



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра «Микро- и нанотехника»

В. А. Сычик

ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

**Конспект лекций
по дисциплине «Технология сборки
полупроводниковых приборов и интегральных схем»**

**Минск
БНТУ
2014**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Микро- и нанотехника»

В. А. Сычик

ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Конспект лекций
по дисциплине «Технология сборки
полупроводниковых приборов и интегральных схем»
для студентов специальности 1-41 01 01
«Технология материалов и компонентов электронной техники»

Минск
БНТУ
2014

УДК 621.382–049.1+621.382.049.77–049.1(075.8)

ББК 32.852я7

С95

Рецензенты :

доц. каф. «Микро- и наноэлектроника» БГУИР,

канд. техн. наук *Ю. А. Радионов*;

доц. каф. «Микро- и наноэлектроника» БГУИР,

канд. техн. наук *А. Г. Черных*;

проф. каф. «Электрические системы и сети» энергетического
факультета БНТУ, д-р техн. наук, проф. *М. А. Короткевич*

Сычик, В. А.

С95 Технология сборки интегральных схем : конспект лекций по дисциплине «Технология сборки полупроводниковых приборов и интегральных схем» для студентов специальности 1-41 01 01 «Технология материалов и компонентов электронной техники» / В. А. Сычик. – Минск : БНТУ, 2014. – 306 с.

ISBN 978-985-550-140-5.

В предлагаемом конспекте лекций изложены базовые теоретические сведения по всем разделам дисциплины «Технология сборки полупроводниковых приборов и интегральных схем», включая подготовку кристаллов к сборочным операциям, пайку и сварку в полупроводниковом производстве, монтаж кристаллов и подложек, присоединение и разварку выводов, герметизацию полупроводниковых приборов и интегральных схем в корпусе, защиту арматуры на сборочных операциях, заключительные операции сборочного производства и автоматизацию производственных процессов сборки полупроводниковых приборов и интегральных схем. Конспект лекций соответствует типовой программе дисциплины «Технология сборки полупроводниковых приборов и интегральных схем».

УДК 621.382–049.1+621.382.049.77–049.1(075.8)

ББК 32.852я7

ISBN 978-985-550-140-5

© Сычик В. А., 2014

© Белорусский национальный
технический университет, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.	7
1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ФИНИШНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИМС.	9
1.1. Монтаж кристаллов и присоединение выводов.	10
1.2. Герметизация полупроводниковых приборов и ИМС.	14
2. РАЗДЕЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН НА КРИСТАЛЛЫ.	18
2.1. Технология разделения пластин.	18
2.1.1. Особенности разделения полупроводниковых материалов.	20
2.2. Скрайбирование алмазным резцом.	22
2.3. Лазерное скрайбирование.	25
2.3.1. Скрайбирование химическим травлением.	27
2.4. Ломка пластин на кристаллы.	28
2.5. Резка алмазными режущими дисками.	31
2.6. Резка полотнами, проволокой, ультразвуком.	36
2.6.1. Сквозное прорезание пластин.	38
2.7. Контроль качества дисковой резки и разламывания пластин.	39
2.8. Оборудование разделения полупроводниковых пластин.	40
2.8.1. Установка скрайбирования пластин.	40
2.8.2. Установка лазерного скрайбирования полупроводниковых пластин.	42
2.8.3. Характеристики установок разделения пластин.	43
2.8.4. Оборудование для ломки пластин.	45
3. ПАЙКА И СВАРКА В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИМС.	47
3.1. Пайка: характеристики процесса.	47
3.2. Особенности процессов пайки в полупроводниковом производстве.	49
3.3. Контактно-реактивная пайка.	52
3.4. Пайка эвтектическими сплавами.	53
3.5. Пайка электродных выводов.	55
3.6. Пайка деталей корпусов.	56

3.7.	Припой и флюсы для пайки.	58
3.8.	Оборудование для пайки. Оборудование для эвтектической пайки.	62
3.8.1.	Оборудование для пайки корпусов.	65
3.9.	Сварка в производстве полупроводниковых приборов и ИМС.	67
3.9.1.	Термокомпрессионная сварка.	67
3.9.2.	Ультразвуковая сварка.	73
3.9.3.	Микроконтактная сварка.	73
3.9.4.	Диффузионная сварка.	76
4.	СБОРКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИМС. МОНТАЖ КРИСТАЛЛОВ.	78
4.1.	Роль монтажа в техпроцессе сборки полупроводниковых приборов и ИМС.	78
4.2.	Монтаж кристаллов и подложек методом приклеивания.	79
4.3.	Монтаж кристаллов пайкой стеклом.	85
4.4.	Монтаж кристаллов пайкой низкотемпературными припоями.	87
4.5.	Монтаж кристаллов методом эвтектической пайки.	91
4.6.	Контроль качества монтажа кристаллов.	98
4.7.	Прогрессивные направления в производстве полупроводниковых приборов и ИС.	100
4.8.	Оборудование для монтажа кристаллов.	102
5.	ПРИСОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ ВЫВОДОВ.	110
5.1.	Общие сведения.	110
5.2.	Методы беспроводного монтажа.	112
5.3.	Монтаж методом перевернутого кристалла.	113
5.4.	Монтаж кристаллов с балочными выводами.	116
5.5.	Методы крепления выводов на гибком носителе.	119
5.6.	Присоединение выводов с помощью ультразвуковой микросварки.	122
5.7.	Присоединение выводов с помощью контактной точечной микросварки.	130
5.8.	Присоединение выводов термокомпрессионной сваркой.	134
5.9.	Присоединение выводов пайкой.	139
5.10.	Проволока для электродных выводов.	141

5.11. Методы микромонтажа кристаллов БИС.	143
5.11.1. Ультразвуковая микросварка и микромонтаж кристаллов на ленточных носителях.	143
6. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИМС.	150
6.1. Общие сведения.	150
6.2. Герметизация холодной сваркой.	152
6.3. Герметизация корпусов контактной сваркой.	159
6.4. Герметизация сваркой плавлением.	166
6.4.1. Герметизация аргонно-дуговой сваркой.	167
6.4.2. Герметизация микроплазменной сваркой.	170
6.5. Герметизация корпусов электронно-лучевой сваркой.	171
6.6. Герметизация корпусов лазерной сваркой.	174
6.7. Герметизация корпусов пайкой.	178
6.8. Герметизация корпусов заваркой стеклом.	182
6.9. Герметизация полупроводниковых приборов и ИС пластмассами.	185
6.9.1. Способы герметизации пластмассами.	185
6.9.2. Герметизирующие полимерные материалы.	185
6.9.3. Герметизация способом прессования пластмасс.	187
6.9.4. Герметизация под давлением с помощью жидких компаундов.	192
7. ЗАЩИТА АРМАТУРЫ НА СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ.	194
7.1. Назначение защитных покрытий.	194
7.2. Химическая обработка полупроводниковых структур перед защитой.	197
7.3. Защита с помощью лаков, эмалей, компаундов и кремнийорганических вазелинов.	200
7.4. Защита силанированием.	209
7.5. Защита полупроводниковых кристаллов и активных компонентов ИМС стеклянными пленками сложного состава.	212
7.6. Защита полупроводниковых структур пленками нитрида кремния.	218

7.7. Защита структур методом обволакивания.	222
7.8. Защита структур методом свободной заливки.	225
8. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА.	231
8.1. Характеристика заключительных операций.	231
8.2. Окраска, лакировка и маркировка.	232
8.3. Лужение выводов горячим способом.	239
9. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИС.	242
9.1. Системы управления процессами сборки полупроводниковых приборов и ИС.	242
9.1.1. Структурные схемы системы управления.	242
9.1.2. Устройства управления.	249
9.1.3. Датчики в системе управления сборочного оборудования.	263
9.1.4. Системы технического зрения.	266
9.1.5. Устройства распознавания.	274
9.1.6. Гибкие автоматизированные производства.	285
9.2. Комплексная автоматизация сборочных процессов изделий микроэлектронной техники.	296
ЛИТЕРАТУРА.	301

ВВЕДЕНИЕ

За короткий промежуток времени полупроводниковая электроника прошла огромный путь развития от простейших электронных приборов до сложнейших микромодулей и микросхем. Разработка и освоение серийного выпуска интегральных микросхем (ИМС) явились значительным шагом вперед на пути миниатюризации аппаратуры. Микроскопические размеры компонентов и продолжающаяся тенденция увеличения степени интеграции интегральных схем (ИС) делают операции сборки особо важными. Под сборкой полупроводниковых приборов и ИС понимают совокупность технологических операций, обеспечивающих соединение элементов и частей полупроводникового прибора или ИМС в единое целое. К таким операциям относятся механическое закрепление кристалла в корпусе или на раме с выводами, образование электрических связей между контактными площадками на кристалле и внешними выводами и герметизация для обеспечения защиты изделия от воздействия окружающей среды и механических повреждений. Этим операциям придается большое значение потому, что электрические параметры и надежность изделий во многом зависят от качества сборки. Сборка полупроводниковых приборов, ИМС существенно отличается от сборки обычных радиотехнических устройств. Она характеризуется многообразием оборудования и различными материалами; наиболее специфическими особенностями являются малые толщины проводников (10–200 мкм) и пленок (0,05–5 мкм). Операции сборки были и остаются наиболее трудоемкими в техпроцессе изготовления полупроводниковых приборов и ИМС. Если в процессах создания кристаллов применяются групповые методы обработки, то при сборке оперируют с каждым изделием отдельно. Основные параметры процесса сборки: температура нагрева, выдержка, удельное давление – должны быть минимально возможными, чтобы не повредить элементы прибора или микросхемы. Современный этап развития микроэлектроники характеризуется выпуском сверхбольших интегральных схем (СБИС), благодаря чему создаются блоки и функциональные узлы электронной аппаратуры. В этой связи новое развитие получают основные технологические процессы сборки: монтаж кристаллов, разводка выводов и герметизация изделий.

Дисциплина «Технология сборки полупроводниковых приборов и интегральных схем» включает следующие разделы: подготовка кристаллов к сборочным операциям; пайка и сварка в полупроводниковом производстве; монтаж кристаллов и подложек, присоединение и разводка выводов; герметизация полупроводниковых приборов; заключительные операции сборочного производства; технологические испытания полупроводниковых приборов и ИМС; механизация и автоматизация производственных процессов сборки полупроводниковых приборов и ИМС.

Цель преподавания дисциплины – освоение студентами комплекса теоретических и практических знаний в области монтажа и сборки полупроводниковых приборов и ИМС, позволяющих им свободно ориентироваться в современном производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ФИНИШНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИМС

Финишные операции производства полупроводниковых приборов и ИМС – это операции их монтажа и сборки, включая операции скайбирования пластин, монтажа кристаллов, присоединения выводов, герметизации полупроводниковых приборов и ИМС, технологических испытаний.

Скайбирование. С помощью процессов литографии на одной полупроводниковой пластине изготавливают до 2000 однотипных структур. После создания структур пластины разделяется на отдельные кристаллы, на основе которых собирается полупроводниковый прибор или ИС. Для разделения пластин большое применение получил метод резки алмазным резцом, получившим название **скайбирование** (рис. 1.1). Процесс складывается из операций нанесения риски алмазной иглой и разламывания вдоль нанесенных царапин. Пластины крепят вакуумным присосом или наклеивают на подложку. При этом игла в резцедержателе располагается так, чтобы угол между осью иглы и плоскостью реза составил $8-10^\circ$. После нанесения сетки царапин пластину располагают на резиновой прокладке планарной стороной вниз и проводят валиком с легким прижимом по пластине вдоль линии реза в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При этом кристаллы разделяются по линиям царапин. Полученные кристаллы подвергаются химической обработке и передаются на следующие операции. Ломка скайбированных пластин также осуществляется на сфере. При этом сохраняется исходная ориентация кристаллов и повышается производительность сборки.

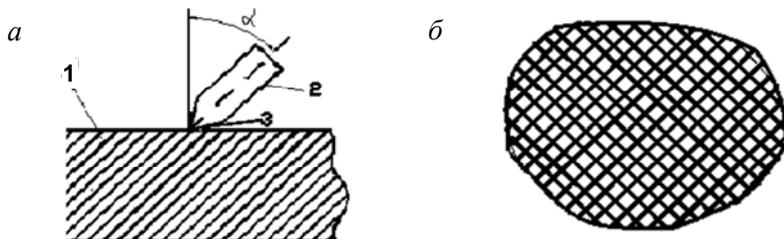


Рис. 1.1. Скайбирование:

а – скайбирование пластины алмазным резцом; *б* – пластина после скайбирования;
1 – полупроводниковая пластина; *2* – резец (игла); *3* – режущая кромка

1.1. Монтаж кристаллов и присоединение выводов

При сборке полупроводниковых приборов и ИМС кристаллы или платы устанавливают на основания корпусов и выполняют электрические соединения. В зависимости от типов приборов электрические соединения создают между контактными площадками, представляющими собой металлизированные участки кристаллов, и гибкими (проволочными, ленточными) или жесткими (шариковыми, в виде выступов, или балочными) выводами (рис. 1.2).

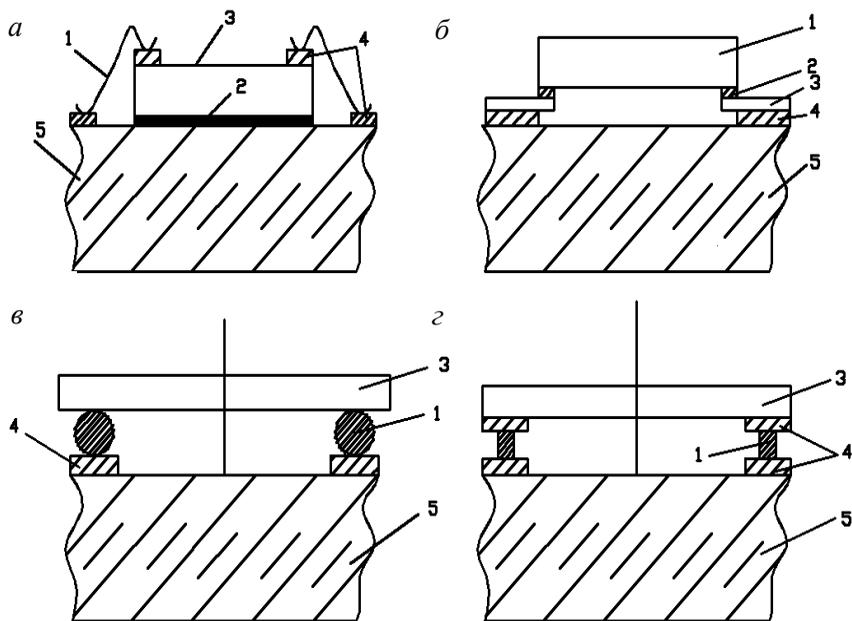


Рис. 1.2. Основные методы монтажа кристалла к корпусу (подложке):
а – проволочный; б – балочный; в – шариковый; г – в виде выступа;
1 – вывод; 2 – клей; 3 – ИС; 4 – контактная площадка; 5 – подложка

Особенности выполнения таких электрических соединений связаны с небольшой толщиной (0,25–2,0 мкм) и сравнительно невысокой прочностью навесных пленок, малыми размерами контактных площадок и большой толщиной (25–180 мкм) выводов, что приводит к перегреву контактных площадок и недогреву выводов и обра-

зованию непрочных соединений. Электрические соединения создают проволочным и беспроволочным монтажом. Клеевые соединения выполняют, используя как токопроводящие, так и непроводящие клеи. Клеи изготавливаются на основе эпоксидных или полиэфирных смол с наполнителем из мелкодисперсного металлического порошка (Au, Ag, Pb, Ni) и имеют низкие объемные показатели. После нанесения жидкого клея под действием гидростатических сил в нем образуются металлические пятна касания в виде проводящих цепочек, которые при отверждении клея фиксируются.

Пайка – это процесс соединения двух металлических деталей в твердом состоянии с помощью припоя, заполняющего пространство между ними. При пайке места соединения деталей разогреваются до температуры выше температуры его плавления. Пайку в основном применяют при проволочном монтаже, а также при монтаже кристаллов, имеющих столбиковые или шариковые выводы. Обычно используют припой ПОС61 (61 % Sn, 38,2 % Pb, 0,8 % Sb). Пайку выполняют без флюса или используют пассивные флюсы, предохраняющие детали и припои от окисления. Пайку осуществляют в течение 2–3 с маломощным электропаяльником ($U = 6 \text{ В}$, $P = 6 \text{ Вт}$, $T = 280 \text{ }^\circ\text{C}$) с автоматическим регулированием температуры. Широкое распространение получила пайка при креплении подложек и кристаллов к основаниям корпусов. Для этих целей применяют припой Au–Sn, Pb–Sn–Ag с температурой, равной 280–300 °С. На место соединения помещают припой в виде пасты или диска из фольги. Пайку стеклом применяют только при монтаже кристаллов в корпусе. Используются легкоплавкие стекла С84-1, С88-1, С90-1, имеющие $\text{ТКЛР} = (8,4 \dots 9,0) \cdot 10^{-8} \text{ К}^{-2}$, температуру размягчения не более 550 °С. Использование стекла исключает электрический контакт кристаллов с корпусами.

Микросварка – это процесс образования неразъемных соединений деталей их сплавлением или деформированием, в результате чего возникают прочные связи между атомами соединяемых материалов. Сварка отличается от пайки меньшими загрязнениями и газонасыщением мест контактирования. **Сварка давлением** основана на одновременном действии температуры и давления на соединяемые детали, которые при этом не расплавляются, а увеличивают свою пластичность. В результате пластической деформации одной

или обеих соединяемых деталей между их поверхностями вследствие металлических связей возникает физический контакт и происходит взаимная диффузия.

Соединения металлических деталей с металлическими или неметаллическими под действием высоких давлений и температуры называют **термокомпрессией**. Этим методом можно сваривать круглые и плоские проводники с тонкими металлическими пленками, нанесенными на хрупкие подложки. Термокомпрессией соединяют золотые и алюминиевые проводники с контактными пластинками из золота (Au), алюминия (Al), кремния (Si) и др. При соединении золотой проволокой алюминиевых контактных площадок кристаллов с выводами корпусов режим термокомпрессии следующий: $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 10^8 \text{ Н/м}^2$, время – 0,3–3 с. При этом деформация присоединяемой детали составляет 30–60 %. Сварочный инструмент обычно выполняют в виде иглы (клина) или капилляра из твердых сплавов ВК-15 или синтетического корунда. Термокомпрессионная сварка по способу нагрева бывает с индивидуальным или одновременным подогревом рабочего столика (кристалла и платы) и сварочного инструмента, а по способу соединения – внахлест (сшиванием) и встык (см. рис. 1.3).

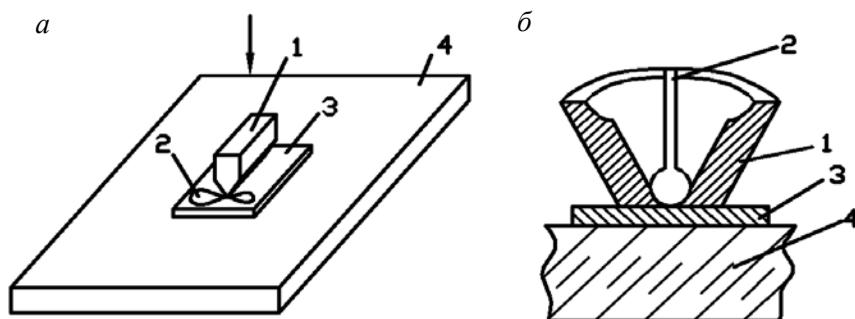


Рис. 1.3. Термокомпрессионная сварка:

а – внахлестку со швом: 1 – сварочный инструмент; 2 – проволочный вывод;

3 – контактная площадка; 4 – плата;

б – встык: 1 – капилляр; 2 – проволочный вывод;

3 – контактная площадка; 4 – плата

По форме образующегося соединения, которая зависит от типа инструмента и степени деформации вывода, судят о качестве сварки.

Термокомпрессионную сварку выполняют как ручную, так и на специальных автоматических установках. При *сварке косвенным импульсным нагревом* (рис. 1.4) рабочий инструмент – электрод – нагревается только в момент выполнения соединения, а его формой предусмотрено сосредоточение выделяющейся теплоты на торцевой части жала и локальный нагрев места сварки. Режим: $P = 10^7\text{--}10^8 \text{ Н/м}^2$; $T = 300\text{--}700 \text{ }^\circ\text{C}$ и время – 0,01–2,00 с. Обычно сварку косвенным импульсным нагревом применяют для соединения проволоки из алюминия (Al), золота (Au) с выводами транзисторов и корпусами ИМС.

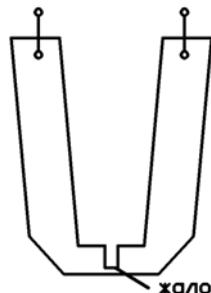


Рис. 1.4. Конструкция инструмента для сварки косвенным импульсным нагревом

Сварка плавлением (сдвоенным электродом, лазерная, электронно-лучевая) основана на нагревании свариваемых деталей до температуры плавления. При *сварке сдвоенным электродом* учитывается особенность выполнения соединений, которая предопределяет одностороннее расположение электродов. В процессе сварки участок вывод–контактная площадка – при прохождении через него электрического тока разогревается. Усилие прижатия электрода составляет 3–10 Н, а время сварки – 0,05–0,20 с. При *лазерной сварке* материалы соединяемых деталей под действием электромагнитного излучения высокой интенсивности расплавляются, а после охлаждения образуют сварной шов. Отсутствие специальных сред, легкость фокусировки лазерного луча до 0,25–1,00 мм делают этот метод наиболее перспективным для использования в микроэлектронной технологии. *Электронно-лучевая сварка* основана на нагревании мест контактирования электронным лучом.

С функциональным усложнением изделий микроэлектроники и увеличением степени интеграции появился **метод группового беспроводного монтажа**. Монтаж кристаллов с жесткими выводами на одно-, двух- или трехслойном ленточном носителе наиболее приемлем в массовом производстве. Однослойный ленточный носитель представляет медную или алюминиевую фольгу, двухслойный – полиамидную пленку, фольгированную алюминием, а трех-

слойный – раздельно изготовленные фольгу и пленку диэлектрика, затем – склеенные полиэфирной или эпоксидной смолой.

1.2. Герметизация полупроводниковых приборов и ИМС

Герметизация является завершающим технологическим процессом изготовления полупроводниковых приборов и ИМС. Ее проводят для полной изоляции элементов, компонентов, кристаллов и электрических соединений от окружающей среды, содержащей влагу, а также активных веществ, способных вызвать коррозию и привести к выходу изделий из строя.

Различают корпусную, бескорпусную и комбинированную герметизацию. При **корпусной герметизации** предварительно изготавливают элементы корпусов – основания с изолированными выводами, крышки. После монтажа прибора, кристалла или платы на основании корпуса и микроконтактирования выводов присоединяют крышку, в результате чего образуется замкнутый объем. В металло-стеклянных корпусах (рис. 1.5, *а*) основание 4 и крышку 1 выполняют из металла, а выводы изолируют от основания стеклом. Металлокерамические корпуса (рис. 1.5, *б*) состоят из керамического основания 4 с выводами 5 и металлической крышки 1. В основании в специальной технологической рамке выводы впаивают стеклом. К бортику керамического основания стеклом припаивают металлическую рамку 6, к которой присоединяют металлическую крышку. Стекло-керамические корпуса состоят из стеклянного основания и металлической или стеклянной крышки. В керамических корпусах как крышка, так и основание выполнены из керамики. В пластмассовых корпусах (рис. 1.5, *в*) крышки 1 приклеивают к основаниям 4 специальными клеями. Этот вариант герметизации применяют при изготовлении малоответственных ИМС.

Многообразие конструкции и типоразмеров корпусов обусловило применение различных видов пайки и сварки. Наиболее часто при герметизации применяются следующие виды сварки и пайки.

Холодная сварка – это процесс получения неразъемного соединения в результате пластической деформации двух деталей. При сближении свариваемых деталей на расстоянии действия межатомных сил между поверхностными атомами образуются металлические связи. Холодная сварка проста, доступна и применяется для

герметизации металлостеклянных корпусов транзисторов, а также корпусов ИМС из металлов, обладающих высокой теплоемкостью.

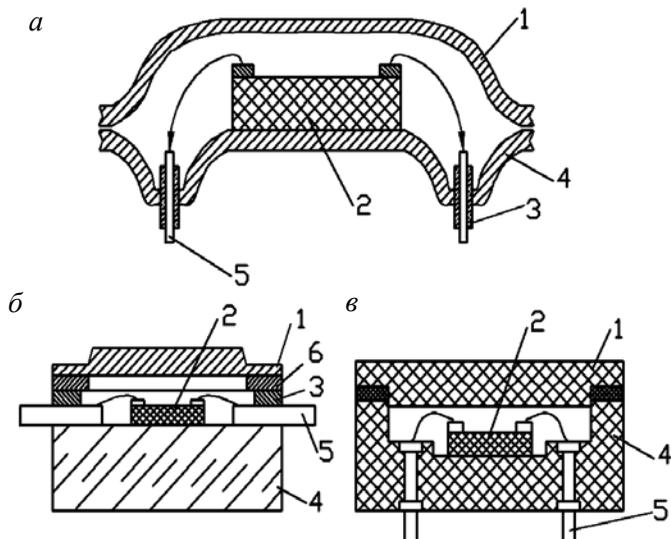


Рис. 1.5. Корпуса полупроводниковых приборов и ИС:

а – металло-стеклянный; *б* – металло-керамический; *в* – пластмассовый;

1 – крышка; 2 – кристалл (микросборка); 3 – стекло; 4 – основание; 5 – вывод; 6 – рамка

Электротермическая сварка – это процесс получения неразъемного соединения нагревом свариваемых кромок до пластичного состояния и последующим их сжатием. Наиболее распространена **электроконтактная сварка** неподвижными электродами, при которой соединяемые детали устанавливают в специальное гнездо нижнего электрода, а верхний электрод при опускании сжимает их с удельным давлением 50–100 Н/мм². Электроконтактной сваркой герметизируют корпуса полупроводниковых приборов и микросхем круглой и прямоугольной формы со штыревыми выводами. При **аргонно-дуговой сварке**, которая является одним из видов электродуговой, аргон, обтекающий электрод и зону соединения, предохраняет расплавленный металл от воздействия кислорода и азота воздуха. Охлаждаясь, металл в месте сварки кристаллизуется и образуется сварочный шов. Аргонно-дуговой сваркой герметизируют металлостеклянные корпуса со штыревыми выводами.

При **микроплазменной сварке**, которая является разновидностью аргонно-дуговой, локализация и стабилизация плазменного луча достигается с помощью сопла с диаметром выходного отверстия менее 1 мм. При корпусной герметизации применяется также пайка припоями и стеклом. Пайку припоями выполняется при $T = 170\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Перед пайкой изделие облуживают расплавленным припоем. Далее корпус герметизируют, применяя различные способы нагрева, необходимые для оплавления припоя. Пайку стеклом применяют не только для контакта кристаллов с корпусами и крепления внешних выводов к керамическим основаниям, но и для соединения керамических крышек с основаниями.

Бескорпусная герметизация обеспечивает совмещение герметизации с формированием корпуса. Свободное пространство между элементами заполняется полимеризующимся электроизоляционным составом (компаундом), который при затвердевании образует монолитную оболочку. Герметизирующие компаунды изготавливают на основе эпоксидных, кремнийорганических или полиэфирных смол. Преимущества бескорпусной герметизации – значительное сокращение количества технологических операций. **Обволакивание** – способ, при котором каплю герметика наносят на сборку или кратковременно погружают сбоку в герметик. Способ используют для предварительной защиты изделий перед заливкой или прессовкой. Заливку выполняют в специальные литьевые формы многократного использования из силиконовой резины. Заливка может быть свободной или в вакууме. **Литьевое прессование** является наиболее совершенным способом создания бескорпусных оболочек, применяемых в серийном производстве. Способ основан на использовании разъемных пресс-форм и пресс-порошков, получаемых из эпоксидных и кремний органических смол. Расплавленный порошок подается через литниковые каналы под давлением в формирующие гнезда. Через 3–5 мин давление снимают, раскрывают пресс-форму, изделие выталкивается из нее.

При **комбинированной герметизации** предварительно изготовленную крышку в виде металлического колпачка, в которую устанавливают кристалл с выводами, заливают компаундом. Так обычно герметизируют толсто пленочные ГИС.

Технологические испытания полупроводниковых приборов и ИМС. После сборочных операций приборы и микросхемы проходят

ряд технологических операций, включающих комплекс различных воздействий, измерение основных электрических параметров и визуальный контроль. Установлены следующие *виды технологических испытаний и контроля*: визуальный контроль до герметизации; механические, климатические и электрические испытания после герметизации; проверка герметичности; визуальный контроль внешнего вида; рентгенотелевизионный контроль. Выдержавшими испытания считаются приборы и микросхемы, которые после испытаний не изменили своей конструктивной формы и внешнего вида, сохранили герметичность корпуса и электрические параметры.

2. РАЗДЕЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН НА КРИСТАЛЛЫ

Разделение полупроводниковых пластин на кристаллы – одна из основных операций техпроцесса производства ИС, заключающаяся в выделении отдельного кристалла ИС из монолитной пластины для последующего монтажа его в корпуса приборов. Разделение осуществляется на специальных установках.

2.1. Технология разделения пластин

Разделение осуществляется по двух- или одностадийной технологии. В первом случае формируется концентратор напряжений по специально выделенным дорожкам в двух взаимно перпендикулярных направлениях либо зонах между рядами структур. Такая операция называется **скрайбированием**. Во втором случае полупроводниковая пластина разрезается насквозь специальным алмазным режущим диском. Общий техпроцесс разделения относится к дискретным и имеет сравнительно большое количество межоперационных переходов. Например, типовой восьмиоперационный технологический процесс (рис. 2.1) при двухстадийном разделении включает следующие операции: скрайбирование, отмывку и сушку, ломку пластины на кристаллы, укладку кристаллов в кассету, отмывку кристаллов в кассете, визуальный контроль кристаллов, доукомплектование кассеты, повторную отмывку и сушку, на сборку.

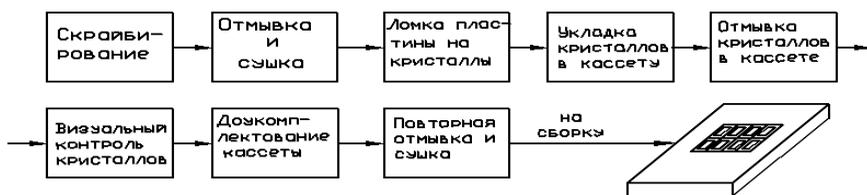


Рис. 2.1. Структура восьмиоперационного технологического процесса разделения полупроводниковых пластин на кристаллы при двухстадийном разделении

Скрайбирование пластины – нанесение рисок или надрезов по разделительным дорожкам с помощью алмазного резца, лазера, алмазных дисков.

Очистка пластины производится дионизованной водой или органическими растворителями для удаления отходов скрайбирования

(после лазерного скрайбирования удаляются специально наносимые защитные покрытия).

Ломка проскрайбированной пластины происходит на отдельные кристаллы (характерно появление скрытых дефектов из-за возникновения неконтролируемых напряжений в полупроводниковом материале, которые могут быть причиной электрических отказов).

При **кассетировании** кристаллов, которые после ломки могут находиться в свободном состоянии, электрически годные (немаркированные при зондовом контроле) кристаллы выбираются с помощью вакуумных присосок и укладываются в ячейки кассеты.

Очистка кристаллов происходит в кассете (как правило выполняется вручную, и качество ее выполнения в значительной степени зависит от оператора).

При **визуальном контроле** кристаллы в кассете рассматриваются под микроскопом при увеличении в 180–200 и более раз. Отбракованные по внешнему виду кристаллы удаляются из кассеты.

Далее производится **доукомплектование** кассет годными кристаллами.

Отмывка полных кассет производится по необходимости.

В производстве наиболее широко внедрился **метод разделения и сортировки кристаллов с сохранением ориентации кристаллов на пластине**, наклеенной на специальную пленку. Сущность его в том, что проскрайбированную пластину крепят на эластичную пленку, обладающую адгезионными свойствами (липкостью), после чего разламывают на отдельные кристаллы, которые сохраняют первоначальную форму пластины. В случае разрезания пластины алмазными режущими дисками она также сохраняет свою форму. При использовании одностадийного процесса разделения методом сохранения ориентации кристаллов на пластине и интеграции ряда операций на современном оборудовании сборки количество переходов в технологическом процессе разделения уменьшается до четырех (рис. 2.2):

1. Формирование спутника-носителя с адгезионной лентой и приклейка пластины.

2. Сквозное разрезание пластины алмазными режущими дисками (обеспечивается четкая прямоугольность кристаллов, исключается необходимость ломки и операции кассетирования).

3. Очистка кристаллов на пленке деионизованной водой под высоким давлением, механическими щетками и струей сухого воздуха.

4. Визуальный контроль кристаллов на пленке с маркировкой кристаллов краской, аналогичной маркировке на операции зондового контроля.



Рис. 2.2. Структура технологического процесса разделения полупроводниковых пластин на кристаллы при одностадийном разделении

2.1.1. Особенности разделения полупроводниковых материалов

Известен ряд методов разделения полупроводниковых материалов, в частности полупроводниковых пластин: скрайбирование алмазным резцом, резка проволокой, стальными полотнами, набором ленточных дисков с алмазным слоем, металлическими дисками со свободным абразивом, ультразвуковая резка, разделение направленным химическим травлением и др. Наибольшее распространение получили методы разделения с помощью скрайбирования алмазным резцом и режущими дисками. Сущность первых двух методов заключается в удалении части сечения полупроводниковой пластины и образовании концентратора напряжений в зоне последующего разламывания.

Для принятой схемы разделения полупроводниковых пластин на кристаллы (рис. 2.3) максимальное напряжение на поверхности пластины $\sigma_0 = M/W$, где M – изгибающий момент на единицу длины; W – момент сопротивления при изгибе.

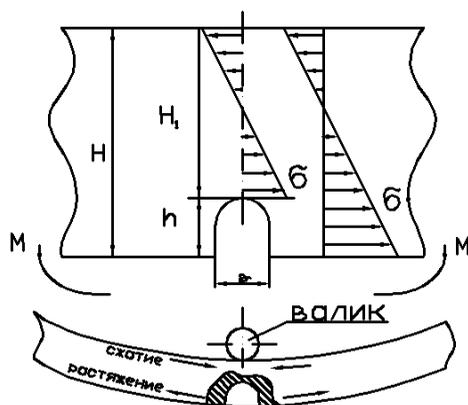


Рис. 2.3. Схема разламывания полупроводниковой пластины

Напряжение нетто-сечения, обусловленное уменьшением толщины пластины в зоне реза:

$$\sigma'_0 = \frac{1}{(1 - h/H)^2} \cdot \sigma_0, \quad (2.1)$$

где h – глубина надреза пластины;

H – толщина пластины.

Номинальное ослабление прочности пластины характеризуется фактором $K_1 = \sigma'_0 / \sigma_0 = H^2 / (H - h)^2$ (рис. 2.4).

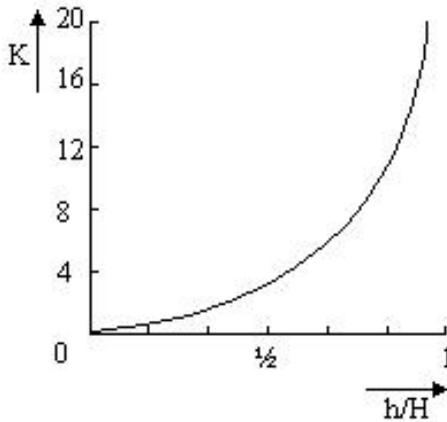


Рис. 2.4. Зависимость фактора K от h/H

В зоне резкого изменения поперечного сечения пластины возникает концентрация напряжений при приложении изгибающего момента, характеризующаяся фактором $K_2 = \sigma_{\max} / \sigma'_0$, где σ_{\max} – максимальное напряжение в основании реза, обусловленное концентрацией напряжений. Максимальное напряжение, развивающееся в основании надреза пластины, является функцией соотношений $r/(H - h)$ и h/H . Для качественного разделения пластины σ_s вдоль линии реза должно превысить минимальное напряжение разрушения материала σ_p ($\sigma_s \gg \sigma_p$), но одновременно напряжение в точках, расположенных на некотором расстоянии от реза, должно быть значительно меньше σ_s ($\sigma_0 \ll \sigma_s$). Значение σ_s определяется как $\sigma_s = K_1 \cdot K_2 \cdot \sigma_0 = \sigma_0 K$. Величина $K \leq 2$.

Фактор K является комплексным показателем, характеризующим степень ослабления полупроводниковой пластины в местах обработки. Например, для пластины толщиной $H = 400$ мкм и параметрами обработки $h = 1/4H = 100$ мкм, $r = 25$ мкм, фактор $K = 4,6$, а для пластины с $H = 600$ мкм, $h = 150$ мкм, $r = 25$ мкм, то фактор $K = 5,8$. Хотя для второй пластины нужно приложить изгибающую нагрузку почти в два раза большую, условия для направленного разрушения лучше – излом происходит по направлению обработки. Если надрез пластины осуществляется на глубину более четверти ее толщины, K_2 достигает максимального значения, а K_1 продолжает увеличиваться. Происходит дальнейшее ослабление полупроводниковой пластины в местах обработки, приводящее к тому, что доминирующий вклад в фактор K вносит K_1 . Создание концентратора напряжений в полупроводниковой пластине осуществляется по методу скрайбирования алмазным резцом.

2.2. Скрайбирование алмазным резцом

Скрайбирование полупроводниковой пластины с целью создания концентратора напряжений является первой частью двухстадийного процесса разделения, поэтому требования к этой операции в значительной мере вытекают из второй операции – ломки пластины. Разламывание сопряжено с деформацией и разрушением кристаллической решетки полупроводникового материала. Разрушение происходит за счет разрыва межатомных связей и требует приложения напряжения $\sigma = 1/5E$, где E – модуль Юнга. Разрушение реальных хрупких тел происходит при значительных меньших напряжениях ($\sim 1/50 E$). Интерпретация такого расхождения величины напряжения разрушения дается *теорией Гриффитса*, согласно которой концентрация напряжений в вершине трещины при разрушении твердого тела является фактором, снижающим высокую теоретическую прочность атомных связей. Для полупроводниковой пластины напряжение хрупкого разрушения является параметром, зависящим от предшествующей физико-химической обработки. В нормальных условиях в кремнии отсутствует заметное пластическое течение, и основным механизмом его разрушения является скол, характеризующийся совпадением направления развития трещины с плоскостью спайности кристаллографической решетки. Этот эффект использу-

ется при разделении пластины на кристаллы, проскайбированных алмазным резцом. Сущность метода заключается в нанесении на поверхность пластины рисок глубиной 10–15 мкм и шириной 20–30 мкм специальным резцом с алмазной пирамидой (рис. 2.5).

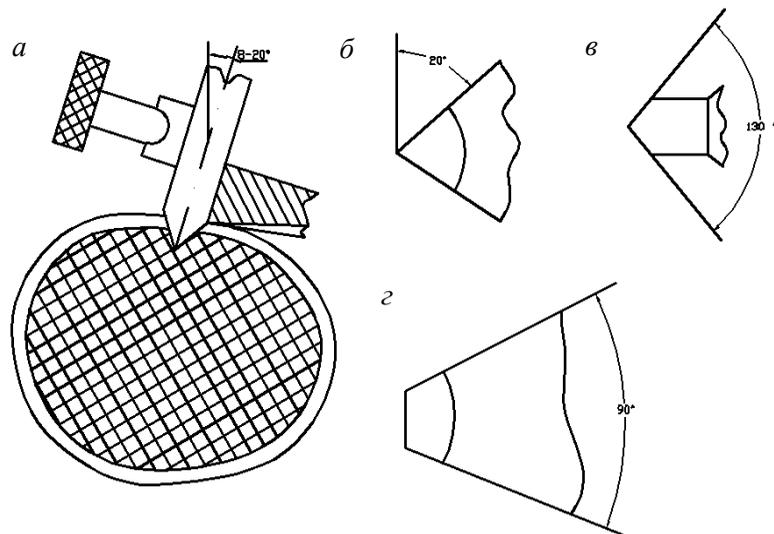


Рис. 2.5. Резец с алмазными пирамидами:
a – установка резца; *б* – трехгранная пирамида; *в* – четырехгранная пирамида;
z – четырехгранная усеченная пирамида

За счет больших удельных давлений в зоне нанесения рисок возникают локальные механические напряжения, которые являются зародышами последующего раскалывания. В результате деформации на поверхности пластины возникают микротрещины, которые распространяются вглубь пластины вдоль направлений, параллельных естественным плоскостям спайности. Для кремния наиболее плотно упакованные плоскости (111) и силы связи между ними значительно слабее, чем в самих плоскостях. Технология производства ИС обычно использует кремниевые пластины с ориентацией поверхности в плоскости (111). При скрайбировании параллельно ортогональным плоскостям (111) и (110) возможно получение кристаллов, в которых две боковые грани перпендикулярны к плоскости ориентации, а скол происходит по плоскости (110). Две другие грани будут наклонены

к плоскости ориентации под углом $\sim 70^\circ$, так как плоскости спайности пересекаются под этим углом. Качество получаемых кристаллов (идентичность размеров, отсутствие сколов) и выход годных во многом определяются величиной изгибающего усилия, прикладываемого к пластине при разламывании, которое зависит от соотношения длины стороны кристалла l и толщины H , причем $l/H \geq 4$. Нагрузка на резец выбирается в зависимости от материала пластины, ее толщины, геометрии режущей части и степени износа резца. Скрайбирование алмазным резцом осуществляется со скоростью 10–150 мм/с. Геометрические размеры царапин зависят от формы резца. Резец (треугольной или четырехгранной пирамиды) устанавливается с углом наклона $\gamma = 5\text{--}15^\circ$. Рис. 2.6 отображает зависимость ширины царапины, создаваемой четырехгранным алмазным резцом, от угла его наклона к поверхности пластины.

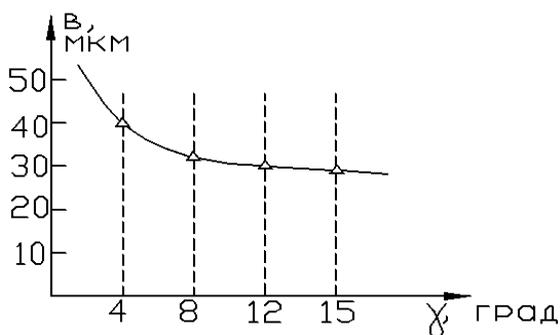


Рис. 2.6. Зависимость ширины царапины, созданной четырехгранным резцом, от угла его наклона к поверхности пластины

В процессе скрайбирования деформации распространяются на ширину 50–100 мкм, что необходимо учитывать при проектировании ИС, разделяющие ИМС дорожки, должны иметь ширину не менее 200 мкм. Основной недостаток скрайбирования алмазным резцом — относительно невысокий выход годных кристаллов ИС по размерам, геометрической форме, величине сколов, количеству неразделенных блоков кристалла, причем с увеличением толщины пластины выход годных кристаллов снижается. К недостаткам — также быстрый износ резца и невысокую скорость скрайбирования пластины, т. е. низкую производительность установок скрайбирования.

Применение лазера в качестве инструмента скрайбирования полупроводниковых пластин открыло новые возможности повышения производительности оборудования.

2.3. Лазерное скрайбирование

Скрайбирования полупроводниковых пластин кремния осуществляется лазером на основе кристалла алюмоиттриевого граната (АИГ): Nd (длина волны $\lambda = 1,06$ мкм) с непрерывной накачкой от плазменно-дуговых криптоновых ламп. При воздействии на пластину импульсом сфокусированного лазерного излучения большой удельной мощности ($\sim 10^8$ Вт/см²) на ее поверхности образуется лунка (рис. 2.7). Частичное наложение лунок вследствие относительного перемещения излучения образует скрайберный рез. Пороговая мощность, при которой начинается испарение материала, определяется температурой плавления кремния Si, коэффициентами теплопроводности и поглощения. Формирование концентратора напряжений достигается за счет ослабления сечения, при этом оптимальная глубина надреза составляет не менее $1/4H$.

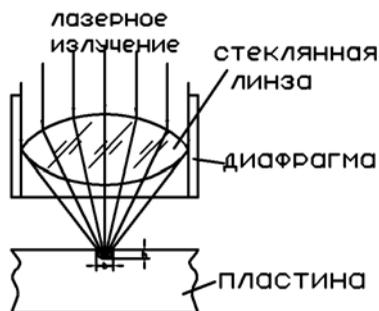


Рис. 2.7. Образование лунки на поверхности пластины при лазерном воздействии

Энергия кванта для АИГ: Nd лазера приблизительно соответствует краю собственного поглощения для кремния Si, т. е. лазер должен быть малоэффективным для испарения кремния из-за слабого поглощения излучения с $\lambda = 1,06$ мкм при комнатной температуре. Однако краевое излучение на поверхности пластины сильно зависит от тем-

пературы: с ее повышением поглощение усиливается и обеспечивается высокая эффективность формирования реза. Лазер работает при скрайбировании в режиме модуляции добротности с длительностью импульса порядка 100–500 нс. Каждый импульс обеспечивает формирование лунки размером, близким диаметру фокального пятна. Для образования скрайберной риски лунки должны перекрываться. Коэффициент перекрытия зависит от соотношения частоты импульсов и скорости перемещения стола с пластиной. Пластину закрепляют вакуумным прижимом на столе установки. Скорость скрайбирования выбирают от 100–200 мм/с. Применяемые для скрайбирования лазеры АИГ имеют среднюю мощность в одномодовом режиме до 20 Вт и 100 Вт – в многомодовом. Увеличение мощности лазерного скрайбирования ограничивается: появлением термонапряжений в материале вследствие значительных температурных градиентов (10^5 – 10^6 К/см), которые являются причиной возникновения трещин и разрушения пластины; расширением зоны температурного воздействия излучения, что связано с вероятностью повреждения ИС; экранировкой сфокусированного лазерного излучения продуктами разрушения в виде паров, капель жидкости и плазмы. Лазерное скрайбирование применяется в тех случаях, когда к операции разделения предъявляются следующие требования: стабильное разделение при низком качестве поверхности скрайбируемой пластины; длительное время непрерывной работы без замены инструмента; получение кристаллов и подложек прямоугольной формы; разделение тонких (< 200 мкм) пластин на кристаллы размером менее $0,2 \times 0,2$ мм; разделение хрупких материалов и материалов с неровной поверхностью (GaAs, стекла, ситаллы и др.); получение полосы скрайбирования менее 25 мкм с общей шириной дефектной зоны менее 50 мкм.

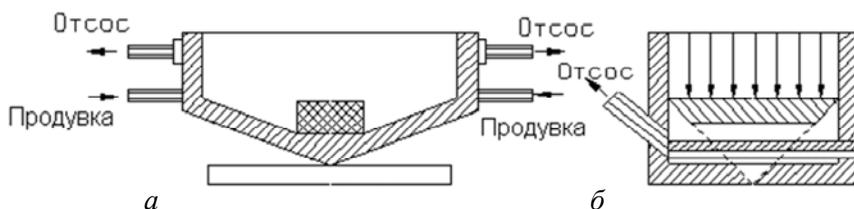


Рис. 2.8. Схема защиты полупроводниковой пластины от продуктов обработки лазером:

а – продувка газом с отсосом; *б* – защита стеклом с вакуумным отсосом

Технологическая проблема при лазерном скрайбировании – защита и очистка полупроводниковых пластин от конденсата полупроводникового материала. Вакуумный отсос продуктов испарения является обязательным для защиты пластины. Используют различные варианты защиты поверхности пластины и фокусирующей оптики от продуктов обработки лазером (рис. 2.8), размещение над пластиной прозрачной эластичной ленты, обладающей хорошей адгезией к глобулам испаренного материала и предотвращающей их осаждение на поверхность пластины, подачу в зону испарения вещества, вступающего в химическую реакцию с продуктами испарений с образованием газообразного соединения кремния, которое удаляется вакуумной или другой откачкой. Применяется также защита вакуумным отсосом в сочетании с установкой дополнительного защитного стекла для оптики (рис. 2.8, б), которое периодически очищается или заменяется. Наиболее распространена защита поверхности пластины пленкой на основе жидких органических поверхностно-активных веществ. После скрайбирования поверхность пластины очищается от отходов обработки и защитных покрытий ультразвуковой отмывкой в деионизованной воде.

2.3.1. Скрайбирование химическим травлением

Скрайбирование пластин химическим травлением – путем вытравливания канавок на пластине. Травлению пластин предшествует создание защитной маски на них. Маска предохраняет структуры, боковую и нерабочую поверхность пластин от растравливания, оставляя открытыми разделительные дорожки. Маску создают фотолитографией. При травлении используют анизотропные травители. В процессе избирательного травления профиль получаемых канавок ограничивается кристаллографическими плоскостями с наименьшей скоростью травления. Так, при изготовлении канавок в кремнии (Si) на плоскости (100) вдоль (110) профиль ограничивается плоскостями (111). Скорость травления плоскостей (111) Si очень мала, поэтому при образовании профиля канавок травление анизотропными травителями прекращается. Для вытравливания сквозных канавок необходимо оставлять широкие дорожки (рис. 2.9).

Поэтому после вытравливания канавок глубиной 50–100 мкм пластины ломают на кристаллы так же, как и после скрайбирования.

Ширину канавок можно уменьшить протравливанием с двух сторон пластины. В результате ускоряется травление, но изготовление masks с двух сторон пластины трудоемко.

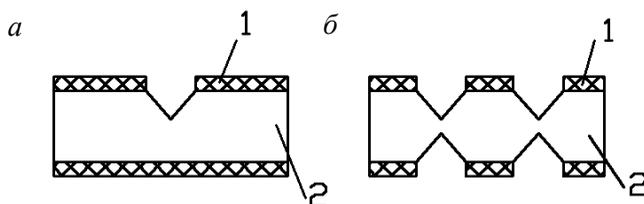


Рис. 2.9. Скрайбирование пластины химическим травлением:
a – одностороннее; *б* – двухстороннее;
 1 – маска из фоторезиста; 2 – полупроводниковая пластина

С точки зрения качества кристаллов разделение пластин травителем превосходит другие способы, однако низкая производительность, точность, воспроизводимость процесса, высокая трудоемкость и необходимость использования токсических травителей препятствуют его широкому внедрению в промышленную технологию.

2.4. Ломка пластин на кристаллы

После лазерного скрайбирования алмазным резцом или дисковой резки на глубину меньшую толщины пластины, производят разламывание пластин на кристаллы. На этой операции брак из-за образования больших сколов на кромках кристаллов и разламывания не по риску, а также из-за царапин на металлизации может достигать 10–15 %.

Наиболее распространенными являются методы разламывания проскрайбированных пластин сферой, полуцилиндром и валиком. Чаще всего пластины разламывают механически, при этом качество получаемых кристаллов определяется приложенным усилием, зависящим от соотношения длины и толщины кристалла, т. е. пропорциональна $(l/H)^2$. Если пластина приклеена на адгезионном носителе (пленке), то хорошее качество разламывания обеспечивается при $(l/H)^2 \geq 24$. Разламывание пластины на цилиндрических и сферических опорах позволяет получать кристаллы с соотношением сторон от 1 : 1 до 1 : 1,5. Распространенным способом ломки является разламывание пластин на кристаллы валиком (рис. 2.10). Для слома пластины на кристаллы по скрайберным рискам прикладывают к ней усилие изгиба.

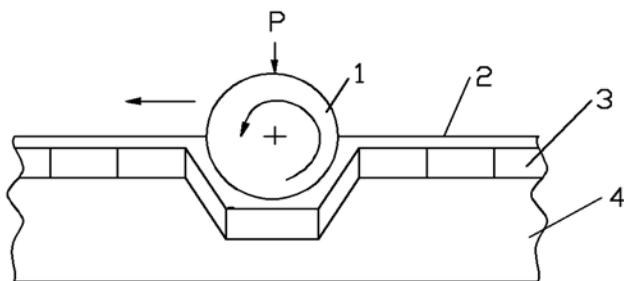


Рис. 2.10. Разламывание пластины на кристаллы валиком:
 1 – валик; 2 – пленка; 3 – пластина; 4 – эластичное основание (резина)

Для этого пластину 3 помещают рабочей поверхностью (рисками) вниз на мягкую гибкую (из резины) опору 4 и с небольшим давлением прокатывают ее последовательно в двух взаимноперпендикулярных направлениях стальным или резиновым валиком 1 диаметром 10–30 мм. Гибкая опора деформируется, пластина изгибается в месте нанесения рисок и ломается по ним.

Таким образом, разламывание происходит в две стадии: вначале на полоски, а затем на отдельные прямоугольные или квадратные кристаллы. Вместо валика нагрузка может быть приложена стальным или фторопластовым клином (призмой) с небольшим радиусом скругления. Валик или клин должны двигаться параллельно направлению скрайбирования, иначе ломка будет происходить не по рискам. Брак появляется в случае, если полоски или отдельные кристаллы смещаются относительно друг друга в процессе ломки. Поэтому перед ломкой пластины покрывают сверху тонкой эластичной полиэтиленовой пленкой или бумагой 2, что позволяет сохранить ориентацию кристаллов в процессе ломки и избежать их произвольного разламывания и царапания друг о друга. С этой целью пластину перед разламыванием помещают в герметичный полиэтиленовый пакет с откачкой из него воздуха. Если остаются неразделенные кристаллы (двойники), их осторожно доламывают специальной сферической оправкой или пинцетом. При использовании ручных устройств с валиком возможна ломка пластин не по скрайберным рискам, так как прикладываемая нагрузка может не совпадать с направлением рисок ввиду того, что валик прокатывают по обратной стороне пластины. При ломке вручную трудно контроли-

ровать усилие на валике: приложив большое усилие, можно разрушить хрупкие **полупроводниковые кристаллы**.

Для улучшения качества разламывания применяют установки, в которых валики движутся строго параллельно направлению рисок и имеют регулировку нагрузки.

Более совершенным является способ прокатывания пластины между двумя валиками (рис. 2.11), при котором обеспечивается нагрузка, пропорциональная длине скрайберной риски. Пластину 1, расположенную рисками вверх, прокатывают между двумя цилиндрическими валиками – верхним упругим (резиновым) и нижним стальным 4.

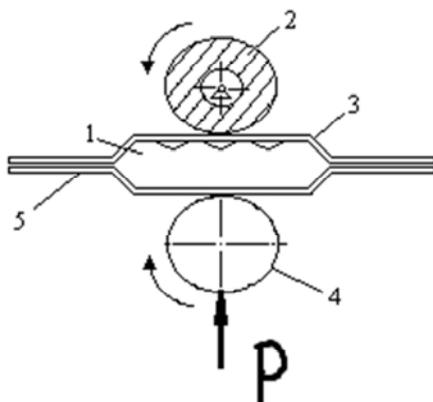


Рис. 2.11. Разламывание полупроводниковой пластины прокатыванием между двумя валиками:

1 – пластина; 2 – валик; 3 – защитная пленка; 4 – стальной валик;
5 – пленка-носитель

Для сохранения первоначальной ориентации кристаллов пластину закрепляют на термопластичной или адгезионной пленке-носителе 5 и защищают ее рабочую поверхность полиэтиленовой или лавсановой пленкой 3. Расстояние между валиками, определяемое толщиной пластин, устанавливают перемещением одного из них (нижнего). При прокатке более упругий валик, в зависимости от толщины пластины, деформируется, и к ней прикладывается нагрузка, пропорциональная площади ее поперечного сечения или длине скрайберной риски. Пластина изгибается и разламывается по рискам: вначале на полоски, а после поворота на 90° – на кристаллы.

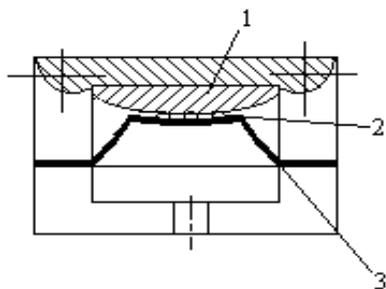


Рис. 2.12. Разламывание пластин на сферической опоре:
1 – опора; 2 – пластина; 3 – резиновая диафрагма

При разламывании на сферической опоре (рис. 2.12) пластину 2, расположенную между двумя тонкими пластичными пленками, помещают рисками вниз на резиновую диафрагму 3, подводят сверху сферическую опору (выпуклую линзу) 1 и с помощью диафрагмы пневматическим или гидравлическим способом прижимают к ней пластину, которая разламывается на отдельные кристаллы. Радиус кривизны сферы или полуцилиндра для различных размеров кристаллов должен быть различным. При малой кривизне необходимо создавать большое давление на пластину, которое ограничивает размеры кристаллов ИС, так как при больших размерах возникает угроза повреждения самих кристаллов. Достоинствами данного способа являются простота, высокая производительность (ломка занимает не более 1,0–1,5 мин) и одностадийность, а также достаточно высокое качество, так как кристаллы не смещаются друг относительно друга. Недостатки: невысокий процент выхода годных изделий (до 90 %); разброс кристаллов по размерам (50–100 мкм), что ограничивает возможности автоматизации последующих операций сборки. Этих недостатков практически лишен метод разделения пластин резкой алмазными режущими дисками.

2.5. Резка алмазными режущими дисками

Одностадийный процесс разделения полупроводниковых пластин сквозным разрезанием ее алмазными режущими дисками, наиболее широко распространен в производстве изделий микроэлектроники. Он сочетается с методом разделения пластины, приклеенной на адгезионный носитель. Резку алмазными режущими дисками характеризуют две взаимосвязанные составляющие (рис. 2.13): инструмент – алмазный режущий диск – и режимы резания. Для выбранного инструмента устанавливаются режимы резания, и наоборот, причем взаимосвязь будет различной при различных характеристиках материала резания. При изготовлении алмазных дисков алмазонасыщенный слой получают двумя способами.

При первом способе смесь механического и алмазного порошка уплотняют, спекают и охлаждают под давлением. Используется связка типа оловянных бронз, обладающих высокой пластичностью при температуре спекания и обеспечивающих прочное сцепление алмазных зерен. Диски, полученные спеканием, имеют высокие стойкость и точность геометрических размеров (рис. 2.13, *а* и *б*). Второй – гальванический способ получения алмазного слоя применяют при из-

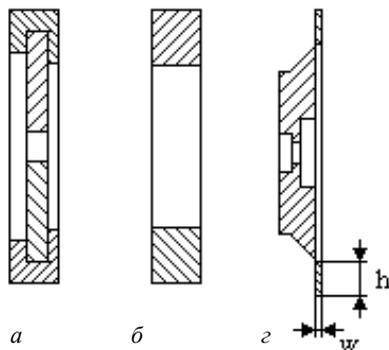


Рис. 2.13. Алмазные режущие диски:

а – на металлической основе;

б – из алмазосодержащей ленты;

в – с жестким металлическим корпусом

готовлении дисков с внутренней алмазной режущей кромкой. Его недостаток – трудность получения тонких (менее 0,15 мм) дисков из-за нежесткости металлической основы. Алмазный диск (рис. 2.13, *в*) имеет жесткий алюминиевый корпус, на котором электролитическим осаждением нанесен алмазный слой с никелевой связкой.

Лезвия алмазных режущих дисков закрепляются в специальных разборных и неразборных корпусах, причем лезвия бывают синтезированные, спрессованные и полученные методом гальваностегии. Для разделения пластин из «легких» материалов (Si, GaAs и т. п.) наиболее часто используют алмазные режущие диски, полученные гальваностегией. Сначала изготавливается алюминиевый корпус, на который методом электролитического осаждения наносится никель с алмазными зернами. Затем часть корпуса удаляется химическим травлением для вскрытия режущей кромки. Такие алмазные режущие диски относятся к классу корпусных. Они удобны в эксплуатации, так как исключают прикосновение оператора к лезвию, обладают хорошей взаимозаменяемостью при установке на шпиндель и дают наибольшее приближение ширины реза к ширине лезвия диска, поскольку мала вибрация, также эти диски легко воспроизводимы, износостойки благодаря эффективному отводу теплоты от лезвия к корпусу и обладают хорошими режущими свойствами. Их недостатки – высокая стоимость, невозможность использования в наборе. Резиноидные (синтезированные) и спрессованные диски относятся к бескорпусным. При установке на шпиндель они закрепля-

ются между жесткими фланцами. Основными их преимуществами наряду с возможностью использования в наборе являются многократное (до трех раз) применение при замене фланцев и резка на большую глубину, чем корпусные диски. Прокладки для дисков, работающих в наборе, выполняются из алюминия или карбида титана. Фланцы изготавливаются из нержавеющей стали. Фланцы, заключающие диск, оказывают наибольшее давление на зерна алмаза. В результате при установке диска возможно искривление лезвия. Правка лезвия такого диска помогает устранить эксцентриситет и заусеницы, т. е. уменьшить ширину реза. Частой причиной поломки бескорпусного диска или превышение ширины реза является неправильный выбор крутящего момента фланца или его плохое качество. Фланцы не должны вызывать вибрацию при рабочих частотах вращения шпинделя. Следовательно, использование бескорпусных дисков требует строгого соблюдения условий эксплуатации и своевременного ремонта элементов их крепления. После установки на шпиндель перед началом работы диски необходимо править. Лезвие правится на 150 мкм глубже необходимой глубины резания на пластине. Все алмазные режущие диски подразделяются по толщине и высоте лезвия, а также по размерам зерен алмазного порошка на нем. Характеристики корпусных дисков приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Характеристики корпусных дисков

Условное обозначение типоразмеров диска	Толщина лезвия, мкм	Высота лезвия, мкм	Максимальная глубина реза, мкм	Ширина реза при скорости подачи 100 мм/с, мкм (не более)	
					Марка диска
ДАР2-А	20	250	170	50	АСН 7/5
ДАР2-Б	25	320	240	70	АСН 7/5
ДАР2-1В	35	320	240	90	АСН 10/7
ДАР2-1Г	45	400	320	110	АСН 14/10
ДАР2-2Д	55	400	320	130	АСН 14/10

При разрезании пластины необходимо правильно выбрать марку диска, глубину обработки, скорость резания, частоту вращения диска и высоту лезвия. Марку диска выбирают по толщине и высоте

лезвия, учитывая, что при малом размере алмазного зерна резко снижается срок службы диска и увеличивается время резания, а при больших размерах алмазных зерен увеличивается величина сколов и ухудшается качество обрабатываемой поверхности. Толщина b режущего лезвия диска выбирается из условия $b = (\Delta p - \delta t) / 2$, где Δp – ширина дорожки разделения, мкм; δt – погрешность позиционирования лезвия диска относительно дорожки разделения, мкм.

Высота режущего лезвия выбирается на 50–100 мкм больше максимальной глубины резания, так как радиальный износ диска при обработке Si составляет 3–5 мкм на длине 100 м резания. Частота вращения – один из факторов, влияющий на стойкость диска и качество реза. Увеличение частоты вращения считается предпочтительным, так как уменьшается глубина врезания зерна в сечение среза, т. е. уменьшается сила резания. Однако при разрезании неметаллических материалов алмазными режущими дисками появляется ряд ограничений, из-за которых оптимальная частота вращения диска составляет 30–40 тыс. об/мин (рис. 2.14) по критерию минимальных сколов по кромкам реза и максимальной стойкости диска.

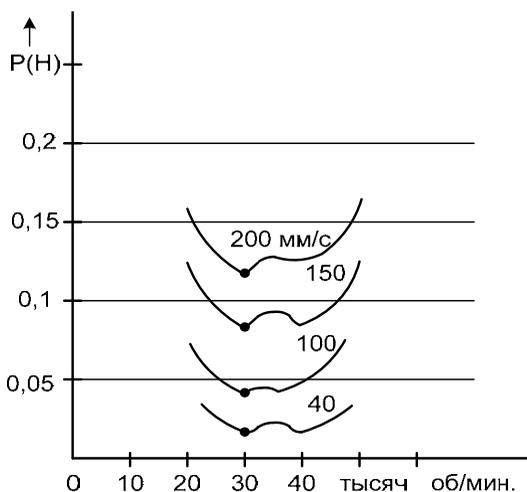


Рис. 2.14. Зависимость $P(H)$ от частоты вращения диска

Дальнейшее увеличение частоты вращения диска ведет к резкому возрастанию усилия резания. Причина этого – гидродинамические явления, происходящие в зоне разделения (рис. 2.15). Поскольку рез-

ка кремниевых пластин производится на относительно высоких скоростях, вокруг инструмента возникают воздушные потоки. Поэтому давление струи охлаждающей жидкости, направленной в зону резания, должно пробить воздушную завесу вокруг диска. Например, для обработки кремния при частоте вращения диска 35 тыс. об/мин давление потока охлаждающей жидкости должно быть не менее 1 МПа.

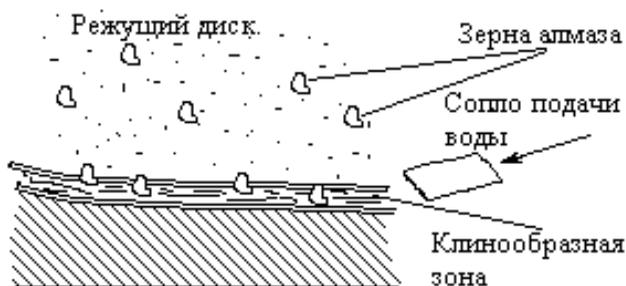


Рис. 2.15. Схема подачи воды в зону резания

В этом случае жидкость вследствие сцепления с поверхностями обрабатываемой пластины и инструмента затягивается в сужающееся пространство в зоне резания.

Процесс усиливается за счет каналов, создаваемых алмазными зернами в материале, и вибрации, вызываемой в жидкости выступающими алмазными зернами. Жидкость попадает в клиновидный зазор между пластиной и лезвием. Поскольку жидкость несжимаема, то из условия неразрывности потока следует, что в таком зазоре возникает внутреннее гидравлическое давление, стремящееся расклинить поверхности. Величина давления создает препятствие для выхода отходов обработки. Осколки материала, задерживаясь в зоне разработки, препятствуют вращению диска, внедряются в связку, заклиниваются в зазорах между зернами и блокируют режущее лезвие инструмента. Вылет лезвия бескорпусного диска влияет на режимы резания и качество разделения. При его увеличении уменьшается жесткость системы, происходит искажение формы реза, увеличивается вероятность поломки инструмента. Слишком малый вылет затрудняет поступление и выход охлаждающей жидкости из зоны резания. Отношение вылета диска к его толщине устанавливается 10–15 %,

глубина врезания – $2/3$ вылета диска. Оптимальная скорость резания – это наибольшая скорость, обеспечивающая требования к величине сколов, поверхности реза, стойкость инструмента и др. Рекомендуемые режимы обработки ряда материалов приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Рекомендуемые режимы обработки материалов

Обрабатываемый материал	Размер алмазного зерна, мкм	Частота вращения шпинделя, об/мин	Скорость подачи, мм/с	Метод обработки
Кремний монокристаллический	5–7	$(30–40) \cdot 10^3$	100–250 25–150	Надрезание, сквозное разделение
Сапфир и кремний на сапфире	30–60	$(18–24) \cdot 10^3$	0,2–8	Надрезание
Арсенид галлия, фосфид галлия	2–5	$(30–40) \cdot 10^3$	6–20	Сквозное разделение
Алюмооксидная керамика	70	$(12–18) \cdot 10^3$	6–40	Сквозное разделение
Оптическое стекло	20–70	$(12–18) \cdot 10^3$	2–5	Сквозное разделение
Ферриты	2–5	$(30–40) \cdot 10^3$	4–40	Надрезание

Дисковая резка используется для разделения пластин толщиной более 450 мкм. Ширина рисок зависит от толщины алмазной кромки диска и составляет 40–50 мкм. Полученные после разрезания кристаллы имеют вертикальные боковые грани практически по всей высоте (рис. 2.16).

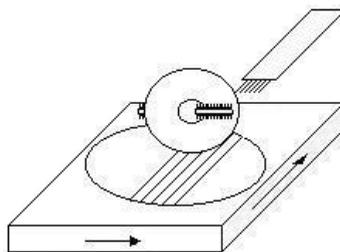


Рис. 2.16. Дисковая резка

2.6. Резка полотнами, проволокой, ультразвуком

Резка стальными полотнами и проволокой применяется, когда не требуется высокая точность изготовления кристаллов и сохранение

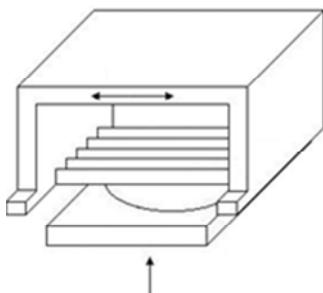


Рис. 2.17. Резка набором стальных полотен

их первоначальной ориентации. Набор полотен толщиной 0,05–0,1 мм, шириной 5–10 мм и разделительные прокладки собирают в пакет, закрепляют в касете, которая совершает при резке возвратно-поступательное движение с большой частотой от 400 до 600 движ. ход/мин, и растягивают в продольном направлении. Резание осуществляется при подаче в зону обработки абразивной суспензии (рис. 2.17).

Резка проволокой – вольфрамовую или стальную проволоку диаметром $\sim 0,1$ мм наматывают на вращающиеся ролики, имеющие канавки с шагом, соответствующим размерам кристаллов (рис. 2.18). Ролики закреплены в касете, совершающей возвратно-поступательное движение с частотой от 700 до 1000 движ. ход/мин. Для увеличения срока службы проволоку перематывают с помощью подающей и приемной катушек и одновременно натягивают, подтормаживая подающую катушку. Преимуществом резки полупроводниковых пластин на кристаллы проволокой и полотнами является их мягкое абразивное воздействие на обрабатываемый материал, что позволяет разрезать пластины с покрытиями из золота, никеля и других материалов без их отслаивания, а недостатком – возможность обрыва при износе, что приводит к неисправимому повреждению разрезаемой пластины.

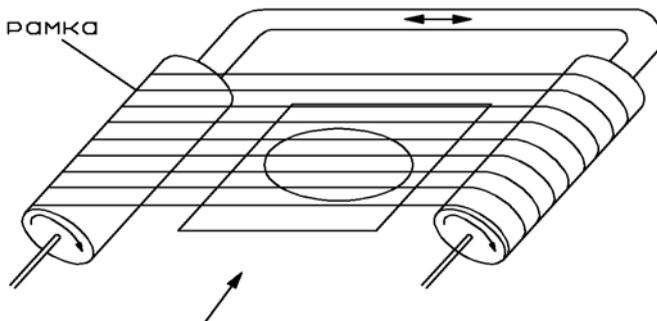


Рис. 2.18. Структурная схема установки для резки пластин на кристаллы проволокой

Ультразвуковая резка полупроводниковых пластин осуществляется в результате воздействия на зерна абразивной суспензии инструмента, совершающего колебания с высокой частотой (16–25 кГц) и разрушения этими зернами обрабатываемой поверхности с высокой интенсивностью (рис. 2.19). При образовании канавки ее форма копирует форму и размеры инструмента. Благодаря этому УЗ-методом можно вырезать кристаллы сложной конфигурации (круглые с глухими отверстиями, лунками и т. д.). Точность УЗ-обработки зависит в основном от размера зерен абразива, степени износа инструмента, глубины обработки, а также характеристики оборудования.

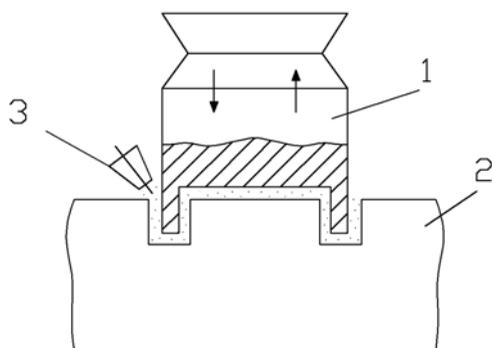


Рис. 2.19. Структурная схема установки УЗ-резки:
1 – УЗ-концентратор; 2 – полупроводниковая пластина;
3 – сопло для подачи алмазной суспензии

2.6.1. Сквозное прорезание пластин

Перспективным методом разделения полупроводниковых пластин на кристаллы является их сквозное прорезание, которое исключает необходимость операции разламывания. Для сохранения ориентации разделенных кристаллов пластины перед резкой закрепляют на адгезионном носителе толщиной приблизительно 75–100 мкм. Носитель натянут в спутнике-рамке, выполненной из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм, или полистирола толщиной 2 мм, имеющем направляющие для совмещения с вакуумным столом установок резки кристаллов. Рамка имеет центральное отверстие круглой или прямоугольной формы, размер которого на 20–30 мм больше диаметра пластины.

Сквозная резка Si-пластин выполняется алмазными дисками с наружной режущей кромкой зернистостью 10/7 мкм на установках для резки при частоте вращения шпинделя $5 \cdot 10^4$ об/мин и скорости подачи при попутном резании 100–120 мм/с, встречно-попутном – 80–90 мм/с.

Установка имеет двупольную систему ориентации с выводом информации на телеэкран, автоматический поворот стола на 90° , систему компенсации износа дисков, их автоматической правки, микропроцессорное управление и возможность резки набором из двух-трех дисков. Для сквозной резки пластин применяются бескорпусные (рис. 2.13, а, б) и, при частичном износе, корпусные диски. Для повышения эффективности сквозной резки пользуются устройством гидродинамического крепления бескорпусных дисков, когда передача крутящего момента обеспечивается через слой жидкости, благодаря чему улучшается качество резки. Использование сквозной дисковой резки позволяет создавать автоматизированные участки для разделения и подготовки кристаллов к сборке. Все установки могут быть связаны единой вычислительной и транспортной системами. Автоматическая установка обеспечивает сборку 60 спутников с пластинами за час. Спутники и пластины подаются из магазинов, взаимно ориентируются и поступают в рабочую зону, где соединяются в вакуумной камере для предотвращения попадания воздушных пузырьков в зону склейки. Подготовка носителей с пластинами является одной из основных проблем, сдерживающих широкое внедрение сквозной резки в производстве. При разделении методом сквозной резки пластин целесообразно дополнять автоматизированные комплексы оборудованием для автоматической сортировки и укладки годных кристаллов в кассеты.

2.7. Контроль качества дисковой резки и разламывания пластин

Перед началом резки настраивают установку: проводят юстировку оптической системы, наладку механизмов перемещения рабочего стола, вращения и перемещения шпинделя. Проверяют алмазные диски на отсутствие дефектов. Заданную глубину резки устанавливают медленным перемещением стола по высоте в направлении диска с помощью шагового двигателя. Оптимальная глубина резания – $2/3$ – $3/4$ толщины пластины. Оптимальная частота вращения шпин-

деля при резке Si и GaAs – 40 000–45 000 об/мин, скорость продольной подачи для кремния – до 100 мм/с, для GaAs – 7 мм/с. После настройки, установки и задания режимов проводят резку. По окончании резки пластину снимают с вакуумного столика и помещают в кассету, находящуюся в ванне с деионизованной водой для отмычки от продуктов абразивной обработки. При правильной настройке установки и выборе режимов резки разброс размеров кристалла не превышает $\pm 0,02$ мм, а сколы на рабочей поверхности кристаллов – 0,01–0,02 мм. Состояние рабочей поверхности пластин, ширину, глубину реза на поперечном сколе контролируют с помощью микроскопа ММУ-3 при 200-кратном увеличении. Другим методом контроля глубины является пробное разламывание пластины вручную по полученному надрезу. Если полоска легко отламывается, это указывает на недостаточную глубину реза.

Визуально и под микроскопом при 100–200-кратном увеличении контролируют наличие неразделенных кристаллов, разломанных не по риске, величину и количество сколов от разламывания, повреждения металлизации. Перспективным является контроль с помощью лазерных проекционных микроскопов с 1000-кратным увеличением.

2.8. Оборудование разделения полупроводниковых пластин

2.8.1. Установка скрайбирования пластин

Для скрайбирования пластин используются установки «Алмаз» и «Алмаз – М» (рис. 2.20). Основными элементами этих установок являются механизм перемещения стола и резцовой головки с двумя резцами, что повышает производительность, а также устройство визуального контроля процесса.

Рабочий цикл: скрайбирование осуществляется возвратно-поступательным движением резцов 2, а шаг скрайбирования пластины задается перемещением стола 3 вправо или влево. Применение двух резцов позволяет избежать холостого хода резцовой головки и выполнять скрайбирование при каждом ее ходе. Поперечное движение столика осуществляется с помощью шагового двигателя, который обеспечивает шаг скрайбирования 0,01–9,9 мм с интервалом через 0,01 мм и 0,02–19,98 мм с интервалом через 0,02 мм. Общий поперечный ход стола равен 85 мм. Шаг скрайбирования может быть выбран раз-

личным при перемещении стола влево или вправо и его значение устанавливаются специальными переключателями, расположенными на передней панели установок. Алмазные резцы перемещаются в продольном направлении со скоростью 1–5 м/мин относительно полупроводниковой пластины. Общий продольный ход резцовой головки составляет 100 мм, при этом предусмотрена его регулировка в пределах от 20 до 100 мм. Рабочий стол имеет вакуумный столик (держатель) для закрепления скрайбируемой пластины и микровинты его продольного перемещения и точного поворота вокруг своей оси на 2–3°. Для быстрого фиксированного поворота столика на 90° служит ручка. Пластины загружают на столик и снимают после скрайбирования вручную. Резцовая головка имеет микровинты вертикального перемещения резцов и регулирования их давления на пластину. Точность перемещения резцов 0,02 мм. Нагрузка на резец обеспечивается пружинами и может изменяться от 0,01 до 2,5 Н. Головка позволяет устанавливать резцы под разным углом наклона к рабочей поверхности пластины. Для визуального контроля процесса скрайбирования установка снабжена микроскопом или прожектором 1, представляющим оптическое устройство с экраном, на котором видны одновременно два изображения разделительной дорожки, что упрощает процесс настройки на рабочий режим.

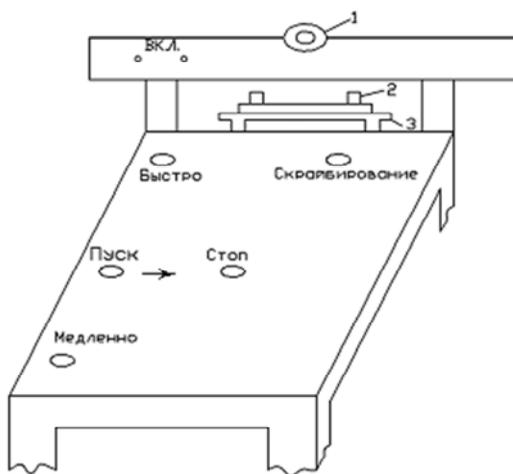


Рис. 2.20. Установка «Алмаз»: 1 – прожектор; 2 – резец; 3 – стол

2.8.2. Установка лазерного скрайбирования полупроводниковых пластин

Для лазерного скрайбирования полупроводниковых пластин используется установка типа ЭМ-210, внешний вид которой изображен на рис. 2.21. Установка состоит из твердотельного ОКГ (лазера), оптической системы для одновременного фокусирования лазерного излучения и визуального контроля процесса скрайбирования, проектора, механизма перемещения рабочего стола и блоков управления. Рабочий цикл (скрайбирование) осуществляется возвратно-поступательным перемещением рабочего стола с одновременной подачей его на шаг в продольном, затем поперечном направлении относительно неподвижного лазерного луча, который взаимодействует с полупроводниковой пластиной при каждом ходе стола.

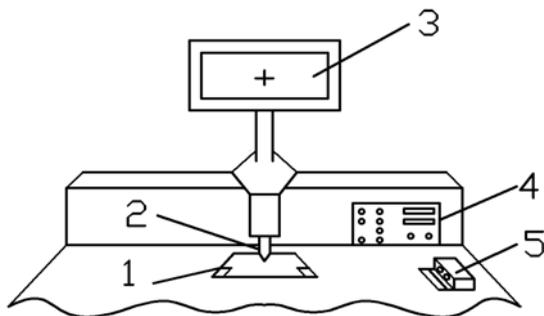


Рис. 2.21. Установка ЭМ-210 лазерного скрайбирования полупроводниковых пластин:
1 – рабочий столик; 2 – объектив; 3 – проектор; 4 – стационарный пульт;
5 – выносной пульт

Для обеспечения высокой скорости перемещения рабочего стола в установке применен линейный шаговый двигатель, состоящий из неподвижной плиты – статора, выполненного из ферромагнитного материала, – и подвижного элемента – индуктора, на котором закреплен рабочий стол. Для перемещения и фиксирования индуктора относительно статора используется сила магнитного взаимодействия между ними. Изменяя поступающими с блока управления сигналами полюсность магнитов, перемещают индуктор с рабочим столом в продольном (по координате x) или поперечном (по координате y) направлении с высокой скоростью (от 50 до 250 мм/с).

Для торможения индуктора в конце каждого хода предусмотрено демпфирование. Движение рабочего стола по координатам x и y осуществляется с шагом от 0,01 мм до 9,99 мм с интервалом 0,01 мм. Общий ход стола по каждой координате – 125 мм. Шаг скрайбирования регулируется по каждой координате. Максимальный диаметр скрайбируемой пластины – 150 мм. На рабочем столе расположен вакуумный столик для закрепления полупроводниковой пластины, для его поворота вокруг оси на $2-3^\circ$ служит микровинт. Загрузка пластины и снятие ее с вакуумного столика после лазерной обработки производится на специальной позиции рабочего стола – «Загрузка». Оптико-квантовый генератор расположен в верхней части корпуса установки, отделен от оператора светонепроницаемым экраном и работает в непрерывном режиме генерации. Для повышения мощности излучения предусмотрен импульсный режим работы с помощью специального УЗ-модулятора. Частота следования импульсов излучения регулируется от 5 до 50 кГц, длительность импульса – 500 нс. Лазерный луч направляют через поворотные призмы оптической системы установки в зону обработки и объективом 2 фокусируют его в плоскости вакуумного столика 1 в пятно диаметром 25–30 мкм. Для скрайбирования пластин различной толщины предусмотрена возможность фокусировки излучения по высоте в пределах 2–3 мм изменением фокусного расстояния объектива поворотной установочной гайкой. Для защиты объектива и рабочей поверхности пластин от разлетающихся при работе расплавленных мелких частиц в нижней части объектива закреплена вакуумная насадка с защитным сменным стеклом. Проектор 3 позволяет визуально контролировать процесс лазерного скрайбирования. Для удобства управления установкой помимо стационарного пульта 4 смонтирован выносной пульт управления 5.

2.8.3. Характеристики установок разделения пластин

В настоящее время в производстве микроэлектроники применяется четыре вида технологических маршрутов разделения пластин, основные операции которых выполняются на специальном оборудовании разделения.

Первый маршрут. Полупроводниковая пластина скрайбируется лазером (установка ЭМ-220), затем отмывается и приклеивается к адгезионному носителю (ЭМ-226). Далее производится ломка пластины на

отдельные кристаллы (ЭМ-246) и натягивание пленки-носителя с приклеенными кристаллами на пяльцы (формируется кассета).

Основные технические характеристики установок разделения пластин приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Характеристика	ЭМ-220	ЭМ-225	ЭМ-2006
Диаметры полупроводниковых пластин, мм	60±0,5; 76±0,5	100±1,0; 150±1,0	125±1,0
Ширина дорожек между кристаллами, мкм	Не менее 100		
Толщина пластин, мм	0,3–0,5	0,3–0,8	0,3–0,8
Пределы перемещений координатного стола, мм:			
по координате x	230	230	–
по координате y	180	–	–
по координате z	–	4	–
Скорость перемещения координатного стола, мм/с	100–390	1–170	
Дискретная величина шага перемещения координатного стола, мм	0,01	0,01	0,0025
Пределы перемещений каретки шпинделя по оси y , мм	–	150	200
Дискретность величины шага перемещения каретки шпинделя, мм	–	0,01	0,01
Скорость вращения шпинделя, тыс. об./мин	–	25–50	25–50
Параметры лазера: средняя мощность, Вт длина волны, мкм частота повторения импульса, кГц ширина реза, мм глубина реза, мм	16±1,6		
	1,06		
	8–50		
	Не более 0,04 Не менее 0,15 при скорости 100 мм/с	Не более 0,07 Не более 0,07 до сквозного разделения	
Система управления	Микропроцессорное управление с развитой диагностикой электронных узлов		

Второй маршрут. Полупроводниковая пластина надрезается на $2/3$ толщины с помощью алмазного режущего диска (ЭМ-225), затем отмывается, приклеивается (ЭМ-226) к адгезионному носителю и разламывается на отдельные кристаллы. Далее натягиванием пленки на пальцы формируется кассета.

Третий маршрут. Неразрезанная полупроводниковая пластина приклеивается к адгезионному носителю (ЭМ-226) и разрезается насквозь алмазным режущим инструментом – диском (ЭМ-225), затем натягиванием пленки на пальцы формируется кассета.

Четвертый маршрут. Формируется спутник в виде пленки адгезионного носителя на пластмассовом каркасе, в котором приклеивается пластина (установка ЭМ-2008). Затем пластина насквозь разрезается и отмывается (ЭМ-2005). Этот маршрут наиболее приспособлен к полной автоматизации сборочного процесса. Установки лазерного скрайбирования (ЭМ-220) и разделения (ЭМ-225, ЭМ-2006), выполняют наиболее сложные и трудоемкие операции при разделении пластин на кристаллы (табл. 2.3).

2.8.4. Оборудование для ломки пластин

В серийном производстве для ломки пластин используется полуавтомат типа УЛП-3 (рис. 2.22), который предназначен для разламывания проскрайбированных полупроводниковых пластин диаметром до 150 мм с сохранением ориентации кристаллов на адгезионной пленке-носителе толщиной 0,005–0,02 мм. Кристаллы получают прямоугольной формы с отношением сторон до 3. В полуавтомате смонтирован механизм ломки 1 с валиками блока 4, блоки 7 (управления) и 8 (питания), пульт управления 5 и микроскоп 2. Там же размещены три манометра, показывающие давление воздуха в магистрали (не менее $2,5 \cdot 10^5$ Па), пневмосети полуавтомата и пневмоцилиндре прижима валиков, стабилизатор давления, обеспечивающий создание необходимого усилия разламывания (от 100 до 1500 Н), и динамометр для его измерения. Полуавтомат имеет вакуумную магистраль с давлением не более $0,6 \cdot 10^3$ Па, подведенную к подвижному столику, который перемещает разламываемую пластину к валикам. Во избежание внедрения осколков кремния в резиновое покрытие верхнего валика его поверхность защищают полиэтиленовой пленкой, перематываемой с катушки 3 на другой ролик. Для

ориентации пластины используют микроскоп, установленный на полуавтомате. Усилие сжатия валиков подбирают экспериментально, изменяя толщину резинового покрытия и диаметр металлических валиков, а также толщину транспортирующей ленты, причем чем меньше размер кристаллов и больше их толщина, тем больше должны быть усилия сжатия. При правильно выбранных режимах количество неразделенных кристаллов на полупроводниковой пластине после разламывания не превышает 2–3 %.

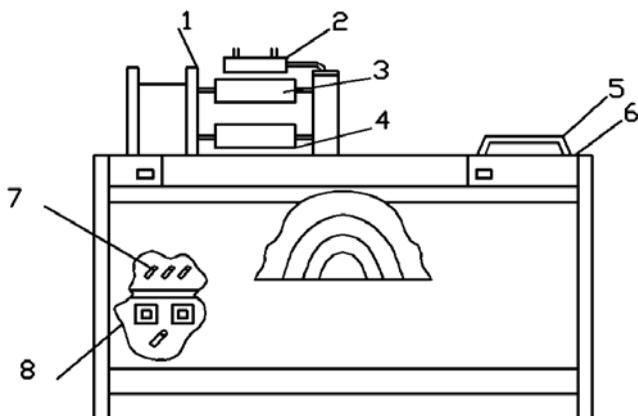


Рис. 2.22. Установка УЛП-3 разламывания пластин на кристаллы:
 1 – механизм ломки; 2 – микроскоп; 3 – катушка; 4 – валики;
 5, 7 – пульт и блок управления; 6 – корпус; 8 – блок питания

3. ПАЙКА И СВАРКА В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИМС

3.1. Пайка: характеристики процесса

Пайка – это процесс получения неразъемного соединения нагретых материалов с помощью расплавленного припоя, который, взаимодействуя с ними, после кристаллизации образует паяный шов.

Пайка характеризуется смачиваемостью и паяемостью. Свойство соединяемых материалов вступать в физико-химические взаимодействия с расплавленным припоем называют *смачиваемостью*, а их способность соединяться между собой – *паяемостью*.

Пайкой можно соединять все металлы с неметаллами и неметаллы с металлами, если обеспечивается активация поверхности, при которой между атомами соединяемых материалов и припоем будет установлена прочная физико-химическая связь. Лучшей активацией обладают металлы. В производстве полупроводниковых приборов преимущественно спаивают металлы с металлом. Для возникновения адгезии необходимо, чтобы расплавленный припой смочил соединяемые поверхности. Степень смачиваемости оценивается по краевому углу (углу между горизонтальной поверхностью детали и расплавленным припоем). Хорошим считается смачивание, когда краевой угол близок к 180° (рис. 3.1), удовлетворительным, когда угол больше 90° , и смачиваемость отсутствует, если угол равен нулю. Отсутствие смачивания – между металлом и припоем имеется загрязнение. Степень смачиваемости зависит от вида контактируемых материалов, состояния поверхности, а также условий пайки (температуры, газовой среды, продолжительности) и свойств припоя (его жидкотекучести и возникающих сил поверхностного натяжения).

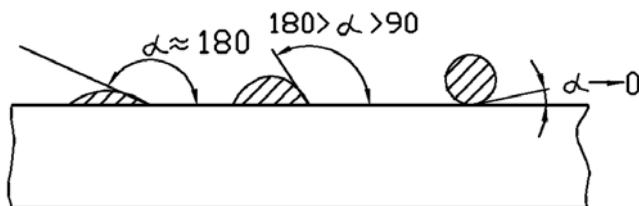


Рис. 3.1. Угол между горизонтальной поверхностью детали и расплавленным припоем

Для очистки металлической поверхности химическим путем применяют флюсы, которые разрушают и удаляют окисные пленки и предохраняют очищенную поверхность, пока припой не растечется по ней. Флюсы не должны разъедать соединяемые металлы, вступать в реакции в процессе пайки и должны легко удаляться после пайки. В качестве флюса широко используется канифоль, а также водород и его смесь с другими газами. Канифоль плавится при температуре 150–200 °С, хорошо очищает паяемые поверхности от окислов, закрывает их во время пайки и является изолятором. При пайке микросхем канифоль удаляется органическими растворителями. Для активизации канифоли добавляются химические присадки (кислоты или галогены). Хорошей восстановительной средой являются водород и его смесь с азотом, которые выполняют функции флюса и применяются в полупроводниковом производстве.

В производстве полупроводниковых приборов и ИМС припои применяют при монтаже кристаллов на ножки (в корпуса) или держатели (платы), а также при пайке электродных выводов и герметизации. При сборочных операциях используют оловянно-свинцовые припои ПОС, оловянно-свинцовые эвтектические сплавы и эвтектические сплавы золото-германий и золото-кремний, т. е. мягкие припои, имеющие температуру плавления менее 500 °С. При герметизации корпусов пайкой используют твердые серебряные, медно-серебряные эвтектические и медные припои с температурой плавления выше 500 °С, а также мягкие припои с температурой плавления от 85–90 °С до 400–420 °С. Различие между пайками мягкими и твердыми припоями состоит в преобладании адгезии, которая способствует смачиванию при мягкой пайке, при твердой наряду с адгезией – плавление и диффузия. Существует несколько способов дозирования и нанесения припоя. Первый способ – в вырубке из припоя штампом деталей нужной конфигурации. Его недостаток – значительные отходы припоя. В другом методе припой гальванически локально наносят на паяемые поверхности. Также припой в нужных количествах наносят в виде рисунка на подложку методом трафаретной печати, для чего готовят пасту из тонкого измельченного порошка припоя и связующего вещества. Важной характеристикой процесса пайки является растекаемость припоя – свойство металла или сплава изменять свою форму в жидком состоянии на поверхности твердого тела или в зазоре.

Процесс образования паяного соединения состоит из следующих стадий: прогрев паяемого металла до температуры, близкой к температуре расплавленного припоя; растекание жидкого припоя по поверхности твердого материала и заполнение паяного шва; растворение основного металла в жидком припое и взаимная диффузия; охлаждение и кристаллизация припоя в паяном шве. Во всех случаях пайка завершается кристаллизацией металлической прослойки между соединяемыми поверхностями деталей. Прочность, герметичность, электропроводность и другие свойства паянных соединений зависят от правильного выбора конструкции шва. Практически швы подразделяются на два вида: стыковые соединения (рис. 3.2, *а*) и нахлестные (рис. 3.2, *б*). Остальные виды соединений представляют различные комбинации этих двух видов.

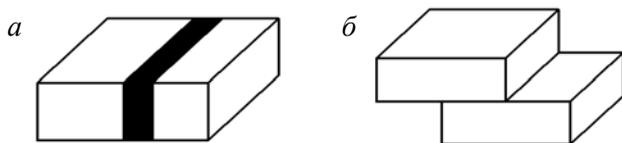


Рис. 3.2. Типы швов паяных соединений:
а – стыковое соединение; *б* – нахлестное соединение

3.2. Особенности процессов пайки в полупроводниковом производстве

Широкое распространение пайки в полупроводниковом производстве обусловлено тем, что этим способом возможно изготавливать сложные по конфигурации узлы из простых по форме и легких для производства элементов; можно соединить в одном узле детали из различных по природе материалов, причем пайке не требуется сложного дорогостоящего оборудования. Широкая номенклатура припоев и флюсов позволяет осуществлять пайку в промышленных условиях большого количества различных конструкционных материалов. Применение пайки для сборки полупроводниковых приборов не вызвало необходимость создания специальных методов, оборудования приспособления и оснастки. В производстве полупроводниковых приборов и ИМС используют как традиционные, так и вновь разработанные методы.

Классификация методов пайки, используемых в полупроводниковом производстве, в зависимости от применения различных источников теплоты и оборудования дана на рис. 3.3.

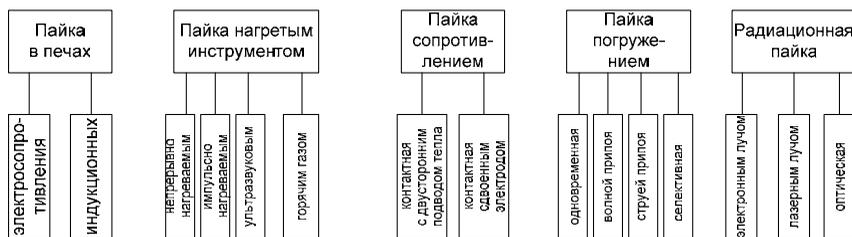


Рис. 3.3. Классификация методов пайки

Пайку в печах применяют для монтажа полупроводникового кристалла на держатель, для соединения кристаллодержателя с вольфрамовыми компенсаторами. Пайку нагретым инструментом и теплообменом применяют при монтаже на подложки навесных компонентов, как с предварительной дозировкой припоя, так и при захвате припоя жалом паяльника.

Пайка импульсно-нагреваемым инструментом с дозировкой припоя заключается в разогреве инструментом места пайки (рис. 3.4, а). V-образный инструмент подводится к месту контакта под определенным давлением, причем точно контролируется температура пайки.

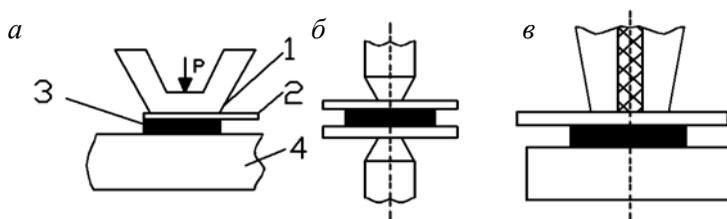


Рис. 3.4. Схема пайки импульсно нагреваемым инструментом:
а – пайка сопротивлением; *б* – пайка с двухсторонним подводом тока; *в* – пайка сдвоенным электродом; 1 – V-образный инструмент; 2 – припаеваемый проводник; 3 – дозированный припой; 4 – подложка

Пайка струей горячего газа заключается в использовании направленного потока воздуха или инертного газа, нагрев и расход которого регулируется. При нагревании газом припой плавится, смачивает поверхность детали, и после кристаллизации образуется прочное соединение. Этот метод применяется для герметизации корпусов ИМС.

Пайка ультразвуковым инструментом – для присоединения тонких токоведущих выводов к облуженной поверхности полупроводникового кристалла. При УЗ-пайке используют сопутствующий нагрев – общий и косвенный. Пайка сопротивлением происходит под воздействием теплоты, выделяемой при прохождении электрического тока через паяемые детали. В производстве микросхем наиболее распространены контактная пайка с двусторонним подводом тока и контактная сдвоенным электродом (рис. 3.4, б, в). Ее используют для присоединения токоведущих выводов к кристаллам и для монтажа кристаллов к подложкам с помощью припайных прокладок.

Пайка погружением получила широкое распространение для печатных плат при одностороннем монтаже навесных компонентов, выводы которых вставляются в отверстия плат. Разновидностями пайки погружением является пайка волной припоя и пайка струей припоя. При пайке волной припоя жидкий припой 5 подается насосом из нижних слоев ванны 4 через продольную щель, образуя волну припоя (рис. 3.5). Паяемая плата протягивается горизонтально и соприкасается с верхней кромкой волны припоя. При пайке струей припоя печатная плата движется в горизонтальном направлении над гребнем струи так же, как и при пайке, волной припоя. Струю припоя можно регулировать не только по высоте, но и по направлению, что облегчает условия пайки. Кроме того, происходит более интенсивное перемешивание припоя, что способствует эффективной передаче теплоты паяемой плате, обеспечивает большую равномерность температуры и состава припоя и более чистую и свободную от оксидов рабочую поверхность припоя.

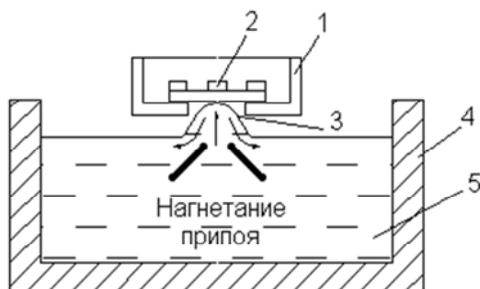


Рис. 3.5. Схема пайки волной припоя:

1 – закрепитель платы; 2 – печатная плата с кристаллами; 3 – волна припоя;
4 – ванна; 5 – расплавленный припой

3.3. Контактно-реактивная пайка

Контактно-реактивной (контактно-реакционной) называется пайка, при которой между соединяемыми металлами в результате контактного плавления образуется эвтектический сплав, заполняющий зазор и кристаллизующийся с образованием паяного соединения. Применяется эта пайка для присоединения полупроводниковых кристаллов к золоченым ножкам. Скорость контактного плавления полупроводников и золота зависит от температуры и усилия, прилагаемого к сплавленному кристаллу и ножке. Образующаяся при пайке эвтектика имеет высокую активность, хорошо смачивает твердые поверхности и при кристаллизации дает прочное сплошное соединение. В установках контактно-реактивной пайки столик, на котором подогреваются ножки (держатели), обычно нагревают до температуры 410 ± 10 °С. Оптимальным считается усилие, равное 0,5–0,7 Н, прикладываемое к инструменту для контактно-реактивной пайки. Увеличение усилия приводит к образованию сколов и трещин в кристаллах.

Контактно-реактивная пайка – двухстадийная. На первой стадии происходит взаимное растворение в очень тонком контактном слое соединяемых металлов в твердом состоянии, что способствует увеличению энергии кристаллической решетки и расплавлению твердого раствора. На второй стадии интенсифицируется диффузия, в результате атомы из расплава одного компонента переходят в твердую фазу другого компонента, переводя в жидкое состояние все новые слои контактирующих металлов. Контактно-реактивная пайка существенно изменяет структуру и свойства материалов в месте их соединения. Для устранения этого явления и активации соединяемых поверхностей, заключающейся в разрушении окисных пленок, контактно-реактивную пайку выполняют с ультразвуковым воздействием (амплитуда 0,05–0,08 мм) на кристалл, в результате чего кристалл получает возвратно поступательное движение в горизонтальной плоскости и притирается к фланцу ножки, происходит контактное плавление кремния и золота. Жидкий сплав перемешивается, и происходит соединение ножки с фланцем. Жидкая фаза способствует измельчению окисных пленок и их удалению из зоны.

Контактно-реактивная пайка эффективна при соединении кристаллов с золочеными фланцами при толщине покрытия не менее 6 мкм. При нарушении режима появляются трещины и сколы. Контактно-реактивная пайка полупроводникового кристалла к золоченой поверхности ножки показана на рис. 3.6, а, б.

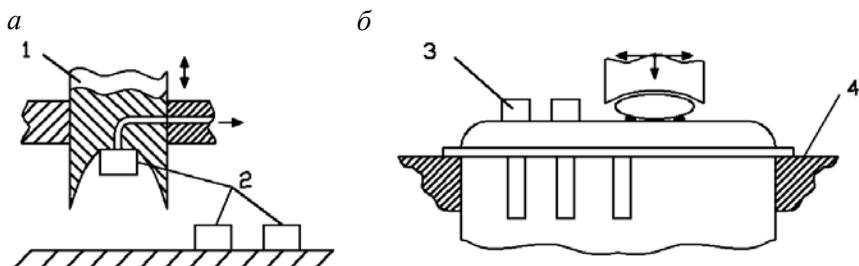


Рис. 3.6. Контактно-реактивная пайка:

а – захват кристалла; б – присоединение кристалла к плате;

1 – вакуумный пинцет; 2 – кристалл; 3 – ножка (корпус); 4 – нагреватель

Кристалл 2 подается на ножку 3 и удерживается в течение времени пайки (5–7 с) вакуумным пинцетом 1. Для создания физического контакта соединяемых поверхностей через вакуумный пинцет подают ультразвуковые колебания, которые, передаваясь кристаллу, заставляют его колебаться в горизонтальном направлении и он притирается к золотому покрытию ножки. Одновременно к вакуумному пинцету прикладывается усилие, которое также передается кристаллу, прижимая его к ножке. Пайку выполняют в среде инертного газа, подогревая ножку нагревателя 4.

3.4. Пайка эвтектическими сплавами

Пайка эвтектическими сплавами применяется для присоединения полупроводниковых кристаллов к ножкам (корпусам) и отличается от контактно-реактивной тем, что эвтектический сплав образуется не в результате контактного плавления соединяемых материалов, а вводится в качестве припоя между соединяемыми поверхностями кристалла и ножки. В качестве эвтектических используют сплавы Au-Ge и Au-Si. Подготовленные к пайке детали нагревают в нейт-

ральной атмосфере до температуры, превышающей температуру плавления эвтектического сплава. Эта температура зависит от определенного соотношения в них компонентов.

Эвтектические сплавы Au-Ge (12 % Ge и 88 % Au) и Au-Si (94 % Au и 6 % Si) имеют температуру плавления соответственно 356 и 370 °С, т. е. ниже температуры плавления каждого из этих материалов. Эвтектические сплавы – смеси, а не химические соединения. Сплав Au-Si сложно готовится и раслаивается, поэтому чаще применяют эвтектический сплав Au-Ge ЗлГр 12. Режим пайки эвтектическим сплавом ЗлГр 12 на специальной установке следующий: температура поверхности столика 410 ± 10 °С усиление на инструмент 0,6–0,74 Н, амплитуда колебаний инструмента 0,08 мм и время пайки 7 с. По сравнению с контактно-реактивной пайкой пайка эвтектическими сплавами имеет преимущества: эвтектические сплавы имеют невысокую температуру плавления, хорошие жидкотекучесть и способность смачивания, а также незначительное время нагрева до температуры пайки. В паяном соединении не создается больших остаточных напряжений, образующихся вследствие разницы КТР спаеваемых материалов. Введение эвтектического сплава между соединяемыми поверхностями способствует сглаживанию на них шероховатостей и неровностей.

Нерастекшийся припой свидетельствует о плохой смачиваемости им золоченой поверхности ножки и кристалла или о недостаточно высокой температуре пайки, что является одной из причин низкой прочности паяного соединения. Появление трещин и сколов на кристаллах связано с большим усилием на рабочий инструмент или резким подъемом температуры пайки по сравнению с оптимальной. Пайка кристалла к ножке эвтектическим сплавом состоит из четырех операций: захвата прокладки 1 из эвтектического сплава, ее переноса и укладки на место пайки (рис. 3.7, а, б), захвата кристалла б, переноса и присоединения его к ножке з (рис. 3.7, в, г). Захват, перенос и удержание прокладки кристалла выполняется специальным инструментом. При этом усилие захвата и удержания прокладки создается вследствие перепада давлений. Это усилие называют присосом.

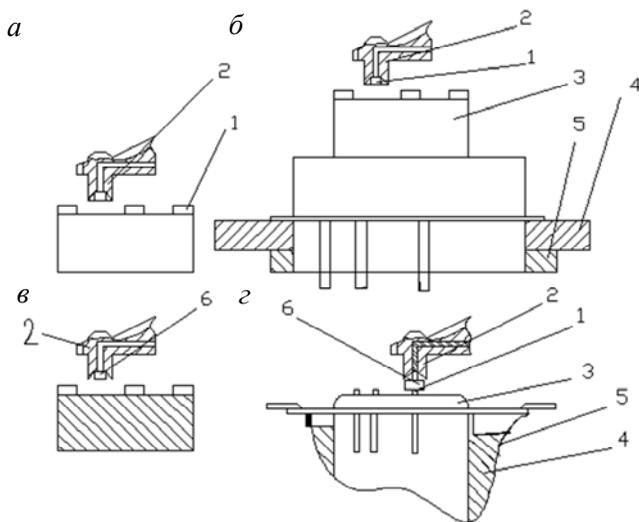


Рис. 3.7. Пайка кристалла к ножке эвтектическим сплавом:
а – захват прокладки; *б* – укладка кристалла на ножку;
в и *г* – захват, укладка кристалла на прокладку и их пайка;
 1 – прокладка; 2 – вакуумный пинцет; 3 – ножка; 4 – нагреватель;
 5 – устройство прижима ножки к нагревателю; 6 – кристалл

3.5. Пайка электродных выводов

Присоединение электродных выводов пайкой применяют при изготовлении мощных полупроводниковых приборов, а также при сборке модулей. Пайку электродных выводов выполняют низкотемпературными мягкими припоями на основе олова, свинца и индия в термических установках (печах) непрерывного и периодического действия в атмосфере защитного газа и на воздухе. Пайку выводов также можно производить нагревом электрическим током (прямым или косвенным), а также паяльником (электрическим или газовым). Перед пайкой детали тщательно очищаются. В термических условиях пайку выполняют в кассетах, в каждой из которых собираются в нужном положении детали. Припой в виде детали определенной формы и размеров также закладывают между соединяемыми элементами. Иногда припой предварительно осаждают гальваническим способом на конце плоских выводов или электрохимическим способом – на конце проволоочных выводов. Кассеты изготавливают из термостой-

ких материалов, несмачиваемых припоем. Роль флюса выполняет водород. Процесс присоединения электродных выводов складывается из нескольких этапов: нагрева деталей до максимальной температуры пайки, выдержки при этой температуре и охлаждения с определенной скоростью до температуры 50–100 °С. Возможна также пайка электродных выводов в вакуумных печах, но процесс малопродуктивный. При присоединении электродных выводов нагревом электрическим током импульсы тока можно пропускать непосредственно через соединяемые детали, или использовать дополнительный контакт, если есть место для ввода электрода. Иногда места пайки нагревают электрической спиралью. Пайку электродных выводов выполняют специальным паяльником с миниатюрным наконечником. Присоединение второго конца электродного вывода к корпусу выполняется теми же способами и на том же оборудовании. В полупроводниковом производстве для пайки электродных выводов используют множество высокопроизводительных автоматов и полуавтоматических установок, разработанных специально для конкретных изделий с учетом спецификации технологического процесса их изготовления.

3.6. Пайка деталей корпусов

При изготовлении корпусов соединяют металл с металлом и металл с керамикой. Паяные конструкции корпусов получают, пользуясь твердыми припоями, обеспечивающими вакуумноплотные соединения высокой механической прочности, выдерживающие значительный нагрев. Пайку твердыми припоями выполняют в атмосфере водорода, выполняющего функции флюса. В производстве корпусов используется серебряно-медный припой ПСр-72, которым паяют молибдено-медные сплавы, никель, медь. Также в качестве припоя используют серебро, которым паяют те же металлы, кроме меди. Плавление сплавов происходит в интервале температур и носит сложный характер. ПСр-72 обладает сравнительно низкой температурой плавления (779 °С), почти полным отсутствием взаимодействия между серебром и другими металлами и незначительной критичностью к отклонению технологического режима пайки. Выполняют ее в атмосфере водорода в колпаковых или в конвейерных электропечах. Зазоры между спаиваемыми деталями колеблются в пределах от 0,05 до 1,00 мм. Корпуса полупроводниковых приборов паяют в одно или многоместных кассе-

тах, с помощью которых осуществляется фиксирование деталей относительно друг друга. Материал кассет – нержавеющая сталь, графит, керамика и комбинированный. Материал кассет не должен смачиваться припоем, вступать во взаимодействие с паяемыми деталями, выделять газы и быть жаропрочным, выдерживать много периодических нагревов до температуры пайки и охлаждения до 20 °С. Кассета с собранными для пайки деталями изображена на рис. 3.8.

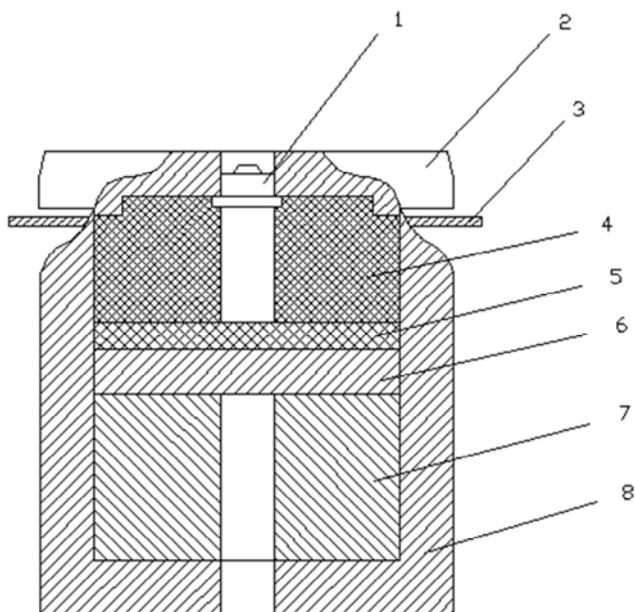


Рис. 3.8. Кассета с деталями:

- 1 – грузик; 2 – колонка; 3 – выводная рамка; 4 – двухслойный изолятор;
 5 – бромметаллитовая керамика; 6 – фланец; 7 – вкладыш кассеты;
 8 – основание кассеты

Сборка идет в такой последовательности. На вкладыш 7, фиксируемый на двух колонках 2 основания 8 кассеты, укладывают фланец 6 из псевдосплава. На те же колонки надевают по два уголковых фиксатора (на рис. 3.8 не показаны), ограничивающих смещение керамических деталей в перпендикулярном рисунку направлении. Затем между фиксаторами последовательно помещают навеску припоя, бромметаллитовую керамику 5, детали из припоя, двухслойный изолятор 4 из корундовой керамики, детали из припоя под выводы выводной рамки 3,

а сверху на колонки надевают грузик *I*, который своими выступами прижимает выводы к припою и корундовой керамике. В таком виде кассету подают в термическую установку для спаивания деталей корпуса. После выполнения пайки кассету разбирают и извлекают готовый корпус.

Пайка металлизированной керамики с металлами состоит в том, что с момента взаимодействия припоя с компонентами металлизации происходят сложные физико-химические процессы, отличные от процессов, происходящих при соединении двух металлов пайкой. В полупроводниковом производстве керамику спаивают с никелем, коваром, медью, используя в качестве припоя серебро, медно-серебряный сплав и медь. В начале пайки припоем смачиваются соединяемые поверхности, затем происходит диффузия жидкого припоя по границам зерен металла и растворение смачиваемых металлов в припое, в результате появляются компоненты паяемых металлов. Пайку керамики с металлами осуществляют также медью, причем медью можно паять керамику, как с молибденовой, так и молибдено-марганцевой металлизацией. Процесс осуществляется при температуре 1100 °С. При пайке керамики медью, она, проникая под металлические покрытия, ослабляет связь керамики с ним. При пайке керамики с молибденово-марганцевой металлизацией марганцевая шпинель заполняет все молибденовые пространства, медь на поверхность керамики не проникает и соединение получается надежным. Для создания высококачественных металлокерамических сплавов со стабильными прочностными характеристиками при пайке медью предварительно на металлизационное покрытие наносят плотный слой никеля толщиной 10–12 мкм. Также используется метод при котором вжигание металлизационного слоя керамики совмещено с ее пайкой при температуре плавления припоя 1000–1100 °С. Для изготовления надежных металлокерамических спаев (конструкций) необходимо, чтобы соединяемые между собой керамические детали были согласованы по КТР в широком интервале рабочих и экстремальных температур. Определенное значение для целостности спаиваемых материалов имеет их теплопроводность.

3.7. Припои и флюсы для пайки

В полупроводниковом производстве к припоям предъявляются следующие требования: они должны обладать хорошей смачивае-

мостью и растекаемостью; давать минимум реакций, приводящих к образованию интерметаллических соединений с металлом основы; обеспечивать получение швов, обладающих требуемой механической прочностью и пластичностью; температура их плавления должна быть ниже температуры соединяемых металлов; ТКЛ не должен резко отличаться от ТКЛ основного металла; в паре с паяемым металлом быть коррозионно-стойкими; иметь высокую тепло- и электропроводность. Некоторые из этих требований обеспечиваются технологией изготовления припоя, другие – выбором компонентов припойных сплавов. Припои подразделяются на два класса: 1) низкотемпературные (индиевые, свинцово-оловянные) с температурой плавления ниже 450 °С; 2) высокотемпературные (на медно-серебряной и золотой основе) с температурой плавления выше 450 °С. Виды припоев в полупроводниковом производстве определяются температурой работы их в аппаратуре. Для основных приборов их рабочая температура не превышает 85 или 150 °С. Поэтому припой не должен изменять своих характеристик при этих температурах. При сборке полупроводниковых приборов применяют в основном низкотемпературные припои. Виды припоев, их основные физико-химические свойства и назначение в сборочном производстве полупроводниковых приборов и ИМС приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Типы припоев, применяемых в производстве полупроводниковых приборов и ИМС

Наименование и марка припоя	Химический состав		Температура плавления, °С	Назначение
	Компоненты	Содержание, %		
1	2	3	4	5
Оловянно-свинцовая	Олово	49–57	142–145	Пайка пассивной части
Блесурмянистая ПОСК 50	Сурьма Медь Свинец	0,2 0,08 Остальное		ИМС, чувствительных к перегреву, герметизации
Оловянно-свинцовые посы ПОС-40	Олово	60–62	183–190	Напайка металлизированных кристаллов, пайка металлокерамики, герметизация
	Свинец	Остальное	183–238	
	Олово	39–40		
	Свинец	Остальное		

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4	5
Оловянные ПОВИ-0,5	Висмут Олово	0,4–0,5 Остальное	224–232	Припайка кристаллов Ge к платиниту
Серебряные ПСП-2,5	Серебро Олово Свинец	2,5 2,5 Остальное	295–306	Герметизация ИМС
ПСП-45	Серебро Медь Цинк	45 30 25	660–750	Изготовление деталей корпусов
ПСРОС-3-58	Серебро Сурьма Олово Свинец	3 0,5 57,8 Остальное	184–190	Пайка пассивной части микросхем

Наиболее широко в полупроводниковой промышленности используется припой Sn-Pb эвтектического состава (ПОС-61), а также припой на основе свинца с присадкой серебра. Для получения качественных паяных швов и экономии припоя применяют дозирование припоев. Простейший способ дозирования – применение штампованных шайб и колец. Для пайки круглых деталей припой готовится в виде колец навивкой на оправку проволоки и последующей ее разрезкой по образующей. Припой в нужных количествах в виде рисунка наносят методом трафаретной печати, для чего приготавливают пасту, состоящую из тонко измельченного порошка припоя и связующего вещества. Для улучшения условий смачивания применяют флюсы, газовые среды и другие средства.

Флюсы – неметаллические вещества, служащие для удаления оксидной пленки с поверхности припоя и паяемого материала, для предотвращения образования ее при пайке. К флюсам, используемым при пайке, предъявляются следующие требования: температура плавления флюса должна быть ниже температуры начала плавления припоя. К началу плавления припоя флюс должен смачивать поверхность основного материала. При температуре пайки расплавленный флюс должен полностью удалять оксиды и защищать от окисления основной материал и припой. Флюс не должен терять активности и защитных свойств при длительном нагреве. Продукты флюсования не должны способствовать активному развитию коррозии паяных соединений. Флюс состоит из основы, растворителя ок-

сидной пленки и активных флюсующих веществ. Эти компоненты иногда сочетаются в одном веществе. Процесс флюсования заключается в смачивании основного металла и припоя флюсом, удалении с них оксидных пленок, вытеснении флюса из зазора расплавленным припоем и защите места пайки от окисления образовавшимся шлаком. Флюсы проявляют свое действие в определенном интервале температур, который называют температурным интервалом активности флюсов. В зависимости от температуры плавления припоев флюсы подразделяются на флюсы для низкотемпературной пайки и флюсы для высокотемпературной пайки. Наибольшее применение в производстве полупроводниковых приборов и ИМС находят антикоррозийные флюсы для низкотемпературной пайки. К ним относятся канифоль; остатки канифольного флюса не поглощают влаги и не вызывают коррозии места пайки. Кроме канифольных используются флюсы на основе хлористого цинка. Типы флюсов, используемых в производстве полупроводниковых приборов и ИМС и их физико-химические свойства приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Физико-химические свойства флюсов

Состав и свойства флюсов	ФКСп	ФПЭ	ФКТС	ЛТИ-120	ФХЦ
Химический состав, %					
Канифоль	10–60	–	15–30	20–25	–
Этиловый спирт	90–40	–	81–65	76–86	20–50 воды
Полиэфирная смола	–	15–50	–	–	–
Этилацетат	–	85–50	–	–	–
Салициловая кислота	–	–	3–35	–	–
Триэтиламин	–	–	1–1,5	1–2	–
Хлористый цинк	–	–	–	–	10–50
Температура оптимальной активности флюса при пайке, С	220–240	220–240	190–300	230–300	140–320

Флюсы используют не только для удаления оксидной пленки, но и для предохранения поверхности металлов от окисления.

В полупроводниковом производстве часто применение флюсов недопустимо и тогда используют различные технологические газо-

вые среды и вакуум (рис. 3.9). По характеру воздействия на металл газовые среды делятся на нейтральные (аргон, азот) и восстановительные (водород). Возможность пайки в среде определяется стойкостью оксида и активностью самой газовой среды. Чаще применяют пайку в восстановительных средах, реже в нейтральных и редко – в вакууме. Основной восстановительной средой для пайки в полупроводниковом приборостроении является водород, сухой, очищенный от примеси. Во время пайки он интенсивно поглощается металлом, вытесняя другие в металле газы, и легко удаляется сам при обезгаживании приборов.

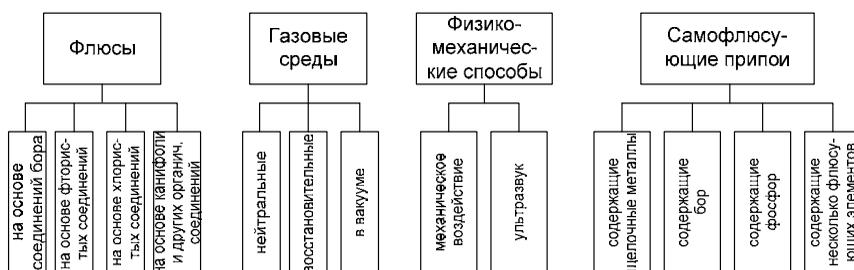


Рис. 3.9. Способы удаления оксидной пленки в процессе пайки

В качестве нейтральных сред для пайки также используется азот с аргоном, причем азот применяется тогда, когда нагреваемые материалы не образуют с ним нежелательных соединений. Во время пайки в вакууме образующийся в процессе диссоциации оксид непрерывно удаляется.

3.8. Оборудование для пайки. Оборудование для эвтектической пайки

Монтаж кристаллов в корпуса полупроводниковых приборов и микросхем эвтектической пайкой выполняют на специальных установках (типа ЭМ-415 и ЭМ-438).

Установка ориентированной пайки кремниевых кристаллов к позолоченным ножкам (рис. 3.10) состоит из стола, механизмов перемещения, нагружения и привода рабочего инструмента б, микроскопа 1 с держателем 2, нагревателя 5, газовой и вакуумной систе-

мы и электрооборудования. Пайку кристаллов к ножкам выполняют под бинокулярным микроскопом 1 на держателе 2, позволяющем устанавливать его в нужном положении. В поле зрения микроскопа – инструмент, стойка с кристаллами и расположенная на нагревателе ножка, вокруг которой создается защитная газовая среда. Охлаждаются ножки с кристаллами обдувом через отверстия в инструменте. Действия газовой и вакуумной систем управляются с помощью электромагнитных клапанов. Электрооборудование установки обеспечивает подачу энергии к нагревателю, вибратору и автоматическое управление режимом пайки и сигнализации.

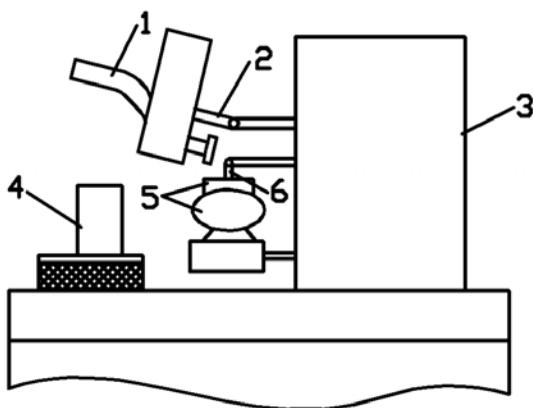


Рис. 3.10. Установка ЭМ-415 для пайки кристаллов:
1 – микроскоп; 2 – держатель микроскопа; 3 – вибратор; 4 – стойка;
5 – нагреватель; 6 – рабочий инструмент

Установка ЭМ-438 имеет шесть исполнений, что позволяет использовать ее для монтажа кристаллов, на которые оказывается ультразвуковое воздействие.

На основании установки размещены механизмы перемещения инструмента, подача ленты и кристаллов, бинокулярный микроскоп, пульт управления, электрооборудование с блоками питания, терморегулятором и ультразвуковым генератором. Механизм перемещения (рис. 3.11) служит для захвата кристаллов, их транспортировки к месту монтажа специальным инструментом, совершающим движения в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

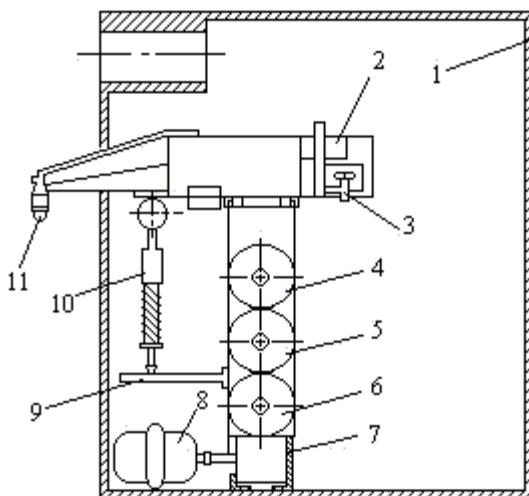


Рис. 3.11. Установка ЭМ-438 (механизм перемещения):

- 1 – корпус; 2 – направляющая; 3 – груз; 4, 5, 6 – шестерни; 7 – червячный редуктор;
 8 – электродвигатель; 9 – рычаг; 10 – кронштейн с толкателем и роликом;
 11 – рабочий инструмент

Перемещение монтажной головки с инструментом 11 в горизонтальной плоскости (вперед-назад) осуществляется от электродвигателя 8 через червячный редуктор 7, шестерни 4, 5, 6, вал, кривошип – рычагом монтажной головки. Движение инструмента в вертикальной плоскости (подъем и опускание) осуществляется от электродвигателя через червячный редуктор, шестерни, рычаг 9 и толкатель 10, который своим роликом воздействует на планку монтажной головки. Управляют механизмом перемещения бесконтактные выключатели. Механизм подачи ленты обеспечивает перемещение на заданный шаг из левой кассеты в правую с одновременным подогревом места монтажа кристалла до необходимой температуры нагревателя. Бинокулярный микроскоп осуществляет визуальное наблюдение за монтажом кристалла. На пульте управления установкой, расположенной над механизмом перемещения инструмента, находятся кнопки управления, сигнальные лампочки и прибор контроля температуры нагревателя.

Электрооборудование (в тумбах стола): блоки питания и управления временем пайки, движением координатного стола и работой установки, терморегулятор, блок питания 27 В и ультразвуковой ге-

нератор. Начало работы – нажатие кнопки питания и включение терморегулятора нагрева ленты с заданием температуры. При работе в автоматическом режиме инструмент опускается, захватывая кристалл и удерживая его вакуумом, а затем поднимается. Далее включается импульсный подогрев инструмента и координатный столик перемещается на один шаг, инструмент подходит к месту пайки кристалла (ленте, ножке), опускается на него, и включается ультразвуковой генератор. Происходит пайка кристалла к ленте или ножке. После истечения времени пайки выключается импульсный подогрев инструмента и ультразвуковой генератор, а включается обдув кристалла. Далее происходит подъем инструмента, выключение обдува кристалла и перемещение ленты на шаг, после чего цикл работы установки повторяется.

3.8.1. Оборудование для пайки корпусов

Пайку корпусов выполняют в электропечах двух типов: периодического действия – колпаковых, непрерывного – конвейерных. Эти печи могут использоваться для герметизации полупроводниковых приборов и микросхем в корпусе, а также для пайки кристаллов к ножкам.

Колпаковая электропечь имеет два колпака, два механизма их перемещения, две газовые системы охлаждения и по одной системе питания и автоматического регулирования температуры. Поэтому нагрев деталей в колпаках может быть только поочередным. Двойные элементы печи имеют одинаковое устройство. Колпак состоит из корпуса и привернутой через прокладку крышки, изготовленных из нержавеющей стали и имеющих двойные стенки (водяную рубашку). С боков корпуса приварены цапфы, за которые его перемещают. Внутри колпака расположено шесть экранов для теплоизоляции и концентрации тепла в его рабочем пространстве. Внутри колпака расположен трехсекционный нагреватель. Подъем и опускание колпака выполняет расположенный внутри шкафа электропечи механизм перемещения. Газовая система служит для удаления воздуха из подколпачного объема и создания восстановительной технологической среды. Система охлаждения обеспечивает отбор тепла проточной водой у нагреваемых элементов печи. Система автоматиче-

ского регулирования обеспечивает программное и ручное управление температурой нагрева деталей.

Конвейерная электропечь (рис. 3.12) состоит из приборных оснований 6, камер загрузки 1 и разгрузки 4, нагревательных камер 2 рабочего канала, водяных холодильников, привода конвейерной ленты, систем: газовой, охлаждения, питания и автоматического регулирования температуры.

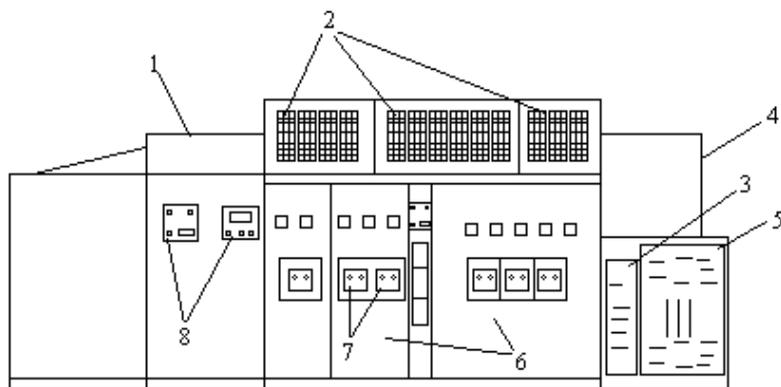


Рис. 3.12. Конвейерная электропечь:

1 и 4 – камеры загрузки и разгрузки; 2 – нагревательные камеры; 3 – пульт управления системой охлаждения; 5 – пульт управления газовой системой; 6 – приборные основания; 7 – терморегулирующие приборы тепловой автоматики; 8 – пульт управления конвейерной лентой

Камера загрузки представляет металлическую сварную конструкцию, в нижнюю часть которой вводится азот для создания воздушной завесы, а также трубка с проволочным резистором для отвода и сжигания водорода. Специальные ролики позволяют перемещаться камере загрузки при удлинении и сжатии рабочего канала. Камера разгрузки аналогична камере загрузки. Нагревательные камеры имеют цилиндрическую форму и состоят из основания и крышки. Проволочные нагреватели подвешены к футировке основания. В нагревательные камеры введены токовводы и термопары. Водяные холодильники служат для снижения температуры выходящих из печи изделий.

Привод конвейерной ленты состоит из электродвигателя постоянного тока и редуктора. Газовая система обеспечивает удаление воздуха из нагревательных камер, создание необходимой рабочей атмосферы и завес на входе и выходе из рабочего канала. Все органы управления и контрольные приборы газовой системы расположены под разгрузочной камерой. Электропечь получает питание от промышленной сети переменного тока и имеет автоматическую систему регулирования температуры по восьми одинаковым каналам.

3.9. Сварка в производстве полупроводниковых приборов и ИМС

Сваркой называют технологический процесс образования неразъемного соединения двух материалов путем их местного сплавления или совместного деформирования, в результате чего возникают прочные связи между атомами соединяемых тел.

Поверхностные атомы металла имеют свободные ненасыщенные связи, с помощью которых захватывается всякий атом, приблизившийся на расстояние действия сил межатомного взаимодействия. При сближении поверхности двух металлов на расстояние действия сил межатомного взаимодействия по поверхности соприкосновения происходит сращивание двух металлов в одно монолитное целое соединение прочностью, равной прочности металла.

При производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем необходимо учитывать ряд особенностей, возникающих при сварке: малые толщины соединяемых элементов (от единиц до сотен микрометров); жесткие ограничения по термомеханическим воздействиям на соединяемые элементы; неизменность физико-механических свойств сварного контакта при термостарении.

Способы сварки классифицируют по разным признакам, например, по виду энергии, используемой при сварке, по состоянию, свариваемых металлов, по наличию или отсутствию усилия.

3.9.1. Термокомпрессионная сварка

Термокомпрессия – это процесс соединения двух материалов, находящихся в твердом состоянии, при воздействии на них тепла и давления. Температура нагрева соединяемых термокомпрессией

материалов не должна превышать температуру образования их эвтектики и один из материалов должен быть пластичным.

На поверхности соединяемых полупроводникового кристалла и электродной проволоки имеется множество выступов и впадин. Если приложить давление к электродному выводу и нагревать полупроводниковый кристалл, произойдет пластическая деформация микровыступов электродного вывода и частичная деформация микровыступов вывода и взаимное затекание соединяемых материалов в микровпадины, то есть термокомпрессионная сварка. При такой сварке образуется прочная адгезия между полупроводниковым кристаллом и электродным выводом и создается надежный электрический контакт, причем чем пластичнее материал электродных выводов, тем больше коэффициент адгезии. Золото и алюминий по сравнению с другими материалами имеют наибольший (1,84) коэффициент адгезии. В производстве полупроводниковых приборов термокомпрессионной соединяют следующие пары металлов: Au-Si, Au-Ge, Au-Al, Al-Al, Au-Ag, Al-Ag. Присоединение электродных выводов термокомпрессионной выполняется в виде одной или нескольких плоских точек, шарика, а также встык и внахлестку. В зависимости от принятого технологического процесса термокомпрессию разделяют на шариковую, клином, сшиванием.

Шариковая термокомпрессия (рис. 3.13, а) реализуется: шарик 5 на конце проволочного вывода может быть получен оплавлением электродной проволоки 1 в пламени водородной горелки 4 или прикосновением к электрическому разряднику.

При оплавлении в водородном пламени получают один или два шарика: один остается свободным на конце уже присоединенного вывода, а другой находится в капилляре 3 (инструменте) и предназначен для приварки очередного электродного вывода к кристаллу 7 и контактной площадке 8. Один шарик в водородном пламени получают, если горелку используют только для оплавления конца проволоки в шарик, выходящий из капилляра, а не для отделения присоединенного электродного вывода.

С помощью разрядника на конце проволоки образуется только один шарик, которым электродный вывод присоединяют к контактной площадке кристалла. Второй конец электродного вывода присоединяется к корпусу 9 внахлестку.

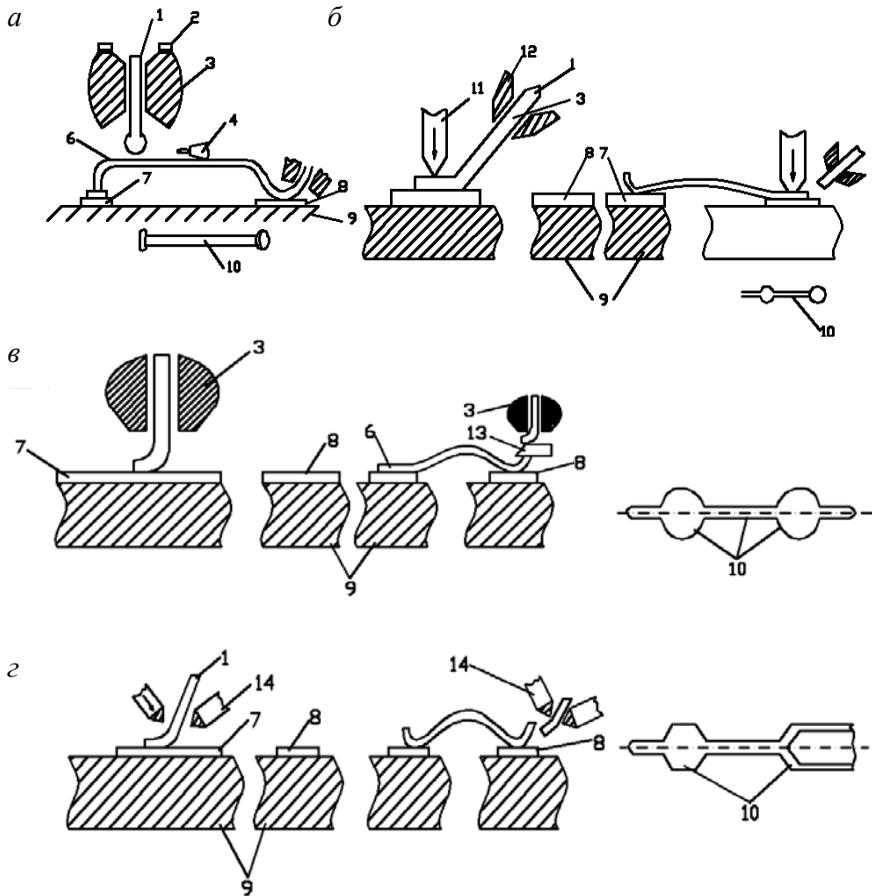


Рис. 3.13. Виды соединения термокомпрессионной сваркой (ТКС):
а – шариковая ТКС; *б* – ТКС клином; *в* – ТКС шиванием; *г* – ТКС с использованием птичьего клюва; 1 – электродная проволока; 2 – зажимное устройство; 3 – капилляр (рабочий инструмент); 4 – водородная горелка; 5 – шарик; 6 – электродный вывод; 7 – кристалл; 8 – контактная площадка; 9 корпус (подложка); 10 – форма места соединения; 11 – клин; 12 – сопло; 13 – ножницы; 14 – птичий клюв

Термокомпрессия клином (рис 3.13, б): сначала необходимо совместить контактную площадку 8 кристалла 7 с инструментом, конец электродной проволоки 1 (вывода) с концом инструмента – клин 11. Затем после сварки, вытянув проволоку из сопла 12, продумать те же манипуляции для присоединения второго конца проволоки 1 к корпусу

су 9. Далее следует отделение электродного вывода от остальной части проволоки, которое выполняется обрывом, ножницами, перерезанием иглой о край траверсы (вывод корпуса) или обрезкой специальным устройством. В этом случае конец проволоки не сплющивается и не остается длинных концов – причин образования закороток.

Термокомпрессия сшиванием (рис. 3.13, в): инструмент представляет собой капилляр 3 с вертикальным осевым отверстием. Процесс создания проволочных перемычек между кристаллом 7 и корпусом 9, в общем случае напоминает обычное шитье. Только при шитье нитка проходит через боковое отверстие иголки, а при термокомпрессии сшиванием – через вертикальное осевое отверстие инструмента. После приварки конца электродной проволоки 1 к кристаллу 7 ее вытягивают через капилляр 3, совмещают его с контактной площадкой 8, выполняют вторую сварку, а затем обрезают ножницами 13, загибая свободный конец под инструмент.

Термокомпрессия инструментом в виде птичьего клюва (рис. 3.13, г) относится к термокомпрессии сшиванием. Главное отличие этих видов присоединения электродных выводов заключается в устройстве инструмента – птичьего клюва 14, состоящего из двух частей, между которыми пропускают электродную проволоку 1. После выполнения обеих сварок проволоку обрывают, перемещая инструмент в сторону от места сварки. Необходимо отметить, что каждый способ термокомпрессии характеризуется своим отпечатком 10 инструмента на электродном выводе. Наиболее производительна шариковая термокомпрессия, но ее применяют при сборке полупроводниковых приборов, имеющих большие контактные площадки, используя электродную проволоку диаметром более 20 мкм. При термокомпрессировании золотой электродной проволоки к Si-кристаллу температура нагрева составляет 350–380 °С, давление – 60–100 мН/м², а время выдержки – 2–20 с. При соединении золотой проволоки с золотой пленкой на пленке двуокиси кремния температура нагрева должна быть 250–370 °С, давление – 60–100 мН/м², а время – 0,05–2,00 с.

Основным достоинством термокомпрессионной сварки является то, что без применения флюса и припоев можно соединять металлы в твердом состоянии при сравнительно низких температурах и малой их деформации (10–30 %) как на воздухе, так и атмосфере формигазы или сухого азота. Термокомпрессией сваривают такие пла-

стичные металлы, как алюминий, золото с тонкими нанесенными на полупроводник металлическими пленками, некоторыми проводниками (медью, коваром) и диэлектриками (ситаллом, SiO_2). Термокомпрессия обладает высокой технологичностью, заключающейся в простоте подбора режимов и изготовления оборудования, а также возможности контроля качества сварки.

Недостатки термокомпрессии – ограниченное число пар свариваемых металлов, высокие требования к качеству соединения поверхностей и сравнительно низкая производительность. Для присоединения электродных выводов термокомпрессией используются специальные установки, отличающиеся особенностями конструкции, в основу которых заложены три технологических признака: способ нагрева, конструкция инструмента и вид термокомпрессионной сварки. В различных установках термокомпрессии нагреваются столик, инструмент или инструмент и столик одновременно.

Разновидностью термокомпрессии является *сварка косвенным импульсным нагревом (СКИН)* инструмента, изготовленного из жаропрочного материала, который служит проводником электрического тока (рис. 3.14).

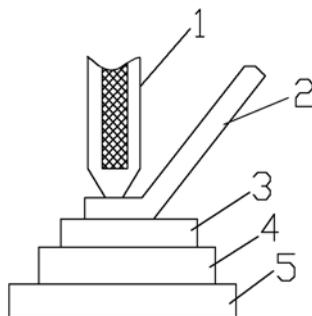


Рис. 3.14. Сварка косвенным импульсным нагревом:
1 – инструмент; 2 – электродная проволока; 3 – кристалл;
4 – корпус (подложка); 5 – столик

При импульсном пропускании электрического тока происходит кратковременный нагрев инструмента, в результате чего можно сваривать электродные выводы из малопластичных металлов (Cu, сплавов Ag) с тонкими металлическими пленками, нанесенными на керамику или полупроводниковый материал.

3.9.2. Ультразвуковая сварка

Ультразвуковая сварка – это процесс соединения двух материалов, находящихся в твердом состоянии, при незначительном нагреве с применением определенного давления и колебаний ультразвуковой частоты. При ультразвуковой сварке температура нагрева в зоне контакта не превышает 50–60 % температуры плавления свариваемых материалов. Контактное давление зависит от механических свойств свариваемых материалов и размеров изготавливаемых из них деталей. Деформация деталей не превышает 5–20 % их первоначальных размеров. УЗ-сварку выполняют в интервале частот от 18 до 250 кГц. Ультразвуковые колебания, воздействуя на соединение, нагревают его, освобождают от загрязнений и окислов, ускоряют пластическую деформацию электродного вывода, зачищают поверхности в зоне контакта, в результате происходит сближение физически чистых поверхностей на расстояние действия межатомных сил, взаимная диффузия и прочное соединение двух материалов. При УЗ-сварке не используют флюсы и припой – важное достоинство. Этим способом можно соединять разнородные разнотолщинные материалы и трудно свариваемые. С помощью УЗ хорошо свариваются электродные выводы из Au, Al, Ag на ситалле, алюминиево-электродные выводы с алюминиевой пленкой, нанесенной на стекло, оловянные и оксидно-кремниевые, золотые и медные проволочные выводы ИМС с золотым покрытием. В установках УЗ-сварки применяются различные системы передачи УЗ-колебаний. Для приварки проволочных выводов и микросхем обычно применяют ультразвуковую продольно-поперечную колебательную систему с инструментом, совершающим колебания изгиба (рис. 3.15).

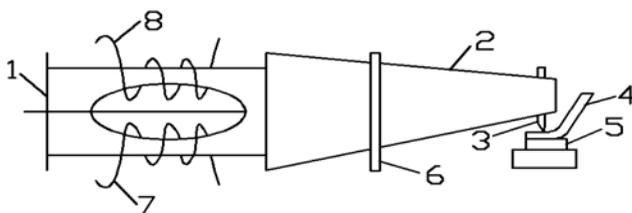


Рис. 3.15. Установка приварки проволочных выводов с применением продольно-поперечных УЗ-колебаний инструмента:
1 – преобразователь (вибратор); 2 – пондетратор (волновой); 3 – электродный вывод;
4 – кристалл; 5 – устройство крепления; 6 – обмотка возбуждения; 7, 8 – обмотки возбуждения и подмагничивания

УЗ-колебания от преобразователя 1 передаются по концентратору (волноводу) 2 расположенному перпендикулярно ему сварочному инструменту 3, который передает их проволочному электродному выводу 4 и кристаллу 5. Инструмент, совершая колебания изгиба, воздействует на электродный вывод, притирая его к кристаллу. Поверхности контакта очищаются, нагреваются, сближаются, и происходит взаимная диффузия атомов, в результате чего образуется прочное соединение электродного вывода с кристаллом. Прочность соединений, полученных УЗ-сваркой, зависит от амплитуды и частоты УЗ-колебаний инструмента, контактного усилия на свариваемые материалы, времени сварки и мощности колебательной системы. Амплитуду и частоту колебаний инструмента подбирают опытным путем для каждой пары материалов определенной толщины. Так, для материалов небольшой толщины используют малые амплитуды (0,005–0,015 мм) и повышенные частоты до 100 кГц. Пластическая деформация материалов зависит от их физико-механических свойств, толщины и приложенного контактного усилия, а также состояния поверхностей. Для электродных выводов диаметра от 20 до 50 мкм контактное усилие лежит в пределах 0,05–0,1 Н (5–100 гс). Мощность колебательной системы определяется конструкцией установки, а время сварки зависит от выбранных амплитуд и частоты колебаний инструмента, контактного усилия, а также свойств свариваемых материалов, их толщины и равно от нескольких сотых до несколько десятых долей секунды. Свариваемые поверхности должны быть чистыми, не иметь жировых клеток, грубых дефектов. Основным условием высококачественной ультразвуковой сварки является свободное контактирование соединяемых поверхностей. Интенсификации процесса ультразвуковой сварки способствует косвенный импульсный нагрев инструмента. Одновременное воздействие ультразвуковых колебаний и импульсного нагрева инструмента на соединяемые материалы повышает прочность сварного соединения при меньшей деформации выводов и позволяет соединять между собой трудно свариваемые материалы.

3.9.3. Микроконтактная сварка

Микроконтактная сварка – это процесс присоединения проводников толщиной более 20 мкм к тонким металлическим пленкам

при прохождении импульса электрического тока через свариваемые материалы и приложения некоторого давления.

По своему принципу микроконтактная сварка аналогична контактной, используемой в полупроводниковом производстве для герметизации корпусов, когда соединение деталей осуществляется с помощью двух электродов, подводящих сварочный импульс и передающих усилие сжатия на элементы с разных сторон. Такая сварка называется *двухсторонней*.

Односторонняя микроконтактная сварка отличается от двухсторонней невстречным расположением электродов. Выполняется односторонняя микроконтактная сварка двумя электродми (рис. 3.16, б), сдвоенным расщепленным (рис. 3.16, в) или строенным (рис. 3.16, г) электродом.

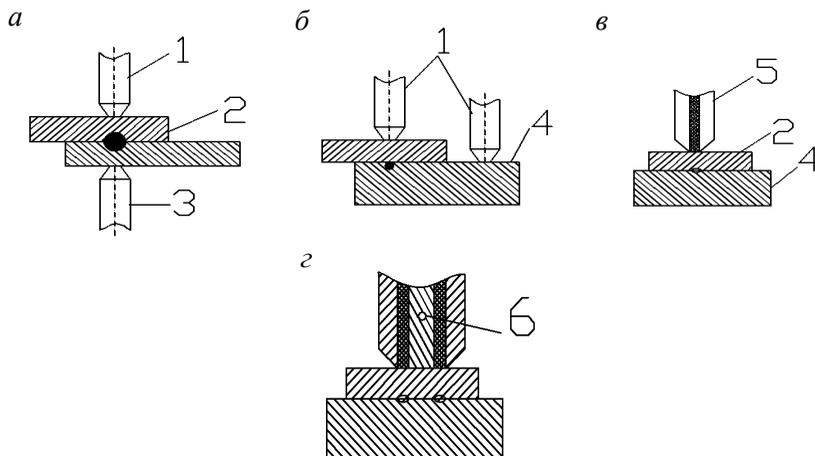


Рис. 3.16. Основные варианты микроконтактной сварки:

- а* – двухсторонняя сварка; *б* – односторонняя сварка с разнесенным переходом;
в – односторонняя сварка со сдвоенным электродом; *г* – односторонняя сварка со строенным электродом

Односторонняя сварка двумя электродами используется для соединения тонких проводников (проволоки или ленты) с относительно толстыми пленками (более 20 мкм) в местах, допустимых для размещения двух электродов. При этом импульс электрического тока проходит от электродов через слой металлизации. Первоначально ток

проходит через проволочный проводник (верхнюю деталь), сопротивление которого по мере нагрева увеличивается; наступает момент, когда ток раздваивается и начинает проходить через слой металлизации (нижнюю деталь), что способствует выравниванию температур нагрева деталей. Односторонней сваркой сдвоенным и строенным электродами присоединяют плоские и проволочные выводы диаметром от 20 до 250 мкм к тонким пленкам. Зазоры между электродами должны быть в пределах от 10 до 1000 мкм.

Так как при микроконтактной сварке электроды устанавливаются сверху на привариваемый вывод и прижимают к пленке контактной площадки, электрический ток проходит через вывод, разогревает его и сварка проходит под электродами или в зазоре в зависимости от контактного сопротивления. При микроконтактной сварке строенным электродом нагрев осуществляется трехфазным током, что создает равномерный нагрев свариваемых деталей, требуется меньшая мощность сварочного импульса и не происходит перегрев проводника в межэлектродных зазорах. Микроконтактную сварку разделяют на два вида: плавлением и сопротивлением.

При сварке плавлением оба соединяемых металла разогревают до температуры плавления и при охлаждении в сварной точке образуется ядро с литой структурой. К этому виду сварки относится двухсторонняя микроконтактная сварка. При сварке сопротивлением быстрее до температуры пластического состояния разогревается вывод, и в момент приложения усилия сжатия происходит его пластическое деформирование и взаимное схватывание атомов свариваемых металлов с образованием прочного соединения. Такое соединение характерно для односторонней микроконтактной сварки. Микроконтактная сварка обеспечивает надежное присоединение электродных выводов из различных материалов в широком диапазоне размеров к тонким металлическим пленкам. Недостатки – из-за неправильно подобранного режима возможны поломки полупроводниковых кристаллов, ухудшение электрических параметров $p-n$ -переходов, значительная деформация электродных выводов в месте присоединения. Максимальная прочность приварки электродных выводов контактной сваркой получается при оптимальном подборе формы сварочного импульса по длительности нарастания напряжения и тока, а также усилия сжатия свариваемых деталей. Эти детали и инструмент подготовлены к сварке согласно принятому технологическому процессу.

3.9.4. Диффузионная сварка

Диффузионная сварка – это способ получения в твердом состоянии монокристаллического соединения, образующегося при максимальном сближении контактных поверхностей на расстояние действия межатомных сил в результате локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в поверхностных слоях соединяемых материалов в вакууме или защитном газе. Этим способом соединяют металлы с металлом, металл с неметаллом, а также неметалл с неметаллом, т. е. такие материалы, которые другими способами не соединяются. Диффузионная сварка не требует дорогостоящих припоев, электродов, флюсов, защитных газов и механической обработки выполненных соединений; не образует окалины, шлака, грота; свариваемые детали не коробятся и свойства металлов в зоне соединения не изменяются, так как сварка происходит при невысоких температурах и давлениях; отпадает необходимость в термообработке. При сварке исключаются потери ценного металла, не увеличивается масса изделий, повышается качество и увеличивается срок службы. Диффузионная сварка применяется при соединении деталей из трудносвариваемых между собой материалов с деталями из дорогих и дефицитных материалов, с деталями из малоценных материалов, а также при ремонте деталей, соединяя изношенную часть с новой. Диффузионная сварка характеризуется основными контролируемыми параметрами: температурой, давлением и зависящим от них временем выдержки. Температура при сварке однородных материалов должна составлять 0,5–0,7 температуры их плавления, а разнородных – ту же величину, но материала с более низкой температурой плавления. Нагрев при диффузионной сварке ускоряет взаимную диффузию атомов через соединяемые поверхности, снимает макронеровности, образует более плотный контакт. Давление должно быть таким, чтобы в результате деформации все пустоты были заполнены металлом. При приложении давления разрушаются также окисные пленки. Время диффузионной сварки должно быть минимальным, но достаточным для создания плотного контакта и протекания взаимной диффузии атомов соединяемых материалов. На диффузионную сварку влияют дополнительные факторы: необходима бескислородная атмосфера (вакуум – не ниже 1,33 Па, инертный газ), чисто обработанные и хорошо пригнанные друг к другу соединяемые поверхности.

Выполняют диффузионную сварку на специальных установках – вакуумной камере с охлаждаемой водой рубашкой, высокочастотном индукторе для нагрева свариваемых деталей и гидросистеме для подачи на них давления. В полупроводниковом производстве диффузионной сваркой соединяют керамику с металлом, молибден с медью или сталью и др. Предварительно детали обрабатывают. Металлические детали травят в кислотах, отжигают в атмосфере осушенного водорода. Керамические детали шлифуют, промывают в горячем мыльном растворе, обезжиривают, прокаливают при 1400–1500 °С в атмосфере водорода для устранения поверхностных дефектов и насыщения поверхностного слоя керамики стеклофазой. Диффузионной сваркой соединяют металл как с металлизированной, так и неметаллизированной керамикой. Режим диффузионной сварки в водороде карундовой неметаллизированной керамики с бескислородной медью: температура сварки – 1030–1060 °С; удельное давление – $1,8 \cdot 10^7$ Н/м²; время выдержки – 12–15 мин. Диффузионную сварку выполняют и в обычных колпаковых печах, если вместо теплообменника установить устройство для создания давления на соединяемые детали, расположив рабочую часть его в горячей зоне колпака.

4. СБОРКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИМС. МОНТАЖ КРИСТАЛЛОВ

Под сборкой полупроводниковых приборов и ИМС понимают совокупность технологических операций, при выполнении которых получают готовые изделия. Подготовительной операцией перед сборкой является визуальный контроль, при котором удаляются отбракованные по электрическим параметрам кристаллы (с метками маркировки) с остатками фоторезиста, механическими повреждениями и другими дефектами. Важнейшая операция сборки – монтаж кристаллов на корпус или плату.

4.1. Роль монтажа в техпроцессе сборки полупроводниковых приборов и ИМС

Монтаж кристаллов в корпуса или на платы должен обеспечивать прочное механическое соединение, надежный электрический контакт, хороший теплоотвод. Выбор способа монтажа зависит от конструкции, назначений и условий эксплуатации полупроводниковых приборов и ИМС. При монтаже кристаллов используют четыре метода их присоединения: стеклом, пластмассой, приклеиванием низкотемпературную и эвтектическую пайку. Достоинством присоединения кристаллов стеклом является низкая стоимость, хорошее согласование по ТКЛР с соединяемыми материалами, а также возможность выполнения в многовыводных корпусах одновременно с пластмассовой герметизацией монтажа кристаллов и выводов. Монтажом в полупроводниковом производстве называют операции по креплению кристаллов со сформированными в них активными областями в корпуса (на ножки, кристаллодержатели). При монтаже достигаются требуемое расположение кристалла, прочное механическое соединение, надежный электрический контакт и хороший теплоотвод. После монтажа кристаллов проводится разводка выводов и герметизация приборов и ИМС. Операции монтажа кристаллов и подложек в корпуса относятся к наиболее важным и ответственным в техпроцессе сборки. В зависимости от назначения прибора кристаллы могут присоединяться и к промежуточному элементу-термокомпенсатору на плату. Используются наиболее эффективно для присоединения кристаллов пайка эвтектическими припоями, пайка низкотемпера-

турными припоями, присоединение с помощью легкоплавких стекол, приклеивание токопроводящими и токонепроводящими клеями. Интенсивно проводятся исследования по разработке процессов присоединения кристаллов методом трехфазной сварки, в частности диффузионной. При выборе способа монтажа кристаллов учитываются конструктивные особенности прибора, его электрические и тепловые характеристики, тип корпуса и другие показатели.

4.2. Монтаж кристаллов и подложек методом приклеивания

Метод приклеивания, обладая опасностью химического загрязнения и газовыделения, нестабильности термических и электрических характеристик клея, в настоящее время является наиболее распространенным по сравнению с другими способами вследствие ряда преимуществ: простоты технологии, возможности подбора материалов с комплексом необходимых свойств, соединения самых разнообразных материалов в различных сочетаниях, упрощении конструкции узлов, снижения расхода материалов. Клеевые соединения позволяют получать соединительные швы с электроизоляционными, оптически, токопроводящими и другими заданными свойствами. Недостатки – низкая теплопроводность и сложность замены кристаллов. Клеи, используемые для крепления кристаллов и подложек к корпусу полупроводниковых приборов и микросхем, должны: обеспечивать хорошую прочность соединения и сохранения своих физико-химических свойств в диапазоне рабочих температур; иметь коэффициент термического расширения, близкой к ТКЛР склеиваемых материалов; иметь высокую химическую стойкость; обладать высокими электроизоляционными и оптическими свойствами; иметь степень вязкости, обеспечивающую удобство работы; выдерживать воздействие температуры при последующих технологических операциях. Современные клеи соединяют любые материалы, образуя высокопрочные долговечные элементы, работающие в широком интервале температур и различных климатических условиях. Широко применяются токопроводящие клеи, имеющие невысокую температуру отверждения и малое время полимеризации. Их использование дает возможность исключить пайку элементов или применения эвтектики золота при посадке кристаллов. Соединение элементов приборов

этими клеями дает надежный электрический контакт на различных подложках. Клеи – полимерные материалы, их пленки при высушивании – типичные изоляторы, т. е. не проводят электрический ток. Чтобы клей был электропроводящий, в него добавляют порошок серебра. После замешивания серебряного порошка клей превращается в густую пасту. С увеличением количества серебра прочность склеивания уменьшается, но растет электрическая проводимость. Поэтому подбирается оптимальное количество серебра, чтобы эти показатели были оптимальными. Обычно электропроводящие клеи содержат от 60 до 80 % серебра. В качестве полимерной основы (связующего) используют обычно эпоксидные смолы. Клеи на основе жидких эпоксидных смол имеют ряд преимуществ: в присутствии отвердителей они могут затвердевать при низкой (комнатной) температуре, усадка клея (уменьшение объема) мала.

Монтаж кристаллов приклеиванием применяют при изготовлении полупроводниковых приборов и ИМС общего назначения, так как он прост, экономичен, не требует сложного технологического оборудования. В качестве клеев используются пластмассы – обычно эпоксидные смолы, которые обеспечивают достаточную механическую прочность и надежность соединений и имеют низкую температуру отвердевания, что исключает ухудшение параметров полупроводниковых приборов и ИМС вследствие перегрева кристалла. В зависимости от свойств пластмассы их подразделяют на диэлектрические, теплопроводящие и оптические. Для монтажа кристаллов оптоэлектронных приборов (фотодиодов, цифровых индикаторов и др.) требуются пластмассы, не содержащие наполнителей, обладающие высокой прозрачностью в диапазоне длин волн 300–700 нм, не изменяющейся в процессе эксплуатации, малой вязкостью (400–3000 СП) и отверждающиеся при 90–125 °С в течение 4–24 ч.

В жидком состоянии клеи практически не проводят ток, даже если содержат много серебра. После затвердевания клеевая пленка – хороший проводник с $\rho_v = 0,010\text{--}0,001$ Ом/см. Используются электропроводящие клеи, затвердевающие при комнатной температуре. Они – двухкомпонентные, поступают в производство в двух упаковках: в одной – смола, разбавитель и серебро, в другой – отвердитель, который вводят в клей непосредственно перед операцией склеивания. Применяются также клеи, которые затвердевают при нагреве

до 120–180 °С. Они обычно однокомпонентны. Срок годности клея – его жизнеспособность – составляет от 30 мин до 24 ч (у однокомпонентных – до года). Особую группу представляют теплопроводные клеи, которыми можно соединять детали приборов, выполненные из различных материалов: с их помощью обеспечивается теплоотвод от тепловыделяющих элементов. Для получения прочного и надежного в эксплуатации клеевого соединения нужно обеспечить хорошую смачиваемость склеиваемых поверхностей; высокая смачиваемость – основное условие склеиваемых материалов.

Клеи готовят непосредственно перед употреблением: смесь перетирают до образования густой однородной массы, не содержащей комков и крупинок. В полученную смесь вводят отвердитель и тщательно перемешивают композицию, добавляя в нее соответствующий растворитель для получения нужной вязкости. Каждую приготовленную партию контролируют по внешнему виду и вязкости.

При монтаже кристаллов клей наносят либо на их обратную сторону, либо на корпус. Клей наносят несколькими способами на подложку: вручную, с помощью трафаретной печати или специальных дозирующих устройств. Вручную клей наносят иглой, кистью, монтажной лопаткой или шприцем. Этот способ не требует сложных инструментов, но малопроизводителен и не обеспечивает равномерности нанесения клея по поверхности. Способ трафаретной печати (распылением) является более эффективным, так как точно определяются количество и площадь нанесения клея. Недостатки – для каждой схемы своя маска, установка компонентов ведется в несколько приемов. Широко применяются для нанесения клеевых композиций микродозировочные устройства, преимущества которых – строгая дозировка клея (для дозирования используются либо импульсы сжатого воздуха, либо печать специальным инструментом типа пуансона). Дозирующие устройства легко перестраивать, изменяя время выдержки, давление воздуха или применяя дозатор с другим диаметром иглы.

Изображенный на рис. 4.1 дозатор представляет емкость, заполненную компаундом, клеем или полимером, в которую от пневмостанции импульсами подается сжатый воздух. Количество вещества дозируется на конце сменных дозирующих элементов – иглы или воронки. Доза определяется изменением длительности импульса подачи сжатого воздуха, его давлением и подбором соответствующей

ших размеров дозирующих элементов. Отсутствие в дозаторе движущихся механических частей, соприкасающихся с вязкими веществами, обеспечивает его надежную, продолжительную работу и удобство обслуживанием. Дозирующая система позволяет контролировать подачу клеевых материалов с большой точностью и повторяемостью. В зависимости от размеров сопла можно получать капли клея диаметром от 0,1 мм и выше. Одновременно с нанесением капли клея производится установка вакуумным захватом кристалла, контактные площадки которого ориентируются относительно контактных площадок основания. Кристаллы приклеиваются либо в кассетах, либо бескассетным способом. Давление при склеивании необходимо почти для всех типов клеев, причем оно зависит от состава клея, его влажности и определяется способностью клея к растеканию. Собранный арматуру направляют на обработку при повышенных температурах, если применены клеи холодного отвердевания.

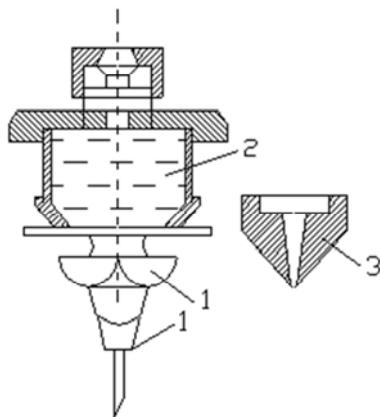


Рис. 4.1. Дозатор клея:
1 – игла; 2 – клей; 3 – воронка

Прочность клеевого соединения должна составлять $(12,5-15,0)10^6 \text{ Н/м}^2$. До отвердевания клеевого шва необходимо удалить растворители из клеевой пленки. Так как большинство клеевых композиций – это растворы смол в растворителях или смесях, то не полное удаление растворителей приводит к резкому снижению прочности соединения в результате пористость и появления усадочных напряжений после отвердевания клеевого шва. Это важно для конструкций с малой поверхностью испарения летучих веществ.

На рис. 4.2 показана характерная конструкция гибридной ИС с малой поверхностью испарения летучих веществ (приклейка подложки к основанию корпуса и навесных элементов к подложке). Так как клеевая пленка является конструктивным элементом изделия, то наличие растворителя исключается применением материалов, не содержащих растворителей и обладающих высокой нагревостойкостью. Толщина клеевого слоя в полупроводниковой технологии ограничивается, поскольку с увеличением толщины клеевого шва его прочность падает.

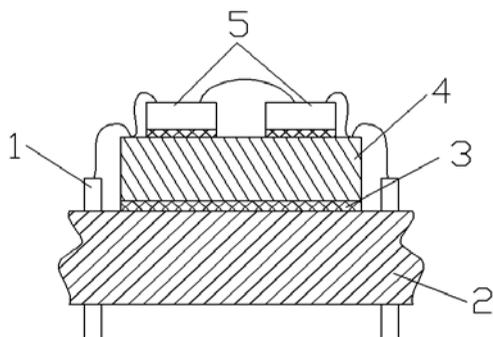


Рис. 4.2. Крепление подложки и навесных элементов ГИС с помощью клеевых соединений:
 1 – вывод; 2 – основание корпуса; 3 – клеевой слой; 4 – подложка;
 5 – навесные компоненты

Основные клеи и клеевые композиции, применяемые для монтажа кристаллов и подложек, приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Клеи и клеевые композиции, применяемые для монтажа кристаллов и подложек

Марка клея	Состав клея	Режим сушки		Примечание
		Температура, °С	Время, ч	
МК-400	Смола Т-Ш-100	18–23	48	Сохраняет прочность при 270 °С в течение 40–60 мин
	Смола Л-20, продукт АГМ-3	80–100	2–3	
ВК-4, ВК-8	Раствор фенольно-кремний-органической композиции в органическом растворителе с минеральным наполнителем	200	5	Сохраняет прочность при 320 °С в течение 40–60 мин
ВК-32-200	Полиэфирная смола, лак ФЛ-5111	60	1,0	Сохраняет прочность при 300 °С в течение 40–60 мин
		80	1,5	

Многие из ранее использованных клеев недостаточно теплостойки, содержат в своей основе летучие токсические растворители, которые обуславливают нестабильную во времени консистенцию клея, что усложняет их использование. В настоящее время созданы электро- и теплопроводящие клеевые материалы, свободные от этих недостатков; они представляют собой вязкие, подвижные пасты и отличаются от клеев-контактолов отсутствием растворителей. Вместо растворителей в их состав входят активные разбавители и пластификаторы, которые позволяют регулировать вязкость и обеспечивать ее высокую стабильность в течение всего срока хранения. К высокотеплостойким электропроводящим однокомпонентным относятся клеи ЭВТ, диапазон рабочих температур которых от 60 до 200 °С. Полученные клеевые соединения отличаются высокой электропроводностью ($\rho = 5 \cdot 10^{-4}$ Ом·см), хорошей адгезией к элементам конструкции приборов, стойкостью к воздействию влаги.

Оптические клеи, используемые в оптоэлектронных приборах, как светопроводящие должны иметь возможно высокий коэффициент преломления, близкий к коэффициенту преломления полупроводниковых материалов, и высокий коэффициент светопропускания (более 90 %). Наиболее широко применяются оптические клеи ОП-72Ф, ОП-429, ОП-430, ОП-3М. Их коэффициенты преломления (1,4–1,6) отличаются от коэффициента преломления Si (3,6) и GaAs (3,4). Поэтому достаточно большое количество света отражается на оптических границах клея и полупроводниковых материалов.

В настоящее время существуют высокопроизводительные установки (ОЗПВ-1500, ОЗПВ-2500, ЭМ-4015, ЭМ-4055, ЭМ-4085), на которых с помощью клея осуществляют монтаж кристаллов в корпусах полупроводниковых приборов и ИМС. Автоматизированная установка ОЗПВ-2500 работает в автоматическом режиме при выборке кристаллов из кассет и в полуавтоматическом – при выборке кристаллов с эластичного носителя. Выгрузка кристаллов из кассет и загрузка в кассеты осуществляется автоматически. Установка присоединения кристаллов (на клей и эвтектику) ЭМ-4015 предназначена для посадки кристаллов БИС в керамические корпуса и на отрезки лент; ее производительность – 1800 кристаллов в час, размеры кристаллов от $0,4 \times 0,4$ до 10×10 мм. В установке ЭМ-4085 поиск годных кристаллов на пластине и их присоединение проводятся автоматически. Оптико-телевизионная система распознает годные кристаллы

по отсутствию маркировочных меток, трещин и сколов. Установка ЭМ-4055 предназначена для посадки кристаллов запоминающих устройств с помощью клея в окна платы. Цикл присоединения состоит из следующих операций: нанесение клея методом штемпелевания; захват кристалла из кассеты; ориентация платы относительно кристалла; посадка кристалла. Создание пленки необходимой толщины в месте забора клея инструментом производится дозатором.

4.3. Монтаж кристаллов пайкой стеклом

В настоящее время в промышленность внедряется монтаж полупроводниковых кристаллов пайкой стеклом, к которой предъявляются следующие требования: температура пайки не должна быть высокой; коэффициент термического расширения стекла должен быть согласован с КТР исходного полупроводникового материала; стекло не должно содержать в своем составе компонентов, вредно влияющих на электрические параметры активных областей. Пайка стеклом используется пока ограничено в связи с тем, что стекло – изолятор и поэтому оно не может применяться, когда требуется электрический контакт между подложкой и стороной кристалла; оно недостаточно хорошо проводит теплоту, что не позволяет использовать его при необходимости отвода большого количества тепла; температура, необходимая для выполнения соединения стеклом (500 °С), выше, чем в других методах. При такой температуре у ряда приборов могут ухудшаться электрические параметры. Пайка стеклом рекомендуется для присоединения кристаллов небольшого размера к керамическим подложкам. Перед посадкой кристалла керамическую подложку покрывают слоем легкоплавкого стекла. Стекло выполняет роль связующего материала между кристаллом и керамической подложкой. При нагреве подложки стеклянное покрытие плавится, и расплавленное стекло припаивает кристаллы к керамике. В зависимости от физико-химических свойств применяемого стекла рабочая температура пайки составляет 500–600 °С.

Монтаж кристаллов пайкой стеклом (рис. 4.3) применяют также при массовом производстве маломощных однокристалльных полупроводниковых приборов, в которых не требуется электрический контакт между нижней поверхностью кристалла и корпусом. Стекло в виде пасты наносят методом трафаретной печати или напыле-

нием на место монтажа в корпусе, размягчают, нагревая и укладывают кристалл, охлаждая затем корпус до комнатной температуры.

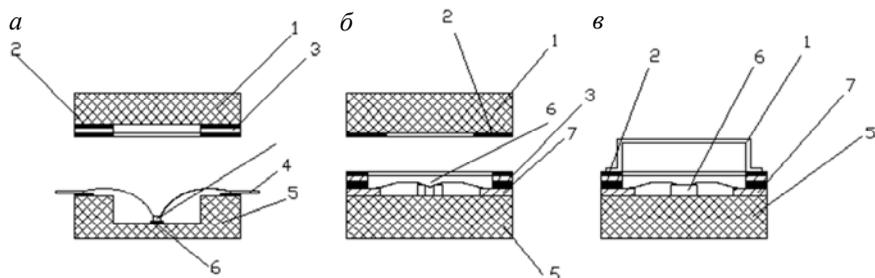


Рис. 4.3. Корпус ИС, в котором монтаж кристалла, присоединение выводов и герметизация выполнены стеклом:

1 – крышка; 2 – стеклянный припой; 3 – рамка; 4 – вывод; 5 – основание;
6 – кристалл

Корпус ИМС, в котором монтаж кристалла, присоединение выводов и герметизация выполнены стеклом, показан на рис. 4.3, а. При этом трафаретной печатью или напылением на контактные площадки керамического корпуса 5 под выводы и кристалл, а также на крышку 1 наносят стеклянный припой 2, который оплавливают в печи, не допуская кристаллизации. Затем на нагретое ($T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$) керамическое основание 5 монтируют кристалл б и присоединяют выводы 4, вдавливая их в размягченное стекло. После этого герметизируют корпус, соединяя крышку с основанием, сжимая их и прогревая при $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5 мин. При повторном нагреве происходит кристаллизация стеклянного припоя, что повышает прочность спая. В корпусе ИМС, как показано на рис. 4.3, б, стеклянный припой последовательно наносят трафаретной печатью на слои металлизации 7 для изоляции их друг от друга. Герметизируют также корпуса, соединяя стеклянным припоем 2 керамическое основание 5 корпуса с керамической крышкой 1. В корпусе ИМС, показанном на рис. 4.3, в, два слоя стеклянного припоя 2 служат для изоляции токоведущих дорожек. Корпуса герметизируют аналогично рис. 4.3, б. Основными видами дефектов при этом методе сборки является нарушение механической прочности соединения вследствие растрескивания стекла. Такое растрескивание происходит либо из-за неправильно выбранного режима процесса пайки, либо вследствие получения шва большой толщины.

Толщина шва должна составлять 10–20 мкм. Для пайки могут использоваться как легкоплавкие, так и тугоплавкие стекла.

4.4. Монтаж кристаллов пайкой низкотемпературными припоями

Присоединение кристаллов и подложек в корпус с помощью пайки низкотемпературными припоями широко используется в полупроводниковом производстве. Оно является одним из основных способов соединений, применяемых при монтаже бескорпусных транзисторов и ИМС в круглые плоские корпуса и на платы. Монтаж с помощью низкотемпературной пайки используется также при сборке кристаллов маломощных выпрямительных и импульсных диодов в металлостеклянном корпусе с охватывающим спаем, мощных транзисторов, тиристоров и диодов, монтаж активных компонентов гибридных микросхем, где необходим хороший отвод теплоты через поверхность, контактируемую с корпусом. Эффективность метода обусловлена следующими достоинствами: монтаж с помощью пайки низкотемпературными припоями позволяет получить высокую прочность соединения и минимальное переходное электросопротивление за счет значительной площади контакта навесной компонента (кристалла) с платой или держателем; хорошая ремонтпригодность – при монтаже гибридных интегральных микросхем в большинстве случаев навесные компоненты, вышедшие из строя, легко удаляются и заменяются новыми. Недостатки монтажа пайкой: необходимость нагрева всего прибора до значительной температуры (200–350 °С) и вредное влияние флюса (остатки флюсов, которые не могут быть полностью удалены, попадают на полупроводниковые структуры и могут ухудшать их электрические параметры и стабильность), необходимость работы в среде водорода или дорогостоящего инертного газа, критичность режимов пайки, особенно при монтаже кристаллов полупроводниковых приборов и микросхем с наличием Au на соединяемых поверхностях. Данный метод эффективен для соединения припоем металлизированных поверхностей кристалла или подложки с металлическими деталями корпусов, компенсаторами, держателями, ножками. Для получения высокого качества паяного соединения при монтаже кристаллов необходимо соблюдать следующие требования: применяемый способ пайки должен обеспечивать нагрев зоны пайки до температуры, несколько превышающей

температуру плавления припоя; на паяемых поверхностях кристаллов и деталей корпусов не должно быть загрязнений и слоев оксидов; для определенных паяемых покрытий должны быть выбраны соответствующие припои, они должны обладать хорошей текучестью при температуре пайки и хорошо заполнять паяемый шов, т. е. обладать хорошей смачиваемостью.

Для пайки кристаллов и навесных элементов на платы с пленочным монтажом применяют низкотемпературные припои с использованием малоактивных флюсов. Припои наносят на контактные площадки методом трафаретной печати или используют в виде таблеток (дисков).

Когда возможно соединяемые детали корпусов или участки подвергают предварительному облуживанию либо в расплаве припоя, либо нанесением припоя гальваническим методом. Участки полупроводниковых кристаллов, подлежащие пайке, для улучшения смачиваемости покрывают металлизированным слоем, представляющим тонкие пленки никеля, хрома и серебра, хрома и никеля.

Схема пайкой через прокладку низкотемпературного припоя приведена на рис. 4.4. Активация соединяемых поверхностей кристалла и держателя осуществляется действием флюсов, при бесфлюсовой пайке – средой водорода, формиру-газа или специальными компонентами припоя.

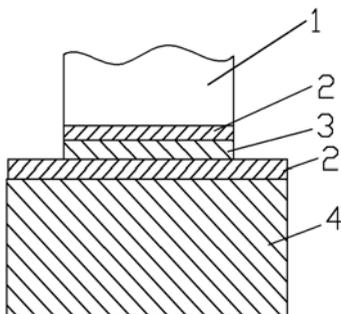


Рис. 4.4. Посадка кристалла на корпус посредством пайки низкотемпературными припоями:

1 – кристалл; 2 – легкоплавкое покрытие на кристалле; 3 – припой;
4 – основание корпуса из Cu

Пайка в конвейерных водородных печах (рис. 4.5) наиболее широко применяется для присоединения кристаллов к корпусам, держателям низкотемпературными припоями и обеспечивает высокое

качество паяных соединений. Она проводится при нагреве в печи собранных в кассеты деталей с заранее вложенным припоем. Через печь с определенной скоростью проходит непрерывно движущаяся лента, которая перемещает кассеты, установленные с одного конца трубы. Они проходят зоны нагрева, выдержки и охлаждения. Скорость движения ленты регулируется в соответствии с технологическими режимами. При проведении процесса важно соблюдать режимы: скорость нагрева и температуру, время выдержки, скорость охлаждения, расход газа, состав газовой среды. Для предохранения паяемых деталей корпусов и припоя от окисления в процессе нагрева рабочее пространство печи заполняют сухим и чистым инертным газом, который выбирают в зависимости от паяемых деталей корпусов и припоя; обычно это водород или смесь водорода с азотом.

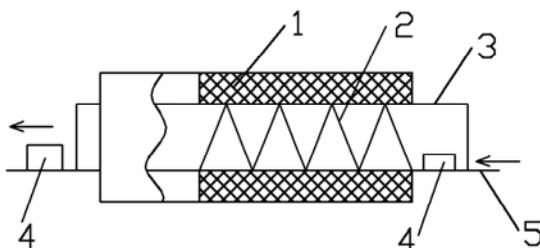


Рис. 4.5. Схема конвейерной печи:

1 – корпус; 2 – нагреватель; 3 – рабочий канал; 4 – кассета с изделиями;
5 – транспортная лента

Важным в процессе является правильная конструкция кассеты, которая должна обеспечивать в процессе пайки взаимное расположение деталей с необходимой точностью и определенное давление для контакта паяемых поверхностей. Масса кассет должна быть минимальной, чтобы не увеличивать время разогрева и охлаждения; кассеты не должны деформироваться при нагреве и охлаждении; материал кассет не должен припаиваться к деталям, выделять вредных газов и взаимодействовать с защитной атмосферой печи. Обычно для изготовления кассет применяют нержавеющую сталь.

На рис. 4.6 показана конструкция кассеты для напайки кристалла выпрямительного диода на держатель с позолоченным вольфрамовым компенсатором. При монтаже гибридных микросхем припойные шайбы и кристаллы укладывают на плату с помощью специальных трафа-

ретов. Качество собранной арматуры определяется качеством паяных швов. Один из наиболее распространенных методов контроля – визуальный осмотр. Основным критерием оценки качества пайки кристаллов низкотемпературными припоями является состояние поверхностного припоя и форма образованного паяного соединения. Паяные соединения считаются удовлетворительными, если припой имеет гладкую блестящую поверхность, отсутствуют внешние признаки дефектов: пузыри, вздутия, раковины, выплески припоя и флюса за пределы контактной площадки, наплывы и перемычки припоя.

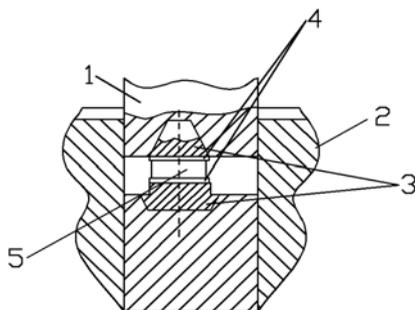


Рис. 4.6. Кассета для пайки держателя с W-компенсаторами в кристалле:
 1 – груз; 2 – корпус кассеты; 3 – золоченые W-компенсаторы;
 4 – припой; 5 – кристалл

В табл. 4.2 приведены основные виды дефектов швов и причины их возникновения.

Таблица 4.2

Основные виды дефектов паяных швов и их причины при монтаже кристаллов

Виды дефекта	Причины дефекта	Виды дефекта	Причины дефекта
1	2	3	4
Наплыв припоя	Избыток припоя, плохая смачиваемость, растекаемость	Пористость и раковины	Загрязнение припоя, перегрев деталей при пайке

1	2	3	4
Незаполнение шва	Недостаток припоя, недостаточная выдержка в нагретом состоянии	Трещины в шве	Недостаточная выдержка при нагреве, недостаточная температура нагрева, быстрое охлаждение
Смещение кристалла относительно посадочного места или контактной площадки	Неправильная сборка, изношенная оснастка каскеты, пробки		

4.5. Монтаж кристаллов методом эвтектической пайки

Основным способом крепления кристаллов полупроводниковых приборов и ИМС в корпус является соединение с помощью эвтектической пайки, подразделяющуюся на контактно-реактивную и эвтектическими сплавами. Контактно-реактивная – это пайка, при которой между соединяемыми металлами в результате контактного плавления образуется эвтектический сплав, заполняющий зазор и кристаллизующийся с образованием паяного соединения. Соединение формируется без применения флюсов, происходит в нейтральной атмосфере или на воздухе в результате разрушения и удаления оксидных пленок с поверхностей соединяемых деталей в процессе притирки одной из деталей к другой через прослойку жидкой фазы (эвтектики Au-Si или Au-Ge). На первом этапе пайки происходит взаимное растворение в тонком контактном слое соединяемых металлов в твердом состоянии. На втором этапе интенсифицируется диффузия, в результате чего атомы из расплава одного компонента переходят в твердую фазу другого компонента, переводя в жидкое состояние все новые слои контактирующих металлов. Третий этап характеризуется охлаждением металлов до температуры окружающей среды, при которой происходит их рекристаллизация. Для активации соединяемых поверхностей, заключающейся в разрушении оксидных пленок, контактно-реактивную пайку выполняют с вибрационным воздействием на кристалл, в результате чего кристаллы получают возвратно-поступательное движение в горизонтальной плоскости и притираются к фланцу нож-

ки. Происходит контактное плавление, в частности Au и Si, жидкий сплав перемешивается и процесс соединения кристалла с фланцем ускоряется. Жидкая фаза способствует измельчению оксидных пленок и удалению их из зоны контакта.

На рис. 4.7 представлена схема соединения полупроводникового кристалла с корпусом контактно-реактивной пайкой. При лицевом монтаже кристаллов небольших размеров (менее 3×3 мм) используют как УЗ, так и низкочастотные колебания, а для кристаллов больших размеров – в основном низкочастотные с большой амплитудой (до 0,5–0,8 мм). Скорость контактного плавления полупроводника и металла зависит от температуры и усилия, прилагаемого к спаиваемому кристаллу и ножке. Контактным плавлением можно управлять, изменяя температуру: при ее уменьшении останавливать процесс пайки в нужный момент, а при увеличении возобновлять его. Соединение получается в результате контактного плавления поверхности, например кремния и золота, и образования на границе раздела слоя эвтектики, которая имеет высокую активность, хорошо смачивает твердые поверхности и при кристаллизации дает прочные и сплошные соединения.

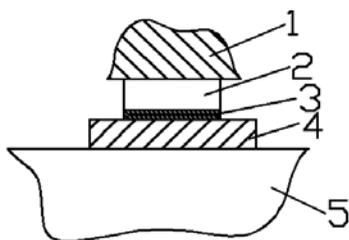


Рис. 4.7. Схема контактно-реактивной пайки с вибрацией кристалла относительно основания корпуса:

1 – вибрирующий инструмент; 2 – кристалл; 3 – эвтектический сплав;
4 – основание корпуса; 5 – столлик нагревателя

Малое содержание кремния (до 6 %) в эвтектике Au-Si исключает опасность проплавления кристалла, так как плавится в основном золото. Из диаграммы состояния системы Au и Si, представленной на рис. 4.8, следует, что эвтектическая температура достаточно высокая (370°C), чтобы соединение не разрушилось при небольших нагревах, связанных с монтажом других компонентов, разводкой выводов и герметизации прибора, но и не настолько высокая, чтобы вызвать ухудшение электрических параметров от воздействия теплоты.

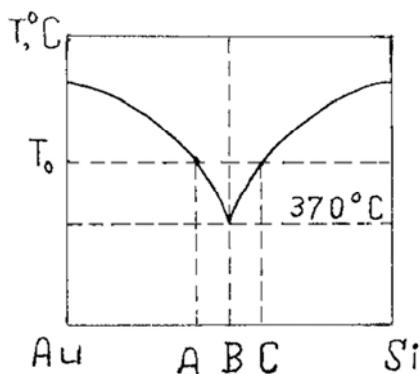


Рис. 4.8. Диаграмма состояния системы Au-Si

Существенное влияние на характеристики соединения оказывают состояния поверхности и толщина золотого покрытия корпуса. Экспериментально установлено, что для образования качественного соединения толщина золотого покрытия должна быть не менее 3 мкм. При малых размерах кристалла (менее $0,7 \times 0,7$ мм) толщину золотого покрытия можно уменьшить. При пайке эвтектическими сплавами в отличие от контактно-реактивной эвтектический сплав (обычно в виде таблетки) вводится в качестве припоя между кристаллом и монтажной площадкой корпуса (рис. 4.9). При использовании этого способа следует учитывать возможность образования пор в плоскости раздела между кристаллом и монтажной площадкой, которые могут снизить надежность приборов при их длительной эксплуатации. Припойный сплав должен иметь высокую прочность, тепло- и электропроводность, а также обладать стабильными химическими и физическими свойствами во времени и при различных температурах.

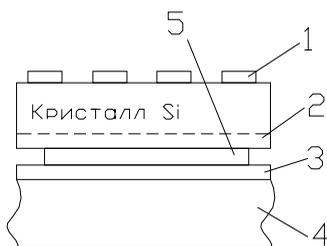


Рис. 4.9. Структурная схема присоединения кристалла эвтектическим сплавом

Пайка эвтектическими сплавами применяется для присоединения больших полупроводниковых кристаллов к ножкам (корпусам). В отличие от контактно-реактивной эвтектический сплав образуется не в результате контактного плавления соединяемых материалов, а вводится в качестве припоя между соединяемыми поверхностями кристалла и ножки.

В качестве эвтектических сплавов используют Au-Si или Au-Ge. Пайка кристалла должна обеспечить высокую воспроизводимость процесса, устранение общего, локального перегрева кристалла и температурных напряжений на его поверхности. При хорошей воспроизводимости процесса возможно получение высокого выхода годных изделий и гарантированного качества. Для этого эвтектический сплав или припой должен химически реагировать и хорошо смачивать поверхность как кристалла, так и материала монтажной площадки. Эвтектическая структура устанавливает связь между поверхностями и придает соединению необходимые свойства. Присоединение кремниевого кристалла к корпусу зависит от создания когерентной структуры в зоне раздела кристалл-корпус. Если реакция не проходит, структура не образуется и появляются раковины. Для уяснения процесса отказа в образовании структуры важно рассмотреть взаимодействия Si и Au при определенных условиях нагрева или охлаждения в фазовой диаграмме (рис. 4.8). При температуре 370 °С в расплавленном состоянии происходит смачивание поверхностей кремниевого кристалла, позолоченной монтажной площадки и образование жидкости, находящейся в равновесии с обеими поверхностями. Жидкость регулируют с кристаллами и площадкой и создают при охлаждении между ними эвтектическую структуру, устанавливающую связь между соприкасающимися поверхностями. На диаграмме видно, что эвтектический сплав превращается в жидкость при температуре T_0 . Согласно требованиям равновесия, определяемым фазовой диаграммой, эвтектическая структура в жидком состоянии не будет вступать в реакцию с Au или Si при этой температуре. Жидкость может смачивать поверхность Au и Si, но она не будет в равновесии, ни с одной из них и не происходит никакой реакции и необходимого соединения. Для того чтобы эвтектическая жидкость, золото и кремний находились в равновесии, требуется выдержка во времени и невысокая температура. Для получе-

ния химической реакции и создания соединения структура припойного сплава должна уравниваться кремнием и золотом.

Наиболее распространенный метод монтажа кристаллов с помощью эвтектической пайки заключается в нагреве системы «кремниевый кристалл–припойная таблетка–золотая монтажная площадка корпуса» до температуры, превышающей эвтектическую температуру всей системы. Золотое покрытие на монтажной площадке разбавляет припой, обогащая его золотом, и вызывает сдвиг влево точки плавления всей эвтектической структуры припойного сплава (рис. 4.8, сплав *A*). Свойства нового припойного сплава оказывают отрицательное воздействие на операцию присоединения. Приемлемые варианты – при использовании сплавов, содержащих в общей структуре больше кремния (рис. 4.8, сплав *C*). При охлаждении сплава осаждаются кристаллы кремния. Они являются единственными твердыми материалами, поддерживающими равновесие с жидкой фазой сплава *C*. Кристаллы растут до момента достижения температуры, при которой оставшаяся жидкость образует эвтектическую структуру. Сплавы, находящиеся справа от эвтектической точки остаются в равновесии с кремнием во время охлаждения. Следовательно, сплавы с большим содержанием кремния более предпочтительны при использовании в качестве припоя. На практике присоединение кристалла припоем к керамическому (металлическому) основанию корпуса (подложки или металлической выводной рамке производят таблеткой припоя из состава Au или Au – 8 % Si). При этом и других составах (табл. 4.3) разница значений коэффициентов расширения между кремнием и подложкой относительно невелика. При механической отмывке соединяемых поверхностей и температуре соединения выше 370 °С (температура плавления эвтектики) материал таблетки реагирует с кремнием, и образуется структура эвтектического сплава Au + 3,6 % Si, которая затем обогащается Si. Происходит контактное плавление с взаимодействием сплава припоя (Au – 2 % Si) с кремнием, при этом образуется тонкая пленка жидкой фазы эвтектического состава Au + 31 % Si или Au + 6 % Si, которая при обогащении кремнием переходит в твердожидкое состояние, закрепляющее кристалл в корпусе. Пайка эвтектическими сплавами по сравнению с контактно-реактивной имеет ряд достоинств: эвтектические сплавы имеют невысокую температуру плавления, хорошую жид-

котекучесть и способность смачивания, а также незначительное время нагрева до температуры пайки, в паяном соединении не создается больших остаточных напряжений, образующихся вследствие разницы КТР соединяемых материалов. Введение эвтектического сплава между соединяемыми поверхностями способствует сглаживанию на них шероховатости и неровности.

Таблица 4.3

Состав и точка плавления материалов припоя, используемого для соединения кристалла и подложки

Состав	Температура, °С	
	ликвидуса	солидуса
80 % Au, 20 % Sn	280	280
92,5 % Pb, 5 % Ag, 5 % In	300	–
97,5 % Pb, 1,5 % Ag, 1 % Sn	309	309
95 % Pb, 5 % Sn	314	310
98 % Au, 2 % Si	800	370
100 % Au	1063	1063

Нерастекающийся припой свидетельствует о плохой смачиваемости его поверхности ножки и кристалла при недостаточно высокой температуре пайки, что является одной из причин низкой прочности паяного соединения. Появление трещин и сколов на кристаллах связано с большим усилием, прикладываемым к рабочему инструменту, или слишком резким подъемом температуры пайки по сравнению с оптимальной.

Пайка кристалла к ножке эвтектическим сплавом представлена на рис. 4.10 и состоит из нескольких операций: захвата прокладки *1* из эвтектического сплава, ее переноса и укладки на место пайки (рис. 4.10, *а*), захвата кристалла *б*, переноса и присоединение его к ножке (корпусу) *з* (рис. 4.10, *б*). Захват, перенос и удерживание прокладки и кристалла выполняют специальным инструментом *2*. При этом усилие захвата и удержание прокладки или кристалла создается вследствие перепада давления (атмосферного и разрежения). Инструмент представляет собой вакуумное захватывающее приспособление для переноса и прижима кристалла.

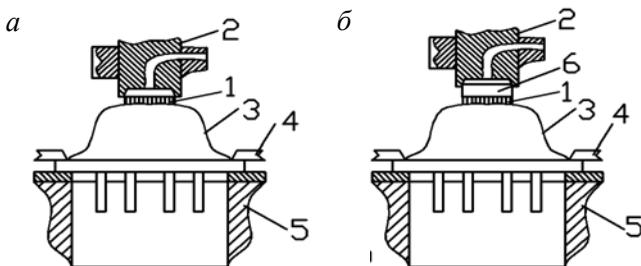


Рис. 4.10. Пайка кристалла к ножке эвтектическим сплавом:
a – захват прокладки и укладка ее на ножку; *б* – захват и укладка кристалла на прокладку;
 1 – прокладка; 2 – инструмент (вак. пинцет); 3 – ножка; 4 – устройство прижима
 ножки к нагревателю; 5 – нагреватель; 6 – кристалл

Наибольшее распространение получил инструмент с прямым хвостовиком, имеющий наконечник с центральным отверстием для крепления кристалла (рис. 4.11, *a*), так как при плоском торцевом инструменте (рис. 4.11, *б*) возможно смещение кристалла в процессе соединения. Кристалл захватывается инструментом и центрируется наклонными рабочими площадками, расположенными под углом 90° .

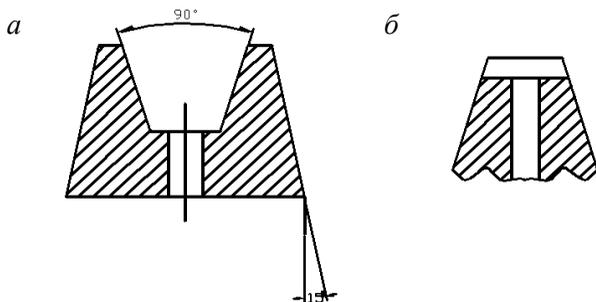


Рис. 4.11. Конфигурация наконечников инструмента
 для присоединения эвтектической пайкой:
a – с углублением в виде канавки; *б* – с плоским торцом

Углубление в наконечнике служит для предотвращения относительного сдвига кристалла и инструмента при подаче на последний УЗ и механических колебаний. Высота усеченной пирамиды рассчитывается, чтобы половина толщины кристалла выступила из-под торца инструмента.

Инструмент для монтажа должен обеспечивать точный захват кристаллов и точное присоединение и иметь высокую стойкость к износу. Для повышения качества крепления кристаллов методом эвтектической пайки используют трехкомпонентные системы, когда добавление третьего компонента к системе Au-Si вызывает понижение точки плавления. Трехкомпонентная система должна быть эвтектической. Для того чтобы $T_{\text{эвтектики}}$ трехкомпонентной системы была ниже 370°C , один из компонентов двухкомпонентной системы должен иметь $T_{\text{эвтектики}}$ ниже 370°C . Наиболее полно отвечает этим требованиям олово.

4.6. Контроль качества монтажа кристаллов

Контроль качества выполнения операций монтажа кристаллов является неотъемлемой частью технологического процесса сборки. Его роль не менее значительна и на стадиях создания новых типов микросхем и выборе оптимального техпроцесса их производства. Наиболее известным является метод оценки качества приложением сдвигающей нагрузки вдоль плоскости раздела кристалл–подложка (рис. 4.12). Этот метод оценки прочности присоединения может выполняться как разрушающий, когда нагружение увеличивается до полного разрушения соединения (или кристалла), или как контроль на заданную прочность, когда разрушаются потенциально негодные соединения. Однако в обоих случаях процесс занимает много времени и не дает полной оценки качества соединения.

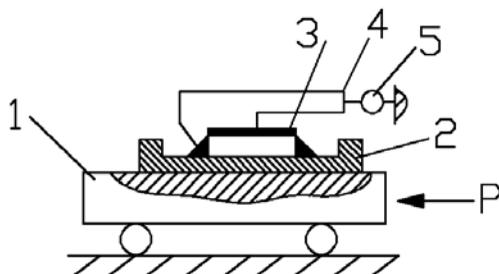


Рис. 4.12. Схема контроля прочности соединения кристалла:
 1 – кристалл; 2 – корпус прибора; 3 – подвижная каретка;
 4 – зацеп; 5 – динамометр

Для первичной оценки качества присоединения пользуются визуальной оценкой: при наличии 0,5 периметра кристалла эвтектики присоединение считается качественным (в ответственных случаях принимают 3/4 периметра). Объективную оценку при неразрушающем контроле дают следующие методы: метод оценки напряженного состояния кристалла; метод теплового сопротивления; метод рентгеноскопии и рентгенотелевизионной микроскопии. Причинами отказов могут служить остаточные внутренние напряжения в полупроводниковых кристаллах, появляющиеся в результате механических и тепловых воздействий в процессе сборки микросхем. Поэтому и оценка напряженного состояния системы кристалл–подложка для определения остаточных внутренних напряжений имеет важные значения. В практике находят применение рентгенографический и интерферометрический методы оценки напряжений. Рентгенографический метод оценки напряжений основан на измерении межатомных расстояний, изменяющихся под воздействием напряжений. Достоинством этого метода является возможность измерения не только напряжений в тонком и поверхностном слое в кристаллах, но и радиусов их изгиба. Однако рентгенографический метод является очень трудоемким при измерении и сложным в расшифровке результатов. Метод интерферометрии позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние системы кристалл–подложка. Расчет напряжений производится по расшифровке интерферограммы, в которой одной интерференционной полосе соответствует изменение деформации поверхности, равное половине длины волны λ излучения лазера (рис. 4.13).

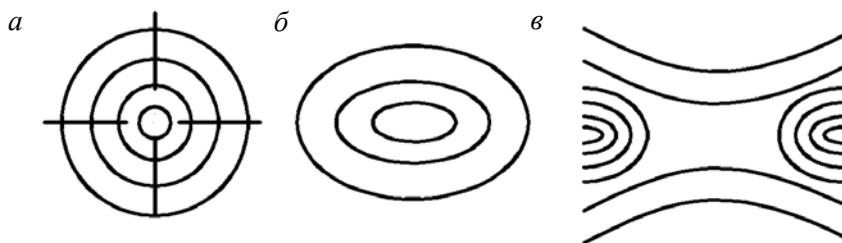


Рис. 4.13. Интерферограммы:
a – в виде круговых колец; *б* – овалобразных колец;
в – седлообразных дуг

4.7. Прогрессивные направления в производстве полупроводниковых приборов и ИС

Сборка на ленте-носителе. Прогрессивным направлением в производстве полупроводниковых приборов и ИМС является их сборка на гибкой ленте-носителе. Широкое освоение такой технологии сборки способствует значительному снижению стоимости приборов и ИМС, так как резко повышается уровень механизации, автоматизации и уменьшаются затраты на материал. Лентой-носителем служит тонкая (толщиной 0,05–0,15 мм) полиамидная или полиэфирная пленка одно-, двух-, трехслойная пленка шириной от 8 до 70 мм.

Полиамидные и полиэфирные пленки. Полиамидные пленки обладают высокой термостойкостью (возможен их кратковременный нагрев до 400 °С), стабильными физико-химическими свойствами при воздействии кислот. Их можно подвергать селективной химической обработке и использовать в качестве подложек для вакуумного напыления металлических пленок. Основные свойства полиамидных пленок: предел прочности при растяжении и температуре 25 °С – $1,8 \cdot 10^9$ Па; максимальное относительное удлинение при этой температуре – 70 %; температурный коэффициент линейного расширения в интервале от –14 до +38 °С – $2 \cdot 10^{-5}$ 1/°С; коэффициент теплопроводности при 25 °С – $1,6 \cdot 10^3$ В/(м·К), при 300 °С – $2 \cdot 10^3$ В/(м·К); срок службы при нормальных атмосферных условиях и $T = 250$ °С – 8 лет, при $T = 300$ °С – 3 года, $T = 400$ °С – 1,2 года; гигроскопичность при относительной влажности 50 % и $T = 25$ °С – 1,3 %; электрическая прочность при $T = 25$ °С – $3 \cdot 10^6$ В/м; диэлектрическая проницаемость при $T = 25$ °С и частоте 1 кГц – 3,5; $\text{tg} \delta$ при $T = 25$ °С и частоте 1 кГц – $2,5 \cdot 10^{-3}$; объемное электрическое сопротивление при $T = 25$ °С и $U = 125$ В – 10^{15} Ом·см; поверхностное электрическое сопротивление при относительной влажности 50 % и $T = 25$ °С – 10^{16} Ом/□.

Полиэфирные пленки на основе полиэтиленрефталата являются перспективным материалом, так как в 10 раз дешевле полиамидных и более устойчивы к воздействию влаги и высокой температуре. Наибольшее распространение получили двух- и трехслойная лента-носитель, технологический процесс изготовления которых состоит из нанесения на поверхность пленки адгезионного слоя (фенола, эпоксида, полиамида) толщиной 10–250 мкм и его сушки. После резки

пленки на заготовки требуемой ширины, пробивки краевой перфорации и отверстий под кристаллы на нее наклеивают медную фольгу толщиной 35 мкм. В медной фольге фотолитографией получают паучковые выводы (шириной 60–100 мкм) и последовательно осаждают на них слои Au и Sn. В результате получают ленту-носитель с большим количеством паучковых выводов, к внутренним концам которых присоединяют кристаллы (платы), а наружные, отрезаемые от ленты-носителя, монтируют на выводные рамки, печатные платы или в многовыводные корпуса. Для присоединения термокомпрессией, пайкой или УЗ-сваркой к паучковым выводам ленты-носителя кристаллов на них создают металлические выступы (столбики) высотой около 125 мкм, что предохраняет контактные площадки кристаллов от разрушения. Выступы должны выполняться из металлов, не диффундирующих в полупроводниковый кристалл (хрома, меди, титана, вольфрама, никеля и золота). При изготовлении выступов на алюминиевую пленку контактных площадок кристаллов последовательно напылением наносят слои хрома, меди, золота, а затем гальванически осаждают еще один слой золота толщиной 12–25 мкм.

Производительность автоматической сборки полупроводниковых приборов и ИМС на ленте-носителе составляет 1000–2500 шт./ч. Лента-носитель с собранными приборами может быть свернута в рулон или нарезана в виде отрезков заданной длины. Герметизируют такие приборы обычно заливкой пластмассой. Последовательность сборки полупроводниковых приборов и ИМС на гибкой полиимидной ленте-носителе показана на рис. 4.14. Вначале на автоматической установке (рис. 4.14, *a*) присоединяют выступы 5 кристаллов 6 к внутренним (электродным) паучковым выводам 2 гибкого носителя 4. Предварительно кристаллы, размещенные на определенном расстоянии друг от друга, приклеивают воском 7 к подложке 9, которую закрепляют на ленте-носителе 8. Каждый кристалл поочередно автоматически устанавливается под термод (головку для пайки или сварки) 1, который опускается до соприкосновения с паучковыми выводами. При прохождении импульса тока происходит нагрев и пайка одновременно всех выводов с выступами 5 кристалла. При пайке таких металлов, как золото и олово, температура области контакта достигает 280 °С, воск под кристаллом расплавляется и лента-носитель вместе с присоединенным к ней кристаллом приподнимается, затем носитель 4 и ленточный носитель 8 кристаллов передвигается на

очередную позицию и цикл повторяется. Пайка выводов, например Au-Au, происходит при 550 °С за 0,25 с; прикладываемое усилие составляет 0,13 Н. Собранные полупроводниковые приборы и ИМС можно непосредственно монтировать в аппаратуру, вырубая их из носителя 4 и приваривая внешние выводы к печатным платам. При непосредственном монтаже в аппаратуру лента 10 с выводными рамками (рис. 4.14, б) и носитель 4 с припаянными приборами синхронно подаются с определенным шагом на рабочую позицию установки.

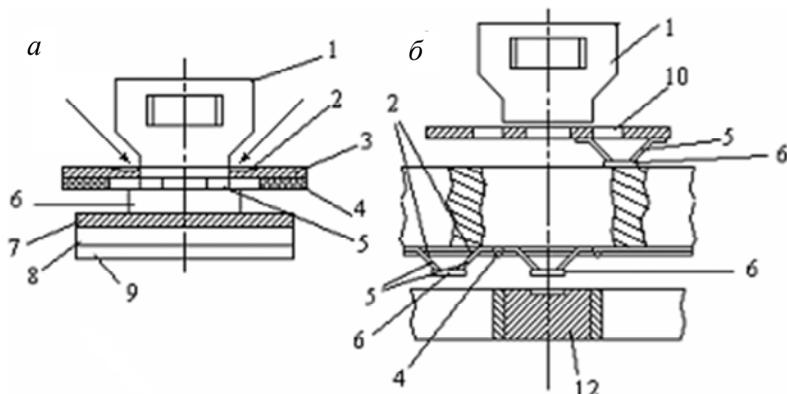


Рис. 4.14. Последовательность сборки полупроводниковых приборов на гибкой ленте-носителе:

a – присоединение кристалла к паучковым выводам; *б* – вырубка паучковых выводов и приварка их к выводам рамки; 1 – термод; 2 – паучковые выводы; 3 – Cu-фольга; 4 – носитель; 5 – выступы на кристалле; 6 – кристалл; 7 – воск; 8 – лента-носитель; 9 – подложка; 10 – лента с выводными рамками; 11 – матрица; 12 – пуансон

При совмещении прибора и выводной рамки включается механизм, который матрицей 11 и пуансоном 12 при его движении вверх вырубает паучковые выводы вместе с прибором из носителя 4. Затем вырубленный прибор прижимается к выводной рамке и опускается термод 1, сваривающий их выводы. После этого пуансон опускается, термод поднимается и цикл повторяется.

4.8. Оборудование для монтажа кристаллов

Присоединение кристаллов к корпусу прибора выполняется на специальных установках монтажа методом эвтектической пайки, пайки стеклом либо с помощью клея. В современном оборудовании

для монтажа кристаллов в корпуса (или на платы) захват кристаллов выполняется вакуумным инструментом (присоской), который поочередно берет их с липкой ленты-носителя после разделения полупроводниковой подложки. В момент захвата вакуумным инструментом кристалл отделяется от липкой ленты толкателем-подколом с обратной стороны. Инструмент, используемый для захвата кристаллов, представляет капилляр с расширенным книзу отверстием. Узкой верхней частью отверстия инструмент соединяется с вакуумной системой, а широкая нижняя служит для захвата и удержания кристаллов. Широкая часть отверстия может быть выполнена либо в виде конуса (рис. 4.15, *а*) для неориентированного монтажа кристаллов, либо в виде четырехгранной пирамиды (рис. 4.15, *б*) или квадрата (рис. 4.15, *в*) для ориентированного монтажа.

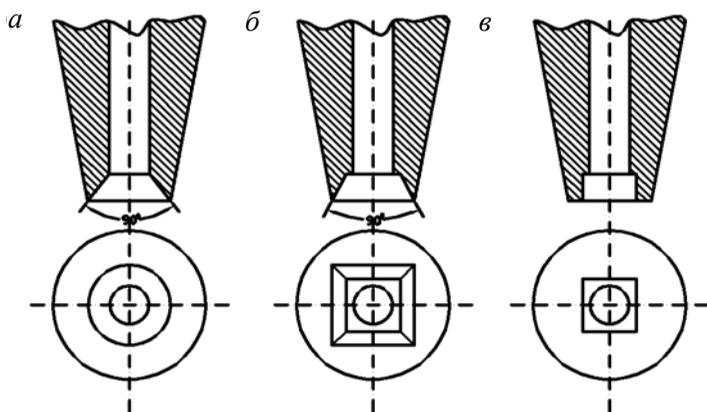


Рис. 4.15. Виды широкой части отверстий капилляра:

- а* – в виде конуса для неориентированного монтажа кристаллов;
- б* – в виде 4-гранной пирамиды для ориентированного монтажа;
- в* – в виде квадрата для ориентированного монтажа

Соотношения глубины этого отверстия и толщины кристаллов должны быть такими, чтобы при захвате и переносе на очередную позицию кристалл не менее чем на половину толщины находился вне инструмента. Изготавливают инструмент для монтажа кристаллов из быстрорежущей или нержавеющей стали, керамики, титана или другого материала, обладающего высокой нагревостойкостью и не смачивающегося припоем (клеем). Современные установки для мон-

тажа кристаллов имеют единую функциональную схему и состоят из координатного стола, предметного столика, монтажной головки с инструментом, устройства загрузки-разгрузки, микроскопа, оптического указателя (световой указки), устройства питания и программного управления.

Характеристики установок монтажа кристаллов. Установки монтажа кристаллов конструируются по двум принципиальным кинематическим схемам. По первой схеме на двух параллельных позициях производятся подготовительные операции над объектами сборки: на первой позиции один корпус прибора или отрезок выводной рамки подается на монтажный столик и нагревается до заданной температуры; на второй позиции с пластины снимается кристалл, годный по внешним признакам. Затем механическое устройство с помощью инструмента производит сьем кристалла, переносит его в корпус прибора на монтажном столике и присоединяет. При конструировании по второй схеме предполагается, что кристалл на позиции съема может иметь достаточно свободную ориентацию. Поэтому в данной схеме сьем кристалла осуществляется присоской, и он помещается на промежуточную позицию, где ориентируется специальным механическим устройством, после чего производится сьем его инструментом и присоединение к корпусу. Отличительные особенности моделей установок монтажа кристаллов обусловлены различием технических решений устройств, методами присоединения кристалла, типом корпуса прибора, размерами кристаллов и т. д. В упрощенном варианте оператор с помощью микроскопа совмещает инструмент 1 (рис. 4.16) с кристаллом, расположенным на предметном столике 3.

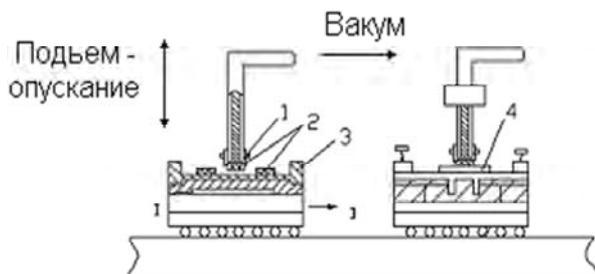


Рис. 4.16. Схема монтажа кристаллов:

1 – инструмент; 2 – кристалл; 3 – предметный столик; 4 – корпус прибора

Затем осуществляется захват кристалла с помощью вакуума, перемещение и присоединение его к корпусу прибора 4. При необходимости вокруг монтажной площадки корпуса создается защитная газовая среда, а охлаждение осуществляется обдувом через инструмент. Основные технические характеристики установок монтажа кристаллов приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Технические характеристики установок монтажа кристаллов

Характеристика	Семейство полуавтоматов		Семейство автоматов	
	ЭМ-4025	ЭМ-4015	ЭМ-4085	ЭМ-4105
1	2	3	4	5
Обрабатываемые изделия				
Размеры присоединяемых кристаллов, мм	От 0,4 × 0,4 до 6 × 6	От 0,4 × 0,4 до 4 × 4	От 1 × 1 до 4 × 4	От 0,35 × 0,35 до 2 × 2
	Кристаллы поступают в виде полупроводниковых пластин на адгезионном носителе. Допускаются многорядные кассеты с предварительной укладкой годных кристаллов			
Требования к кристаллам на адгезионном носителе	–		Зазор между кристаллами не более 50 мкм. Маркировочный знак не должен затрагивать край кристалла	
Установки				
Метод присоединения кристаллов	Эвтектическая пайка с наложением колебаний; посадка на клей; эвтектическая пайка с таблеткой припоя и наложением колебаний			
Температура нагрева рабочей зоны, °С	Регулируется в пределах от 150 до 650		Регулируется в пределах от 250 до 500	
Допускаемое отклонение установленного значения температуры нагрева рабочей зоны, °С	Не более ±5 °С			
Температура нагрева инструмента, °С	Регулируется в пределах от 120 до 300			

Продолжение табл. 4.4.

1	2	3	4	5
Допускаемое отклонение установленного значения температуры нагрева инструмента, °С	Не более $\pm 30^{\circ}\text{C}$			
Погрешность присоединения кристаллов: по координатам x , мм по координатам y , мм	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,125$	$\pm 0,150$
	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,125$	$\pm 0,150$
Усилие сжатия соединяемых элементов, Н	От 0,8 до 5	От 0,25 до 6,0	От 0,4 до 3,0	От 0,2 до 1,5
Допустимое отклонение усилия сжатия, %	Не более $\pm 5\%$			
Предел регулирования длительности присоединения: при работе без колебаний, с при работе с колебаниями, период, с	От 0,1 до 9,9			
	От 1 до 200			
Время автоматического определения положения кристалла, с	—	—	Не более 0,4	
Погрешность позиционирования координатного стола, мкм	Не более ± 10		Не более ± 20	
Рабочий ход координатного стола по координатам x , y , мм	120 × 160		180 × 180	

1	2	3	4	5
Система управления	Микропроцессорное управление	Комбинированные схемы	Микропроцессорное управление с развитой диагностикой электронных узлов	
Среднее время наладки монтажного прибора, ч	0,1	1,0	2,0	1,0
Связь с верхним уровнем управления	–	–	0,2	

Современное оборудование монтажа кристаллов оснащено быстродействующими механизмами, большим числом перепрограммируемых технологических параметров, развитым интеллектом, системой технологического зрения и т. д.

Режимы работы установок монтажа кристаллов. Установки монтажа кристаллов могут иметь два основных режима работы (автоматический и полуавтоматический) и ряд вспомогательных, позволяющих производить наладку и перепрограммирование установок для различных приборов.

В автоматическом режиме работы загрузочно-разгрузочное устройство подает корпус прибора либо отрезок выводной рамки на монтажный столик, где осуществляется его подогрев до заданной температуры. Одновременно осуществляется поиск годного кристалла на пластине системой технического зрения с помощью координатного привода. Годный кристалл, поданный на позицию подкола, снимается с липкого носителя и помещается в корпус прибора, где он и присоединяется. Установки ЭМ-4085 имеют конвейерную схему, реализуемую с помощью мальтийского креста, что позволяет производить несколько операций одновременно. Автоматический режим установки: в результате вращения распредела инструмент снимает кристаллы с крестовины, затем координатный стол перемещает инструмент с кристаллом на позицию монтажа. После установки кристалла в корпус прибора распредел останавливается, и с помощью координатного стола, после интервала заданной длительности, осуществляется вибрация инструмента. По окончании монтажа кристалла запускается распредел, в результате чего инструмент поднимает

ется, а поданный на параллельную позицию подкола годный кристалл снимается присоской с липкого носителя и укладывается на крест. После подъема инструмента осуществляется запуск механизма подачи, на позицию монтажа подается очередной прибор и цикл повторяется. Во время работы автомата оператор производит смену магазинов подачи, а после остановки автомата по концу обхода пластины с кристаллами – смену пялец. В процессе работы автомата осуществляется автоматический контроль следующих условий устойчивой работы: отсутствие засорения отверстия креста, достаточного давления сжатого воздуха, минимального давления вакуума, заданной температуры нагрева, а также производится диагностика работы основных узлов установки.

Полуавтоматический режим работы отличается от автоматического тем, что поиск годного кристалла и его ориентация на позиции подкола осуществляются оператором с помощью визиров на экране видеоконтрольного устройства либо оптического оператора. Оператор визуально оценивает годность кристалла, находит годный, и по его команде кристалл автоматически монтируется в корпус прибора. Количество и содержание вспомогательных режимов обусловлены особенностями конструкции отдельной установки, уровнем автоматизации, сложностью переналадки и другими факторами. Вспомогательные режимы рассматриваем для установок семейства ЭМ-4085.

Режим «Обучение» предназначен для задания значений переменных величин на этапе наладки установки и настройки на новый тип прибора, в частности: данных о размерах кристаллов; масштабных коэффициентов механической и телевизионной систем координат; порога в зонах разбраковки кристалла по визуальный дефектам поверхности; траекторий движения инструмента при вибрации; количества шагов носителя на краю пластины перед перемещением на следующую строку положения кристаллов; параметров вибрации инструмента; количества присоединяемых кристаллов в одном корпусе прибора; количества циклов работы установки до контрольной проверки исходного положения координатных столов; времени прогрева корпуса прибора; координат позиции выгрузки неориентированного кристалла, захвата кристалла, монтажа кристаллов.

Режим «Наладка» предназначен для включения механизмов установки в отдельных фазах ее работы, при этом предусматривается: задание быстрого и медленного вращения распределителя с индикации

ей выхода преобразователя углового перемещения; управление устройством перемещения полупроводниковой пластины; включение вибрации инструмента; диагностирование запоминающих устройств системы управления.

Режим «Поиск» предназначен для проверки работы и правильности настройки системы поиска кристалла. При этом автоматически осуществляется подача кристалла в зону распознавания, совмещение его с визиром на экране видеоконтрольного устройства и анализ годности кристалла. Если кристалл годен, на экране появляется рамка, если не годен – перекрестье, если кристаллов нет – метка, если смещение кристалла больше нормы, осуществляется гашение визира. Очередной кристалл подается на позицию спустя 0,6 с, что дает возможность оператору оценить погрешность совмещения кристалла и правильность его разбраковки.

5. ПРИСОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ ВЫВОДОВ

5.1. Общие сведения

Создание надежного электрического контакта между контактными площадками полупроводниковых кристаллов (подложек) и корпусов, способного безотказно работать в различных условиях эксплуатации, является важным технологическим процессом производства полупроводниковых приборов и ИМС. Присоединение тонких алюминиевых или золотых проволочек – электродных выводов – остается малопроизводительной, трудоемкой, с низкой надежностью операцией, которую выполняют на специальных установках с визуальным наблюдением и ручным ориентированием инструмента и проволоки с местом присоединения. В отдельных случаях стоимость присоединения электродных выводов составляет 50 % стоимости микросхемы; половина всех отказов микросхем также происходит из-за нарушения электрического контакта. Методы присоединения электродных выводов можно разделить на проволочные и беспроволочные. К проволочным (наиболее распространенным методам) относятся термоконтактная (термокомпрессия), УЗ-сварка, микроконтактная сварка, а также пайка. К беспроволочным методам (отсутствие проволочных электродных выводов) относятся монтаж перевернутого кристалла (флип-чип) и кристалла с балочными выводами.

Кристалл полупроводникового прибора или ИМС выполняет свои функции только после присоединения к его активным областям металлических проводников-выводов, которые служат для подключения к внешним электрическим цепям. В полупроводниковых приборах и ИМС, когда величина контактных площадок составляет десятки или единицы микрометров, процесс присоединения выводов является очень сложным. Наиболее универсален и широко используется в промышленности метод лицевого присоединения, где в качестве выводов применяются гибкие металлические проводники (рис. 5.1).

Выполнение неразъемных соединений в полупроводниковом производстве имеет ряд специфических особенностей: большая разница в толщине соединяемых элементов – металлические проводники толщиной или диаметром 10–200 мкм должны присоединяться к тонким (0,05–5,00 мкм) пленкам, нанесенным на диэлектрические, полупроводниковые или металлические подложки; ограничение терми-

ческого и механического воздействия на активную область полупроводникового прибора, керамическую подложку гибридной микросхемы или металлостеклянные спаи корпуса; необходимость сварки разнородных материалов; высокие требования к качеству и воспроизводимости качества соединений; высокая производительность процессов и оборудования.

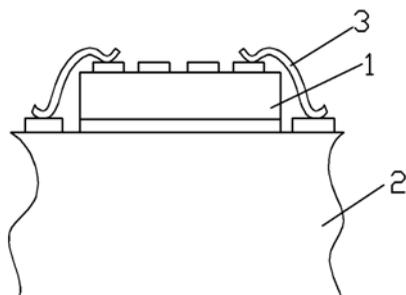


Рис. 5.1. Структура прибора с гибкими металлическими проводниками:
1 – кристалл; 2 – подложка; 3 – вывод

Большое значение при выборе технологии разводки имеет оценка металлургической совместимости свариваемых материалов (металл–металл, металл–полупроводник). Разнородные металлические пары в зоне контакта могут служить (например, соединение Au с Al – пурпурная чума) причиной полных отказов приборов. Для присоединения и разводки выводов широко используются следующие способы сварки: ультразвуковая, одно- и двухсторонняя контактная и точечная, термокомпрессионная, давлением с импульсным косвенным нагревом. Могут также использоваться комбинации указанных способов, например, ультразвуковая сварка с импульсным косвенным нагревом. У отдельных типов приборов разводка выводов осуществляется пайкой низкотемпературными припоями. Материалом для выводов микросхем и полупроводниковых приборов обычно служит алюминиевая, золотая, серебряная или медная проволока (в отдельных типах приборов применяют облуженную или золоченную никелевую или медную плющенко). Такие выводы пластичны, хорошо проводят тепло и электрический ток, имеют низкое сопротивление в контакте с металлическими пленками, наклеенными на полупроводниковые структуры (Au, Ni, Al). Обеспечение высо-

кой пластичности позволяет образовать прочное соединение при определенной деформации в зоне создания сварного соединения. При пластическом течении проводника по другой свариваемой детали вытесняются из зоны соединения адсорбированные газы, тонкие жировые и оксидные пленки, которые всегда присутствуют на поверхности металлов и неметаллов. Характер протекания процесса образования и его качество определяют состояние соединяемых поверхностей, что заметно при присоединении проводников к тонким пленкам. Присоединение проводников к тонким пленкам сразу же после их получения позволяет создавать качественные соединения при умеренных параметрах режима.

5.2. Методы беспроводного монтажа

Постоянно расширяющееся производство изделий полупроводниковой микроэлектроники, в частности сверхбольших интегральных микросхем, где увеличивается плотность монтажа и количество микросоединений, методы беспроводного монтажа ставятся на первое место в технологическом процессе сварки, поскольку он открывает большие возможности автоматизации производства, увеличения производительности и повышения надежности изготавливаемых приборов. Сущность беспроводного монтажа состоит в одновременном соединении кристалла с выводами корпуса, металлической лентой носителя или пленочными контактными площадками на подложке (рис. 5.2). Технология беспроводного монтажа включает в себя две основные операции: изготовление на кристалле или подложке жестких выводов, монтаж кристаллов с жесткими выводами на подложку с контактными площадками или в корпус. Жесткие выводы делятся на столбиковые (шариковые, формы усеченного конуса, пирамида) и консольные (балочные и паучковые).

В зависимости от способов создания контактных выступов на площадках и соединения активной зоны кристалла с выводной рамкой различают следующие методы беспроводного монтажа: монтаж методом «перевернутого» кристалла, монтаж приборов и микросхем с балочными выводами, монтаж микросхем с помощью гибкого носителя (паучковое соединение).

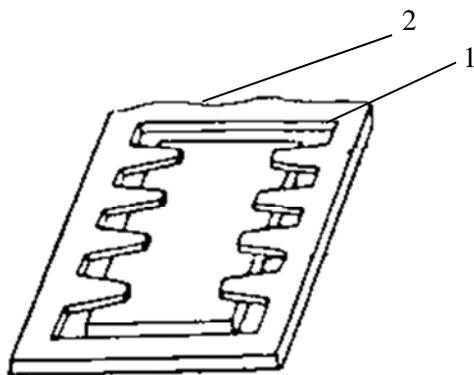


Рис. 5.2. Структура беспроводного монтажа:
1 – балочные выводы; 2 – кристалл микросхемы

5.3. Монтаж методом перевернутого кристалла

Монтаж кристаллов с жесткими выводами на плату состоит из операций: ориентации кристалла, совмещения столбиковых выводов с контактными площадками платы и непосредственно операции монтажа (сварки или пайки). Столбиковые выводы могут быть выполнены из припоя или из меди, покрытой припоем. Схема монтажа кристаллов со столбиковыми выводами из припоя приведена на рис. 5.3.

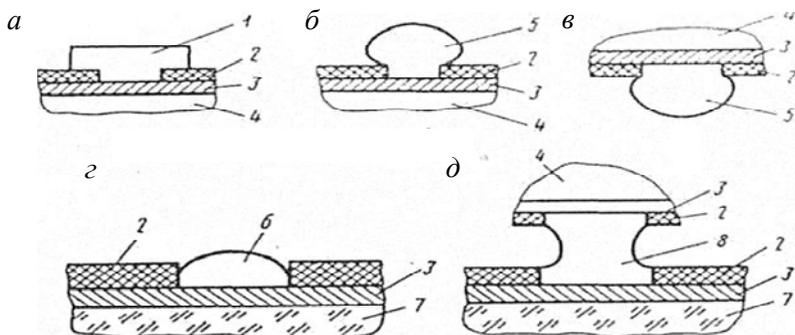


Рис. 5.3. Монтаж кристаллов со столбиковыми выводами
из низкотемпературного припоя:

- а, б* – нанесение гальваническим способом припоя и его оплавление; *в* – переворачивание кристалла; *г* – нанесение припоя на плату; *д* – присоединение кристалла к подложке;
1, 5 – припой, нанесенный на кристалл и оплавленный; 2 – пленка диоксида кремния;
3 – слой металлизации; 4 – кристалл; 6 – припой, нанесенный на плату; 7 – плата;
8 – столбик припоя

Наиболее распространены столбиковые выводы в виде шариков из меди, покрытые низкотемпературным припоем – сплавом олова и висмута (0,5 %). При плавлении припоя медные шарики одновременно служат дистанционными элементами, предотвращающими закорачивание между соединениями. Монтаж методом перевернутого кристалла с такими выводами на подложку проводят способом пайки на специальных установках (рис. 5.4). Кристалл монтируется на ножку или подложку планарной стороной. Он с определенным усилием прижимается к подложке при температуре, несколько превышающей температуру плавления припоя. Рисунок контактных площадок на подложке является зеркальным отображением расположения (рисунка) выводов на кристалле. Припой расплавляется и стекает на контактные металлизированные дорожки подложки, образуя прочные соединения. Кроме пайки используют и другие методы присоединения: термокомпрессию, ультразвуковую сварку с косвенным импульсным нагревом. Разновидностью метода перевернутого кристалла является сборка кристалла с подложкой, когда столбиковые выводы (пьедесталы) выращены на подложке. Если контактные площадки на кристалле покрыты паяемыми металлами, например золотом, то выводы на подложке должны быть из оловянно-свинцовых припоев и сборку следует производить методом пайки. Если контактные площадки на кристалле сделаны из алюминия, то сборку кристалла с подложкой следует производить с помощью ультразвуковой сварки, так как ультразвук разрушает оксиды на поверхности алюминия.

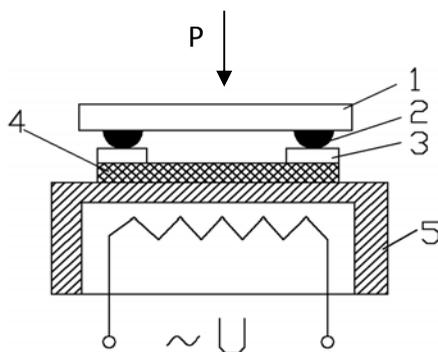


Рис. 5.4. Монтаж кристалла с шариковыми выводами на подложке:
 1 – кристалл; 2 – шариковый вывод; 3 – слой металла на подложке;
 4 – подложка; 5 – столик с подогревом

Контактные выводы на подложке могут представлять композицию из токопроводящих клеев. Клеи наносят через отверстия в маске на металлизированную подложку, когда выступы высыхают, кристалл помещают на выступы, с помощью выравнивающей системы соединяют с подложкой. Клей обладает высокой пластичностью, поэтому механических напряжений в зоне контакта практически не возникает. Качество монтажа ИМС со столбиковыми выводами определяется разновидностью контактных площадок, материалом и качеством обработки поверхности подложки, числом выводов микросхемы, размером кристалла. Для получения качественных соединений важно, чтобы минимальная толщина припойного покрытия выводов была больше максимальной неровности подложки. Наиболее высокие выступы кристаллов при соединении с подложкой следует подвергать деформации, чтобы обеспечивать тесный контакт во всех точках микросхемы. Общими преимуществами сборки полупроводниковых приборов и ИМС методом перевернутого кристалла являются: высокая степень автоматизации производства, как самих контактных выступов, так и сборки, и большая прочность сварных и паяных соединений. К недостаткам способа сборки относятся: нестабильный теплоотвод от кристалла, сложные подготовительные операции по изготовлению подложек и трудность исправления некачественного соединения.

При монтаже перевернутого кристалла вместо проволочных выводов используют выступы (столбики) 2 (рис. 5.5, *а*) высотой в десятые доли миллиметра, расположенные в определенных местах полупроводникового кристалла 1.

Все необходимые соединения на кристалле электрически связаны с выступами. Кристалл переворачивают выступами вниз, опускают на плату с точно расположенными участками металлизации, прикладывают давление и подводят теплоту для образования соединения выступов с платой. Выступы на кристаллах могут быть изготовлены из низкотемпературного (мягкого) припоя, а также гальваническим осаждением алюминия или золота. Если выступы получают гальваническим осаждением, кристаллы присоединяют термокомпрессионной или ультразвуковой сваркой. Обычно в качестве выступов используют медные шарики (рис. 5.5, *б*). Для этого в кремниевом кристалле, имеющем контактные площадки, покрытые пленкой диоксида кремния, изготавливают окна, в которые осаждают три слоя (хром, хром–медь, хром–олово). Затем на них наносят шарик, который закрепляют оплавлением

мягкого припоя. При совмещении такого выступа с предварительно облуженной контактной площадкой платы и последующем нагреве с приложением давления к кристаллу происходит пайка, обеспечивающая надежное соединение. Достоинством монтажа перевернутого кристалла является то, что все соединения выполняются одновременно. Использование при монтаже мягкого припоя облегчает демонтаж бракованных кристаллов. Пластичность мягкого припоя частично компенсирует температурные напряжения в соединении.

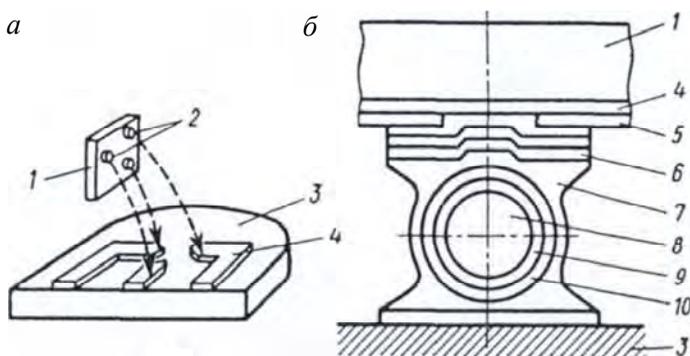


Рис. 5.5. Монтаж перевернутого кристалла:
а – с выступами; *б* – с шариками; 1 – кристалл; 2 – выступы; 3 – плата; 4 – алюминиевая металлизация; 5 – пленка диоксида кремния; 6 – слой хрома; 7, 10 – припой;
 8 – медный шарик; 9 – слой никеля

5.4. Монтаж кристаллов с балочными выводами

Большое распространение в производстве полупроводниковых приборов и ИМС получает монтаж кристаллов этих приборов с балочными выводами. Балочные выводы (рис. 5.6, *а*) представляют металлические полоски толщиной 6–15 мкм, шириной 50–120 мкм, длиной 250–400 мкм, которые выступают за края кристалла (рис. 5.6, *а*).

Выводы на кристалле обычно изготавливают из золота, осаждаемого электролитическим путем или алюминия распылением его в вакууме на контакт. Относительно части кристалла балочный вывод изолируется слоем оксида. При монтаже кристаллов с балочными выводами, выходящими за габариты (рис. 5.6, *б*), гребенчатое расположение выводов экономит площадь полупроводниковых подложек. Кристалл 2

с балочными выводами обычно присоединяют к слою металлизации 3 на плате 4 термокомпрессионной или ультразвуковой сваркой. Балочные выводы получают на подложках, еще не разрезанных на кристаллы (по групповой технологии). Для этого на поверхности подложек со структурами создают в пленке диоксида кремния окна, в которые наносят золото, образующее балочные выводы, а затем травлением разделяют подложки на отдельные кристаллы. При монтаже кристаллов к плате приваривают только наружные части балочных выводов, тем самым, предохраняя кристалл от разрушения и компенсируя напряжения, возникшие при сварке.

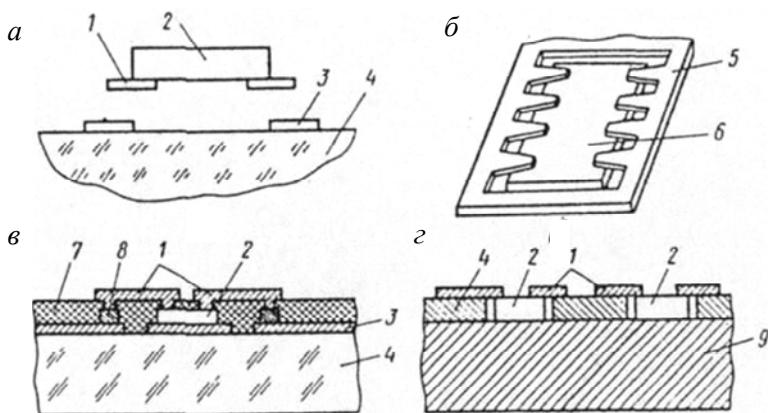


Рис. 5.6. Монтаж кристалла с балочными выводами:

а – конструкция кристалла; *б* – паучковое соединение; *в* и *г* – кристалла с балочными выводами на подложку; 1 – балочные выводы; 2 – кристалл; 3 – слой металлизации; 4 – плата; 5 – паучок; 6 – подложка; 7 – пластмассовая пленка; 8 – столбик; 9 – металлическое основание

При изготовлении ИМС с балочными выводами высокие требования предъявляются к операции разделения пластин на кристаллы. Кристаллы с балочными выводами присоединяют к подложке методами термокомпрессии, ультразвуковой сварки и пайки. Практически эти методы выполняются на всех существующих высокопроизводительных установках термокомпрессии и УЗ-сварки с небольшой модернизацией столика, на котором крепится подложка интегральной микросхемы. Большое применение этот метод сборки находит при из-

готовлении СВЧ-приборов, так как можно получить приборы с малым значением емкости и индуктивности. На рис. 5.7 изображена конструкция СВЧ-диода с балочными выводами.

Разновидностями монтажа кристаллов с балочными выводами являются паучковые соединения и соединение, получаемое напылением балочных выводов. Паучковое соединение (рис. 5.6, б) целесообразно применять, когда выводов более десяти. Балки в виде паучка 5 вырезают из ленты алюминиевой фольги, накладывают на подложку и присоединяют, например термокомпрессией, к контактным площадкам. Затем разделяют паучок на отдельные выводы и монтируют ИМС в перевернутом виде в аппаратуре. При соединении, получаемом напылением балочных выводов (рис. 5.6, в), после выполнения всей пленочной разводки на нужных местах плат создают столбики 8, монтируют между ними кристаллы 2, которые накрывают сверху пленкой термопластичного материала (фторизированным этиленпропиленом) 7 и получают фотолитографией в пластмассе окна, оставляя незащищенными столбики и лицевые поверхности кристаллов. Затем вакуумным напылением в окна наносят золотую металлизацию (балочные выводы 1), соединяющую кристаллы со столбиками. Балочные выводы можно получать также на плате (рис. 5.6, г). Для этого предварительно напылением и фотолитографией создают на плате 4 пленочные балочные выводы, а также отверстия, в которые помещают кристаллы 2, присоединяя их нижнюю сторону к металлическому основанию 9 (это способствует улучшению теплоотвода), а верхнюю соединяют термокомпрессией с балочными выводами.

Метод сборки ИМС и полупроводниковых приборов с балочными выводами обладает рядом достоинств: места соединения балочных выводов с внешними выводами корпуса можно просматривать с помощью обычных оптических приборов; могут быть использованы различные способы присоединения, в том числе контактная сварка, пайка, термокомпрессия, ультразвуковая сварка; так как концы балочных выводов выступают за края кристалла, то снижаются тре-

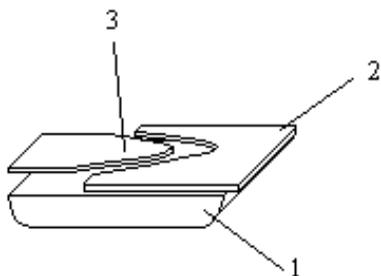


Рис. 5.7. Конструкция СВЧ-диода с балочными выводами:
1 – кристалл; 2 – балочные выводы;
3 – слой оксида

бования к допускам на размеры и точность расположения внешних соединений по сравнению с ИМС с выступами; не распространяется теплота, выделяемая в момент присоединения интегральной микросхемы на активные элементы кристалла; кристалл не разрушается, так как давление при монтаже прикладывается к балочному выводу. В то же время такой монтаж в два раза дороже монтажа перевернутых кристаллов, так как требуется дополнительная металлизация и не допустимы даже незначительные отклонения плат от плоскостности. Кроме того, балочные выводы легко изгибаются (их сечение обычно равно 13×76 мкм), но иногда ломаются. Необходимо отметить, что беспроводные соединения целесообразно применять в массовом производстве при выпуске полупроводниковых приборов и ИМС в миллионных масштабах.

5.5. Методы крепления выводов на гибком носителе

Одним из последних достижений в области сборки ИМС является метод «паучкового» крепления выводов, который позволяет автоматизировать процесс сборки и проводить технологический контроль и электрические испытания непосредственно в процессе производства. Этот метод обеспечивает улучшенный теплоотвод прибора благодаря использованию толстых медных или алюминиевых проводов и возможности монтажа кристаллов микросхем не только в корпус, но и на гибких носителях (лентах). Следовательно, этот метод является одним из эффективных путей повышения производительности труда и улучшения качества микросхем. Ленточный носитель изготавливается из стойких химических и термореактивных смол класса полиэфиров. Полиимиды обладают высокими термостойкостью, а также стабильностью физических и химических свойств при воздействии кислот. Их можно подвергать селективной химической обработке и использовать в качестве подложки для вакуумного напыления металлических пленок. Полиэфирные пленки на основе полиэтилентерефталата относятся к более перспективным материалам: они дешевле полиимидов и значительно стабильнее по свойствам, в частности более стойки к воздействию влаги и высокой температуры.

Технологический процесс изготовления ленточного носителя начинается с нанесения адгезива (класс фенолов, эпоксидов или полиимидов) на пленку из полиимидов или полиэфира. Нанесенный слой су-

шат, а затем пленку разрезают на ленты определенной ширины. Лента выпускается шириной одного-двух стандартных форматов (обычно 8 и 16 мм). В ленте с помощью автоматического пуансона вырезают краевую перфорацию и отверстия, куда на последующих операциях помещаются кристаллы. При этом строго соблюдаются размеры перфораций. Затем на ленту с краевой перфорацией наклеивается медная или алюминиевая фольга. Для этого ленту и медную (алюминиевую) фольгу подают с двух различных катушек в автоматический пресс, где их подвергают кратковременному нагреву при механическом давлении $(1,5-2,0) \cdot 10^5$ Па. После охлаждения при температуре окружающей среды обратную сторону ленточного носителя покрывают лаком и сматывают на катушку. Медная или алюминиевая фольга протравливается фотолиграфическим методом до получения тонких паучкообразных выводов, которые нависают над центральным вырезом, т. е. получают-ся определенной формы балочные выводы. После травления медной фольги электрохимическим осаждением на нее наносится припойное покрытие на основе сплава олово-висмут. Для изготовления ленточных носителей обычно используются полиимидные пленки, марка которых определяется типом адгезива и термостойкостью пленки.

На рис. 5.8 приведена схема изготовления ленточного носителя на основе полиимидной пленки.

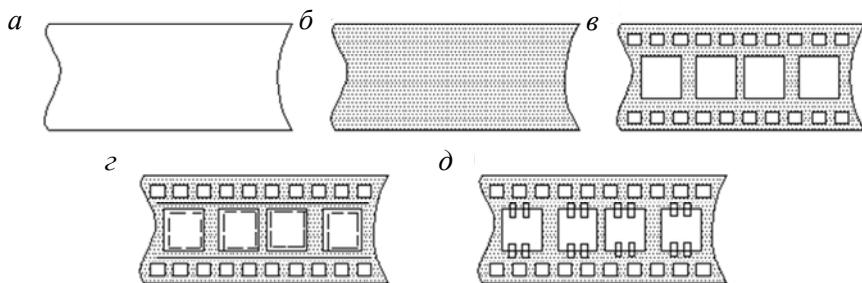


Рис. 5.8. Схема изготовления ленты-носителя на основе полиимидной пленки: а – Cu-пленка; б – полиимид; в – перфорация и прошивка отверстий под кристаллы в полиимиде; г – полиимидная лента с наклеенной Cu-фольгой; д – лента-носитель после травления Cu-фольги со сформированными паучковыми выводами

На механические качества паучковых выводов большое влияние оказывают класс обработки, ровность (плоскостность), толщина и микроструктура фольги, а также адгезия фольги к полиимидной пленке.

Паучковые выводы закреплены на гибкой диэлектрической пленке и не соединены друг с другом, вследствие чего возможно измерять электрические параметры микросхем после присоединения кристаллов. Выводы кристаллов присоединяют к паучковым выводам микропайкой или ультразвуковой сваркой в зависимости от используемых материалов.

При микропайке с импульсным нагревом (рис. 5.9) паучковые выводы 2, закрепленные на диэлектрической пленке 3, совмещаются со столбиковыми выводами 4 на кристалле 5. Головка 1 опускается, прижимая паучковые выводы к столбиковым контактам. Через нее пропускается импульс тока, и места контакта нагреваются до температуры пайки. Слой клеящего вещества 6, удерживающий кристалл на подложке 7 в ориентированном положении, расплавляется, и при поднятии инструмента кристалл, припаянный к паучковым выводам, отрывается от подложки под действием силы, вызванной упругой предварительной деформацией паучковых выводов. Силы сцепления кристалла с клеящим веществом и подложкой должны быть меньше этой силы.

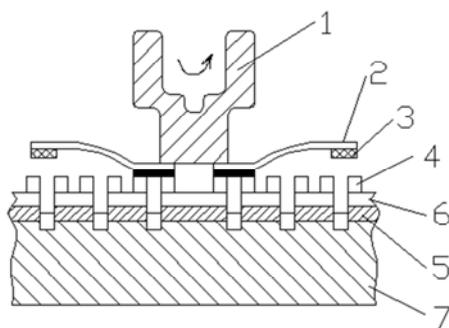


Рис. 5.9. Схема микропайки паучковых выводов с косвенным импульсным нагревом инструмента:

1 – инструмент; 2 – паучковый вывод; 3 – диэлектрическая пленка; 4 – контакт на кристалле; 5 – кристалл; 6 – слой клеящего вещества; 7 – подложка

При микропайке с общим нагревом (рис. 5.10) после совмещения паучковых выводов 1 с шариковыми контактами 5 кристалла 4 вакуумный присос 3 перемещается вверх, деформируя выводы на некоторую величину L . В результате упругой деформации выводов возникающая сила стремится их прижать к шариковым контактам

на кристалле. Включается нагревательный элемент 2, в местах соприкосновения выводов достигается температура плавления припоя (шариковые выводы кристалла покрыты легкоплавким припоем). После остывания в местах контакта образуется спай. Аллюминиевые паучки присоединяются к аллюминиевым контактньм площадкам кристалла с помощью ультразвуковой сварки. Применение ультразвука исключает нагрев кристаллов микросхем при сварке, который может приводить к выходу их из строя. Внешне микросхемы с такими выводами подобны пауку, причем радиальное расположение выводов соответствует на одной стороне контактньм площадкам на кристалле, а на другой – выводам внешней платы или корпуса.

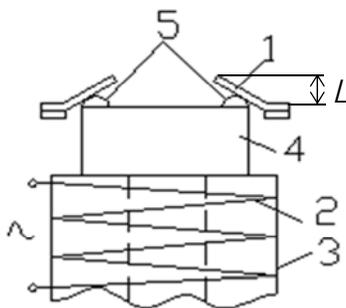


Рис. 5.10. Микропайка с общим нагревом:

1 – паучковые выводы; 2 – нагревательный элемент; 3 – вакуумный присос;
4 – кристалл; 5 – шариковый контакт

5.6. Присоединение выводов с помощью ультразвуковой микросварки

УЗС – это метод соединения металлов в твердом состоянии, отличающийся от других видов сварки способом введения энергии в зону сварки. Сближение свариваемых материалов (проволока с контактной площадкой) и образование соединения происходит при пластической деформации материалов от совместного воздействия усилия напряжения и тепловой энергии за счет процессов трения и воздействия на материалы УЗ-полем частотой $66 \pm 10\%$ кГц для микросварки. Метод является базовым при выполнении технологических операций сборки полупроводниковых приборов аллюминиевой проволокой. Основньми достоинствами метода УЗС-выводов являются: возможность соединения широкой номенклатуры материалов; получение

соединений материалов с окисленными поверхностями; высокая механическая прочность соединений. Для образования соединения важны процессы, происходящие в зоне контактирования соединяемых материалов. Процесс протекает наиболее эффективно в случае хорошего сцепления между сварочным инструментом и проводником. На рис. 5.11, *a* показано поперечное сечение проводника во время соединения с помощью инструмента типа клин. На рис. 5.11, *б* показано напряжение вибраций.

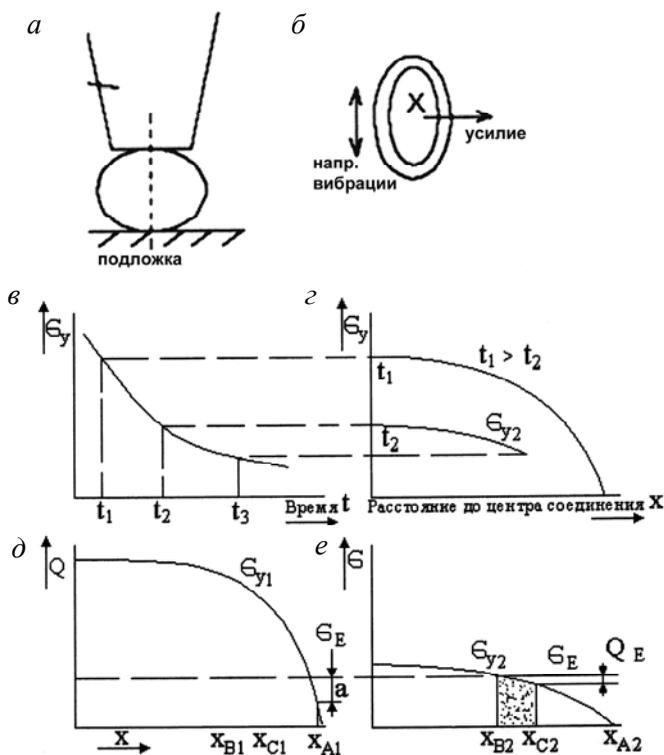


Рис. 5.11. Процесс УЗ-сварки:

- a* – поперечное сечение при соединении клином; *б* – напряжение вибраций;
- в* – зависимость нормального напряжения в центре проволоки от времени сварки;
- z* – зависимость нормального напряжения в момент времени и горизонтального напряжения, введенного пульсацией, определяющих зону соединения;
- д* – зависимость распределения вертикального напряжения для двух значений времени сварки и расстояния до центра соединения;
- e* – те же взаимосвязи, но для позднего момента времени

В то время как проволока находится под нагрузкой, механическое перемещение или вибрация инструмента для УЗС вызывает скачок уплотнения на алюминиевой контактной площадке (рис. 5.11, б). Распространение волнового фронта по проволоке обуславливает образование волнистой структуры посредством воздействия напряжения сдвига на алюминиевой контактной площадке перпендикулярно к направлению вибраций. До или во время движения волнового фронта УЗ-энергия поглощается проволокой, при этом она размягчается и под действием нагрузки течет, разрывая поверхностный оксид и оставляя незащищенную чистую поверхность проволоки и контактной площадки. Эти чистые незащищенные поверхности металлов быстро свариваются. Соединение образуется в тороидальной области вокруг центра контактной площадки и проволоки. На рис. 5.11, в, г показана модель, поясняющая механизм соединения. Поскольку проволока размягчается и деформируется, вертикальное напряжение уменьшается во времени. Вибрирующее воздействие инструмента для УЗС вызывает появление горизонтального напряжения.

При среднем вертикальном напряжении происходит соединение, и свариваемая область растет с увеличением времени, так как вертикальное напряжение уменьшается (рис. 5.11, е). Увеличение сцепления инструмента с проводником можно добиться за счет состояния (формы) поверхности инструмента, либо за счет увеличения контактного усилия. Однако оно ограничивается узкой зоной пластичности и повышенной склонностью к образованию внутренних напряжений и трещин в полупроводниковых материалах и диэлектрических подложках. Необходимые условия сцепления обеспечиваются соответствующей шероховатостью рабочего торца инструмента и созданием специального профиля (продольная или поперечная канавка или продольное углубление, рис. 5.12).

В первый момент контактного взаимодействия проволоки с инструментом формируется контакт, обеспечивающий хорошую передачу колебаний, и исключаются условия смещения проволоки. Создано несколько способов УЗС: с модуляцией частоты генератора, автоматическим поиском частоты преобразователя с последующей фиксацией частоты генератора и автоподстройкой частоты. Эти способы обеспечивают воспроизводимость параметров и с успехом используются. Наиболее перспективной считается создание адаптирующих систем для микросварки, позволяющих в условиях массового производства

получать достаточно высокие механические свойства свариваемых соединений. Более точный контроль за качеством соединений имеют системы, в которых управление сваркой ведется в зависимости от изменения амплитуды колебаний инструмента, тока или напряжения в электрической цепи преобразователя. Повышение точности обусловлено тем, что изменение указанных параметров вызвано увеличением тормозящей силы в процессе образования соединений, величина которой зависит от свойства контакта инструмент–проволока. Изменение этих свойств вносит неопределенность в передачу ультразвуковых колебаний в зону сварки, что существенно влияет на длительность каждой из трех стадий формирования соединений от сварки к сварке. Поэтому предусматривается разработка систем управления параметрами процесса УЗС с учетом кинетики образования соединений, обеспечивающих условия формирования высокопрочных соединений и контроль их качества непосредственно в процессе сварки.

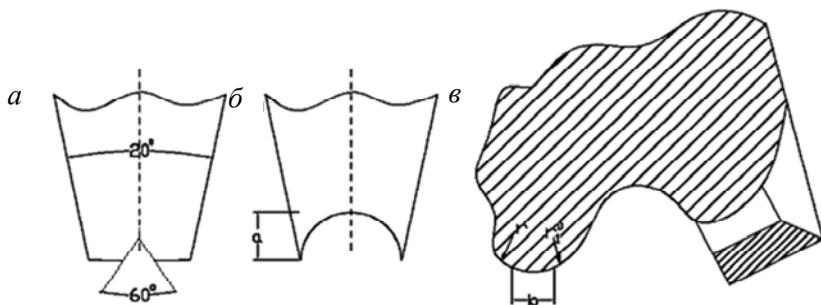


Рис. 5.12. Конструкция сварного инструмента для УЗС:
a – с продольной канавкой; *б* – с продольным углублением;
в – профиль инструмента

Параметры УЗС определяются свойствами свариваемых материалов и поверхностных пленок. Основными параметрами являются величина амплитуды колебаний сжимаемого усилия и время, взаимосвязанное при сварке. От качества свариваемых поверхностей зависят условия протекания процесса сварки. Соединения одинаковой прочности могут быть получены в различных сочетаниях основных факторов, но время образования сварочного соединения (стадия формирования зон схватывания) для конкретных материалов и качества подготовки их поверхностей являются величиной, не зависящей от выбора режима. Для каждой пары свариваемых материалов время, в течение кото-

рого скорость осадки постоянна, является характерной величиной. Если сварочный режим обеспечивает малое время протекания осадка, то соединение образуется лишь на части площади контакта и прочность сварки мала. При завышенных режимах, когда постоянная скорость осадки высока, контактное соединение получается некачественным либо из-за высокой осадки, либо из-за разрушения под воздействием колебаний образовавшегося контактного соединения. Следовательно, между кинетикой образования соединения и параметрами процесса существует сложная взаимосвязь, которая определяет качество сварки. Например, алюминиевую проволоку легируют кремнием (1 %) для увеличения твердости и жесткости. Необходимо соблюдать требования к состоянию поверхности, на которой бы отсутствовали механические повреждения и загрязнения. Поверхности контактных площадок должны быть одинаковой толщины. Оптимальных результатов при УЗС можно достичь, подбирая значения параметров так, чтобы обеспечить максимальную воспроизводимость качества соединения в сочетании с высокой прочностью соединений (на отрыв). Для обычных при сборке микросхем параметров проводников в пределах 25–50 мкм параметры процесса сварки варьируются из следующих основных составляющих: частота сварочных импульсов – от 60 до 72 кГц и выходная мощность УЗ частоты от 0,63 до 6,3 Вт; усилие сжатия присоединяемых элементов от 0,1–1,2 Н; время присоединения 0,01–0,2 с. При применении ультразвуковой сварки существует угроза поглощения УЗ-энергии, передаваемой инструментом к выводам корпуса. Это происходит, когда вывод имеет большую свободную длину – вылет и может наблюдаться отслаивание сварных соединений или образование низкопрочных соединений. Причиной является уменьшение резонансной частоты вывода с увеличением его длины, приводящее к резонансному возбуждению вывода. Такие колебания частично или полностью расходуют ультразвуковую энергию. Круглый вывод диаметром – 0,5 мм и длиной – 1,5 мм, применяемый в корпусах ГИС, имеет резонансную частоту – 60 кГц и практически полностью гасит проводимую УЗ-энергию. Для приведенного типа надежная сварка возможна при длине вывода менее 1 мм, т. е. прочность сварки приближенно прямопропорциональна длине вывода. Плоские горизонтальные выводы корпуса также могут поглощать УЗ-энергию, но для них проблема сварки решается выбором места сварки ближе к месту крепления вывода. При необходимости использования более длинных выводов рекомендуется

точное определение момента касания проволоки с выводом корпуса с помощью контактных или бесконтактных датчиков и создание вибрации стола с корпусом в момент включения необходимой для сварки мощности УЗ-генератора. Эта вибрация компенсирует потерю энергии на возбуждение вывода. При этом программируется величина перемещения стола и количество циклов сканирования. Причинами отказов при УЗС часто являются плохое закрепление корпуса прибора, инструмента в держателе, неправильно выбранная конструкция корпуса и длина инструмента. Повреждение полупроводникового материала под контактной площадкой является результатом использования слишком твердой проволоки, чрезмерно длительной сварки или недостаточной нагрузки на инструмент. Нагрузка на инструмент не должна вызвать перемещения проволоки в процессе сварки. Конкретное значение усилия нагружения зависит от размера и конструкции сварочного инструмента, материала сечения, твердости присоединяемого проводника и металлизации подложки, кристалла. Недостаточная нагрузка на инструмент может привести к повреждению материала полупроводника под контактной площадкой вследствие вибрации инструмента, а слишком большая нагрузка – к разрушению соединения. Область оптимальных усилий нагружения определяют испытаниями на отрыв, сохраняя постоянными время и мощность УЗ-колебаний. Полученные оптимальные значения усилия сжатия перепроверяются после нахождения области оптимальных значений мощности и времени (рис. 5.13).

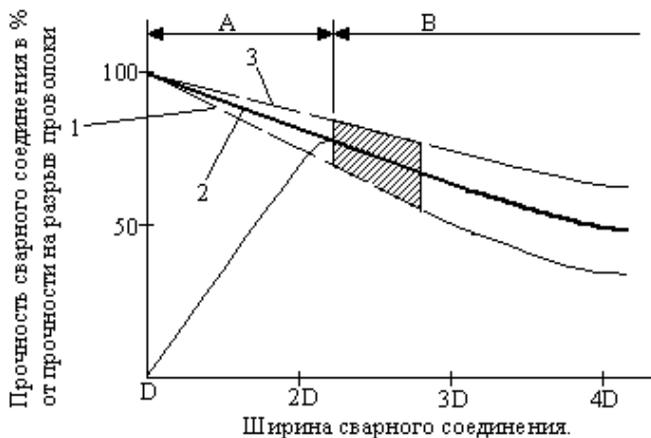


Рис. 5.13. Зависимость прочности соединения от ширины сварного соединения

Обычно предпочтение отдается более высокой мощности при минимальном времени сварки. Оптимальное значение определяется также испытаниями на отрыв. Зная оптимальную величину нагружения и времени присоединения, находят близкое к оптимальному значение мощности. Испытанием нескольких соединений на отрыв, выполненным на разных значениях УЗ-мощности, находят ее оптимальное значение. Качественное присоединение проволочных выводов обеспечивается конструкцией инструмента. Наиболее надежен инструмент с вогнутой рабочей поверхностью и продольной канавкой (рис. 5.12). Для варианта 5.12, *a* отполированные передний и задний радиусы создают плавный переход проводника в соединение, а матовая (неотполированная) рабочая площадка инструмента обеспечивает минимум перемещений на границе инструмент–проводник. Вогнутая с малой кривизной поверхность рабочего торца создает небольшую деформацию и высокую прочность соединения на отрыв.

Для присоединения проводников различного диаметра используются сварочные инструменты с разными размерами рабочей площадки. При больших размерах контактной площадки и кристалла и правильной топологии рекомендуемая величина рабочей площади инструмента должна составлять 2,5–3,0 диаметра проводника. Чем она больше, тем менее критичным будет режим сварки, т. е. возрастет выход годных изделий.

Типичный инструмент для УЗС имеет (рис. 5.12) передний радиус r , рабочую площадку b и задний радиус r_1 . Рабочая площадка плоская либо слегка вогнутая, либо имеет продольную канавку. Глубина вогнутости должна составлять 20–30 % диаметра проводника. Передний радиус формирует плавный переход проводника в соединение первой сварки и выполняет отделение проволоки после второй сварки. Задний радиус составляет 40–100 % диаметра проводника в зависимости от рабочей площадки инструмента. Задний радиус обычно меньше, чем передний. В процессе сварки происходят перемещения в основном на границе проводник – подложка. Инструмент с отполированной рабочей площадкой после нескольких сотен сварок прирабатывается и выполняет качественные соединения. Передний и задний радиусы инструмента полируются. Канавки на инструменте выполняются на его рабочей поверхности, чтобы улучшить сцепление с проводником. Инструмент с поперечными канавками рекомендуется в случае соединения трудносвариваемых материалов. Проч-

ность соединения, выполняемого с помощью вогнутого инструмента выше, чем соединения, выполненного инструментом с плоским торцом. При сварке инструментом с вогнутой поверхностью присоединение в центре происходит на большей поверхности, чем при сварке инструментом с плоским торцом. Инструмент периодически очищается, для проволоки диаметром 15–35 мкм не реже чем через 50 тысяч сварок, а для более толстых – ежедневно. Качество очистки и износ инструмента проверяются визуально под микроскопом. Присоединение толстой проволоки имеет ряд особенностей, связанных с затруднениями при ее подаче в процессе образования петли: чрезмерная деформация соединения, повреждения при изгибах для формирования петли, появление царапин. Для отделения толстой проволоки после второй сварки пользуются одним из двух методов. Первый состоит в натяжении проволоки и отрыве ее, как и для проволоки, диаметром 25–35 мкм. В этом случае применяют инструмент с вогнутой рабочей поверхностью. Другой метод заключается в отрезании проволоки ножом. Применяют инструмент с продольной канавкой. Первую сварку при УЗС выполняют на кристалле, так как это исключает замыкание краем кристалла (рис. 5.14, *а*). Однако при монтаже в корпус с углублением трудно обеспечить первую сварку на кристалле, а вторую на выводе с помощью стандартного инструмента с углом подачи проволоки 30°. Для преодоления этой трудности используют обратный метод формирования переемычки. Сварка выполняется с выводом корпуса на кристалле (рис. 5.14, *б*).

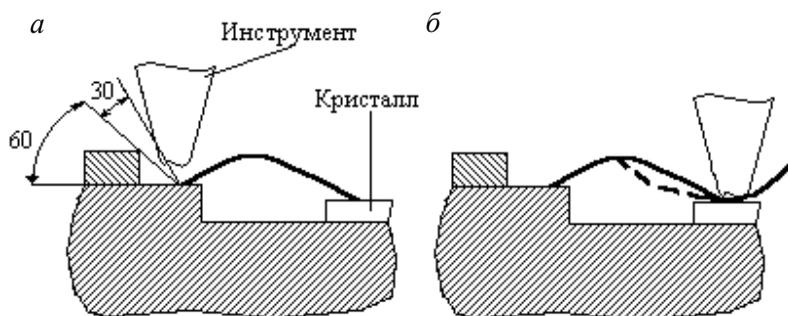


Рис. 5.14. Прямой (*а*) и обратный (*б*) методы формирования проволочной переемычки при УЗС

Качество УЗС-соединений контролируют визуально – наблюдением в микроскоп и испытаниями на механическую прочность. Широкое распространение при испытании на механическую прочность получил метод испытания на растяжение, так как для его реализации используется несложное оборудование, измеряющее значение прочности микросварных соединений. Контроль осуществляется методом приложения отрывных усилий к приваренным выводам. Испытания микросварных соединений проводят двумя методами: до разрушения и до предварительного заданной величины. В промышленности для контроля прочности микросварки используют установки 12 МП 0,05/100. Наиболее характерными видами брака при УЗС являются растрескивание кристалла и сильная деформация проволоки (более 60 %). При испытаниях на механическую прочность наблюдается три вида разрушения соединений: по пережигу проволоки; отрыв проволоки от контактной поверхности; отрыв пленки контактной поверхности вместе с соединением. Характер разрушений указывает на необходимость корректировки технологического режима сварки.

5.7. Присоединение выводов с помощью контактной точечной микросварки

Контактная точечная микросварка широко используется для присоединения выводов в полупроводниковом производстве. Физическая сущность контактной микросварки заключается в нагреве металла в местах максимального электрического сопротивления при прохождении тока и одновременном сжатии свариваемых деталей. Основными параметрами процесса контактной микросварки являются: величина сварочного тока; время сварки; усилие сжатия электродов. Контактная микросварка применяется для присоединения металлических проводников к токопроводящим пленкам на диэлектрических и полупроводниковых подложках к внешним выводам корпусов, когда недопустим общий подогрев изделия. Образующиеся соединения при контактной точечной микросварке разделены на два вида: соединения с литым ядром и соединения в твердой фазе. Соединения в твердой фазе характерны для присоединения выводов с односторонней сваркой. Оно образуется в результате рекристаллизации, когда происходит взаимное прорастание зерен через поверхность раздела или в результате пластической деформации при температуре рекристаллизации, ко-

гда происходит молекулярное сцепление по поверхности раздела двух материалов. В настоящее время контактная микросварка осуществляется несколькими способами: с двусторонним расположением электродов, односторонним расположением двумя электродами, двоянным расщепленным, строенным расщепленным электродами (рис. 5.15).

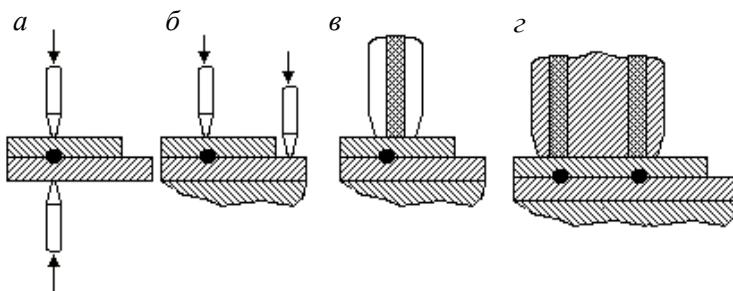


Рис. 5.15. Основные способы контактной точечной сварки выводов:
a – сварка с двусторонним расположением электродов; *б* – сварка с односторонним расположением электродов; *в* – сварка сдвоенным расщепленным электродом; *г* – сварка строенным расщепленным электродом

Односторонняя сварка двумя электродами (рис. 5.15, *б*) применяется для соединения тонких проводников (проволоки и ленты) с относительно толстыми пленками (более 20 мкм) в местах, доступных для размещения двух электродов. При этом импульс электрического тока проходит от электродов через слой металлизации. Так как контактное сопротивление привариваемого проводника к металлируемому слою оказывается максимальным под левым электродом, максимальный разогрев металла и сварка проходят в области левого электрода.

Для присоединения выводов широкое распространение получил метод контактной сварки расщепленным электродом (рис. 5.15, *в, г*). В момент прижатия этим электродом свариваемой проволоки пропускается электрический ток. Часть его протекает через участки проволоки, зажатой между двумя параллельными электродами, а часть – через токопроводящую пленку. Прохождение тока сопровождается сосредоточенным выделением тепловой энергии в месте контакта между соединяемыми деталями. Внешнее давление в сочетании с разогревом деталей до температур пластического состояния способствует образованию прочного соединения. Расстояние между двумя элементами электрода составляет два–три диаметра привариваемой про-

волокни. Сила сварочного тока, проходящего через верхние и нижние детали свариваемого соединения, зависит от их сопротивления. При этом могут образовываться три различных соотношения между сопротивлениями верхней и нижней детали сварочного соединения:

- сопротивление материала обеих деталей одинаково;
- сопротивление верхней детали больше;
- сопротивление нижней детали больше.

При присоединении металлических проводников к металлизированным полупроводниковым структурам наиболее типичен третий вариант. Сварочный ток в основном проходит через верхнюю деталь (проволоку), сопротивление которой с ростом температуры увеличивается. Ток разветвляется и начинает проходить через нижнюю деталь (металлизированную пленку), что приводит к выравниванию температур.

На рис. 5.16 представлена схема присоединения золотой проволоки к диодной кремниевой структуре, имеющей расширенный контакт, представляющий собой алюминиевую пленку 4, напыленную на слой SiO_2 5.

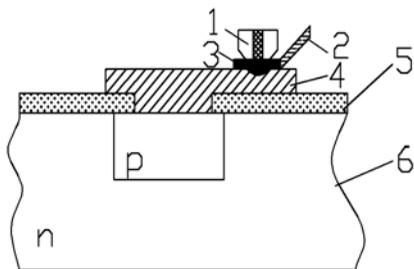


Рис. 5.16. Схема присоединения вывода к диодной структуре методом расщепленного электрода:

- 1 – электрод; 2 – привариваемая проволока; 3 – сварная точка;
4 – омический контакт; 5 – оксидный слой; 6 – кристалл

Высокий локальный разогрев места сварки при такой геометрии структуры практически не влияет на свойства p - n -перехода.

Способом сварки с расщепленным электродом можно соединять проводники диаметром 20–150 мкм с различными тонкими пленками и выводами корпусов (подложек). При микроконтактной сварке строенным электродом (рис. 5.15, з) нагрев осуществляется трехфазным током, что создает более равномерный нагрев свариваемых деталей, требуется меньшая мощность свариваемого импульса и не про-

исходит перегрева проводника в межэлектродных зазорах. Однако в полупроводниковом машиностроении преимущество имеют установки со сдвоенным электродом, как не требующие увеличения размеров контактных площадок и обеспечивающие присоединение электродных выводов сшиванием, т. е. последовательным выполнением первой и второй сварки (присоединение вывода сначала к контактной площадке кристалла, а затем к выводу корпуса). Важными для получения качественного соединения в процессе контактной микросварки являются форма и материал инструмента, который представляет склеенные через диэлектрическую прокладку с определенным зазором электроды, или отдельные электроды, закрепленные в сварочной головке, обеспечивающей регулирование зазора между ними. Материал электродов – молибден или вольфрам. Рабочие торцы электродов быстро изнашиваются, поэтому важным является правильный выбор формы и размеров торцов электродов.

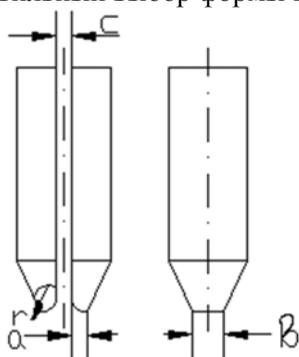


Рис. 5.17. Форма торцов сдвоенных электродов для микросварки проволоки с тонкими пленками

На рис. 5.17 показана оптимальная форма торцов расщепленных электродов для микросварки проволоки с тонкими пленками. Рабочая часть наконечников электродов имеет форму усеченной пирамиды с шириной контактных площадок от 3 до 5 диаметров присоединяемой проволоки. К рабочему инструменту предъявляется ряд эксплуатационных требований: передача в зону сварки заданного количества энергии с минимальными потерями; обеспечение надежного электрического контакта с присоединяемым проводником; возможность переточек рабочего торца инструмента; максимальная стойкость инструмента между переточками. Срок службы электродов составляет 30–40 тыс. сварочных циклов. Максимальную прочность привариваемых электродных выводов можно получить при оптимальном подборе длительности нарастания напряжения и тока сварочного импульса, а также усилия сжатия свариваемых деталей. Недостатки микроконтактной сварки – из-за неправильно подобранного режима возможны поломки полупроводниковых кристаллов (образование трещин), ухудшение электрических параметров, значительная деформация электродных выводов в месте присоединения.

5.8. Присоединение выводов термокомпрессионной сваркой

Термокомпрессионная микросварка – метод сварки давлением с подогревом – используется для соединения в твердом состоянии металлов с металлами и полупроводниками при относительно невысоких удельных давлениях и нагреве до температуры ниже температуры образования эвтектики соединяемых материалов.

Метод состоит в том, что в результате силы, приложенной инструментом на проволочный вывод, лежащий или касающийся торцом металлизированной контактной площадки кристалла, при нагреве происходит пластическая деформация, создающая взаимную диффузию между соединяемыми элементами и образование прочного соединения.

В полупроводниковом производстве термокомпрессионная сварка применяется для монтажа гибридных проволочных выводов из золота, алюминия, меди к тонкопленочным контактным площадкам, к металлизированной поверхности полупроводниковых кристаллов и выводам корпусов. Для предотвращения разрушения соединения из-за остаточных напряжений один из соединяемых материалов при термокомпрессии должен обладать высокой пластичностью (гибкий проволочный вывод). Процесс присоединения проволочных выводов к кристаллу проводника (контактной площадке) термокомпрессионной сваркой представлен на рис. 5.18.

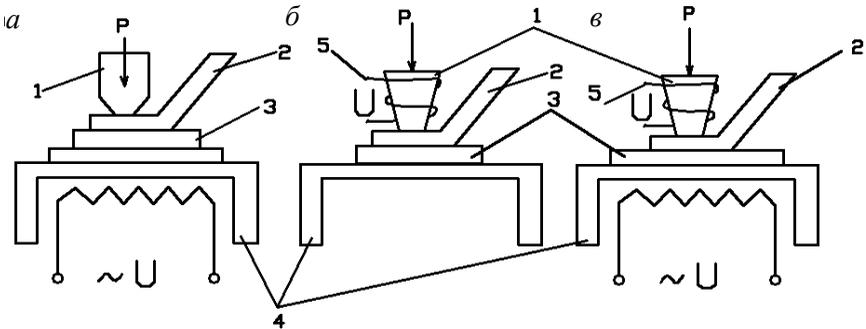


Рис. 5.18. Схематический процесс присоединения проволочного вывода к кристаллу термокомпрессионной микросваркой и ее разновидности в зависимости от способа нагрева:

- а* – нагрев только рабочего столика; *б* – нагрев рабочего инструмента; *в* – одномерный нагрев рабочего столика и инструмента; 1 – рабочий инструмент – пуансон; 2 – присоединяемый проводник; 3 – подложка или кристалл полупроводникового прибора; 4 – рабочий столик; 5 – спираль для нагрева

Полупроводниковый кристалл закрепляют на специальном столике 4 нагревательной колонки. К кристаллу 3 одним из микроманипуляторов подводят золотую проволоку 2, а другим – рабочий инструмент – иглу-пуансон 1, которая прижимает проволоку к кристаллу с определенным удельным давлением. Перед проведением сварки поверхность кристалла тщательно очищается, а золотая проволока подвергается отжигу для увеличения пластичности.

Рабочий диапазон температур и давлений при термокомпрессии выбирают так, чтобы температура сварки была ниже температуры эвтектики соединяемых материалов, а давление таким, чтобы обеспечить деформацию металлического проводника на 30–60 %. Длительность процесса зависит от выбранных режимов и состояния поверхностей свариваемых контактной площадки и выводов.

Все соединяемые материалы при термокомпрессии можно разделить на три типа:

а) металлы с хорошей взаимной диффузией в твердом состоянии, образующие ряд твердых растворов (Ag-Au, Au-Cu). Они обладают наилучшей свариваемостью при соединении термокомпрессией;

б) материалы, образующие между собой низкотемпературные эвтектики (Al-Si, Au-Si); они обладают удовлетворительной свариваемостью;

в) металлы, взаимная диффузия которых приводит к образованию интерметаллических соединений и эвтектик (Au-Al, Au-Sn); они обладают удовлетворительной свариваемостью, но при их соединении требуется более тщательное соблюдение рекомендованных режимов.

На эффективность и качество соединения при термокомпрессии влияет окисление поверхности. Наиболее качественные соединения методом термокомпрессии получают при сварке проводников с металлическими пленками непосредственно после их напыления на полупроводниковые пластины. Термокомпрессионная сварка выводов реализуется рядом разновидностей: по способу нагрева (рис. 5.18), по способу соединения (рис. 5.19), по типу образующегося соединения, обусловленного формой инструмента (рис. 5.20).

При сварке внахлестку (рис. 5.19, а) проволочный вывод накладывается на металлизированную контактную площадку, при этом ось вывода располагается параллельно плоскости контактной площадки. При сварке встык (рис. 5.19, б) конец проволочного вывода (ось вывода перпендикулярна плоскости контактной площадки) пред-

варительно оплавливают, образуя шарик с диаметром равным удвоенному диаметру привариваемого проводника.

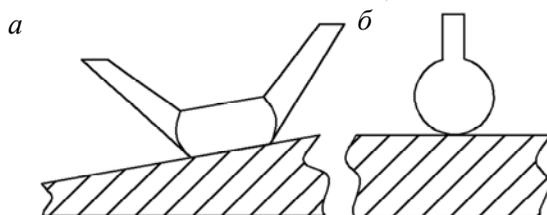


Рис. 5.19. Виды компрессионной сварки по способу выполнения:
а – нахлесточное; *б* – стыковое с образованием шарика

Прочность сварных соединений, выполненных встык, выше прочности соединений внахлестку, и равна при оптимальных параметрах режима процесса сварки прочности привариваемого проводника. Относительная деформация шарика при образовании качественных соединений составляет 50–60 %. Минимальный размер контактной площадки, к которой может быть выполнено стыковое соединение, должен быть больше диаметра шарика на величину точности его совмещения с контактной площадкой. При соединении встык используется рабочий инструмент в виде капилляра с центральным отверстием. Конфигурация нахлесточного соединения зависит от формы торца рабочего инструмента.

Используются следующие типы рабочего инструмента: игла-пуансон (рис. 5.20, *а*) с подачей проволоки под инструмент сбоку через специальную дюзу; разрезной капилляр «птичий клюв» (рис. 5.20, *б*); капилляр с боковым отверстием для подачи проволоки (рис. 5.20, *з*); капилляр с центральным отверстием (рис. 5.20, *в*).

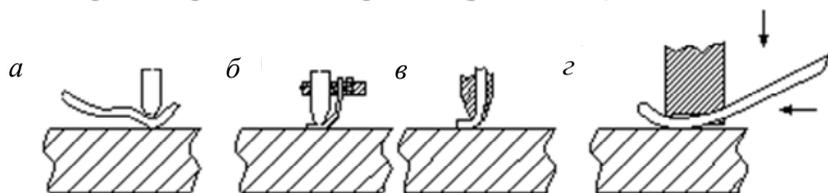


Рис. 5.20. Виды инструмента для термокомпрессионной сварки внахлестку:
а – игла-пуансон с подачей проволоки под инструмент сбоку через специальную дюзу;
б – разрезной капилляр типа «птичий клюв»; *в* – капилляр с центральным отверстием для подачи проволоки; *з* – наконечник инструмента с боковым отверстием для подачи проволоки

Торец рабочего инструмента может быть плоским, с поперечной канавкой и выступом. При сварке с помощью иглы-пуансона подача проволоки на контактную площадку, совмещение торца иглы с проволокой и контактной площадкой производятся раздельно, поэтому производительность такого способа сварки невелика. При сварке с помощью капилляров проволока совмещена с рабочим инструментом. Капилляр «птичий клюв» из-за его сложности в настоящее время редко используется. Наиболее широко применяются капилляры с центральным отверстием и с боковой подачей. На торец капилляров обычно наносится формирующая канавка, которая ограничивает пластическое течение материала проволоки и принудительно увеличивает скорость пластического течения в приконтактной зоне, благодаря чему получается прочное соединение при небольших нагрузках на инструмент. В качестве материала рабочего инструмента используют синтетический корунд, твердые сплавы ВК-6М, ВК-15 и керамику Al_2O_3 (для капилляров).

При присоединении и разводке выводов методом термокомпрессионной сварки используются две основные схемы:

1. На контактных площадках прибора и внешних выводах создаются нахлесточные соединения с помощью капилляра с боковой подачей.

2. На контактных площадках прибора создаются соединения встык, а на внешних выводах – нахлесточные соединения с помощью капилляра с центральным отверстием.

Более предпочтительна вторая схема, так как прочность свариваемых соединений, выполненных встык, значительно выше прочности соединений внахлестку. Чтобы исключить замыкание на край кристалла и компенсировать механические напряжения, возникающие при перепадах температур, вблизи мест приварки соединительный проводник должен иметь изгибы (петли). Проволока перед сваркой проходит операции подготовки: обезжиривание, при необходимости термоотжиг в стационарных печах и на установках непрерывного отжига. Для присоединения золотой и алюминиевой проволок к траверсам корпусов транзисторов, к подложкам и корпусам ГИС, изготовленных из кобальта, никеля, ситалла, покрытых золотом, наиболее успешно используется сварка с косвенным импульсным нагревом. Процесс сварки представлен на рис. 5.21.

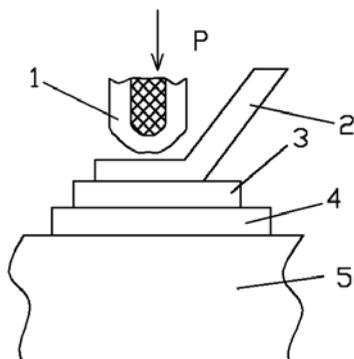


Рис. 5.21. Термокомпрессионная сварка с косвенным импульсным нагревом V-образным электродом:

1 – инструмент; 2 – электродная проволока; 3 – кристалл;
4 – корпус (подложка); 5 – столик

Под необходимым давлением P приводятся в контакт инструмент, металлический проводник и кристалл полупроводника. Затем через инструмент пропускается импульс тока длительностью 0,01–2,00 с. При этом торцевая часть инструмента разогревается, вместе с ним нагревается металлическая проволока и кристалл полупроводника. Под воздействием приложенного давления происходят осадка металлического проводника и образование соединения.

При термокомпрессионной сварке золотой проволоки и Al контактных площадок возможно образование интерметаллических соединений, ухудшающих качество и надежность сварных соединений. Визуальный осмотр соединений является наиболее распространенным методом контроля. Качество готовых узлов проверяют 100%-м осмотром под микроскопом на соответствие требованиям чертежа. Зона сварки не должна быть смещена за границы контактной площадки. Деформация выводов должна составлять 30–60 % от его толщины. Дефекты в структуре полупроводникового кристалла, возникшие в процессе присоединения выводов, также выявляются по электрическим характеристикам прибора. Например, резкое увеличение обратных токов и падение пробивного напряжения диодной структуры свидетельствует о возможных микротрещинах в объеме полупроводникового кристалла, образовавшихся в результате термокомпрессии. Для выполнения операций термокомпрессионной микросварки разработано и действует в промышленности большое число специа-

лизированных установок. К достоинствам термокомпрессионной микросварки относятся стабильность процесса микросварки, высокая стойкость сварочного инструмента, легкая регулировка и нечувствительность к небольшим изменениям режима сварки.

Ее недостатки связаны с необходимостью подогрева свариваемых деталей до температуры 350–400 °С. При термокомпрессионной сварке возможно образование интерметаллических соединений, ухудшающих качество и надежность свариваемых соединений.

5.9. Присоединение выводов пайкой

Присоединение выводов пайкой применяется при изготовлении мощных полупроводниковых приборов (выпрямительных диодов, транзисторов, СВЧ-диодов), а также для монтажа гибких проволочных выводов к тонкопленочным (предварительно облуженным) контактными площадкам в гибридных микросхемах. Пайку выводов мощных полупроводниковых приборов выполняют низкотемпературными припоями на основе олова, свинца, индия в печах непрерывного и периодического действия в атмосфере защитного газа. При этом детали прибора собираются в определенной последовательности в кассетах (рис. 5.22), фиксируя их в нужном положении относительно друг друга. Припой в виде детали определенной формы и размеров закладывают между соединяемыми элементами. Иногда припой предварительно наносят гальваническим способом на конец плоских выводов или электрохимическим способом в виде шарика – на конец проволочного вывода. Кассеты изготавливают из термостойких материалов, несмачиваемых или плохо смачиваемых расплавленным припоем. При пайке выводов в термических установках роль флюса выполняет водород (или его смесь с азотом), восстанавливающий оксиды на поверхностях соединяемых деталей и припоя, а также предохраняющий их от окисления.

Процесс присоединения электродных выводов складывается из нескольких этапов: нагрева деталей до максимальной температуры пайки, выдержки при этой температуре и охлаждения с определенной температурой до 50–100 °С. Охлаждаться спаянные детали могут вместе с печью и в специальных холодильниках, являющихся продолжением печи непрерывного действия (конвейерных термических установках). При присоединении электродных выводов с нагревом

электрическим током импульс тока пропускается непосредственно через соединяемые детали или используется дополнительный контакт, место пайки (электродный вывод и контактная площадка) также нагревается спиралью, через которую пропускают импульс тока. Пайка электродных выводов выполняется также специальным паяльником с миниатюрным наконечником.

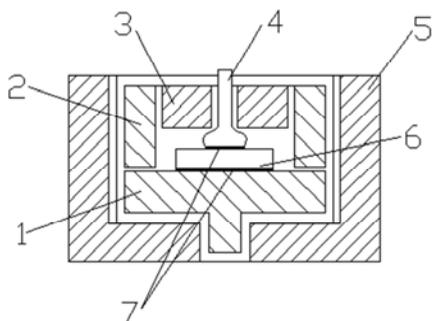


Рис. 5.22. Кассета с загруженной арматурой для пайки в печи:
1 – держатель; 2 – втулка кассеты; 3 – грузы; 4 – вывод; 5 – кассета;
6 – припаянные шайбы

Для обеспечения хорошего смачивания при пайке в водороде на паяемые поверхности наносятся покрытия из Ni, Au, Cu, и других металлов или припой на одну или обе паяемые поверхности. Пайку под давлением круглых и плоских выводов или перемычек к контактным площадкам ИМС и других деталей можно осуществлять паяльником групповым методом на установках ЭМ-439. При этом для обеспечения флюсовой пайки на паяемые поверхности плат микросхем и выводов наносят легкоплавкие припои (ПОС-61, ПОИ-50). Одна из соединяемых поверхностей может быть покрыта золотом. Недостатком данного способа пайки является то, что в процессе отвода инструмента (паяльника) от места пайки или снятия паяемого изделия с нагревательного столика установки могут сместиться выводы относительно контактных площадок плат микросхем. Широкое распространение получил способ пайки давлением с импульсным нагревом места пайки. При этом методе смещения выводов относительно контактных площадок не происходит из-за практически мгновенной кристаллизации паяного шва соединения благодаря небольшой длительности импульсного нагрева (не более 1–3 с) и локальному ра-

зогреву места пайки. Бесфлюсовая пайка под давлением импульсным нагревом осуществляется с помощью V-образного инструмента на установках односторонней контактной сварки. В табл. 5.1 приведены типы припоев, используемых при пайке проволочного монтажа гибридных микросхем и выводов полупроводниковых приборов.

Таблица 5.1

Некоторые типы припоев, используемые при присоединении выводов полупроводниковых приборов и микросхем пайкой

Марка	Температура плавления		Содержание компонентов, %	Примеси мас., % не более
	Начало	Конец		
ПОИ-50	117	117	49–51 Sn, ост. Zn	0,2
ПСРЗИ	141	141	2,5–3,5 Ag, ост. Zn	0,2
ПСРОС-58	180	190	57,8±1 Sn, 3±0,4 Ag, Fe, Bi	0,3
ПОС-61	183	190	59–67 Sn, ост. Pb	0,25
ПОВи-0,5	224	232	0,4–0,6 Bi, ост. Sn	
ПОИН-5	220	285	4–6 Zn, ост. Sn	
ПСр-2,5	245	300	2,5±0,3 Ag, 5,5±0,5 Sn, Fe	0,15

При пайке электродных выводов наблюдается ряд дефектов: смещение вывода относительно контактной площадки кристалла (платы), непропай (недостаточное растекание припоя и заполнение им зазоров), образование трещин в кристаллах и закороток различных областей *p-n*-переходов или соединений контактных площадок (токопроводящих дорожек). Это недостаток метода.

5.10. Проволока для электродных выводов

Наиболее слабым звеном в полупроводниковых приборах (в СВЧ-транзисторах) являются электродные выводы, изготавливаемые из металлической проволоки диаметром от 8–10 мкм до 50–60 мкм. Электродные выводы должны обладать высокой прочностью на растяжение и сжатие при испытаниях полупроводниковых приборов на климатические и механические воздействия в эксплуатации, хорошо деформироваться при присоединении к контактным площадкам, а также иметь высокую электропроводность. Такими свойствами обладает проволока из золота, сплава Ag–Au и алюминия. Проволока, получаемая протягиванием (волочением) через волокнистые материалы, должна иметь чистую,

без посторонних включений, трещин, раковин, расслоений и вмятин поверхность. Допускаются незначительные дефекты в виде рисок и уколов. Особой сложностью изготовления отличается золотая проволока диаметром 8–15 мкм, получаемая волочением в медной оболочке, при стравливании которой обнаруживаются скрытые дефекты, вызывающих ее неоднородность по химическому составу. Для повышения надежности полупроводниковых приборов разработана и изготавливается литьем проволока из сплава Ag-Au (МлСрЗл 850). Литая проволока, полученная непосредственно из жидкой фазы, имеет незначительные структурные дефекты. Изготовление золотой проволоки диаметром от 20 мкм и более осуществляется по отработанной технологии. До диаметра 200 мкм такая проволока поставляется только твердой и диаметром более 200 мкм – твердой или мягкой. Механические свойства проволоки из Ag, Au и их сплавов приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Механические свойства проволоки из Ag, Au и их сплавов

Марка	Временное сопротивление проволоки разрыву		Относительное удлинение мягкой проволоки, %
	твердой	мягкой	
ЗЛ 999,9	196	117	10
ЗЛ СрМ 583-80	7320	440	35
Ср 999,9; Ср 999	255	157	27
СрМ 960	392	245	25
СрМ 925	343	245	20
СрМ 916	343	245	20
СрМ 875	343	245	20
СрП 12	392	196	18
СрП 20	392	245	30

Алюминиевую проволоку для электродных выводов диаметром от 15 до 70 мкм твердую АТ, полутвердую АПТ и мягкую АМ получают волочением через алмазные волюки со смазкой 1–2%-м раствором мыльной эмульсии. Временное сопротивление разрыву проволоки АТ, АПТ, АМ всех диаметров должно быть не менее 96,98–225,73 Н/мм², а удельное электрическое сопротивление 0,028 Ом·мм²/м.

Кроме алюминиевой проволоки в производстве полупроводниковых приборов применяют алюминиевую плющенко, которую изготавливают из проволоки. Из проволоки диаметром 140 мкм получают плющенко толщиной 30 и шириной около 250 мкм.

5.11. Методы микромонтажа кристаллов БИС

5.11.1. Ультразвуковая микросварка и микромонтаж кристаллов на ленточных носителях

Как известно, автоматизированную сборку многих типов конструкций плоских корпусов микросхем средней степени интеграции и БИС с высокой производительностью выполняют на ленточных носителях – рамках, имеющих перфорацию и траверсы для соединения с кристаллом. Переход на медные рамки с локальным покрытием серебром, имеющие большую теплопроводность и технологичность, требует снижения температуры разварки межсоединений и повышения их качества.

Разварка в типовом режиме ТКС при температурах 300–330 °С на установках ЭМ-4060, ЭМ-4060П приводит к окислению медной рамки и ухудшению качества серебряного покрытия. Окисление рамки снижает воспроизводимость последующих технологических операций, в частности герметизации методом литьевого прессования (повышенное облообразование); а также ухудшает качество зачистки рамок от облоя; увеличивает трудоемкость, снижает качество корпуса при гидроабразивной зачистке, создает необходимость удаления оксидов с поверхности рамки перед лужением и, следовательно, затрудняет создание качественного гальванического покрытия сплавом олово-висмут (или горячего лужения).

Хотя в микромонтажном автомате ЭМ-4060П предусмотрен режим ТЗС, реальная конструкция генератора и преобразователя не позволяет добиться хорошего качества разварки в режиме термовздука при сравнительно низких температурах (200–240 °С), который в полной мере обеспечен на установках разварки модели 1484 фирмы Kulicke and Soffa (США). Для повышения качества сварки был доработан автомат ЭМ-4060П в части усовершенствования УЗ-генератора, преобразователя и блока формирования шарика (БФС). Это дало возможность снизить температуру разварки при наложении УЗ-колебаний до 230–250 °С. Однако в процессе отработки режима ТЗС в условиях производства отмечено, что существующие конструкции столика и прижима не обеспечивают надежное, жесткое закрепление выводов рамки, что является необходимым условием ТЗ- и УЗ-сварки.

В процессе соединения проволочных выводов с контактными площадками кристалла методом ТЗС встык шариком для обеспечения качественного сцепления материала проволочного вывода с материалом контактных площадок при наложении температуры, давления и ультразвуковых колебаний шарик деформируют, создавая таким образом требуемую площадь сцепления. Степень деформации шарика, а именно его остаточная толщина («высота» сварного соединения) после образования сварного соединения на кристалле, является одним из критериев оценки качества проведения сборочных операций таких микросхем.

При квалификационной аттестации процессов сборки микросхем проводится оценка уровня состояния технологического процесса микросварки как по величине прочности микросварных соединений на разрыв и на сдвиг, так и по величине остаточной «толщины шарика» на кристалле, которая по техническим требованиям этих фирм должна составлять 10–30 мкм (для проволоки диаметром 25 мкм при ТЗС).

Степень обжатия при формировании микросварного соединения

$$K = \frac{D - H}{D},$$

где D – диаметр проволоки (шарика) в исходном состоянии;

H – высота микросварного соединения после обжатия.

Схема контроля геометрических размеров при формировании микросварного соединения приведена на рис. 5.23.

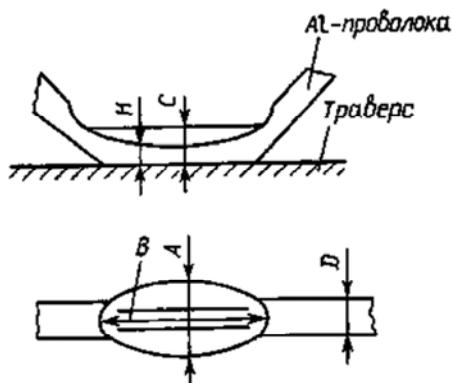


Рис. 5.23. Схема контроля геометрических размеров в зоне микромонтажа кристаллов:
 A, B, C, D, H – характеристические размеры

Результаты контроля геометрических параметров соединений микропровода и контактных площадок приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Геометрические размеры сварных точек, мкм

Сварка	<i>A</i> , мкм	<i>B</i> , мкм	<i>H</i> , мкм	<i>C</i> , мкм	<i>K</i> , %
Термозвуковая	58–65	85–88	6–9	~ 25	78
Ультразвуковая	58–65	75–85	7–9	30–32	77

В промышленности Беларуси освоены технологии разварки выводов из микропровода по 14-выводной медной рамке с серебряным покрытием толщиной 3–5 мкм на различных типах отечественных и импортных установок.

Сравнительные данные по механической прочности формируемых микромонтажных соединений на разрыв при различных режимах разварки медных рамок с серебряным покрытием и данные по прочности сварных соединений (шариков на кристалле) на сдвиг, выполненные проволокой 25 мкм фирмы Heraeus, имеющую собственную прочность 11,5 сН, приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Прочность микросварных соединений

Тип установки, год выпуска	Режим разварки; температура столика, °С; давление, сН	Прочность микромонтажных соединений на разрыв $(F_{\min} - F_{\max}) / F_{\text{ср}}$, сН	Прочность сварного соединения (шарика) на сдвиг $(F_{\min} - F_{\max}) / F_{\text{ср}}$, сН	Усилие сжатия, Н
1	2	3	4	5
ЭМ-4060, ЭМ-4060П, 1992	Термокомпрессия; 300–330; 1св – 36; 2св – 90	(4 – 8) / 5,6	(20 – 32) / 23,7	Прижимом 10–15, столик с пьедесталом под траверсы

1	2	3	4	5
ЭМ-4060П с доработкой БФШ, 1994	Термозвуковая; 240–260; 1св – 30 2св – 95	(4,5 – 8) / 6	(22 – 32) / 27,2	Прижимом 10–15, сто- лик без пье- дестала под траверсы
Kulicke and Sofa, 1984	Термозвуковая; 215–240; 1св – 28 2св – 60	(5 – 8) / 6,6	(28 – 35) / 31,7	

Анализ приведенных данных показывает, что внедрение процесса с оптимальными режимами ТЗС, кроме снижения степени окисления рамки, позволяет увеличить механическую прочность микро-монтажных соединений на разрыв и прочность сварного соединения на сдвиг. Изменение их конструкции с целью исключения образования пьедестала под выводы рамки на столике и использование в производстве прижимающего выступа на прижиме способствовали более равномерному обжатию выводов рамки и высокому качеству ТЗС при температуре 230–250 °С.

УЗ-микросварку алюминиевых проволочных выводов марки А999К0.9 толщиной 35 мкм можно выполнять на полуавтомате ЭМ-4020 при мощности колебаний 0,15 Вт, времени сварки 0,1 с, давлении на сварочный капилляр 20 сН и фиксации усилия с точностью $\pm 1,5\%$. Прочность сварных соединений P_{cp} определялась как среднее арифметическое значение ряда распределения, включающего 100 замеров:

$$P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^l P_i n_i}{\sum_{i=1}^l n_i}, \quad (5.1)$$

где P_i – среднее значение прочности в интервале;

n – количество значений в интервале;

l – количество интервалов.

При термокомпрессионной микросварке на автоматах типа ЭМ-4060, ЭМ-4060П добиться столь высокой степени деформации микросварного соединения, как на автомате разварки 1484, не удастся. Это обусловлено, с одной стороны, трудностью обеспечения условий для

проведения с высокой воспроизводимостью процесса формирования шарика с минимальным диаметром, а «раздавить» шарик большого диаметра (около 90 мкм) до остаточной толщины 30 мкм практически невозможно, и, с другой стороны – тем, что при ТКС регулировать степень деформации шарика можно только давлением, в отличие от ТЗС, где дополнительно накладываются УЗ-колебания (табл. 5.5).

Таблица 5.5

Деформация микросварного соединения

Тип установки	Вид микро-сварки; температура, °С; давление, Па	Диаметр сформированного шарика, мм	Диаметр сварного соединения после разварки, мм	Высота сварного соединения, мм	Степень обжатия К
1484	ТЗС; 205; 235	60–63	93–97 93–96	26 24,5–25	0,58 0,60
ЭМ-4060П с доработкой БФШ	ТКС; 300; 43–45	65–70	97	35–36	0,48
	340; 40–45		90	31–32	0,54
	320; 60–65		90	26–27	0,61
ЭМ-4060	ТКС; 320; 25–35	65–90	97	44–45	0,43
			90	32–33	0,58

При ТЗС совместное действие температуры, энергии УЗ-колебаний и усилия нагружения рабочего инструмента обеспечивает оптимальную степень обжатия. Анализ влияния температуры столика при ТКС показал также, что, как и в случае ТКС, степень деформации сварного соединения практически не зависит от температуры сварки в диапазоне, обеспечивающем образование качественных микросварных соединений (300–340 °С).

Важной технологической операцией является оценка прочности микросварных соединений, полученных термокомпрессионной и термозвуковой сваркой золотой проволокой после термоциклических воздействий. Для определения устойчивости микросварных соединений к термоциклам медные рамки с кристаллами и разваркой кристаллов золотой проволокой диаметром 25 мкм методами ТКС и ТЗС подвергаются испытаниям в диапазоне температур от –60 до +150 °С (по 10 мин при каждой температуре). Прочность микромон-

тажных соединений на разрыв и «прочность шарика» (на кристалле) на сдвиг непосредственно после разварки и проведения 10 и 30 циклов воздействия приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Прочность соединения после термоциклических воздействий

Вид микросварки	Прочность микро- тажных соединений на разрыв, сН			«Прочность шарика» на сдвиг, сН		
	Термокомпрессионная	5,4	5,45	4,9	24,6	24,2
Термозвуковая	6,6	6,55	6,5	29,9	30,7	29,9

Исследования показывают, что до 10 циклических воздействий температур практически не оказывают влияния на прочность микросварных соединений золотой проволокой, полученных при ТКС и ТЗС. После испытаний в течение более 10 циклов отмечено снижение прочности сварных соединений на разрыв на 12 %, полученных термокомпрессионной сваркой. При этом снижается «прочность шарика» на сдвиг на 17 %, увеличивается разброс по величине прочности сцепления сварного соединения золото-алюминий контактной площадки кристалла, полученного методом ТКС. После 30 термоциклов отмечено некоторое снижение прочности микро-монтажных соединений на разрыв, полученных ТКС. При этом также снижается «прочность шарика» на сдвиг, увеличивается разброс величины прочности сцепления микросварного соединения золота с алюминиевой контактной площадкой кристалла.

ТЗС, как показывает результат проведенных исследований, более устойчива к термоциклическим воздействиям и после проведения термоциклов; изменений как прочности сцепления шарика с контактной площадкой кристалла (шарик на сдвиг), так и прочности микро-монтажных соединений на разрыв практически не происходит.

Одним из критериев оценки качества проведения микро-монтажных операций является оценка дефектности монокристалла под контактными площадками. Для этого образцы после проведения микросварки подвергались травлению в растворе ортофосфорной кислоты для удаления металлизации (пленки на основе алюминия) на контактных

площадках. После травливания металлизации производится оценка внешнего вида кристаллов (зон контактных площадок) под бинокулярным оптическим микроскопом при 80–200-кратном увеличении.

После травливания металлизации с контактных площадок кристаллов, которые прошли цикл операции ТКС золотой проволокой диаметром 25 мкм при температуре 340–345 °С и давлении 60–65 сН, на контактных площадках выявлены нарушения структуры кремния («выколы»), что указывает на неоптимальный режим формирования микромонтажных соединений. На кристаллах, прошедших режим ТЗС ($T = 240$ °С), дефектов структуры кремния в зонах контактных площадок не выявлено.

Таким образом, анализ дефектности монокристаллического кремния в зонах контактных площадок показывает, что установленные в результате проведенных экспериментальных исследований режимы термозвуковой сварки являются предпочтительными, так как вероятность обнаружения нарушений структуры кремния под контактными площадками кристаллов меньше, а степень обжата достигает 60 %.

6. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИС

6.1. Общие сведения

Надежность полупроводниковых приборов и ИМС при работе в аппаратуре и хранении существенно зависит от герметичности корпуса. Под герметичностью понимают способность замкнутой конструкции не пропускать через свои элементы жидкость или газ. Герметичность характеризуется допустимой утечкой (течью) в единицах потока жидкости или газа. Этот поток жидкости или газа через микроотверстия выражают в единицах объема при определенном давлении, отнесенных к определенному времени. В вакуумной технике поток измеряют в литрах, умноженных на микрометры ртутного столба в секунду $\left(\frac{\text{л} \cdot \text{мкм рт. ст.}}{\text{с}} \right)$, а в системе СИ – в кубических метрах, умноженных на паскаль в секунду $\left(\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}} \right)$;

$1 \frac{\text{л} \cdot \text{мкм рт. ст.}}{\text{с}} = 1,32 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}}$. Корпуса полупроводниковых приборов считаются герметичными при натекании гелия не более $10^{-5} \frac{\text{л} \cdot \text{мкм рт. ст.}}{\text{с}}$.

Герметизация – одна из завершающих операций технологического процесса производства полупроводниковых приборов, так как обеспечивает их долговечную работу при механических и климатических воздействиях. Она является последней операцией сборки полупроводниковых приборов, от качества которой зависит выход годных изделий. Под *герметизацией прибора или микросхемы* понимают комплекс мер по обеспечению работоспособности изделий при их изготовлении, хранении и последующей длительной эксплуатации. Для этой цели используется широкая номенклатура материалов и различные способы герметизации, реализованы разные конструктивные решения.

Все герметизирующие изделия делятся на две группы: полые конструкции, в которых рабочая поверхность изделия не контактирует непосредственно с герметизирующим материалом, и конструкции

без внутренних газовых полостей, в которых герметизирующий материал контактирует с рабочей поверхностью изделия (монолитные конструкции). К первой группе относят металлостеклянные, металлокерамические, пластмассовые и другие корпуса, ко второй – бескорпусные изделия и монолитные пластмассовые корпуса. При герметизации различают внешнюю и окружающую среды. Среду, в которой хранят и эксплуатируют приборы и микросхемы, называют внешней, а среду, ограниченную поверхностью герметизирующей конструкцией (среда внутри корпуса), – окружающей. Окружающая среда может быть газообразной, жидкой или в виде твердого покрытия. Особенности герметизации в полых корпусах с воздушной или другой газовой средой являются отсутствие воздействия на герметизируемые изделия механических напряжений, возможность расположения внутри корпусов геттеров для регулирования состава газовой среды и влажности, а также возможность заполнения или необходимости внутреннего объема инертных газов. Однако герметизация изделий в полых корпусах не обеспечивает требуемую механическую прочность элементов конструкции изделия. Для этого изделия предварительно покрывают эластичным материалом для механического крепления и электрической изоляции проводников друг от друга и от металлической крышки корпуса.

Наиболее надежны корпуса и покрытия на основе неорганических материалов; используется герметизация изделий, помещенных в металлостеклянные или металлокерамические корпуса. Такие корпуса могут иметь самую различную форму и любое число выводов в зависимости от типа герметизируемого изделия. Существует большое количество способов корпусной герметизации полупроводниковых приборов и ИМС. В зависимости от типа корпуса и предъявляемых требований герметизация может осуществляться пайкой, холодной сваркой, электроконтактной сваркой, сваркой, плавлением. В полупроводниковой промышленности наиболее распространены способы герметизации холодной, электроконтактной сваркой и пайкой.

К конструкциям без внутренних газовых полостей относятся монолитные пластмассовые корпуса. При такой герметизации химические реакции отверждения и образования адгезионных связей, протекающих в покрытиях и материале корпуса, а также усадки и внутренние механические напряжения, связанные с ними, могут оказывать влияние на параметры изделия. Поэтому предъявляются повы-

шенные требования к химической чистоте и термостойкости герметизирующих материалов. Для нанесения герметизирующих материалов непосредственно на поверхность изделий применяют различные способы. Однако независимо от типа используемых материалов и способа герметизации надежность работы изделий зависит от ряда общих факторов: обеспечения механической целостности коммутирующих проводников и соединений, чувствительных к механическим воздействиям элементов; отсутствия повреждений элементов и узлов герметизированных изделий при кратковременном изменении факторов внешней среды (нагрев, охлаждение, резкое изменение температуры); выбора влагостойких материалов; высокой химической чистоты и нагревостойкости материалов. Органические полимерные материалы, используемые для герметизации, являются влагонепроницаемыми и менее нагревостойкими по сравнению с неорганическими материалами. Они могут выделять летучие продукты, не обеспечивать требований по химической чистоте. Однако конструкции на их основе более экономичны и практически незаменимы при герметизации изделий массового производства.

Такие способы герметизации корпусов полупроводниковых приборов и ИМС, как заливка пластмассой, склеивание специальными клеями, стеклоцементами, глазуриями и лаками, заварка стеклом, а также различные виды сварки и пайки находят широкое применение в полупроводниковой технологии. Приборы в пластмассовой оболочке характеризуются низкой стоимостью, хорошим внешним видом, групповой технологией производства. Некоторые полупроводниковые приборы герметизируют клеями, приклеивая керамическую крышку к металлокерамической ножке. Такая герметизация способствует получению высокого выхода герметичных приборов, не требует дорогостоящего оборудования, но процессы нанесения и отверждения клея достаточно длительны. Герметизация стеклоцементами, глазуриями, лаками и стеклом имеет ограниченное применение. Рассмотрим более подробно основные виды герметизации полупроводниковых приборов и ИМС.

6.2. Герметизация холодной сваркой

Для получения неразъемных соединений широко используется холодная сварка. Отличаясь простотой и доступностью, она позво-

ляет осуществлять прочные и надежные соединения. Этот способ применяется в основном для герметизации металлостеклянных корпусов транзисторов и диодов средней и большой мощности, выполняемых из металлов с высокой тепло- и электропроводностью. Достоинством способа герметизации холодной сваркой является отсутствие нагрева при герметизации и сопровождающего его явления – выделения газов внутри объема. В полупроводниковом производстве для герметизации корпусов применяют чаще холодную сварку, которая образует нахлесточное соединение – точечную холодную сварку по замкнутому контуру (периметру) силами P , направленными перпендикулярно свариваемой поверхности и реже – холодную сварку сдвигом или продавливанием при одновременном действии нормальных и тангенциальных усилий. Сварка по замкнутому контуру может быть с одно- и двухсторонним деформированием. Сварку с односторонним деформированием применяют для сваривания деталей из разнородных металлов, так как устраняется опасность образования сильно подрезанного участка шва наружной стороны более мягкой детали. Сварку с двухсторонним деформированием используют для соединения однородных металлов. Недостатком ее является необходимость точной фиксации выступов пуансона и матрицы. Смещение выступов при сварке разнородных металлов вызывает подрезание более мягкого из них.

Режим холодной сварки по замкнутому контуру определяется степенью интенсивной деформации:

$$K = \frac{(S_n + S_b) - h}{S_n + S_b} \cdot 100 \%,$$

где S_n – толщина буртика ножки;

S_b – толщина буртика баллона;

h – толщина шва.

Деформация должна быть не ниже заданного значения, характерного для данного металла. Усилие для создания такой деформации зависит от многих факторов и может меняться в широких пределах. Значения относительной деформации при холодной сварке различных однородных и разнородных металлов толщиной до 1 мкм приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Значения относительной деформации и необходимые удельные давления для холодной сварки некоторых металлов

Свариваемые металлы	Относительная деформация, %	Удельное давление, 10^9 Па/м^2
Алюминий + алюминий	60	0,17–0,5
Медь + медь	80	1,5–1,8
Алюминий + медь	62	0,5–1,0
Медь + низкоуглеродистая сталь	80	2,0–2,5
Медь + ковар	80	2,0–2,5

В промышленных условиях для материалов, применяемых в корпусах полупроводниковых приборов, холодная сварка осуществляется правильно, если величина относительной деформации находится в интервале 75–85 %. При заданном значении относительной деформации можно определить толщину сварного шва:

$$h = (S_n + S_\delta) \cdot (1 - K/100).$$

Усилие сжатия при холодной сварке $Q = nPF$, где n – коэффициент учитывающий склонность материала к упрочнению (обычно $n = 1,5–2,0$); P – удельное давление; F – площадь проекции поверхности рабочей части пуансона.

При сварке однородных металлов удельное давление (при условии, что ширина рабочей части пуансонов вдвое превышает необходимую толщину свариваемого металла) определяется из зависимости: $P = G_T(1,5 + 100/(100 - K))$, где G_T – предел текучести металла.

Необходимые удельные давления для холодной сварки по замкнутому контуру некоторых металлов приведены в табл. 6.1. Давление обычно в 5–8 раз превышает предел прочности свариваемых металлов при растяжении. При одно- и двусторонней сварках толщину S буртиков выбирать одинаковой. Разная толщина буртиков допускается при отношении их толщин до 1:4. Детали корпусов полупроводниковых приборов изготавливаются из материалов, сочетания которых приведены в табл. 6.2

Сочетания материалов для изготовления деталей
полупроводниковых приборов

Материал держателя ножки	Материал баллона, колпака
Медь МБ	Медь МБ, МБ1, МБ2, МБ3, или ковар 29НК, или сталь 10
Ковар 29НК	Медь МБ или медь М1
Медь М1	Сплав 47 НД
Сплав 47 НД	Медь МБ или М1, М2, М3

Особенностью способа герметизации холодной сваркой является значительная деформация около шовной зоны с сильным искажением формы детали. Деформация может передаваться в другие части детали и достичь зон металлостеклянных и металлокерамических спаев и мест крепления полупроводниковых кристаллов. Это может вызвать разрушение спаев, ухудшение контакта полупроводникового кристалла с держателем, растрескивание полупроводникового материала с изменением электрических параметров приборов. Деформация свариваемых деталей, как показано на рис. 6.1, при холодной сварке вызывает увеличение наружного диаметра прибора D_1 , уменьшение диаметра верхней детали баллона D_2 в около шовной зоне, увеличение высоты баллона H . Чтобы избежать деформацию корпуса, применяют конструкцию фланцев, держателей и баллонов с разгрузочными элементами, способные в результате деформации снизить механические деформации до безопасных значений.

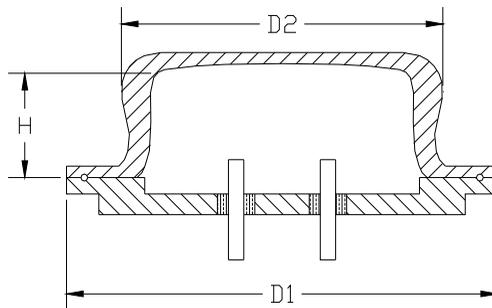


Рис. 6.1. Деформация деталей корпуса при холодной сварке

Конструктивные решения компенсации напряжений во фланцах ножек различных типов полупроводниковых приборов показаны на рис. 6.2.

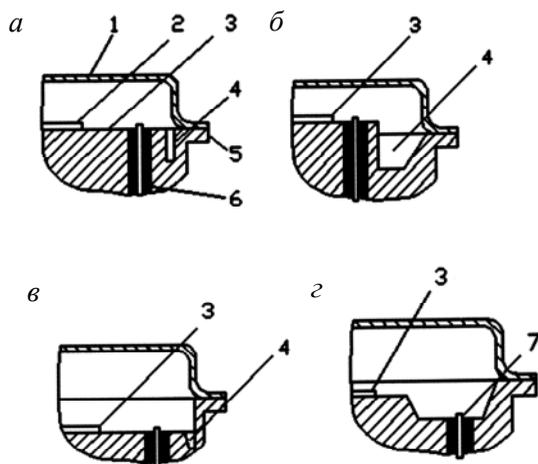


Рис. 6.2. Компенсация напряжений во фланцах ножек кольцевыми разгрузочными канавками:

- а* – получаемый резанием; *б* и *д* – широкой мелкой с отбортованным краем;
в – узкой мелкой; *г* – широкой глубокой;
 1 – баллон; 2 – кристалл; 3 и 7 – плоскости монтажа кристалла и изоляторов;
 4 – разгрузочная канавка; 5 – фланец; 6 – изолятор

Фланцы из бескислородной меди с кольцевой разгрузочной канавкой (рис. 6.2, *а*) применялись в корпусах мощных полупроводниковых приборов. Разгрузочная канавка 4 изготавливается резанием, а металлостеклянные изоляторы 6, состоящие из коваровых втулок и коваровых выводов, соединяемых между собой стеклом, впаиваются в медный фланец 5 твердым (высокотемпературным) припоем. Полупроводниковый кристалл 2 непосредственно напаивается на поверхность 3 фланца или на молибденовый компенсатор, который предварительно смонтирован на нем. Недостатком таких корпусов является высокая стоимость из-за невозможности полностью сделать фланец штампованным. При герметизации баллона 1 с ножкой холодной сваркой металлостеклянный спай и кристалл не разрушаются.

Фланец ножки, показанный на рис. 6.2, *б*, отличается от предыдущего тем, что в нем разгрузочная канавка 4 шире, мельче и имеет от-

бортованный край, а плоскость 3 монтажа кристалла поднята над местом холодной сварки ножки с баллоном. Механические напряжения гасятся деформацией сварочного буртика и частично фланцем, который может изготавливаться штамповкой. Во фланце ножки, показанном на рис. 6.2, в, плоскость 3 монтажа кристалла находится ниже места выполнения холодной сварки и имеется узкая мелкая разгрузочная канавка 4. Оптимальный подбор размеров канавки и глубины опускания плоскости монтажа кристалла позволяет компенсировать напряжения холодной сварки, изготавливать фланец штамповкой и при достаточной его толщине впаивать металлостеклянные выводы, рассчитанные на большие токи. Здесь затруднена очистка (отмывка) канавки.

Фланец ножки, показанный на рис. 6.2, г, имеет широкую глубокую разгрузочную канавку, в которую монтируются металлостеклянные изоляторы и поднятый над ней столик 8, что улучшает условия монтажа кристалла; значительный объем металла столика способствует увеличению теплоотвода. При малых размерах фланцев ножек их очистка (отмывка) затруднена. При такой конструкции целостность выводов и кристаллов при холодной сварке сохраняется.

Фланец ножки, показанный на рис. 6.2, д, применяемый в мало-мощных полупроводниковых приборах, имеет широкую мелкую с отбортованным краем разгрузочную канавку. Плоскости монтажа кристалла и металлостеклянных изоляторов находятся на одном уровне с местом соединения ножки с баллоном. Такие фланцы ножек изготавливают штамповкой из ковара. Деформации, возникающие при герметизации холодной сваркой, компенсируются буртиком.

Для получения надежного холодного сварного соединения необходимо тщательно готовить свариваемые поверхности. Одним из способов такой подготовки является нанесение на ножки с коваровыми фланцами и медные баллоны химическим или гальваническим методом пленок никеля. При герметизации корпусов для получения хороших результатов предварительно химически наносится слой никеля толщиной 3–6 мкм, который вжигается при 400 °С в атмосфере водорода в течение 45 мин. Термообработка увеличивает микротвердость покрытия и его адгезию к основе, стабилизируя процесс герметизации. Также выполняется матовое гальваническое никелирование, не требующее термообработки. Оптимальным считается слой никеля при отношении его толщины к толщине основного металла,

равном 0,01–0,02. Баллоны из стали 10 после отжига также никелируют. Для получения требуемой прочности холодносварного соединения коваровые детали при чистых их поверхностях не никелируют. Холодная сварка одно- и двухсторонняя показана на рис. 6.3.

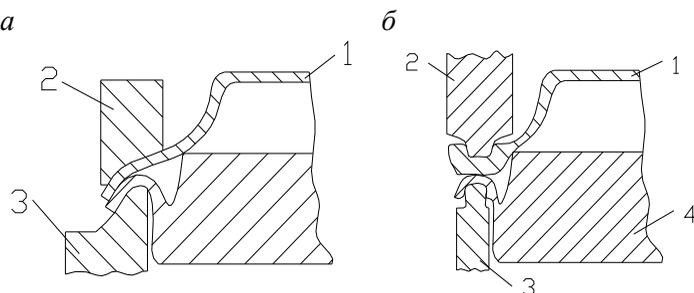


Рис. 6.3. Схемы холодной сварки:

а – односторонней; *б* – двухсторонней; 1 – баллон; 2 и 3 – нижний и верхний пуансоны; 4 – фланец ножки

При односторонней холодной сварке (рис. 6.3, *а*) деформируется в основном только одна из свариваемых по контуру деталей. При двухсторонней сварке (рис. 6.3, *б*) деформируются обе свариваемые по контуру детали. В холодносвариваемом шве различают внутреннюю и две периферийные зоны. Прочность соединения при испытании на отрыв образцов алюминия, сваренных при углублении пуансонов до 70 % толщины металла, зависит от прочности внутренней зоны. По мере увеличения глубины деформации прочность соединения все больше зависит от прочности периферийной зоны. При углублении пуансона в металл на 90 % его толщины на тех же образцах с высверленной внутренней зоной прочность составляет 97–100 % от прочности целых образцов, т. е. определяется только прочностью периферийной зоны. В полупроводниковом производстве для герметизации корпусов используют несколько разновидностей холодной сварки.

При герметизации корпусов чеканкой (рис. 6.4, *а*) необходимо, чтобы фланец 2 ножки был изготовлен из твердого материала (стали) и имел канавку требуемых размеров и формы, а баллон 1 из пластического материала (Cu, Al). Выполняют такую сварку пуансоном с подобранным углом скоса, которым зачеканивают нижний ободок баллона в канавку фланца ножки.

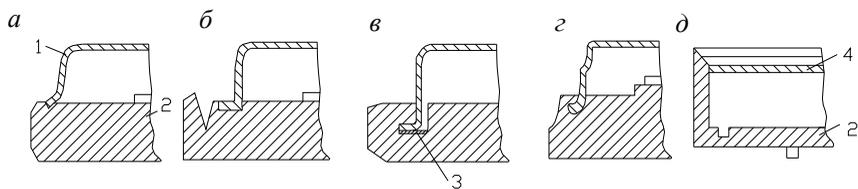


Рис. 6.4. Холодная сварка:

а – чеканкой; *б* и *в* – вдавливанием без уплотнительной прокладки и с нею;
г – обжимом; *д* – продавливанием крышки; 1 – баллон; 2 – фланец ножки;
 3 – прокладка; 4 – крышка

При герметизации корпусов вдавливанием (рис. 6.4, *б*) фланцы ножек выполняют из пластичных металлов, а баллон – из твердых. Для вдавливания баллона во фланец служит специальный пуансон, который, надрезая металл по периметру канавки фланца, герметично уплотняется с ранее помещенным в канавки баллоном. Возможна герметизация вдавливанием с использованием прокладки 3 из пластичного металла (свинца), предварительно укладываемой в канавку фланца по ее периметру (рис. 6.4, *в*). Герметизацию корпусов обжимом (рис. 6.4, *г*) применяют, если фланец изготовлен из пластичного металла, а баллон – из твердого. Баллон помещают в специальную канавку фланца и пуансоном со скошенным внутренним краем металл фланца сдвигают к баллону, плотно охватывая его. Кроме того, корпуса герметизируют продавливанием крышки 4 во фланец 2 (рис. 6.4, *д*). Для этого крышку изготавливают чуть больше фланца по диаметру, а затем с натягом вводят во фланец.

6.3. Герметизация корпусов контактной сваркой

Контактная (электроконтактная) сварка широко применяется для герметизации полупроводниковых приборов и микросхем в металлоглазанных корпусах круглой и прямоугольной формы со штырьковыми выводами (рис. 6.5), а также СВЧ-приборов в керамических корпусах.

Основными ее видами являются контактная сварка по контуру и шовная (роликовая). Контактная сварка представляет процесс получения неразъемного соединения материалов нагревом свариваемых кромок до пластического или расплавленного состояния с последую-

щим их сжатием (осадкой). Нагрев свариваемых деталей производится в результате выделяемой теплоты при прохождении через них электрического тока. Схема процесса герметизации показана на рис. 6.6.

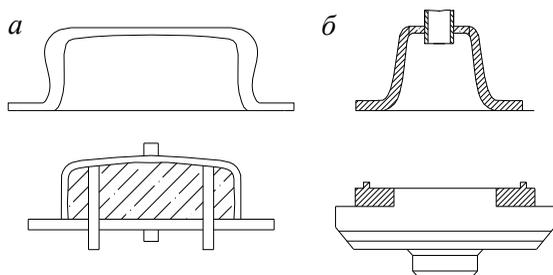


Рис. 6.5. Конструкция элементов корпусов, герметизируемых контактной сваркой:
а – с узким сварным полем; б – с рельефом

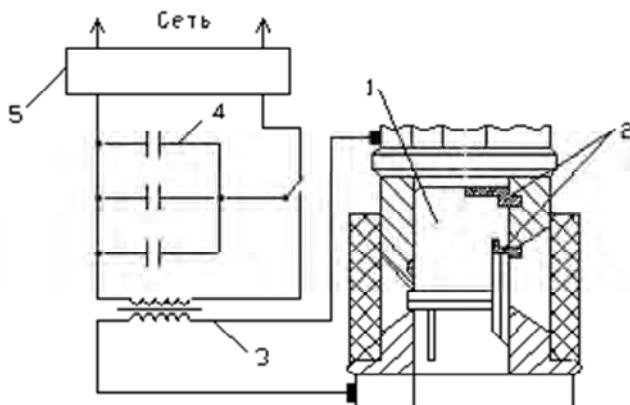


Рис. 6.6. Схема процесса герметизации точечной контактной сваркой:
1 – герметизируемый корпус; 2 – электроды; 3 – электрическая цепь сварочной машины; 4 – батарея конденсаторов; 5 – выпрямитель

Процесс сварки состоит из сжатия свариваемых деталей корпуса, включения (замыкания) и выключения сварочного тока, а также снятия усилия сжатия. Основными элементами установки контактной сварки являются выпрямитель 5, который служит для преобразования переменного тока в постоянный, батарея 4 конденсаторов для накопления электроэнергии и переключатель для последовательного соединения батареи конденсаторов с источником питания и сва-

рочным трансформатором – для получения в сварочной цепи больших токов при низком напряжении. Нагрев металла происходит при замыкании сварочной цепи. Для быстрого нагрева свариваемых кромок применяют большие токи, достигающие десятков тысяч ампер. Электрическое сопротивление прохождению тока в месте контакта свариваемых деталей велико и этот участок быстро нагревается. Преимущественное тепловыделение в зоне контакта сохраняется, и между деталями корпуса появляется расплавленное ядро, которое растет в объеме, перемещается и выравнивается по составу электромагнитным полем, создаваемым сварочным током. При использовании больших токов сварку выполняют за десятые и сотые доли секунды. Герметизация полупроводниковых изделий контактной сваркой – высокопроизводительный процесс, поддающийся механизации и автоматизации. Режим контактной сварки ножки корпуса с баллоном характеризуется основными параметрами – током и временем его прохождения, силой сжатия и временем ее действия.

Ток, проходящий через свариваемые детали:

$$I = N / (U / K) = 1/2 \eta_n C U k,$$

где N – мощность разряда;

C – емкость конденсаторов, равная от 800 до 1200 мкФ на 1 мм периметра свариваемого корпуса;

η_n – КПД процесса для точечной контактной сварки на конденсаторной машине ($\eta_n \approx 0,65$);

U – напряжение зарядки.

Мощность разряда источника питания, обеспечивающая заданную глубину проплавления, составляет от 50 до 150 кВт. Напряжения зарядки аккумуляторной батареи

$$U = (2A/C)^{1/2},$$

где $A = CU^2/2$ – энергия, накапливаемая в конденсаторной батарее

$$A = N t_p / \eta_n;$$

C – емкость конденсаторов;

t_p – время разряда.

Для определения тепловых режимов используется параметр – плотность тока, проходящего через контакт:

$$I_n = \eta_n C U k / (2 t_p S_k),$$

где S_k – площадь контакта свариваемых деталей.

Усилие сжатия свариваемых элементов определяется по формуле

$$Q = P K S_k,$$

где P – удельная нагрузка (12–18 кг/мм²);

K – коэффициент пропорциональности.

Учитывая, что плотность сварочного тока должна быть большой, площади контакта уменьшают, создавая свариваемую поверхность определенного вида (рис. 6.7) или придавая отбортовке деталей специальную наклонную конфигурацию.

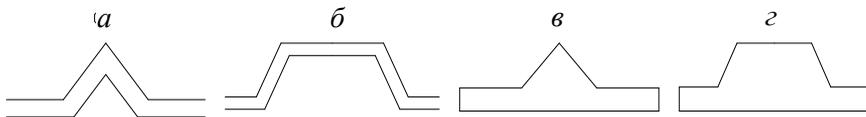


Рис. 6.7. Виды рельефа свариваемых поверхностей корпусов:
а, б – полый; в, г – сплошной

При этом сварка осуществляется в месте контакта острой кромки отбортовки одной из деталей с плоской поверхностью отбортовки другой детали, что значительно повышает качество и стабильность контактной сварки. Контактная сварка по контуру на конденсаторных машинах по тепловому воздействию относится к разряду низкотемпературных. Длительность сварочного импульса при контактной сварке мала (20–80 мс), выделяемая теплота не успевает распространяться вглубь тела корпуса, а отводится в электроды, выполняемые из сплавов меди с высокой теплопроводностью. К достоинствам герметизации контактной сваркой по контуру относятся: точная дозировка энергии; хорошая воспроизводимость процесса; слабый общий нагрев свариваемых изделий, что особенно важно при герметизации корпусов полупроводниковых приборов и ИМС, для которых общий нагрев корпуса не допускается выше рабочей температуры прибора. Качественная герметизация достигается правильно выбранным ре-

жимом и строгим соблюдением технологического процесса. Необходимый режим сварки подбирается регулированием емкости конденсаторов, коэффициента трансформации сварочного трансформатора и усилия сжатия электродов. Суммарная толщина отбортовки корпуса без рельефа должна быть от 0,4 до 0,8 мм.

Правильный выбор материала электродов и оптимальной площади электродного контакта также важны для качества сварного соединения. Для гермитизации корпусов контактной сваркой по контуру в отечественной промышленности используется несколько моделей одно- и многопозиционных сварочных машин (см. табл. 6.3).

Таблица 6.3

Технические характеристики установок для герметизации корпусов контактной сваркой по контуру

Параметры	Значение параметра для установки					
	МТК-53	МТК-8008	МТК-16001	МПК-4001	МПК-10001	МПК-16001
Периметр сварного шва, мм	30–50	51–90	91–140	30–50	51–90	91–140
Производительность, связок/ч	120–150	100–120	80–100	300–900	300–900	200–500
Усилие сжатия электродов, Н	1000–4000	1500–11 500	3000–25 000	1000–5000	1500–12 000	3000–20 000
Максимальная емкость батареи конденсаторов, мкФ	34 000	185 000	280 000	44 800	201 000	280 000

Наиболее ответственными элементами в конденсаторных сварочных машинах являются электроды, которые должны обладать высокой электро- и теплопроводимостью при достаточной твердости и износостойкости. Форма и размеры контактных поверхностей электродов должны обеспечивать надежный подвод электрической энергии и передачу давления к свариваемым деталям корпусов. Электроды для контактной конденсаторной сварки могут быть комбинированными и некомбинированными (рис. 6.8, *a*, *b*). Основание 1 комбинированного электрода изготавливают из меди М1, М2, М3, а рабочую часть (наконечник 2) – из сплава ВМ (20–30 % Cu и 70–80 % W). Для обеспечения минимального теплового сопротивления комбинированного электрода наконечник припаян к основанию серебряным припоем.

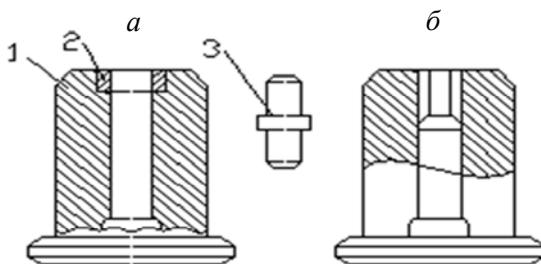


Рис. 6.8. Электроды и фиксатор для контактной сварки:
a – комбинированные; *б* – некомбинированные; 1 – основание;
 2 – наконечник; 3 – фиксатор

Технология герметизации контурной сваркой заключается в подборе режима сварки, сборке деталей корпусов вместе с электродами в представленное на рис. 6.9 специальное приспособление, которое служит для строгой центровки сварочных электродов и самого процесса сварки.

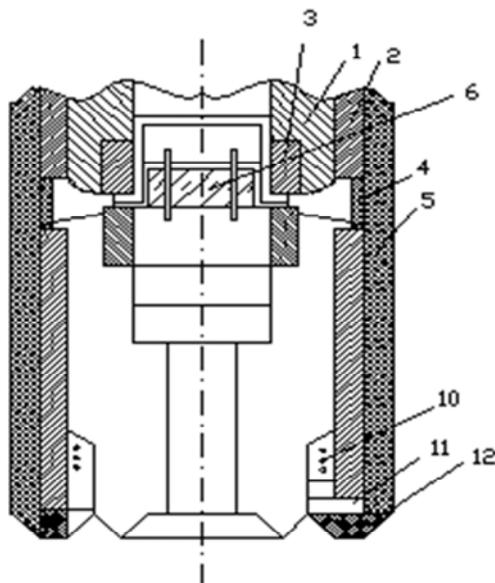


Рис. 6.9. Сварочное приспособление для герметизации корпусов контурной контактной сваркой:
 1 – наконечник; 2, 8 – верхний и нижний электроды; 3, 9 – верхняя и нижняя втулка;
 4 – стакан; 5 – наружная обойма; 6 – герметизируемый корпус; 7 – распорная втулка;
 10 – пружина; 11 – кольцо; 12 – штифт

После сварки и снятия усилия сжатия приборы освобождают из приспособления и помещают в тару. При каждой смене электродов и после определенного количества сварок проверяется внешний вид электродов и параллельность по отпечатку. Внешний вид свариваемых деталей проводят с помощью лупы. Прожоги, выплески, непровары, наплывы металла и смещение свариваемых деталей, приводящие к отклонению от размеров не допускается. Шовная (роликовая) сварка применяется для герметизации прямоугольных корпусов интегральных микросхем. В ней из отдельных точек образуется сварной шов, необходимый для обеспечения герметизации корпуса. Обычно ток подается в виде импульсов, паузы между которыми можно регулировать, изменяя расстояние между точками. Для герметичности шва точки должны перекрывать одна другую. При шовной сварке для соединения деталей корпусов используют вращающиеся ролики, к которым подведен сварочный ток и приложено давление сжатия. Ролик выполняет функцию электрода с распределенным рабочим участком. Это роликовая герметизация. Цикл герметизации состоит из следующих операций. Корпус микросхемы 3 с предварительно подготовленной крышкой укладывают в гнездо поворотного столика 4 каретки 1 (рис. 6.10.)

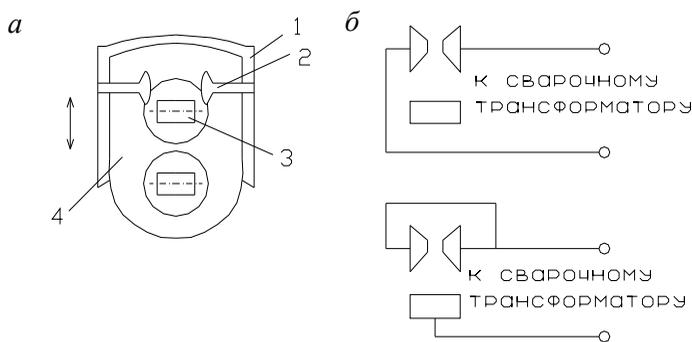


Рис. 6.10. Схема герметизации корпусов роликовой сваркой:

а – схема; *б* – варианты включения сварных роликов; 1 – каретка; 2 – сварочный ролик; 3 – микросхема; 4 – поворотный столик с посадочным гнездом для микросхемы

При прохождении столика каретки под вращающимися роликами происходит сварка двух сторон корпуса микросхемы 3. По достижении кареткой крайнего положения столик с корпусом микросхемы поворачивается на 90° , а ролики раздвигаются на необходимую величину

ну. Каретка движется в противоположном направлении, и при прохождении столика микросхемой под роликами происходит сварка остальных двух сторон герметизируемого корпуса. Основными параметрами режима являются мощность источника питания, длительность сварочного импульса, скорость сварки, скважность режима сварки.

Выходная мощность источника питания в импульсе $P = \eta_n b^2 / (4\eta_n)$, где b – ширина поверхности контакта деталей; η_n – эффективный КПД ($\sim 0,5$); длительность сварочного импульса $t_{и} \leq t_{исп}$, где $t_{исп}$ – время, по истечении которого начинается интенсивное испарение, приводящее к негерметичности. Для герметизации корпусов ИМС контактной шовной сваркой применяют сварочные машины – полуавтоматические машины ПГРС-1М, ПГРС-2 и полуавтомат 10 СС900-007, позволяющие герметизировать плоские металлокерамические корпуса с выводами, расположенными как параллельно, так и перпендикулярно плоскости основания. Для увеличения производительности машин шовной сварки процесс герметизации следует разделять на две операции: сборку основания и крышки с предварительной приваркой их на специальных приспособлениях и непосредственно шовную сварку.

6.4. Герметизация сваркой плавлением

С развитием производства ИМС и новых типов полупроводниковых приборов широко применяются способы герметизации сваркой плавлением кромок соединяемых деталей (см. рис. 6.11).

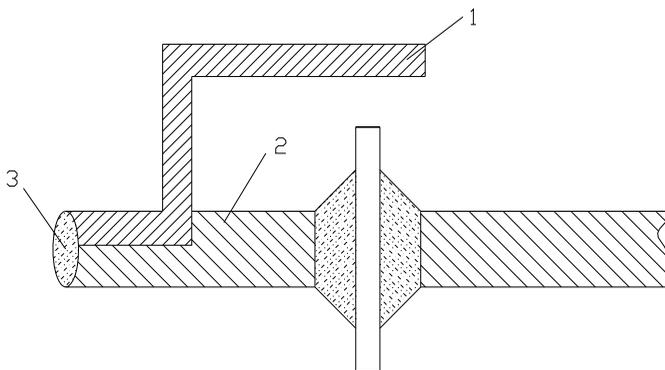


Рис. 6.11. Типовая конструкция корпуса, герметизируемого аргонно-дуговой сваркой:
1 – крышка; 2 – основание корпуса; 3 – сварочный шов

Это объясняется особенностями конструкции ряда широко распространенных корпусов микросхем – боковым расположением выводов и наличием стеклоизолятора или керамического изолятора непосредственно под зоной герметизации или вблизи ее, что делает герметизацию сваркой давлением практически невозможной, а при герметизации пайкой требуется нагрев всей микросхемы. Наиболее распространены следующие способы герметизации сваркой плавлением: аргонодуговая, микроплазменная, электронно-лучевая, лазерная.

6.4.1. Герметизация аргоно-дуговой сваркой

Эта сварка является одним из видов электродуговой сварки, при которой нагрев свариваемых кромок осуществляется теплотой электрической дуги. В зону дуги подается защитная струя аргона, которая, обтекая электрическую дугу и сварочную ванну, предохраняет расплавленный металл от воздействия атмосферного воздуха, окисления и азотирования. Герметизация происходит при расплавлении кромок свариваемых деталей корпуса с образованием сварочного шва и последующего процесса кристаллизации шва металла. В технологии полупроводниковых приборов и ИМС для герметизации корпусов применяется аргоно-дуговая сварка неплавящимися электродами (электроды служат только для возбуждения и поддержания горения дуги). Ее используют для герметизации металлостеклянных корпусов со штырьковыми выводами, периметр сварки которых превышает 50 мм, а суммарная толщина кромок отбортовки составляет 0,2–0,6 мм.

Основные преимущества аргоно-дуговой сварки (АДС) – возможность применения местного нагрева деталей корпуса, а недостаток – повышенные требования к точности изготовления оснастки и совмещения свариваемых деталей, а также чувствительность к отклонениям рабочих параметров дуги, т. е. нестабильность ее горения.

Технологический процесс герметизации корпусов АДС представлен на рис. 6.12.

Детали корпусов собирают в кассеты 4 и, предварительно проверяя (внешним осмотром) чистоту поверхности свариваемых кромок, устанавливают на столе (планшайбе) сварочной установки. Концы электрода 5 помещают относительно свариваемых кромок на расстоянии длины дуги. В качестве неплавящегося электрода используют прутки вольфрама, содержащие 1,5–2,0 % тория. Диаметр элект-

рода для импульсного режима зависит от сварочного тока. Конец электрода затачивается на конус с углом от 15 до 30°. К торцевой поверхности свариваемых кромок электрод располагается под углом 70°. Для предупреждения блуждания сварочной дуги по поверхности герметизируемого корпуса используют малые диаметры электродов и короткую (до 0,6–0,7 мм) дугу, при этом для получения стабильной глубины проплавления металла допусковое отклонение длины дуги не должно превышать $\pm 0,1$ мм.

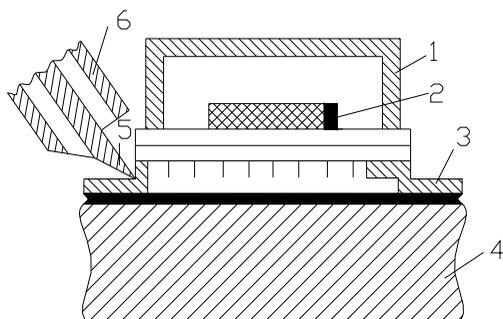


Рис. 6.12. Схема герметизации корпусов аргоно-дуговой сваркой:
 1, 3 – теплоотводы крышки и основания; 2 – микросхема;
 4 – корпус кассеты; 5 – электрод; 6 – сопло горелки

Основными параметрами технологического режима АДС являются: сварочный ток, скорость сварки, длина дуги, давление защитного газа в рабочей камере. Сварочный ток и скорость сварки подбираются в зависимости от свариваемых металлов и толщины кромок. Давление защитного газа в сварочной камере должно быть $\sim 0,2 \cdot 10^3$ Па. Передвигая горелку 6 с электродом 5 вдоль кассеты с собранными микросхемами 2, осуществляют сварку в установленном режиме. Перекрытие шва происходит на длине 10–25 % от его периметра с плавным снижением тока до минимального. АДС является разновидностью электро-дуговой сварки, выполняется в защитной атмосфере аргона плавящимся или неплавящимся электродами. При сварке плавящимся электродом (рис. 6.13, а) электродная проволока одновременно служит электродом и присадочным материалом. Сварка неплавящимся электродом может производиться как без присадки (рис. 3.16, б), так и с нею (рис. 3.16, в). При АДС выделяется

значительное количество тепла, нагревающее корпус до 300 °С и более, что может быть причиной выхода приборов из строя.

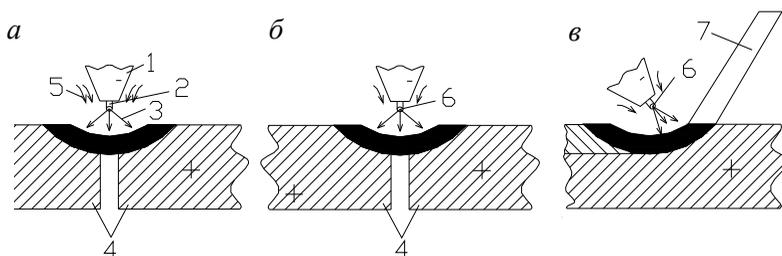


Рис. 6.13. Аргонно-дуговая сварка электродами:

а – плавящимся; *б* и *в* – неплавящимся без присадки с присадкой;

1 – наконечник горелки; *2* – электродная проволока; *3* – дуга; *4* – свариваемые детали;

5 – защитный газ; *6* – неплавящийся электрод; *7* – присадочный материал

Для снижения температуры нагрева и повышения качества герметизации необходимо обеспечивать хороший теплоотвод, требуемые плотность, диаметр дуги и скорость охлаждения. АДС выполняется в специальных скафандрах (камерах), заполняемых инертным газом, или этот газ подается непосредственно к месту сварки. АДС позволяет управлять процессами диффузии и дегазации жидкого металла. Аргонно-дуговой сваркой герметизируют гибридные ИМС, для чего служат специальные установки УСКМ-2, УСКМ-2М. На установке УСКМ-2 в импульсном или непрерывном режиме последовательно заваривают противоположные стороны прямоугольных корпусов при возвратно-поступательном движении горелки и повороте столика с кассетой на 180°. Режим герметизации коваровых прямоугольных корпусов с суммарной толщиной свариваемых кромок 0,6 мм следующий: сварочный ток 14–15 А; скорость сварки – 20 м/ч; частота следования импульсов – 22 Гц; длительность $t_{и} = 0,03$ с, паузы $t_{п} = 0,09$ с, расход инертного газа – 3–4 л/мин.

Контроль сварного АДС соединения осуществляется внешним осмотром и проверкой герметичности. Сварные швы должны иметь гладкую или мелкочешуйчатую поверхность по всей их длине без видимых дефектов (непроваров, подрезов, пор, трещин, незаплавленных кратеров).

6.4.2. Герметизация микроплазменной сваркой

Микроплазменная сварка (МПС) – это разновидность АДС, применяется для герметизации корпусов с малой толщиной. Для сварки этим способом используется сжатый дуговой разряд с интенсивным плазмообразованием.

Плазменная сварка не имеет присущих АДС недостатков: сравнительно большого активного пятна и нестабильности при малых токах. Плазменная дуга характеризуется высокими скоростями потока плазмы и температурой столба. Для получения дуговой плазменной струи используются специальные плазменные головки-плазмотроны, в которых имеется неплавящийся вольфрамовый электрод, изолированный от канала и сопла, или этим анодом служит герметизируемое изделие. Газовая среда в плазмотроне защищает от окисления и охлаждения вольфрамовый электрод и сопло; обеспечивает получение стабильной плазменной струи с необходимой температурой и скоростью, а также максимальную теплопередачу к герметизируемому изделию. Схема герметизации корпусов микроплазменной сваркой приведена на рис. 6.14.

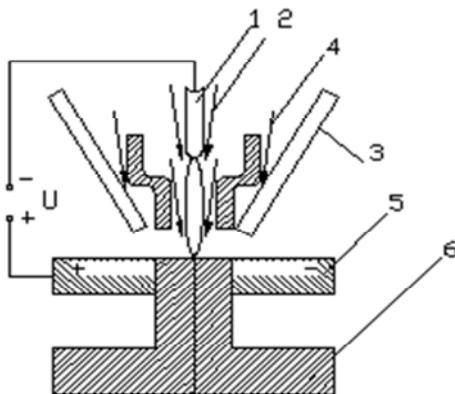


Рис. 6.14. Схема герметизации корпусов микроплазменной дугой:

- 1 – электрод; 2 – плазмообразующий газ; 3 – корпус горелки; 4 – защитный газ;
5 – теплоотвод; 6 – свариваемые кромки корпуса

При сближении плазменной горелки – вольфрамового электрода (катода) со свариваемыми деталями высокочастотным осциллято-

ром (преобразователя промышленного тока по частоте и напряжению) создается вспомогательная дуга, которая образует между ними электропроводный столб, возбуждающий основную дугу. Для придания факелу плазмы формы в виде цилиндра, конуса, диска, петли используют различные насадки, надеваемые на горелки. Изменением сварного тока, напряжения, угла наклона струи, скорости и расхода истечения газов, а также состава газа и геометрической формы струи можно регулировать параметры плазменной сварки.

Существует несколько промышленных установок микроплазменной сварки. Установка МПУ-4 обеспечивает сварку в непрерывном и импульсном режимах постоянного тока с прямой и обратной полярностью при длительности импульсов тока и пауз 0,03–0,5 с, диапазон токов прямой полярности 3–30 А, обратной полярности 1,5–15,0 А, и имеет ток вспомогательной дуги 3–6 А; напряжение холостого хода 60–80 В. Расход плазмообразующего газа (аргона) составляет 0,2–0,8 и 2–8 л/мин. Применяют также полуавтоматы для герметизации микросхем в круглых корпусах и прямоугольных, имеющие такую конструкцию, которая гарантирует нагрев активных компонентов приборов не выше 100 °С.

6.5. Герметизация корпусов электронно-лучевой сваркой

Герметизация сваркой электронным лучом по сравнению с другими видами имеет выгодные особенности – точное регулирование и управление тепловой энергией, локальный нагрев, высокая чистота при сварке благодаря наличию вакуума. Сущность герметизации электронно-лучевой сваркой состоит в формировании непрерывного сварного шва по всему контуру корпуса за счет перекрывающихся сварных точек, образующихся в результате воздействия нагрева до температуры плавления сфокусированного электронного луча на отбортовку вращающегося корпуса (крышки и основания). Нагрев электронным лучом осуществляется вследствие превращения кинетической энергии ускоренных электронов в тепловую при торможении в свариваемых металлических деталях. Высвобождение энергии при электронно-лучевой сварке происходит в самом веществе, причем наиболее интенсивное тепловыделение наблюдается на глубине порядка 1 мкм, поэтому тепловой источник считается поверхностным. Герметизацию электронно-лучевой сваркой можно выполнять в непрерывном и им-

пульсном режиме, но эффективнее импульсный режим, так как возможна герметизация с малой зоной термического влияния.

Основными параметрами техпроцесса ЭЛС являются ускоряющее напряжение, диаметр электронного луча, скорость сварки, длительность и частота следования импульсов (для импульсного режима). При герметизации корпусов электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) суммарная толщина отбортовки на сварку составляет 0,4–0,8 мм, необходимая глубина проплавления, обеспечивающая герметичность корпуса – 0,5–0,8 мм, а степень перекрытия сварных точек 50–60 % от их диаметра (она определяется их размером и шагом). Шаг $S = V/T_{\text{ц}}$, где V – скорость сварки; $T_{\text{ц}}$ – время цикла. Сварные швы, полученные данным способом, имеют гладкую или мелкочешуйчатую поверхность по всей длине.

Основным дефектом швов являются непровары, образующиеся из-за увеличения зазора между свариваемыми кромками, смещения линии стыка кромок относительно оси луча, несоблюдения технологических режимов. При электронно-лучевой сварке электронный пучок действует почти мгновенно, поэтому ИМС не нагревается. Электронный луч перемещается относительно герметизируемого корпуса, или корпус относительно луча с заданной скоростью по определенной траектории. Электронно-лучевая установка герметизации корпусов показана на рис. 6.15.

Электронный пучок в установке неподвижен, а перемещается столик с изделиями. Установка состоит из вакуумной системы, двух вакуумных камер, системы управления электронным пучком и устройство для перемещения рабочего столика. Вакуумная система, состоящая из механического 8 и диффузионного 9 насосов, также трубопроводов, служит для создания в вакуумных камерах давления $p \sim 10^{-4}$ – 10^{-5} мм рт. ст.

В первой камере расположена электронная пушка 1, электромагнитная фокусирующая линза 4 и отклоняющая электростатическая система 5. При работе установки катод 2 электромагнитной пушки из вольфрамовой проволоки, нагревают до $T \sim 2400$ – 2500 °С, а к аноду 3 через выпрямитель 15 подводят напряжение от высоковольтного трансформатора 14 (U от 20–30 до 100–150 кВ). Испускающий катодом пучок электронов ускоряется, фокусируется электромагнитной линзой в диаметре 0,05–0,50 мм и направляется на обраба-

тываемую поверхность (корпус). В результате электронной бомбардировки локальные участки корпуса расплавляются.

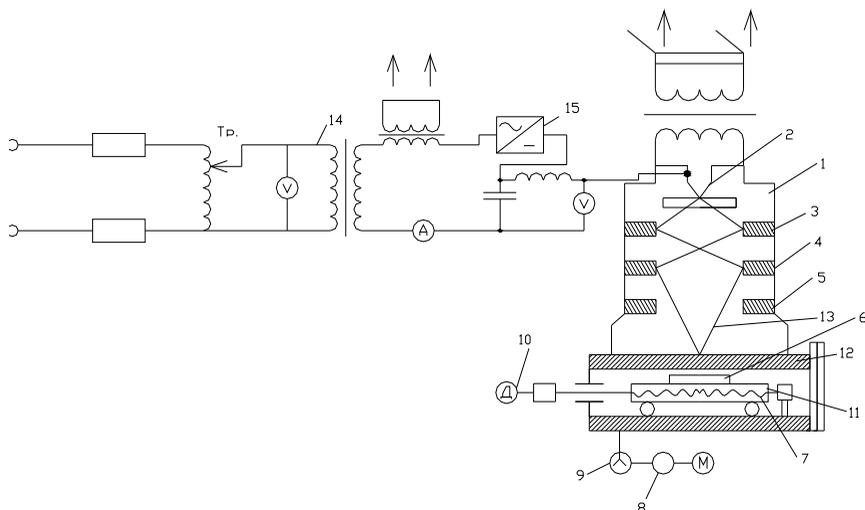


Рис. 6.15. Электронно-лучевая установка герметизации корпусов:

- 1 – электронная пушка; 2 – катод; 3 – анод; 4 – электромагнитная фокусирующая линза; 5 – отклоняющая система; 6 – корпус полупроводникового прибора; 7 – ходовой винт; 8 и 9 – механический диффузионный насосы; 10 – электродвигатель привода столика; 11 – столик; 12 – рабочая камера; 13 – электронный пучок; 14 – высоковольтный трансформатор; 15 – выпрямитель

Размещенную во второй рабочей камере 12 кассету с несколькими полупроводниковыми приборами с помощью соответствующего устройства вращают или перемещают горизонтально в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В этой камере для контроля процесса сварки имеется оптическое окно и детектор отраженных электронов. Рабочий столик 11 перемещается двумя приводными механизмами с шаговыми двигателями 10, расположенными снаружи рабочей камеры 12. Скорость перемещения столика изменяется от 5,12 до $1,25 \cdot 10^{-4}$ мм/с, причем каждый управляющий импульс соответствует сдвигу столика на 10 мкм. Система управления электронным пучком обеспечивает необходимую длительность сварки, регулирование тока и отклонение луча. Прямоугольные корпуса микросхем герметизируют, поворачивая их в вертикальной плоско-

сти сварочными кромками к электронному пучку. Сфокусированный электронный пучок направляется на кромки деталей герметизируемых корпусов с помощью отклоняющей системы. При сварке прямоугольных корпусов на электронно-лучевой установке У-496 со скоростью 25 мм/с начальное расстояние между длинной кромкой корпуса и электронным пучком равно 5,5 мм. Выпускаются установки ЭЛС, в которых электронный пучок перемещается относительно изделия по заданной программе. Достоинствами герметизации электронно-лучевой сваркой является возможность соединения очень тонких материалов толщиной несколько микрон, а также соединение тугоплавких, высокопрочных и химически активных металлов и сплавов при значительных скоростях (10–100 м/ч).

6.6. Герметизация корпусов лазерной сваркой

Принцип герметизации лазерной сваркой состоит в совместном оплавлении соединяемых материалов под действием интенсивного светового потока (переводом импульсной световой энергии в тепловую) с образованием шва. Структурная схема герметизации корпусов лазерной сваркой изображена на рис. 6.16.

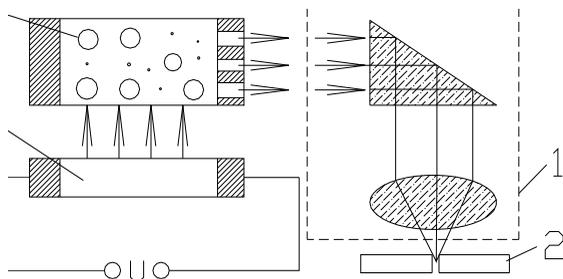


Рис. 6.16. Схема герметизации корпусов лазерной сваркой:
 1 – оптическая система; 2 – свариваемые детали; 3 – лампа накачки;
 4 – активный элемент

Лазерная технология по сравнению другими способами герметизации, обладает рядом преимуществ. Основное достоинство лазерного излучения как источника теплоты при сварке – возможность концентрации больших энергий на малых поверхностях в короткие промежутки времени, т. е. высокая локальность нагрева. В резуль-

тате можно сваривать металл в непосредственной близости от металлостеклянных или металлокерамических спаев, проводить герметизацию без термического влияния на элементы и компоненты микросхем и структуры полупроводниковых приборов.

Лазерная сварка обладает следующими достоинствами: возможностью соединения различных разнотолщинных и тугоплавких (вольфрам, молибден) материалов, а также металлов, обладающих высокой теплопроводностью (медь, серебро); незначительным нагревом близко расположенных от места сварки участков; отсутствием деформации соединяемых деталей; возможностью выполнения в труднодоступных местах, через прозрачные оболочки, в замкнутых объемах и в любой среде, а также передачей лазерного излучения по прозрачному материалу (сапфиру) непосредственно к месту соединения. Недостатки лазерной сварки – незначительная глубина проплавления соединяемых материалов при средних мощностях излучения, выплески испаряемого металла при использовании мощных (более 8 кВт) лазеров и необходимостью удаления образующихся газов и ионизированных паров свариваемых материалов.

Для герметизации корпусов применяют шовную лазерную сварку, выполняемую как в непрерывном, так и импульсном режимах работы лазера, а точечная сварка используется при приварке выводов и пайке тонких деталей. Основными параметрами лазерной сварки является энергия лазерного излучения в импульсе или мощность лазерного излучения, длительность лазерного импульса, диаметр луча, частота следования импульсов и скорость сварки, которые обуславливают обобщенный энергетический параметр – интенсивность излучения в фокальном пятне:

$$E_d = 4W_n / (\pi d_n \tau_n),$$

где W_n – энергия лазерного излучения;

d_n – диаметр луча;

τ_n – длительность лазерного импульса.

Для каждой пары соединяемых материалов существует предельное значение интенсивности излучения в фокальном пятне, выше которого сварка будет сопровождаться значительным испарением металла из зоны нагрева или выплеском части расплавленного металла. Оптимальные условия сварки большинства сочетаний метал-

лов обеспечиваются интенсивностью 10^5 – 10^6 Вт/см². Управление интенсивностью излучения в фокальном пятне осуществляется: изменением длительности воздействия излучения на материал, изменением выходной энергии, изменением площади фокального пятна. Для получения вакуумно-плотного шва при сварке в импульсном режиме степень перекрытия сварных точек должна составлять 50–80 % от диаметра сварной точки. Она зависит от их диаметра и шага. Шаг

$$S = V_{\text{св}} / T_{\text{ц}} = V_{\text{св}} / f_n,$$

где $V_{\text{св}}$ – скорость сварки;

$T_{\text{ц}}$ – время цикла;

f_n – частота следования импульсов.

Техпроцесс герметизации диода в круглом металлокерамическом корпусе состоит из подготовки к сварке свариваемых деталей и загрузки их в специальное приспособление, обеспечивающее стабильное положение деталей относительно лазерного луча, собственно лазерной сварки, и проверки качества свариваемого шва. Свариваемые кромки не должны иметь заусенцев, раковин, царапин, трещин, жировых пятен и других загрязнителей. Зазор между свариваемыми элементами в зоне сварки должен быть минимальным (не превышать 10–25 % от меньшей толщины свариваемых кромок). Он обеспечивается с помощью прижимов при сжатии свариваемых кромок в сварочном приспособлении или предварительной приваркой деталей в одной или двух точках. После установки режима сфокусированный лазерный луч направляется на свариваемые кромки корпуса и крышки. Круглый корпус диода вращается вокруг оси, перпендикулярной оси луча. Все точки периметра корпуса последовательно проходят под лучом на одинаковом расстоянии. Внешний вид сварных соединений проверяют осмотром через лупу, причем не должно быть прожогов, непроваров, свищей и пор.

Механическая прочность соединения должна быть не менее 0,8 предела прочности свариваемых металлов. Схема специализированной полуавтоматической установки Квант-17 изображена на рис. 6.17.

Она предназначена для герметизации одновременно сваркой с двух сторон корпусов микросхем размерами от 10 до 40 мм. Для этого в установке имеются два активных элемента б, которые расположены соосно и помещены в отдельные камеры с импульсными лампа-

ми накачки 7, подключенными к общему источнику питания 8 последовательно для обеспечения одинаковых излучений, и резонатор, состоящий из двух сферических зеркал 5.

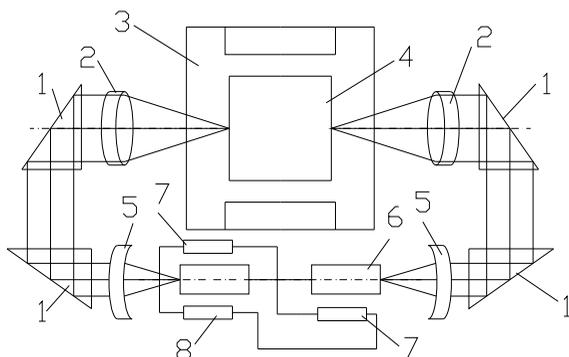


Рис. 6.17. Схема полуавтоматической двухлучевой установки Квант-17:
 1 – призма полного отражения; 2 – объектив; 3 – кассета; 4 – корпус микросхемы;
 5 – сферическое зеркало; 6 – активный элемент; 7 – лампа накачки;
 8 – источник питания

С помощью призм 1 полного внутреннего отражения и объективов 2 лазерные лучи с двух сторон направляются на сварочные кромки корпуса 4 микросхемы и фокусируются на них. Для укладки герметизируемых микросхем служит многоместная кассета 3, которая после сварки двух параллельных сторон корпуса автоматически перемещается с заданной скоростью и поворачивается на 90° для герметизации двух других сторон.

При воздействии лазерного луча некоторая часть излучения отражается от свариваемых поверхностей, причем коэффициент отражения всех металлов с увеличением длины волны лазерного пучка увеличивается. Поглощающая способность металлов также не постоянна и увеличивается с ростом температуры. Уменьшается отражательная способность свариваемых металлов: созданием шероховатости в местах сварки, покрытием этих мест пленками, имеющие низкий коэффициент отражения, подбором оптимальных форм и размеров кромок соединяемых деталей. Для уменьшения потерь лазерного излучения при сварке металлов с большой теплопроводностью сварочные кромки делают тонкими (до 0,5 мм), а для снижения отражательной способности на свариваемых металлических

деталей выполняются специальные светоловушки – треугольные щели. Режим лазерной сварки в зависимости от свойств, толщины и формы сварочных кромок, состояния поверхности пар соединяемых металлов подбирают опытным путем. Прочность сварочного соединения при увеличении энергии сначала растет, а затем уменьшается, так как наступает момент интенсивного испарения металла, при котором площадь сечения литой зоны становится меньше, что снижает прочность. Увеличение длительности сварочного импульса способствует более полному удалению нерастворенных газов, что снижает пористость сварочного шва. Диаметр сфокусированного светового пятна должен быть оптимальным, так как им определяется площадь сечения литой зоны шва. В полупроводниковом производстве для герметизации корпусов используются установки Квант-10, Квант-12 и Квант-17 на твердотельных лазерах, применение которых для сварки обусловлено высокой частотой повторения импульсов, более коротковолновым излучением и лучшей разрешающей способностью, чем у газовых.

6.7. Герметизация корпусов пайкой

Герметизация пайкой корпусов полупроводниковых приборов и ИС находит ограниченное применение, причем для некоторых типов приборов – маломощные диоды в металлостеклянном корпусе с охватывающим спаем, ряд конструкций микросхем в плоских металлостеклянных и металлокерамических корпусах. Сущность процесса герметизации корпусов пайкой заключается в соединении металлических и металлизированных поверхностей деталей корпусов с помощью припоя. Активация соединяемых поверхностей осуществляется действием флюса. При бесфлюсовой пайке роль флюса выполняет газовая среда или специальные компоненты припоя. К преимуществам герметизацией пайкой относят отсутствие значительных давлений специального инструмента (электроды для сварки), а к недостаткам – необходимость нагрева прибора до значительной температуры (200–350 °С) и вредное влияние флюсов, необходимость работы в атмосфере водорода или дорогостоящих инертных газов, критичность режимов пайки, особенно при герметизации микросхем с наличием золота на соединяемых деталях. В полупроводниковой промышленности применяют два вида герметизации низкотемпературной

пайкой: в конвейерных печах и струей горячего газа на специальных установках. Используются оловянно-свинцовые припои ПОС-61 и ПСр-2,5. Припои, как показано на рис. 6.18, используются в виде закладных деталей, представляющие детали одной и той же массы.

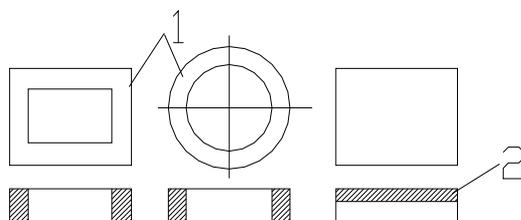


Рис. 6.18. Закладные детали различной формы:
1 – припойные детали с просеченными отверстиями;
2 – детали с припойным покрытием

Использование для пайки таких деталей позволяет вводить в паяемый узел определенное количество припоя и флюса, в результате чего получают однородное соединение. При герметизации пайкой в конвейерной печи диодов в металлостеклянном корпусе и струей горячего газа микросхем в плоском металлокерамическом корпусе движущаяся лента с определенной скоростью проходит непрерывно через конвейерную печь. Она перемещает в загруженные кассеты, установленные с одного конца трубы. Для предохранения паяемых деталей корпусов и припоя от окисления в процессе нагрева рабочее пространство печи заполняют чистым и сухим инертным газом.

Техпроцесс герметизации пайкой включает подготовку деталей корпусов к пайке, непосредственно пайку и контроль загерметизированных изделий. Необходимым условием качества пайки является тщательная очистка паяемых поверхностей. Пайка деталей корпуса осуществляется нагревом в печи собранных в кассеты деталей с заранее вложенным припоем, покрытым флюсом. При этом используется специальная конструкция кассеты (см. рис. 6.19), которая обеспечивает в процессе пайки взаимные расположения деталей с необходимой точностью и определенное давление для контакта паяемых поверхностей.

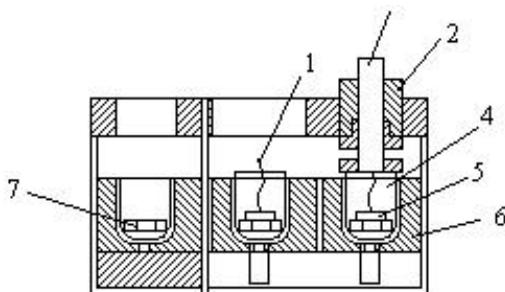


Рис. 6.19. Кассета для пайки металлостеклянного корпуса:

1 – Al (электрод); 2 – пробка; 3 – вывод; 4 – баллон; 5 – держатель с кристаллом;
6 – корпус кассеты; 7 – шайба припоя

При загрузке кассеты сначала загружают шайбу 7 припоя в гнездо кассеты 6, затем металлостеклянный баллон 4, держатель 5, далее шайбу припоя в пробку 2 кассеты, вывод 3 в пробку со стороны шайбы припоя, устанавливают загруженную пробку в направляющие отверстия кассеты и опускают вывод в верхнее отверстие баллона до прижима к Al-электроду 1 кристалла, а шайбу – на торец баллона. Кассеты выполняют из жаростойких материалов – графита, нержавеющей стали, которые не загрязняют арматуру. Весь узел подогревается в печи до температуры пайки замедленно, поэтому большое значение имеет скорость, с которой подводится теплота.

Температура печи должна обеспечить расплавление припоя и перегрев его на 50–60 °С выше точки плавления при определенном времени выдержки. При нагреве припойная шайба расплавляется и образует припойный корпус, соединяющий выводы и держатели с облуженными коваровыми втулками. После пайки детали охлаждают в холодильной камере. Способ пайки в конвейерной печи обеспечивает высокое качество паянных соединений. Преимущества способа герметизации низкотемпературной пайкой в конвейерной печи: отсутствие окисления поверхностей деталей и припоя при нагреве; уменьшение деформации узлов благодаря равномерности их нагрева и жесткости кассет; отсутствие пережогов, коробления, наплывов припоя; возможность сборки приборов и ИС с несколькими паяемыми выводами.

Пайка струей горячего газа применяется при незначительных объемах выпускаемой продукции. Способ заключается в нагреве паяемых деталей и расплавлении припоя направленным потоком

воздуха или инертного газа, температура и расход которого тщательно регулируется. Схема герметизации плоских металlostеклянных и металлокерамических корпусов струей горячего газа показана на рис. 6.20.

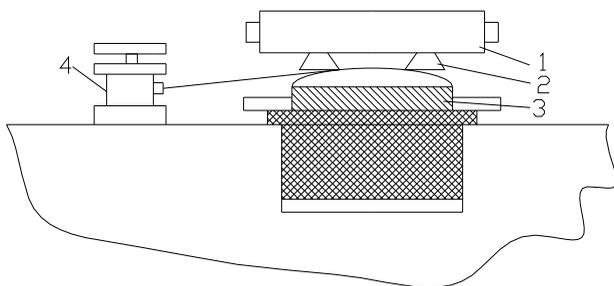


Рис. 6.20. Схема пайки горячим воздухом или газом:
 1 – нагреватель; 2 – горячий газ; 3 – герметизация ИС в сборе перед пайкой;
 4 – приспособление для прижима крышки к корпусу.

Основание микросхемы укладывают в кассету. На основание помещают припойную рамку, покрытую флюсом, и крышку корпуса, которую с помощью приспособления 4 прижимают к основанию, при этом усилии прижима

$$\Phi = pS,$$

где p – удельная нагрузка (для ПСр-2,5 $p = 100\text{--}200 \text{ г/см}^2$, а для ПОС-61 $p = 5 \cdot 10 \text{ г/см}^2$);

S – площадь крышки.

Кассета в фиксированном положении устанавливается под струю инертного газа 2, который предварительно пропускается через специальные нагреватели 1, нагреваясь до необходимой температуры. В момент установки кассеты начинается автоматический отсчет времени пайки. Под действием горячей струи инертного газа припой плавится и смачивает поверхность основания и крышки, при этом между ними образуется тонкий слой припоя. По истечении определенного времени из-под нагревателя выдвигают кассету и вынимают загерметизированную микросхему, которую охлаждают. Паянные швы имеют однородную монолитную структуру и плотный контакт с поверхно-

стью крышки и основания корпуса. Инертная среда предотвращает окисление деталей при высокой температуре пайки – это преимущество. Ход процесса определяется температурой пайки, расходом газа и временем выдержки. Эти параметры легко поддерживаются в заданных пределах, что позволяет получать надежные паянные соединения. При герметизации пайкой горячим воздухом или газом возможны следующие дефекты: полное или частичное отсутствие смачивания паяемых поверхностей припоем; щели в паяемом соединении, затекание припоя внутрь прибора; перекосы паяемых деталей.

Причины плохого смачивания связаны с загрязнением поверхности, наличие оксидного слоя на паяемых поверхностях, недостаточная температура в зоне пайки. Наличие щелей обусловлено чрезмерными зазорами между деталями, глубокими царапинами на паяемых поверхностях. Затекание припоя внутрь прибора связано с тем, что воздух внутри корпуса нагревается и увеличивается в объеме, частично выходя из корпуса. При охлаждении воздуха внутри корпуса раньше, чем начнется кристаллизация припоя, создается пониженное давление и неуспевший затвердеть припой вдавливается внутрь корпуса. Перекосы деталей при пайке указывают на плохое качество кассет или их большой износ.

Указанные виды брака устраняются при соблюдении технологии, качественном контроле паяемых деталей и узлов и тщательной проверке кассет после их изготовления в процессе работы. В настоящее время в полупроводниковой промышленности используются способы герметизации посредством бесфлюсовой пайки (например пайка эвтектикой золото-олово), которую осуществляют в конвейерных печах в среде инертного газа при $T = 320\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура плавления эвтектики $208\text{ }^{\circ}\text{C}$).

6.8. Герметизация корпусов заваркой стеклом

Сущность способа герметизации корпусов заваркой стеклом заключается в создании монолитной герметичной конструкции за счет соединения между собой стеклянных узлов (спай стекла со стеклом) или стеклянных деталей с металлическими (спай стекла с металлом). Технологическая схема изготовления типовой конструкции выпрямительного диода, загерметизированной сваркой стеклом, показано на рис. 6.21.

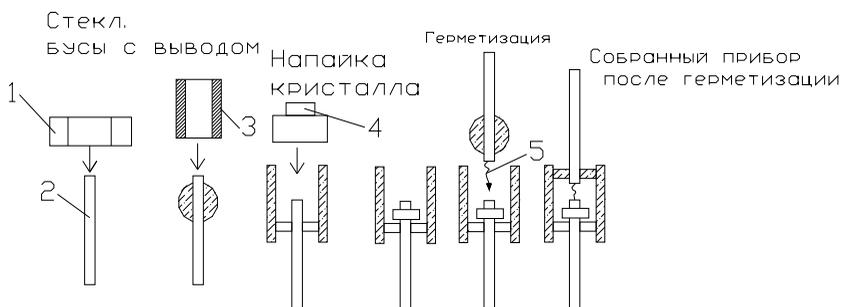


Рис. 6.21. Схема герметизации полупроводниковых приборов в стеклянном корпусе:

1 – буса; 2 – вывод; 3 – стеклянная трубка; 4 – кристалл; 5 – пружинный контакт

В полупроводниковой технологии герметизация стеклом осуществляется в основном радиационным нагревом или нагревом пламенем. Радиационный нагрев широко используется из-за хорошей воспроизводимости технологического процесса и возможности получения стабильных режимов заварки. Герметизация полупроводниковых приборов при создании спая стекла со стеклом происходит в специальном приспособлении с одновременным контролем электрических параметров приборов или на многшпindleльных полуавтоматах заварки. На пластиковый вывод 2 (рис. 6.21) предварительно напаивают бусу 1 из того же стекла, что и стеклянная трубка 3 баллона, но меньшего диаметра. Для уменьшения опасности перегрева кристалла 4 с $p-n$ -переходами при заварке нижний пластиковый вывод помещают в охлаждаемый водой холодильник. Для центровки верхнего вывода при сборке и настройке прибора служит специальная консольно закрепленная оправка. Место заварки обычно нагревают спиралью, расположенной по окружности вокруг корпуса. Скорость разогрева стекла выбирается тем меньше, чем толще стенки трубки и бусы и термостойкость стекла. Быстрый нагрев приводит к неравномерному нагреву внешних и внутренних его слоев и появлению в нем внутренних напряжений и растрескиванию. Время заварки выбирается экспериментально. Трубка баллона и буса держателя 2 с пружинным контактом должны находиться строго в центре спирали. При нагреве стекло трубки и бусы в зоне нагрева размягчаются, и начинается его деформация, которая приводит к уменьшению зазора между трубкой и бусой. Он постепенно исчезает и детали свариваются. При размягчении

стекла трубки и бусы происходит взаимное растворение одного стекла в другом и создается промежуточный по составу и свойствам тонкий расплав из двух стекол, который герметично соединяет трубку арматуры и бусу держателя. Основные дефекты при герметизации стеклом являются трещины в спае, непровар, сильное оплавление стекла. Для их устранения необходимо точно соблюдать режим заварки, не допускать использования деталей и узлов, образующих большой зазор между соединяемыми поверхностями и быстрого охлаждения прибора после заварки. Простота технологического процесса герметизации стеклом, возможность визуального контроля операции герметизации – положительные его свойства. Недостатки: высокая температура нагрева и концентрация опасных напряжений в зоне раздела горячей и холодной частей корпуса.

В полупроводниковой промышленности применяют и менее распространенные способы герметизации: ультразвуковой сваркой, чеканкой, завальцовкой. Герметизация ультразвуковой сваркой достигается крутильными колебаниями в зоне сварки, которые создаются с помощью нескольких синхронно работающих преобразователей и волноводов, прикрепленных к одному сварочному инструменту или специального разрезанного волновода. Благодаря незначительному разогреву в процессе ультразвуковой сварки можно герметизировать полупроводниковые приборы, чувствительные к нагреву. При герметизации чеканкой баллон из более мягкого материала высаживают в держатель. Для этого способа герметизации используют различные комбинации материалов: сталь–медь, сталь–алюминий и др. При герметизации завальцовкой (рис. 6.22) из более мягкого материала (медь) делают держатель.

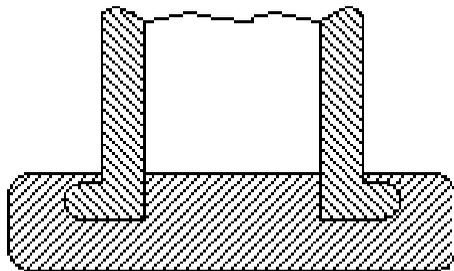


Рис. 6.22. Герметизация корпуса завальцовкой

6.9. Герметизация полупроводниковых приборов и ИС пластмассами

6.9.1. Способы герметизации пластмассами

Современный этап развития полупроводниковой промышленности характеризуется значительным увеличением объемов производства надежных и дешевых полупроводниковых приборов и ИМС в пластмассовых корпусах. Это связано с дальнейшей миниатюризацией, заменой дорогостоящих металлостеклянных и металлокерамических корпусов, возможностью совмещения технологических операций изготовления корпусов и герметизации, полной механизации. Пластмасса изолирует приборы и микросхемы от внешних воздействий и обеспечивает требуемую механическую и электрическую прочность. Различные типы полупроводниковых изделий герметизируют в пластмассовые корпуса разными способами, что связано с их конструктивными особенностями и объемами производства.

Различают следующие технологические способы пластмассовой герметизации: литьевое или трансфертное прессование; компрессионное прессование; опрессовку с помощью жидких композиций; обволакивание и окунание; герметизацию в полые пластмассовые корпуса; заливку во вспомогательные съемные формы; заливку в предварительно изготовленный корпус – капсулу. Способ трансфертного прессования распространен наиболее широко. Герметизация полупроводниковых изделий с помощью пластмасс наряду с большими положительными факторами имеет недостатки: ухудшение условий теплоотвода; появление механических напряжений, возникающих при отвердевании герметика; недостаточная влагостойкость; подверженность процессам старения. Защитные свойства пластмассового корпуса характеризуются скоростью проникновения через пластмассу газов и паров, количеством адсорбированной влаги, адгезией пластмассы к металлу рамки и выводов.

6.9.2. Герметизирующие полимерные материалы

При выборе герметизирующих материалов и техпроцессов герметизации необходимо учитывать режим работы аппаратуры, условия ее эксплуатации, конструктивно-технологические особенности

герметизируемых изделий, свойства отдельных элементов конструкции, возможное механическое и химическое взаимодействие материалов и элементов конструкции с герметизирующими материалами при их контактировании. Герметизирующие полимерные материалы должны обеспечивать: необходимые сроки службы изделий в заданных режимах эксплуатации; высокое сопротивление изоляции и малые диэлектрические потери; достаточную механическую и электрическую прочность при высоких уровнях напряжений и мощностей; стойкость к электрическим разрядам, влаге, химическим реагентам; целостность конструкции; получение заданных геометрических параметров; высокую технологичность. Отверждение термоактивных герметизирующих составов должно происходить в условиях, исключающих выход из строя дискретных элементов конструкции (резисторов, полупроводниковых приборов). В составе полимерных композиций не должно быть токсичных веществ. Этому требованию отвечают композиции на основе эпоксидных, кремнийорганических, полиэфирных смол и их модификаций. Они характеризуются минимальным старением, нагревостойкостью, низким водопоглощением, высокими адгезионными свойствами. На их основе изготавливается большинство герметизирующих композиций: компаундов, лаков, пенокомпаундов, мастик. Компаунды на основе эпоксидных смол обладают малой усадкой при отверждении, высокой адгезией, хорошими механическими свойствами. Недостаток заливочных эпоксидных компаундов – малый срок их жизнеспособности, т. е. готовят только перед употреблением, что затрудняет автоматизацию операции герметизации. Этому недостатка лишены эпоксидные композиции в виде порошков. Таблетирующиеся эпоксидные порошки хорошо прессуются и имеют высокие механические показатели. Свойства порошковых композиций и заливочных материалов, применяемых для герметизации, приведены в табл. 6.4.

Также используются пластмассы на основе кремнийорганических соединений и полиэфирных смол, которые применяют в виде компаундов и в виде порошков. Они термостойки и обладают высокими электрическими свойствами. Полиэфирные смолы – это растворы ненасыщенных полиэфиров в полимерах или олигомерах и представляют термореактивные материалы. Обладают небольшой вязкостью, способностью к отверждению даже при температуре 20 °С, хорошей

стойкостью к действию воды и кислот. Однако адгезия полиэфирных композиций к другим материалам слабая. Эти материалы имеют большую усадку и для герметизации используются редко.

Таблица 6.4

Свойства порошковых композиций и заливочных материалов, применяемых для герметизации

Марка материала	Срок хранения	Диапазон рабочих температур, °С	Электроизоляционные характеристики			
			Электрическая прочность	ρ_v при 20 °С, Ом·см, не менее	Диэлектрическая проницаемость при 20 °С	Угол δ при 20 °С, град
Пресс материал К81-39С	2 мес.	От -60 до +135	15	$1 \cdot 10^{14}$	6	0,03
Пресс материал ЭФСП-С	1 мес.	От -60 до +155	20	$1 \cdot 10^{14}$	6	0,03
Пресс материал ЭФП-СБ	3 мес.	От -60 до +155	22	$3 \cdot 10^{14}$	6	0,03
Пресс материал ЭКП-200	1 мес.	От -60 до +200	20	$1 \cdot 10^{14}$	6	0,03
Пресс материал ТМП	3 мес.	От -60 до +200	20	$5 \cdot 10^{14}$	5	0,025
Компоноид ЭЗК-25	3 мес.	От -60 до +85	27	$6 \cdot 10^{14}$	3,8	0,014
Компоноид ЭЗК-6	3 сут	От -60 до +80	18	$5 \cdot 10^{14}$	4,4	0,021
Компоноид ЖМ	3 сут	От -60 до +130	20	$2 \cdot 10^{15}$	4,8	0,15
Компоноид ЭЦТ	3 мес.	От -60 до +150	20	10^{14}	5	0,01

6.9.3. Герметизация способом прессования пластмасс

Сложность процессов заливки, связанная с применением многокомпонентных композиций, вызвала появление новых способов пластмассовой герметизации. Одним из них является способ прессования пластмасс с использованием порошкообразных компоноидов. Здесь осуществляется предварительное смешивание, дробление их до порошкообразного состояния с последующей дозировкой в виде пресс-

литьевого материала или таблеток. Применение порошкообразных материалов позволяет автоматизировать их точную дозировку в минимальных количествах, что очень осложнено при переработке жидких композиций. Герметизация прессованием пластмасс основана на особенности ряда полимерных материалов расплавляться и течь под действием температуры и давления, заполняя при этом пустоты металлической формы с делениями. Использование небольших давлений позволяет осуществлять герметизацию приборов и микросхем с гибким проволочным монтажом. Применяются два способа герметизации прессованием: компрессорное и литьевое (трансферное литье). При компрессорном прессовании пресс-материал помещают непосредственно в пресс-форму, при литьевом – в загрузочную камеру.

Герметизация компрессорным прессованием происходит следующим способом (рис. 6.23).

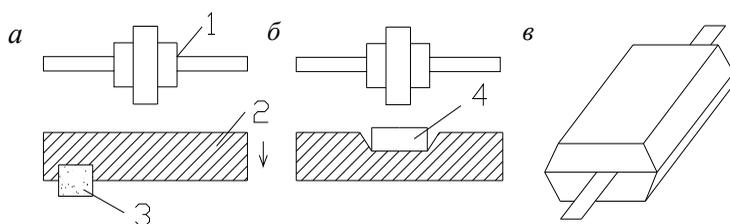


Рис. 6.23. Последовательность операций герметизации компрессорным прессованием: а – арматура; б – размещение арматуры в пресс-форме; в – готовый прибор

В пресс-форму 2 загружают арматуру изделия и таблетированный или порошкообразный материал 3. При смыкании пресс-формы пресс-материал под воздействием теплоты и давления, развиваемого прессом, переходит в пластическое состояние и заполняет формирующую полость. По окончании выдержки опрессованные изделия вынимают из пресс-формы. При компрессорном прессовании давление не остается постоянным. В начале прессования для перехода материала в пластическое состояние и заполнения формирующей полости пресс-формы давление достигает максимума, затем в процессе выдержки давление падает. Основными параметрами технологического режима прессования являются температура, удельное давление и продолжительность выдержки герметизирующих изделий под давлением в пресс-форме.

При литьевом прессовании (рис. 6.24) пресс-материал помещают в загрузочную камеру, где он подвергается воздействию теплоты и давлению пуансона. Переходя в полужидкое состояние, пресс-материал по литникам (специальным каналам) поступает в формующую полость пресс-формы, в рабочих гнездах которой заложена арматура полупроводниковых изделий, причем обеспечивается полный равномерный прогрев всего пресс-материала.

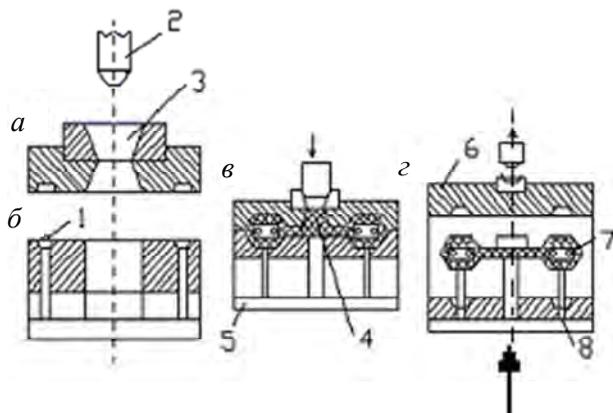


Рис. 6.24. Последовательность операций при герметизации методом литьевого прессования:

a, б – размещение арматуры в пресс-форме, загрузка пресс-материала; *в* – прессование, *г* – извлечение изделия из пресс-формы; *1* – прибор, подлежащий герметизации; *2* – пуансон; *3* – загрузочная камера; *4* – пресс-материал; *5* – выталкиватель; *6* – матрица; *7* – загерметизированный прибор; *8* – колонки

При выборе пластмасс для компрессионного и литьевого прессования учитывают их способность к хорошему измельчению, формированию при низких давлениях, сохранение высокой текучести на период протекания состава и заполнения пресс-формы. Способность формироваться при низких давлениях $(0,5-5,0)10^6$ Па имеют специально разработанные эпоксидные элементы ЭФП, К81-39С, кремнийорганический порошок ЭКП-200. Эти материалы имеют требуемую текучесть $60-80 \text{ см}^{-1}$. Техпроцесс литьевого прессования (трансферного литья) на съемных пресс-формах состоит из подготовки материала к прессованию, подготовки пресс-форм и размещения в них арматуры, собственно трансферного литья, доделочных операций, контроля качества опрессованных приборов.

В подготовку пресс-материалов входят подсушка, просев, окрашивание, отмеривание дозы пресс-порошка и таблетирование. Эти операции направлены на ускорение технологического процесса. При повышенном содержании влаги и других летучих веществ в пресс-материалах производят подсушку пресс-порошков при температуре 80 °С. Подготовительный этап включает также хранение пресс-материалов. При герметизации пластмассами способом литьевого прессования большое значение приобретает точная дозировка загружаемого в загрузочную камеру пресс-материала, которая обеспечивается таблетированием пресс-материала, т. е. его механическим прессованием в твердые таблетки различной формы на специальных машинах. Подготовка пресс-форм для герметизации состоит: из очистки и протирки рабочих поверхностей; смазки их кремнийорганическими жидкостями во избежание прилипания материала, загрузки арматуры; предварительного прогрева пресс-формы при повышенных температурах ($T = 150\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$). Используется герметизация прессованием арматуры полупроводниковых приборов и ИМС, собранных на рамках, где имеются технологические отверстия, которые совмещают с фиксирующими штырьками пресс-форм для точной посадки арматуры в формирующие полости. Загрузка арматуры выполняется на рабочей плите пресса, нагретой до 180–200 °С. После этого пресс-форму собирают и под прессом смыкают ее верхнюю и нижнюю части. Качество герметизации зависит от конструкции пресс-форм, которые являются сложным и дорогостоящим инструментом. Пресс-формы, используемые для трансфертного литья, могут быть:

- по характеру эксплуатации – съёмными и стационарными;

- по количеству одновременно прессуемых изделий – одно- и многогнездными;

- по положению плоскости разъема – с одной или несколькими плоскостями разъема.

Съёмные пресс-формы в процессе прессования не закрепляются на плитах и снимаются с них для извлечения готового изделия и загрузки новой партии приборов. Стационарные пресс-формы закреплены на плитах пресса неподвижно, поэтому загрузка изделий и извлечение их после герметизации осуществляется без съема пресс-формы. В одногнездных пресс-формах за один цикл прессования герметизируется одно изделие, в многогнездных – несколько десят-

ков и сотен изделий. Широко используется пресс-форма с одной горизонтальной плоскостью разъема, которая разнимается на две части (матрицу и пуансон) в одной плоскости, перпендикулярной направлению движения ползуна пресса. Основными деталями таких пресс-форм являются пуансон 2 и матрица 6 (рис. 6.24). Собранные вместе, они образуют формующую полость. Их изготавливают из высококачественных сталей, хромируют (толщиной 5–20 мкм) во избежание износа и полируют до 10–12 классов чистоты поверхности. Выталкиватель 5 служит для извлечения загерметизированных приборов, а колонки 8 – для точного направления пуансона в матрицу.

Пресс-формы очищают от остатков пресс-материала с помощью шпилек, изготовленных из мягких цветных материалов и сплавов или сжатым воздухом. Для литьевого прессования используют гидравлические прессы, на которых задается режим герметизации (температура T , давление P , время выдержки под давлением). Основными характеристиками гидравлических прессов являются: рабочее давление, размеры плиты стола и величина рабочего хода плунжера, определяющие габариты пресс-форм.

В пресс-форму, установленную на обогревательной плите гидравлического пресса, помещают загрузочную камеру и закладывают таблетки или засыпают пресс-порошок. Затем закрывают загрузочную камеру пуансона и после определенной выдержки (5–30 с) плавно опускают плунжер пресса до соприкосновения с пуансоном загрузочной камеры. Доводят давление на прессе при заданной температуре до соответствующего расчетного значения и выдерживают под этим давлением пресс-форму 3–5 мин. Поднимают плунжер, снимают загрузочную камеру и помещают пресс-форму в камеру с повышенной температурой, где выдерживают 5–15 мин в зависимости от типа и партии пресс-порошка.

Давление прессования определяют по формуле

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{уд}} \cdot S_{\text{зк}} / (K \cdot S_{\text{пл}}),$$

где $P_{\text{уд}}$ – удельное давление прессования;

$S_{\text{зк}}$ – площадь горизонтальной проекции загрузочной камеры;

K – КПД гидравлического пресса;

$S_{\text{пл}}$ – площадь поперечного сечения плунжера пресса.

Средняя скорость впрыскивания пластмассы определяется давлением прессования, сечением литников и оформляющих плоскостей пресс-форм. Переход герметизирующего материала ЭПФ из жидкого состояния в отвержденное длится 180–200 с с момента засыпки порции порошка в загрузочную камеру. Исходя из этого и учитывая время разогрева и время заполнения пресс-формы, выбирают время выдержки под давлением. Для устранения коробления герметизированных арматур, вызываемых неравномерной скоростью полимеризации, производится выдержка изделий в пресс-форме при повышенных температурах без подачи давления в течение 5–15 мин. Усадочные явления прекращаются в изделиях после выдержки их при $T = 100\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 6–8 ч. Внешним осмотром проверяют и отбраковывают приборы, на корпусах которых имеются вздутия, раковины, трещины, царапины. Затем приборы подвергают доделочным операциям – удалению литников и облоя, а также обрубке контура. Обрубка контура рамки, отделяющая контур от выводов, проводится штамповкой. Способ трансфертного прессования наиболее экономичен при массовом производстве полупроводниковых приборов и ИМС, так как в сочетании с многоместными пресс-формами характеризуется высокой производительностью.

6.9.4. Герметизация под давлением с помощью жидких компаундов

При герметизации с помощью жидких компаундов объединяются высокая производительность и простота в одном технологическом процессе. Способ обладает рядом достоинств. Давление при герметизации жидким компаундом значительно меньше, чем способом прессования, и составляет 0,1–3,5 МПа, а при подогреве падает до 30 кПа, что позволяет герметизировать микросхемы с тонким проволочным монтажом. Композиции в отличие от пластмасс не содержат компонентов смазки, которые снижают адгезию к выводам и облегчают проникновение влаги.

Стоимость этих композиций ниже стоимости пластмасс. Во время герметизации готовый компаунд подается в форму из дозатора, в котором непосредственно перед каждым впрыскиванием происходит дозирование и перемешивание определенного количества составных частей.

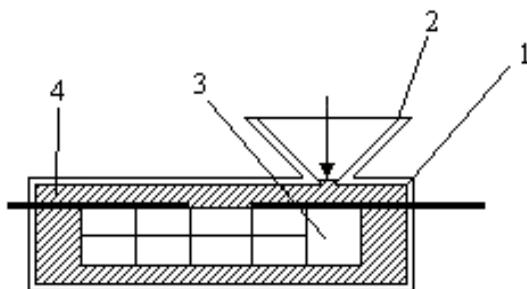


Рис. 6.25. Герметизация с помощью жидких компаундов:
 1 – пресс-форма; 2 – дозатор; 3 – кристалл с выводом;
 4 – заливочный компаунд

Цикл герметизации заключается в следующем. Изделия размещают в гнездах пресс-формы, включают пресс и запирают пресс-форму. В нее впрыскивается отмеренное количество компаунда. После отверждения герметика форма открывается и из нее извлекаются загерметизированные изделия. Устройство впрыскивания композиции периодически промывается растворителем. Благодаря низкому давлению впрыскивания усилие, запирающее форму, также небольшое. Пресс имеет давление вдвое меньше, чем при литьевом прессовании. Впрыскивание происходит по линии разъема. Эта операция эффективна в мелкосерийном производстве, когда литьевые формы и оборудование просты и дешевы. Подогрев компонентов перед смешиванием способствует удалению газов и снижению вязкости, облегчает вспрыскивание, способствует хорошему заполнению заливочной формы.

Длительность цикла зависит от продолжительности затвердевания композиции. Если используют предварительно подготовленные композиции, их жизнеспособность при 25 °С составляет несколько часов, что приводит к удлинению цикла. При дозировании и перемешивании компонентов перед каждым впрыскиванием можно использовать композиции с временем желатинизации 15 с. После извлечения загерметизированных изделий из пресс-формы требуется дополнительное отверждение при 180–150 °С в течение 10–24 ч.

7. ЗАЩИТА АРМАТУРЫ НА СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

7.1. Назначение защитных покрытий

Одной из основных операций в технологическом процессе изготовления различных полупроводниковых приборов и микросхем является операция нанесения защитных покрытий. Роль защиты поверхности полупроводниковых структур резко возросла в связи с использованием для герметизации пластических масс. Обычно эту операцию выполняют в процессе сборки (перед герметизацией прибора или микросхемы). Защитное покрытие в каждом случае имеет разное назначение. Остановимся на основных из них.

1. Защита поверхности полупроводниковых структур, особенно в области электронно-дырочных переходов, от влияния влаги и других загрязнений.

Взаимодействие полупроводниковых структур с окружающей средой является основной причиной ухудшения их параметров.

Поверхность электронно-дырочных переходов интенсивно взаимодействует с окружающей средой, адсорбируя кислород, воду и другие вещества. Это приводит к тому, что электрические свойства поверхности полупроводниковых структур (в первую очередь скорость поверхностной рекомбинации) резко изменяются, что может служить причиной нестабильности основных электрических параметров, таких как коэффициент усиления по току, пробивное напряжение и др.

Сопротивление p - n -перехода при обратном смещении составляет не менее 10^6 Ом, и поэтому даже незначительное количество примесей, обладающих сопротивлением меньше 10^6 Ом, будет шунтировать p - n -переход и вызывать ток утечки. На рис. 7.1 показано влияние влажности окружающей среды на ток насыщения германиевого p - n -перехода.

Из рассмотрения этой кривой видно, что резкое увеличение тока насыщения наступает при относительной влажности 45–50 %.

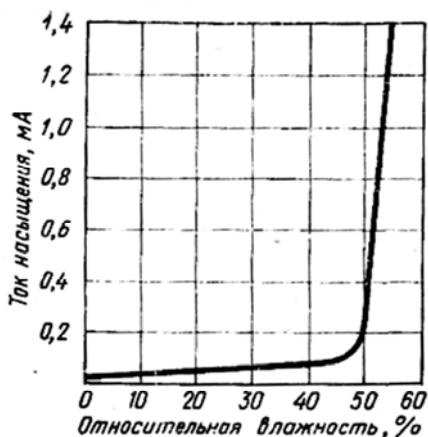


Рис. 7.1. Влияние влажности на ток насыщения германиевого p - n -перехода

2. *Дополнительная защита поверхности полупроводниковых структур, а также бескорпусных полупроводниковых приборов (транзисторов, диодов), используемых в качестве навесных компонентов в гибридных интегральных микросхемах, от влияния окружающей среды.*

Защитное покрытие предохраняет поверхность структур от возможных повреждений при выполнении сборочных операций (монтаж, разводка), а также способствует стабилизации электрических параметров в условиях повышенных температур и значительной влажности.

3. *Изоляция монтажа гибридных микросхем и слоев пассивных компонентов.*

В случае плотного монтажа схемы образуется значительное количество перекрещиваний и нависаний проводников, соединяющих активные компоненты между собой и с пассивной частью. При значительных механических воздействиях (вибронегрузки, удары и др.) это приводит к замыканию токопроводящих проводников между собой и с пассивной частью схемы.

Чтобы исключить возможность перемещения проводников, микросхемы заливают слоями лаков, компаундов.

4. *Создание дополнительной электрической изоляции высоковольтных структур.*

5. *Укрепление монтажа, мест соединений выводов с ножками, фланцами и другими элементами приборов и микросхем.*

В данной главе рассматриваются только методы защиты, выполняемые в процессе сборочных операций, т. е. методы защиты поверхности полупроводниковых структур с нанесенными металлическими контактами, структур с присоединенными внешними выводами, арматур дискретных приборов и микросхем.

Из всех существующих способов защиты можно выделить следующие:

- защиту органическими веществами: лаками, эмалями, компаундами, кремнийорганическими вазелинами, силанированием и др.;

- защиту неорганическими веществами: двуокисью кремния, стеклами специальных составов, пленками нитрида кремния, пленками окислов металлов (Ti, Al и др.).

Защитные покрытия предназначены обеспечить нормальную работу полупроводниковых приборов и микросхем в течение срока службы.

Защитные покрытия должны удовлетворять следующим требованиям:

- обладать высокими электроизоляционными свойствами (в том числе удельное объемное и поверхностное сопротивление в рабочем интервале температур должно быть не менее 10^{11} Ом·см, электрическая прочность покрытия должна быть больше напряженности поля, возникающего при электрическом пробое);

- иметь высокую тепло- и радиационную стойкость;

- не вызывать дополнительных механических напряжений вследствие разности коэффициентов линейного расширения и усадки при сушке и полимеризации;

- быть устойчивыми во внешней среде, иметь высокую гидрофобность и плотность, гарантирующие поверхность *p-n*-перехода от проникновения воды и других веществ;

- иметь хорошую адгезию к поверхности полупроводникового материала и электродным металлам и сплавам;

- для оптоэлектронных устройств обладать такими оптическими свойствами, как прозрачность в рабочей области спектра и высокий показатель преломления, которые не должны ухудшаться под воздействием различных климатических факторов.

Процесс нанесения защитного покрытия не должен влиять на электрические характеристики прибора и ухудшать его надежность.

Выбор метода защиты структур зависит от конструкции и технологии изготовления прибора или микросхемы, от применяемых полупроводниковых материалов, от требований, предъявляемых к данному прибору или микросхеме.

За последнее время в промышленности особое внимание уделяется внедрению неорганических диэлектриков для пассивации и изоляции активных и пассивных компонентов микросхем, так как по сравнению с диэлектриками на основе органических материалов они наиболее полно удовлетворяют приведенным требованиям.

7.2. Химическая обработка полупроводниковых структур перед защитой

Выбор метода химической обработки полупроводниковых структур перед защитой, как и метода защиты поверхности, зависит в первую очередь от конструкции и технологии изготовления приборов и микросхем.

Так, для получения высоких и стабильных значений электрических параметров дискретных (сплавных и диффузионных) структур перед защитой необходима тщательная обработка поверхности с помощью травления и последующей промывки.

Перед защитой планарных структур с уже имеющейся пленкой двуокиси кремния их поверхность дополнительной обработке не подвергают или ограничиваются промывкой в растворителях. Основные растворители, применяемые в полупроводниковом производстве, и их свойства указаны в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Физико-химические свойства органических растворителей для производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

Наименование	Плотность при 20 °С, кг/м ³ ·10 ³	Температура кипения, °С
Трихлорэтилен $\text{CHCl} = \text{CCl}_2$	1,466	88–90
Четыреххлористый углерод CCl_4	1,595	76,8
Этиловый спирт $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	0,789	78,4
Изотропиловый спирт $\text{CH}_2\text{H}_7\text{OH}$	0,804	82,5
Ацетон CH_3COCH_3	0,79	56,24

Перед защитой с помощью травления очищают поверхность кристаллов от окислов и шунтирующих загрязнений и удаляют нарушенный слой (после разделения пластин на отдельные кристаллы) с целью уменьшения несовершенств и дефектов поверхности.

В основном применяют химическое и электролитическое травление.

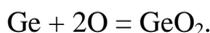
Принцип химического травления основан на окислении поверхности структур с последующим удалением образовавшихся окислов; при этом используются кислотные или щелочные травители. Травитель состоит из окислителя (азотная кислота, перекись водорода) и растворителя (плавиковая кислота, вода). В большинство травителей входят компоненты, влияющие на качество протравленной поверхности и скорость химической реакции (уксусная кислота, бром, йод). Для получения хороших результатов по электрическим параметрам необходимо применять исходные травители с особо очищенными компонентами.

Рассмотрим травление основных полупроводниковых материалов – германия и кремния – в перекиси водорода (H_2O_2) и смеси азотной и плавиковой кислот ($HNO_3 + HF$).

При травлении германия в H_2O_2 происходит следующая реакция:



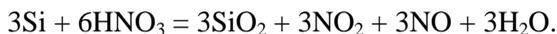
H_2O_2 при нагревании разлагается на воду и атомарный кислород, который является хорошим окислителем:



Двуокись германия затем взаимодействует с водой и удаляется с поверхности:



При обработке кремния в смеси кислот происходит следующая реакция:



На рис. 7.2 показана зависимость скорости травления кремния от процентного соотношения компонентов травителя.

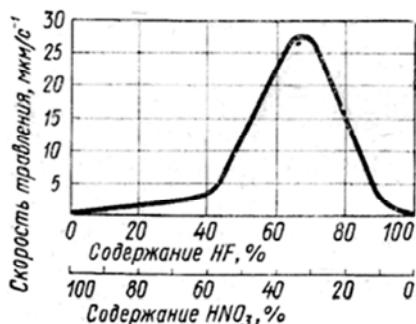
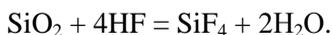


Рис. 7.2. Зависимость скорости травления кремния от процентного соотношения компонентов травителя

Образующаяся двуокись кремния хорошо растворяется в плавиковой кислоте с образованием летучего четырехфтористого кремния:



Скорость и качество травления полупроводниковых структур зависят от многих факторов. Основные из них: соотношения и концентрация компонентов, входящих в травитель; температура травления; объем травильной смеси; интенсивность перемещения в процессе травления.

Для хорошей повторяемости результатов травление проводят во вращающихся винипластовых или фторопластовых барабанах с большим объемом травителя (по отношению к объему полупроводниковых структур), установленных в химических шкафах или специальных скафандрах (рис. 7.3).

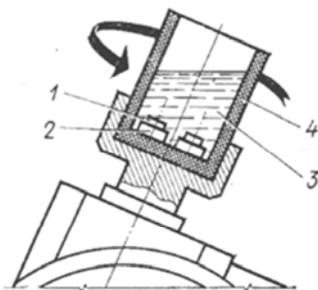


Рис. 7.3. Химическое травление кремниевых пластин:
 1 — кремниевая пластина; 2 — фторопластовый диск; 3 — химический травитель;
 4 — ванна для травления

Электролитическое травление заключается в анодном растворении полупроводника в растворе электролита. По окончании травления кристаллы или блоки арматур тщательно промывают до полного удаления травильных растворов. Для промывки применяют особо чистую – деионизованную воду с удельным сопротивлением $\rho = 5\text{--}25$ МОм·см. Далее пластины и кристаллы сушат в установках инфракрасной и ультрафиолетовой сушки, вакуумных или обычных термостатах при 110–120 °С.

7.3. Защита с помощью лаков, эмалей, компаундов и кремнийорганических вазелинов

Наиболее простым и довольно широко распространенным в промышленности способом защиты при сборке является лакирование. Лакирование применяют также перед герметизацией как дополнительную или вторичную защиту. Лак или эмаль наносят на силановую пленку или окисную пленку планарных структур, что способствует стабильности электрических параметров, особенно при повышенных температурах.

На отдельных приборах лакирование способствует механическому укреплению соединений после разводки выводов.

Требования, предъявляемые к защитным полимерным материалам, являются общими для всех защитных покрытий. Важно подчеркнуть, что защитное покрытие на основе полимерных материалов должно обладать минимальной кислотностью, не содержать активных компонентов и иметь ряд технологических качеств: не слишком большое время сушки и полимеризации; время жизни материала и время его хранения, удобные для производства.

Минимально допустимое значение удельного объемного сопротивления материала для защиты переходов может быть найдено по формуле

$$\rho_v = RS/l,$$

где ρ_v – удельное объемное сопротивление защитного материала;

R – сопротивление перехода;

S – площадь сечения защитного покрытия, перпендикулярного направлению тока;

l – ширина перехода.

Обычно удельное объемное сопротивление составляет $1 \cdot 10^{11}$ – $1 \cdot 10^{12}$ Ом·см.

Метод лакирования достаточно прост. Он заключается в том, что полупроводниковая структура или место соединения выводов обволакивается каплей защитного материала, затем ее подвергают сушке при повышенных температурах по определенному режиму.

Лаками называют жидкие материалы, которые являются растворами пленкообразующих веществ (лаковой основы) в летучих растворителях. После удаления из лака растворителя пленкообразующее вещество превращается в твердую лаковую пленку. Наиболее распространенными пленкообразующими являются различные смолы, битумы.

Эмали представляют собой композиции из лаков с введенными в них органическими пигментами (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Характеристика защитных материалов

Наименование защитного покрытия	Элементы защитного покрытия	Электрическая прочность в диапазоне рабочих температур, кВ/мм, не менее	Удельное объемное сопротивление в диапазоне рабочих температур, Ом·см, не менее	Диапазон рабочих температур, °С
1	2	3	4	5
1. Лаки и эмали				
Эмаль АС-539	Суспензия пигмента свинцового сурика, затертого на растворе смолы СВМ-31	20	$1 \cdot 10^{13}$	От –60 до +150
Лак МК-4У	Раствор кремнийорганической смолы в этилцеллозольве или толуоле	30	$1 \cdot 10^{10}$	От –60 до +200
Лак К-55	Раствор полиметилфенилсилаксановой смолы в толуоле или смеси скипидар-толуол	25	10^{11}	От –60 до +250

Окончание табл. 7.2

1	2	3	4	5
Лак-сульфон 3-И	Раствор полисульфонамида на основе изофталевой кислоты и диаминодифенилсульфона в диметилацетомиде	50	$1 \cdot 10^{12}$	От -50 до +200
Эмаль КО-97	Смесь кремнийорганического лака ФН-34 и раствора смолы БМК-5 с добавлением пигментов и наполнителей	20	10^{12}	От -60 до +150
2. Компаунды				
КЖ-25	Смесь эпоксидной смолы ЭД-5, отвердителя, наполнителей и ускорителей полимеризации	20	10^{14}	От -60 до +70
КЛТ-30	Смесь на основе низкомолекулярного диметилсилоксанового каучука СКТН, отверждаемая метилтриацетоксисиланом	20	10^{13}	От -60 до +300
МБК-3	Спиртовой полимер бутилового и метилового эфиров метакриловой кислоты, пластифицированный полимером ТГМ-3	15	$6 \cdot 10^{11}$	От -60 до +125
ЭКМ	Продукт полимеризации очищенной смолы ЭД-5, перегнанного диметилвинилэпикрилкарбоната и малеинового ангидрида	15	$0,8 \cdot 10^{12}$	От -60 до +120
ВГО-1	Кремнийорганический компаунд	–	$3 \cdot 10^{12}$ при +20 °С	От -60 до +250
Эластосил 11-02	То же	10	10^{13}	От -60 до +250

Примечание. Эмаль АС-539, лаки МК-4У, К-55, лак-сульфон 3-И и компаунд КЖ-25 предназначены для защиты поверхности электронно-дырочных переходов; эмаль КО-97 и компаунды МБК-3 и ЭКМ, кроме того, и для крепления выводов; компаунд КЛТ-30 – для изоляции монтажа, гибридных микросхем и защиты поверхности по окисной пленке, а ВГО-1 и эластосил 11-02 – для защиты поверхности полупроводниковых структур.

Пигменты улучшают твердость покрытия, нагревостойкость, влагостойкость. В процессе высыхания эмалей пигменты вступают в химические реакции с лаковой основой и образуют плотное покрытие.

Кроме эмалей, указанных в табл. 7.2, в промышленности используют так называемые эпоксиэмали ЭП-91 и ЭП-92, которые представляют собой суспензию пигментов на основе окиси хрома в эпоксидном лаке. Эмали ЭП-91 и ЭП-92 успешно применяют для защиты бескорпусных полупроводниковых приборов, служащих в качестве активных компонентов в гибридных микросхемах.

Компаундами называются смеси смол, битумов, жидкие или размягчающиеся до жидкого состояния при применении, в конечном состоянии отвержденные (табл. 7.2). В отличие от лаков и эмалей они не содержат растворителей.

Нельзя дать рекомендации на применение того или иного защитного покрытия для определенной группы или типа приборов.

Каждое покрытие имеет свои достоинства и недостатки, и практически нет такого материала, который удовлетворял бы всем требованиям, предъявляемым к защитным покрытиям. Выбор покрытия поэтому определяется только конкретными данными прибора или микросхемы: системой электрических параметров, диапазоном рабочих температур и мощностью рассеяния корпуса, полупроводниковым материалом, климатическими условиями, назначением самой защитной операции (крепление монтажа, защита перехода и др.).

При всей простоте метод лакирования имеет ряд недостатков, связанных в основном с качеством защитных материалов: длительным циклом отверждения, невозпроизводимостью результатов в зависимости от партий лака, несплошностью защитной пленки (так как большинство таких материалов содержат летучие растворители), слабой прочностью части материалов при циклических изменениях температур.

Технологический процесс лакирования состоит из подготовки лака или эмали; нанесения защитного покрытия; сушки защитного покрытия; определения отверждения лака, эмали; контроля качества защиты арматур.

Наиболее рационально с целью устранения вредного воздействия влаги операцию лакирования проводить в атмосфере с очень низкой относительной влажностью. Такую среду можно получать в специальных скафандрах. Скафандр представляет собой замкнутую

камеру с вводимым под небольшим давлением инертным газом – азотом или аргоном, прошедшим через осушительную колонку. Избыточное давление в скафандре препятствует проникновению в него наружного воздуха.

Резиновые диафрагмы в передней панели скафандра позволяют оператору работать без значительного нарушения герметичности. Чтобы влага не испарялась с рук, применяют резиновые перчатки. Азот очищают до содержания кислорода не более $1 \cdot 10^{-4} \%$ и точки росы порядка $-70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Перед началом работы инструмент, приспособления и химическую посуду протирают спиртом. У эмалей и лаков определяют вязкость с помощью вискозиметра, так как от этого свойства очень сильно зависит их растекаемость по поверхности структур. Перед употреблением лаки и эмали тщательно размешивают до получения однородного состава. Лак наносят с помощью иглы, шприца, окунанием.

Мезаструктуру (рис. 7.4) покрывают эмалью с помощью иглы. Кончик иглы опускают в тигель с эмалью и затем наносят ее на структуру с переходом таким образом, чтобы она закрыла кристалл и никелевую проволоку электрода на высоту 0,1–0,3 мм. На арматуру (рис. 7.5, 7.6) также наносят защитное покрытие с помощью иглы, причем компаундом 4 (рис. 7.5) закрывают арматуру, которая после сплавления и химической обработки уже покрыта слоем силана.

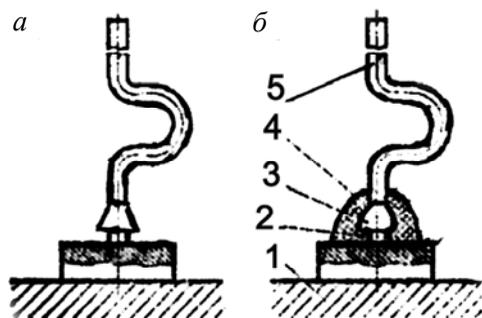


Рис. 7.4. Мезаструктура, защищенная компаундом с помощью иглы:
a – до защиты; *б* – после защиты; 1 – держатель; 2 – кристалл кремния;
3 – индиевый электрод; 4 – защитная эмаль; 5 – никелевый вывод

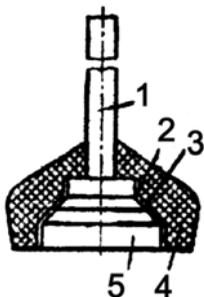


Рис. 7.5. Арматура варикапа с защитным покрытием:
 1 – держатель; 2 – защитная силикатная пленка; 3 – кристалл; 4 – защитное покрытие (компаунд); 5 – вольфрамовый диск

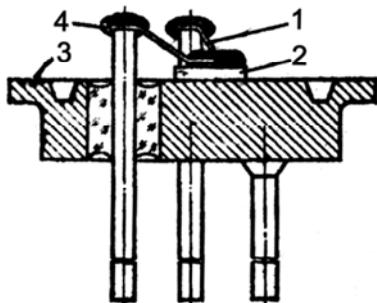


Рис. 7.6. Арматура транзистора с защитным покрытием:
 1 – вывод; 2 – кристалл с защитным покрытием; 3 – ножка; 4 – защитное покрытие, укрепляющее место сварки

Для укрепления места сварки выводов на эпитаксиальную $p-i-n$ -структуру (рис. 7.7) наносят защитное покрытие шприцем. В шприц набирают лак и осторожно небольшими порциями закрывают им поверхность структуры с припаянной плющенькой.

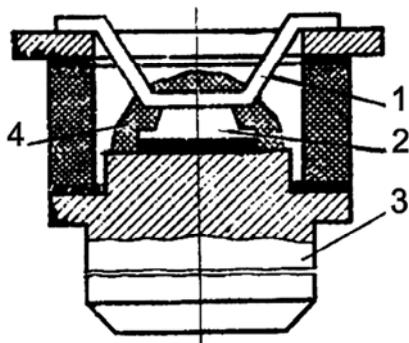


Рис. 7.7. Внешний вид $p-i-n$ -структуры с защитным покрытием:
 1 – вывод (плющенька); 2 – $p-i-n$ -структура; 3 – держатель;
 4 – защитное покрытие

Наиболее трудоемкой является операция лакирования тех структур, где надо защищать только переход, выходящий на боковые поверхности кристалла, не затронув его нижней и верхней поверхно-

стей, так как после лакирования к кристаллу припаивают выводы и производят монтаж.

Предварительная защита диодной матрицы осуществляется на приспособлении (рис. 7.8). Диодные матрицы, смонтированные на специальных рамках, загружают в пазы станины приспособления (рис. 7.9), и вращающийся (от электродвигателя) диск начинает перемещать рамку. На одном валу с этим диском насажен другой (фторопластовый) диск *б* с желобком для лакировки, в который непрерывно поступает из капельницы (баллончика с компаундом) защитная эмаль. При подходе рамки *3* под фторопластовый диск *б* кристалл диодной матрицы окунается в желобок с эмалью.

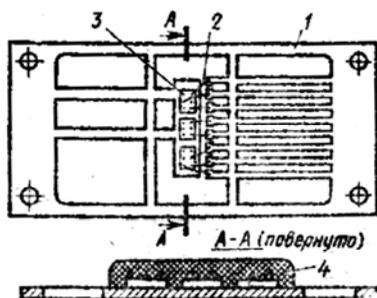


Рис.7.8. Диодная матрица с защитным покрытием:
1 – пластина; 2 – вывод; 3 – кристалл;
4 – защитное покрытие

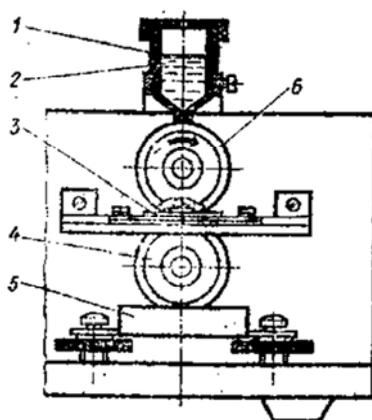


Рис. 7.9. Приспособление для защиты блоков арматур полупроводниковых устройств, смонтированных на ленте:
1 – баллончик (капельница); 2 – компаунд;
3 – рамка с кристаллами; 4 – диск для вибрации компаунда; 5 – лоток; 6 – диск с желобком для лакировки

Эмаль полностью обволакивает структуру с переходом. Рамки в приспособление загружают практически беспрерывно. Арматуры, защищенные эмалью, поступают в специальные кассеты и по транспортеру передаются на следующую операцию для полимеризации эмали. Полимеризация проходит в камере печи инфракрасной сушики. После определенной выдержки кассету извлекают и производят контроль по внешнему виду под микроскопом.

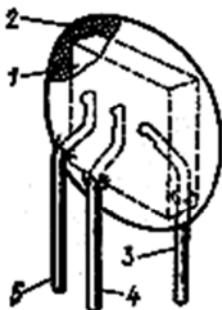


Рис. 7.10. Планарный транзистор, защищенный методом окупания:
 1 – кристалл; 2 – защитный компаунд; 3 – коллекторный вывод; 4 – эмиттерный вывод; 5 – базовый вывод

Планарный транзистор (рис. 7.10) для гибридных микросхем, если он монтируется в схему приклеиванием, защищают с двух сторон методом окупания с помощью специальных приспособлений. В тех случаях, когда посадка транзистора осуществляется при помощи пайки, непланарная сторона его не должна покрываться эмалью. Тогда его защищают с помощью иглы под лупой на специально оборудованных рабочих местах.

Процесс лакирования требует от исполнителей внимания и аккуратности. Лак наносят тонким слоем. От толщины

пленки зависит величина механических напряжений, а следовательно, и электрические параметры. Во время лакирования необходимо следить за тем, чтобы золотые или алюминиевые проволочки, с помощью которых осуществляется электрический монтаж, не касались друг друга, кристаллов и площадок для сварки, кроме тех, к которым приварены.

Эмаль периодически перемешивают, а загустевшую эмаль разбавляют растворителем до нужной консистенции.

После нанесения лака или эмали структуры сушат для удаления растворителей и глубокой полимеризации. Для этого арматуру или кристаллы с нанесенным слоем лака или эмали в специальных кассетах или лодочках помешают в вакуумные сушильные шкафы, печи инфракрасной сушилки или обычные термостаты. Режимы сушки (температура, время выдержки) определяются характером и типом выбранного защитного покрытия.

Контроль качества залакированных структур осуществляется внешним осмотром невооруженным глазом или под микроскопом. Не допускается затекания лака на поверхности кристалла и элементы конструкции арматур, где это может препятствовать качественному выполнению дальнейших сборочных операций (пайке на держатель, присоединению выводов и герметизации). Не должно быть незалакированных участков на структурах с переходом, выходящим на поверхность. Нанесенный лак не должен отслаиваться от кристалла, поверхность его не должна иметь трещин и быть пористой.

Иногда дополнительно контролируют качество отверждения защитного покрытия. Так, арматуру, защищенную эмалью ЭП-91, выдерживают в полиэтиленполиамине в течение 16–20 ч. При этом цвет эмали не должен меняться. Появление голубого ореола вокруг арматуры указывает на неполную полимеризацию эмали.

Перед отправкой залакированных структур на следующие операции обычно проверяют их электрические параметры. Это делают для того, чтобы оцепить качество лакировки и сушки и своевременно выявить и устранить причины брака.

Залакированные и высушенные структуры в период контроля, сборки, а также перед поступлением на дальнейшие операции хранят в эксикаторах с осушителями.

В производстве полупроводниковых приборов и ИС может применяться защита арматур с помощью кремнийорганического вазелина, иногда в сочетании с влагопоглощающими добавками, вводимыми в капсулу прибора. Изоляционный вазелин представляет собой смесь кремнийорганической жидкости с мелкодисперсным наполнителем в виде вязкой пасты. В промышленности применяют кремнийорганические вазелины КВ-2А, КВ-3 и др. Удельное объемное сопротивление вазелинов типа КВ в рабочем диапазоне температур не менее 10^{12} Ом·см, электрическая прочность порядка 15 кВ/мм.

Для защиты структур отдельных приборов находит применение и метод напыления пластмасс из псевдооживленного слоя. Этот метод известен давно, но для защиты полупроводниковых структур стал применяться в последнее время. Так же, как и лакирование, он отличается простотой технологического процесса и не требует сложного и дорогостоящего оборудования. При его помощи можно получить тонкую сплошную пленку покрытия. На поверхность полупроводниковой структуры наносят порошок полимера, находящийся в псевдооживленном состоянии, и затем его оплавливают. Псевдооживленный слой представляет собой аэродисперсию, в «кипящем» состоянии которой под влиянием внешних факторов (вибраций, газового поддува и др.) частицы быстро перемещаются с одного места на другое. По своим свойствам «кипящий» слой напоминает маловязкую жидкость.

Изделие, передвигаясь в таком слое, почти не встречает сопротивления. Однако законы, управляющие перемещением частиц в порошках, существенно отличаются от законов кипения жидкостей (отсюда и название способа – «псевдооживление»).

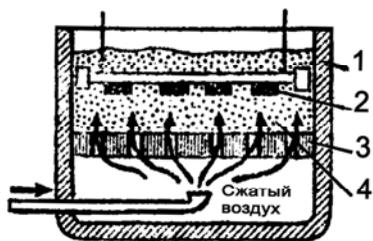


Рис. 7.11. Нанесение защитного покрытия в псевдооживленном слое:
 1 – ванна; 2 – нагретое изделие;
 3 – пористая перегородка; 4 – псевдооживленный порошковый полимер

в течение нескольких часов для оплавления и полимеризации пластмассы. В качестве материала, используемого для получения псевдооживленного слоя, часто применяют порошки на эпоксидной основе.

Основными факторами, влияющими на качество покрытия, являются время выдержки изделий в псевдооживленном слое, высота слоя порошкообразного компаунда, давление или скорость подаваемого воздуха, амплитуда и частота вибраций. При чрезмерном разжижении порошка, т. е. при большом давлении воздуха, создается низкая концентрация порошка в слое, что приводит к неравномерному покрытию. При очень низком давлении затруднительно вообще получить удовлетворительное «кипение» порошка. Роль вибрации в основном сводится к разъединению частиц, в результате чего уменьшается трение между ними, а восходящий поток газа поддерживает частицы во взвешенном состоянии. Немаловажное значение имеет также степень осушки подаваемого сжатого воздуха. Влажность воздуха влияет на характер «кипения» слоя в камере и в итоге на плотность упаковки частиц порошка в осажденном на приборе слое.

7.4. Защита силанированием

Метод силанирования служит для защиты поверхности кремниевых структур (рис. 7.12).

В промышленности применяют в основном два метода получения силановых пленок: 1) в процессе химического взаимодействия

раствора кремнийорганического мономера с водой; 2) из кремнийорганических мономеров, полимеризующихся на поверхности полупроводников под действием тлеющего разряда.

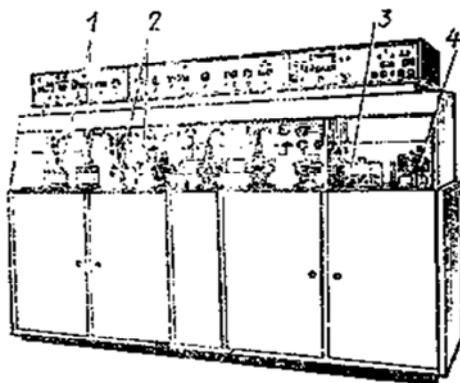
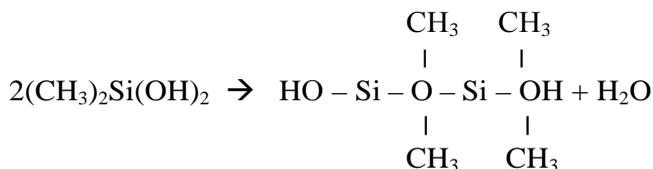
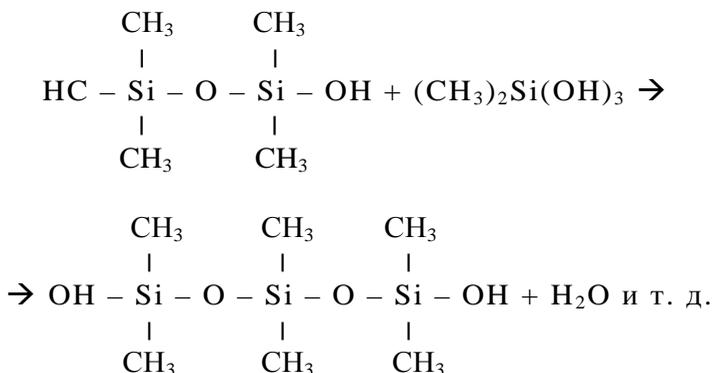


Рис. 7.12. Установка силанирования:

1 – центрифуга; 2 – ванна силанирования; 3 – ванны финишной промывки;
4 – ванны травления

Сущность первого метода состоит в том, что кремнийорганическая защитная пленка получается непосредственно на увлажненной поверхности кремния в результате реакции гидролиза органо-силановых соединений и последующей полимеризации образующихся силанов – водородных соединений кремния. Например, диметилдихлорсилан гидролизуеться в нестабильный диметилдигидросилан, а затем путем внутримолекулярной дегидратации переходит в силоксановый полимер:





Для этого структуру либо погружают в раствор силанов или их смесей, либо предварительно увлажненные структуры выдерживают в парах смеси силанов. Наибольшее распространение получил способ силанирования погружением структур в растворы. В качестве растворителей применяют серный эфир, бензол, ксилол и толуол.

Процесс силанирования рассмотрим на примере обработки арматуры в растворе диметилдихлорсилана в толуоле. Раствор приготавливают в кварцевом стакане в соотношении: 1 ч. диметилдихлорсилана и 9 ч. толуола. Срок хранения приготовленного раствора не более 10 мин, так как раствор теряет свои свойства в связи с тем, что толуол – летучий растворитель, в результате этого будет меняться состав раствора и его свойства. Температура раствора должна быть не более 20–22 °С.

Арматуру с мезаэпитаксиальной структурой, окончательно протравленную и промытую в деионизованной воде в специальной фторопластовой кассете, в которой она проходит травление, укрепляют на диске центрифуги и удаляют избытки влаги с кассеты и структуры центрифугированием. Кассету с арматурой после центрифугирования помещают в кварцевый стакан с раствором диметилдихлорсилана так, чтобы она была полностью покрыта раствором, и выдерживают в течение нескольких минут – время, в течение которого происходит полное смачивание поверхности. Затем раствор сливают и в стакан заливают деионизованную воду. Через 15–20 мин воду сливают, арматуру переключают в кварцевые лодочки и помещают в вакуумный сушильный шкаф, предварительно нагретый до 180–200 °С.

В вакуумном шкафу при давлении не более $1,33 \cdot 10$ Па арматуру выдерживают 2–3 ч, затем вынимают и помещают в специальную тару. Для оценки качества силанирования выборочно от партии проверяют основные электрические параметры кристаллов и арматуры.

Защитная силановая пленка очень тонка — 0,08 мкм, она химически связана с кремнием и не только обеспечивает надежную адгезию, но позволяет устранить некоторые структурные нарушения поверхности. Защитная пленка гидрофобна, обладает высокой газонепроницаемостью и инертностью к различным химическим реагентам, термостойка – может выдерживать температуры до 300 °С.

Метод силанирования имеет некоторые недостатки: защитная пленка состоит из молекул разных размеров; возможно укрупнение молекул в процессе полимеризации, что приводит к некоторой неоднородности пленок и может изменять их защитные свойства; при обработке кристаллов методом силанирования защитная пленка покрывает весь кристалл, т. е. не только поверхности с *p–n*-переходом, но и омический контакт, что может являться причиной ухудшения качества пайки и сварки на последующих операциях. Кремнийорганический мономер – диметилдихлорсилан – применим только для силанирования непосредственно кристаллов или арматур с деталями, покрытыми золотом; если же детали не покрыты золотом, то при гидролизе выделяется соляная кислота, которая взаимодействует с материалами держателей, компенсаторов и выводов.

Силановые пленки, получающиеся под действием тлеющего разряда (второй метод), имеют хорошую адгезию к поверхности кремния. Толщина пленок увеличивается линейно в зависимости от времени протекания реакции в камере, но данный метод не нашел широкого применения, так как не отработаны отдельные операции.

7.5. Защита полупроводниковых кристаллов и активных компонентов ИМС стеклянными пленками сложного состава

Еще одним способом, позволяющим существенно увеличить стабильность и надежность работы полупроводниковых устройств, является защита поверхности *p–n*-перехода стеклом сложного состава. Наиболее широко этот способ применяется для защиты активных

компонентов в гибридных интегральных микросхемах, а также на приборах, герметизируемых пластмассой.

Применение такого стабильного диэлектрика, как стекло, в качестве промежуточной защиты не только предотвращает сложную миграцию примесей к p - n -переходу, но, нанесенное поверх металлической разводки, оно надежно предохраняет полупроводниковый прибор или микросхему от механических повреждений и от коррозии.

Могут использоваться как легкоплавкие (бескислородные халькогенидные), так и тугоплавкие (в основном боросиликатные) стекла. Слой защитного стекла наносят на чистую полупроводниковую поверхность, на слой окиси или пассивированную поверхность.

При выборе стекла в качестве защитного покрытия исходят из того:

- чтобы, во-первых, температурные режимы нанесения стекла не отражались на полупроводниковых структурах (например, при высоких температурах может происходить дополнительная диффузия, может уменьшиться время жизни неосновных носителей и т. д.);

- во-вторых, термический коэффициент расширения не очень заметно отличался от термического коэффициента расширения полупроводникового материала. При толщине стеклянного покрытия около 1–1,5 мкм допускается различие в термических коэффициентах расширения не более чем в два раза.

Стеклянное покрытие должно обладать достаточной химической устойчивостью к парам воды и не должно иметь реакционной способности (реакции между стеклянными покрытиями и материалами выводов, омических контактов, токоведущих дорожек).

Если стеклянное покрытие наносят на планарную структуру, предварительно защищенную окисной пленкой, то оно должно обладать стабилизирующим действием.

Халькогенидные бескислородные стекла по сравнению с боросиликатными имеют то преимущество, что им присуще определенное геттерирующее свойство, т. е. они способны притягивать (поглощать) вредные примеси на поверхности полупроводников. Кроме того, их можно наносить при довольно низких температурах.

Существенным недостатком этих стекол следует считать большую разницу в коэффициентах линейного расширения по отношению к полупроводниковым материалам, что может приводить к воз-

никновению механических напряжений и малой стойкости покрытия при циклических изменениях температуры.

Процесс нанесения стекла может быть различным и определяется типами наносимых стекол. Тугоплавкие стекла наносят в виде пластинок, бусинок, порошков, растворов с последующим оплавлением, легкоплавкие – методом погружения в расплав или вакуумным термическим распылением.

Так, легкоплавкие стекла на основе As-Ge-Se с коэффициентом линейного расширения $1,5 \cdot 10^{-7}$ град $^{-1}$ наносят в качестве защитной пленки на полупроводниковые структуры методом вакуумного распыления.

Технологический процесс вакуумного распыления стекла рассмотрим на примере нанесения его на кремниевую пластину с мезаструктурами (рис. 7.13), имеющими диффузный $p-n$ -переход. Перед нанесением защитной пленки полупроводниковые пластины с $p-n$ -переходом подвергают травлению в специальном составе и тщательно промывают высокоомной водой. Затем их помещают в вакуумную напылительную установку (рис. 7.14) на подложку. В испаритель загружают халькогенидное стекло. При достижении давления порядка $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па включают ток нагрева испарителя. Температура испарения этих стекол 530–570 °С.

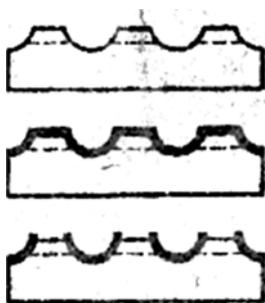


Рис. 7.13. Схема защиты стеклом диффузионных мезаструктур:

- a* – кремниевая пластина с мезаструктурой до нанесения стекла;
- б* – кремниевая пластина после нанесения стекла вакуумным распылением;
- в* – кремниевая пластина после вскрытия контактных окон с помощью фотографии

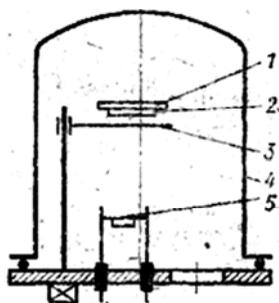


Рис. 7.14. Схема установки для нанесения стекла в вакууме:

- 1* – держатель; *2* – пластина со структурами; *3* – заслонка;
- 4* – колпак; *5* – испаритель

Распыление продолжается 2–3 мин. В первый момент распыления полупроводниковые структуры закрывают заслонкой, чтобы на изделие не попали различные загрязнения. Испаряющееся стекло распыляется во всех направлениях и тонким ровным слоем осаждается на пластины кремния. Толщина слоя зависит от времени распыления. В течение всего процесса в установке должно поддерживаться давление порядка $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па, для того чтобы молекулы стекла не претерпевали соударений с молекулами остаточных газов при движении к подложке и чтобы их траектория на всем пути была прямолинейной. После напыления проводят термообработку при 250–300 °С в течение 30 мин при давлении $1,33 \cdot 10^{-2}$ – $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па, а затем на воздухе в течение 2–3 ч при 220–250 °С.

Основное преимущество данного метода – высокая чистота полученной защитной пленки, относительно простое оборудование и большие скорости нанесения, недостаток – трудность контроля состава покрытий.

Для нанесения тугоплавких стекол на структуры с омическим контактом в промышленности применяют групповые методы остекловывания – метод седиментации и метод растворения керамики.

Метод седиментации заключается в том, что с помощью центрифуги на полупроводниковые структуры (пластины) наносят слой в виде суспензии частиц стекла (например в смеси уксуснокислого этила и изопропилового спирта) с последующим оплавлением в печи при температуре несколько ниже температуры размягчения стекла.

Технологический процесс метода седиментации рассмотрим на примере защиты пластин с транзисторными структурами, на которые нанесен алюминиевый контакт. Пластины с транзисторными структурами помещают на дно стакана центрифуги пленарной стороной вверх. Затем стакан заполняют определенным количеством суспензии стекла. Под действием центробежной силы при центрифугировании в течение 3–4 мин (3000–3500 об/мин) частицы стекла осаждаются на пластину, образуя тонкую порошковую пленку. Толщина пленки контролируется концентрацией и количеством взятой суспензии. Пластины с осажденным стеклом после слива жидкости подсушивают, затем слой порошка оплавляют при 510–520 °С в течение 5–10 мин. Толщина стеклянной пленки 0,5–20 мкм.

Для получения однородных, свободных от дефектов пленок большое значение имеют степень измельчения стекла и дисперсионная среда, в которой частицы стекла находятся во взвешенном состоянии. Стекло необходимо измельчать до частиц размером 0,1–0,5 мкм, а в качестве дисперсионной среды выбирать смесь органических жидкостей с сильно отличающимися диэлектрическими проницаемостями, но с одинаковыми вязкостью и летучестью.

Основными достоинствами метода седиментации являются его универсальность, т. е. возможность нанесения сплошной равномерной пленки стекла практически любого состава, достижение залечивания (благодаря плавлению) сквозных отверстий и пор и хорошее химическое сцепление покрытия с поверхностью подложки. В случае наличия промежуточного слоя SiO_2 условия адгезии стеклянной пленки улучшаются, что связано с частичным растворением стекла в SiO_2 ; толщина слоя растворения составляет 0,04–0,08 мкм и зависит от времени и температуры оплавления. К недостаткам следует отнести определенную технологическую сложность тонкого помола стекла и получения суспензии с размером частиц, как указывалось выше, 0,1–0,5 мкм и меньше.

Наиболее часто в качестве защитных покрытий применяют тугоплавкие многокомпонентные стекла в системах PbO-SiO_2 , $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ с добавками TiO_2 , CuO и др. Они отличаются низкой проницаемостью для различных газов и малым коэффициентом диффузии щелочных ионов; в определенной области состава обладают весьма ценным сочетанием свойств – низкой температурой размягчения, малыми диэлектрическими потерями и хорошей устойчивостью по отношению к влаге. Добавки Al_2O_3 в свинцовые стекла способствуют снижению коэффициента линейного термического расширения без увеличения температуры размягчения. Замещение PbO на ZnO также снижает термический коэффициент расширения и увеличивает влагостойкость стекол. TiO_2 повышает влагостойкость, а CuO – химическую стойкость.

Метод растворной керамики заключается в том, что на пластину наносят спиртоводный раствор, содержащий в необходимых соотношениях все компоненты покрытия в виде соединений, который при надевании разлагается до окислов, входящих в стекло. При последующем нагревании окислы оплавляются в тонкую, равномерную по толщине стекловидную пленку.

Метод растворной керамики, или, как его еще называют, пульверизации, применяют для защиты бескорпусных транзисторов с гибкими и твердыми выводами (шариковыми). Этим методом можно получить тонкую равномерную по толщине стеклянную пленку, он технологически более прост, чем метод седиментизации, не требует предварительной подготовки стекла (измельчение в порошок, приготовление суспензии и т. д.), значительно сокращается длительность производственного процесса нанесения и отжига стеклянной пленки, обеспечивает высокую чистоту процесса нанесения и равномерность покрытия поверхности сложного рельефа.

Защитное покрытие наносят в два этапа. На первом этапе окислением создается буферный слой SiO_2 . На втором этапе наносят пленку стекла путем пульверизации его шихтного состава из форсунки с последующим оплавлением на воздухе при температуре 500°C в течение 10 мин.

Для предотвращения растрескивания стекла при оплавлении выбирают определенную скорость подъема температуры до заданного уровня, а затем ее снижают. Для получения сплошной и равномерной по толщине пленки стекла цикл нанесения и оплавления повторяется два раза. Суммарная толщина пленки составляет $1,5\text{ мкм}$, а химический состав некоторых стекол, применяемых для герметизации методом растворной керамики, следующий (мас. %): $\text{SiO}_2 - 6,6$; $\text{B}_2\text{O}_3 - 18,0$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 6,2$; $\text{PbO} - 63,8$; $\text{ZnO} - 5,4$ или $\text{SiO}_2 - 23,5$; $\text{B}_2\text{O}_3 - 8,51$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 2,49$; $\text{PbO} - 65,5$.

Принципиальная схема установки пульверизации приведена на рис. 7.15. Температура в камере для напыления поддерживается $80 \pm 5^\circ\text{C}$. Время напыления 1–2 мин.

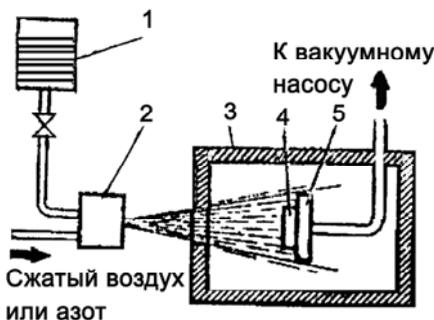


Рис. 7.15. Схема установки пульверизации

Существенным недостатком метода растворной керамики является то, что из-за ограниченной растворимости солей компонентов отдельные стекла, перспективные для защиты полупроводниковых структур, не удается получить в виде растворов.

7.6. Защита полупроводниковых структур пленками нитрида кремния

Для получения хороших результатов перед нанесением стеклянных пленок на планарные структуры кроме SiO_2 часто применяют дополнительную защиту пленками нитрида кремния.

Нитридные пленки, полученные методом реактивного распыления, катодного распыления и др., находят все большее применение для защиты блоков арматуры, структур с нанесенными омическими контактами в планарной и мезаэпитаксиальной технологии.

Нитридами кремния называют соединения кремния с азотом. Такие соединения крайне неустойчивы: единственным прочным является бинарное соединение Si_3N_4 .

Пленки нитрида кремния получают различными путями. Для защиты на сборочных операциях пленки из нитрида кремния могут быть нанесены только при низких температурах преимущественно методом реактивного распыления в плазме. В основе этого метода лежит процесс выбивания атомов, положительных и отрицательных ионов при бомбардировке поверхности твердого тела положительными ионами плазмы.

Плазма представляет собой состояние ионизированного газа, при котором беспорядочное движение электронов (ионов) преобладает над направленным. Характерным ее признаком является высокая степень ионизации газа, в предельных случаях доходящая до полной ионизации всех нейтральных частиц.

Метод реактивного распыления в плазме состоит в том, что подвергаемый распылению материал помещают в прианодную область разряда, где концентрация положительных ионов наибольшая. На электрод (мишень) подают отрицательный относительно плазмы потенциал (практически несколько сотен вольт) и только при этом начинается заметное распыление материала электрода.

Принципиальная схема установки для реактивного плазменного распыления показана на рис. 7.16.

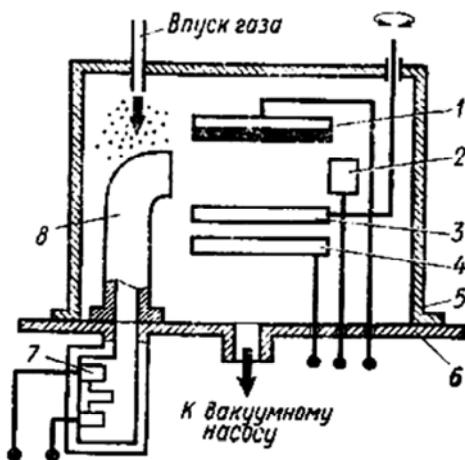


Рис. 7.16. Схема установки реактивного распыления нитрида кремния:
 1 – мишень; 2 – анод; 3 – подвижный экран; 4 – подложка; 5 – колпак;
 6 – основание корпуса; 7 – катод; 8 – кварцевая труба

Установка состоит из основания, колпака с подколпачным устройством, вакуумной и газовой систем и электрооборудования. Основание представляет собой сварной металлический каркас. Сверху на нем размещен колпак с подколпачным устройством. Под вакуумным колпаком 5 монтируются анод 2 и катод 7, служащие электродами газового разряда, а также мишень 1. Большая площадь мишени обеспечивает равномерность получения пленок по толщине всей пластины. Подложка 4 служит для размещения кремниевых пластин или отдельных мезаструктур. Расстояние подложки от распыляемого материала может регулироваться в пределах 70–80 мм.

Для создания плазмы внутри рабочей камеры используют азот. При достижении давления порядка $1,33 \cdot 10^{-2}$ – $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па включают ток катода. Термоэлектронный катод служит источником электронов. Вольфрамовая нить катода помещена в углубленный корпус, для того чтобы загрязнения от вольфрама не попадали в камеру распыления. На входе катода в камеру установлен кварцевый волновод, предназначенный для направления потока электронов к расположенному напротив волновода аноду. После напуска азота высокой чистоты в камере поддерживается давление порядка $1,33 \cdot 10^{-1}$ – $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па. На

анод подают постоянное напряжение, и во время процесса он имеет положительный потенциал. Электроны, выделившиеся с поверхности катода на пути к аноду, разбивают при соударениях частицы газа на положительные ионы и электроны, которые, в свою очередь, также разбивают при соударении частицы газа. Таким образом, число ионизированных частиц газа постепенно увеличивается, что приводит к образованию плазмы.

Распыление материала мишени получается при подаче на нее высокого отрицательного относительно плазмы потенциала (порядка нескольких сотен вольт). Под действием кинематической энергии положительных ионов, источником которых служит газовая плазма, происходит процесс выбивания свободных атомов или ионов с поверхности распыляемого кремния.

Частицы кремния, выбитые с распыляемого материала, попадают в объем, наполненный азотом. Вследствие низкого давления азота в камере выбитые атомы распыляемого кремния, не претерпевая взаимодействия и сохраняя таким образом кинетическую энергию, движутся преимущественно в направлении, перпендикулярном поверхности мишени, причем их средняя скорость зависит от энергии ударяющихся о распыляемый материал положительных ионов азота. Распыленные частицы проходят в результате диффузии через газ и осаждаются на поверхности защищаемых структур: частицы распыленного кремния реагируют с азотом, образуя химическое соединение Si_3N_4 (нитрид кремния).

Отдельные частицы кремния, не успев прореагировать с азотом, могут достигать подложки и вызывать нарушение соотношения между этими компонентами, хотя вероятность этого мала. При небольших скоростях роста пленки $(20\text{--}200)\cdot 10^{-4}$ мкм/мин атомы кремния, осевшие на поверхности подложки, могут успеть прореагировать с азотом еще до нарастания нового слоя пленки; при повышении скорости осаждения пленки возможность нарушения стехиометрии будет возрастать. Поэтому важно выбирать оптимальные режимы напыления (плотность тока, давление азота, напряжение мишени, расстояние между мишенью и подложками).

Нитрид кремния Si_3N_4 может образовываться и на распыляемом кремнии, а затем выбиваться с поверхности и переноситься к подложке уже в виде соединения.

Предварительно подложка подвергается очистке в разрядной плазме, а мишень распыляют при рабочем высоком напряжении для снятия слоев поверхностных загрязнений. Подложку закрывают подвижным экраном, на котором конденсируются распыленные загрязнения поверхностных слоев. По окончании процесса снимают напряжение, закрывают натекаТЕЛЬ и выключают накал катода. Затем нагнетают в систему воздух, поднимают колпак и вынимают продукцию.

Качество полученных структур с нанесенным нитридным слоем оценивают с помощью измерения основных электрических параметров и осмотра внешнего вида по контрольным картам. Пленка должна быть одноцветной, зеркальной, без видимого налета загрязнений и обладать высокой сплошностью и структурным совершенством.

При работе на установке необходимо особенно следить за чистотой подколпачного устройства. Через каждые 10–15 процессов следует производить чистку установки, а обработку кварцевых деталей – через пять процессов. Все работы, связанные с загрузкой, необходимо выполнять в резиновых перчатках.

Электрические свойства пленок нитрида кремния, полученных методом реактивного распыления, следующие: диэлектрическая проницаемость – 5,5–6,5; удельное сопротивление 10^{13} – 10^{15} Ом·см; электрическая прочность – 100 кВ/мм.

Преимуществом методов реактивного распыления является то, что процесс протекает при невысоких температурах и, таким образом, практически не происходит дополнительной диффузии, изменяющей распределение примесей в полупроводниковом материале и параметров приборов. При реактивном методе стремятся получить нитридные пленки с аморфной структурой, так как на границе аморфной пленки с полупроводниковыми материалами возникает меньшее напряжение, чем у кристаллической.

Так как пленка нитрида кремния может быть нанесена с помощью распыления, а не получена путем выращивания за счет самого кремния, то она может служить и для защиты других полупроводниковых материалов, в том числе германия, арсенида галлия. Нитриды кремния отличаются огнеупорностью и кислотностью. Из разбавленных кислот на них реагирует только кремнефтористоводородная. Концентрированная серная кислота при нагревании действует слабо.

К недостаткам нитридных пленок можно отнести следующие: слои толщиной более 1 мкм имеют тенденцию к растрескиванию вслед-

ствии возникновения напряжений на границе между кремнием и нитридом кремния; молекулы газа, химически активированные разрядом, интенсивно адсорбируются слоем нитрида кремния, поэтому готовая пленка часто содержит большое количество атомов газа, что может вызвать сильные отклонения в структуре и свойствах слоев.

Нитридные пленки в качестве дополнительной защиты необходимы в приборах, для которых важны стабильность при высоких температурах и радиационная стойкость.

На некоторых сплавных структурах применяют окисные защитные слои. Их образуют с помощью сильных окислителей, например путем погружения этих структур в кипящую азотную кислоту с последующей выдержкой или в смесь азотной кислоты с плавиковой. Причем азотная кислота присутствует в избытке и процесс окисления поверхности полупроводника преобладает над процессом удаления окисной пленки. Образующаяся пленка имеет темно-синий цвет, она достаточно плотная, однако ее стабилизирующие свойства очень чувствительны к режиму окисления, отклонения от которого могут ухудшать параметры приборов.

В полупроводниковой технологии для защиты кремниевых и германиевых транзисторов применяют также титанирование – пленки получают на основе окиси титана TiO_2 .

Сущность процесса титанирования состоит в том, что полупроводниковую структуру путем окунания или воздействия парами суспензии покрывают одним из сложных эфиров (например, негидролизированным титановым эфиром) и выдерживают при повышенной температуре; в результате образуются прочные химически связанные с поверхностью полупроводника пленки двуокиси титана.

7.7. Защита структур методом обволакивания

Метод обволакивания заключается в создании тонкой пленки полимерного материала путем обволакивания структуры каплей герметика. При растекании герметика под воздействием сил поверхностного натяжения получается сферическая форма. Для обеспечения механической прочности и герметичности структуры, как правило, наносят несколько слоев герметизирующего материала с предварительным подсушиванием каждого слоя. Основным требовани-

ем к материалам (компаундам) для обволакивания является способность их равномерно увеличивать вязкость.

На рис. 7.17 показана многослойная арматура выпрямительного диода общего назначения, загерметизированного методом обволакивания.

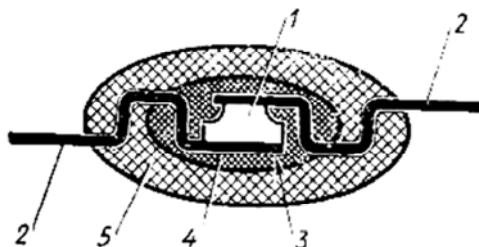


Рис. 7.17. Выпрямительный диод, загерметизированный методом обволакивания: 1 – кремниевая структура; 2 – вывод; 3 – силиановая пленка; 4 – закрепляющий слой компаунда; 5 – герметизирующий слой компаунда

Процесс герметизации полупроводниковых приборов методом обволакивания состоит из следующих операций: приготовления обволакивающего компаунда, нанесения компаунда на арматуру, полимеризации компаунда, контроля качества герметизирующего покрытия.

После проведения процесса силанирования на структуру диода наносят слой защитного закрепляющего состава на основе триацетатной электроизоляционной слабо пластифицированной пленки, которая растворяется в ледяной уксусной кислоте. Блоки арматуры загружают в специальные приспособления с зажимными устройствами – клипсами (рис. 7.18) и

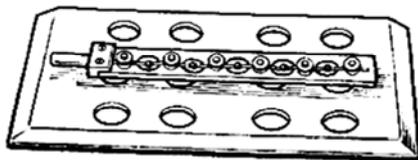


Рис. 7.18. Кассета для закрепления блоков арматуры при нанесении компаунда

стеклянной палочкой наносят одну каплю обволакивающего состава, покрывая тонким слоем со всех сторон кристалл и выступы на выводах. Клипса с блоками арматуры вставляется во вращающееся гнездо приспособления и выдерживается не менее 10 мин. Вращение арматуры предотвращает стекание капли неотвержденного компаунда и дает возможность получить корпуса равномерной толщины. В дальнейшем арматуру сушат при 160–180 °С в течение 1–2 ч в вакуумном сушильном шкафу

с давлением не выше $1,33 \cdot 10$ Па. Аналогичную операцию повторяют несколько раз, последовательно чередуя процесс нанесения и сушки тринитроацетатной пленки до получения необходимого количества слоев, указанных в технологической документации.

Герметизирующий материал представляет собой компаунд на основе эпоксидной кремнийорганической смолы СК-25 с наполнителем – нитридом бора. Приготовленный компаунд вакуумируют при температуре 100 °С и давлении $1,33 \cdot 10$ Па. Так как срок жизни жидкого компаунда ограничен, то компаунд приготавливают небольшими партиями. Большое внимание уделяется правильному соотношению составляющих компаунда, так как это сказывается на качестве загерметизированных этим компаундом приборов.

Нанесение герметизирующего эпоксидного компаунда и сушка проводятся в тех же клипсах (рис. 7.18) и приспособлениях, что и при нанесении защитного закрепляющего состава. Каплю компаунда наносят на блок арматуры таким образом, чтобы он закрывал закрепляющий состав и выступы на выводах.

Отверждение компаунда производится при повышенной температуре. После полимеризации компаунда приборы передают на следующую операцию. Некоторые приборы рассматриваемой конструкции (см. рис. 7.17) покрывают дополнительно массой на основе кремнийорганического электроизоляционного лака КО-989.

После герметизации производят проверку электрических параметров приборов и контроль внешнего вида нанесенного герметика. Внешний вид контролируют под микроскопом или лупой. Не допускаются значительные выпуклости, впадины, царапины на герметизирующем покрытии, нарушающие габариты диода и обнажающие слои из другого материала, отколы герметика около выводов, отслаивание (отлипание, щели) между герметизирующим покрытием и выводами, изолированные пузыри в заливочной массе, образующие сплошные цепочки.

Метод герметизации полупроводниковых приборов обволакиванием отличается простотой, обеспечивает высокую устойчивость приборов в условиях воздействия влажной атмосферы, но имеет ряд недостатков: трудность нанесения равномерного по толщине покрытия, длительность технологического цикла и сложность механизации процесса.

7.8. Защита структур методом свободной заливки

Метод защиты полупроводниковых структур заливкой применяется обычно для приборов мелких серий со сложной арматурой. Существует два метода заливки: во вспомогательные съемные формы и в предварительно изготовленный корпус.

Сущность метода защиты – герметизации – заключается в заполнении жидким герметизирующим компаундом специальных форм или капсул, в которых размещены блоки арматур полупроводниковых приборов или микросхем. В качестве заливочных компаундов чаще всего используют жидкие компаунды на основе эпоксидных смол.

Герметизация приборов и микросхем заливкой в капсулу (корпус) характеризуется тем, что после отверждения герметизирующего компаунда эти капсулы (корпус) остаются частью прибора или микросхемы. При капсулировании микросхема помещается в корпус выводами наружу (рис. 7.19). Свободный торец капсулы и вывода заливают компаундом. Основным условием этого метода герметизации является хорошая адгезия заливочного компаунда к материалу корпуса. Корпус может иметь любую геометрическую форму и таким образом может быть использован для герметизации различных типов полупроводниковых приборов и микросхем.

Наиболее распространен в промышленности метод герметизации заливкой во вспомогательные съемные формы.

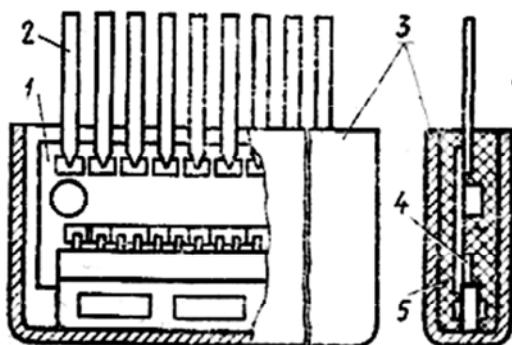


Рис. 7.19. Корпус пенального типа, загерметизированный методом заливки:
1 – плата с пленочной микросхемой; 2 – выводы; 3 – кожух; 4 – кассета;
5 – заливочный компаунд

В зависимости от конструкции прибора или микросхемы применяют два способа заливки во вспомогательные формы.

Первый способ – заранее заполняют пустоты в литевой форме, а затем в нее погружают ту часть прибора или микросхемы, на которой смонтирован полупроводниковый элемент (рис. 7.20).

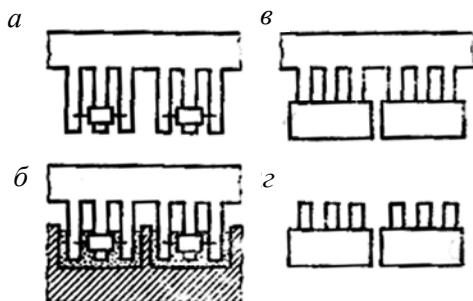


Рис. 7.20. Схема технологического процесса герметизации методом заливки (погружение прибора или микросхемы в заполненную компаундом форму): а – лента с полупроводниковой структурой; б – помещение ленты с кристаллами в форму; в – изъятие из формы; г – обрезка ленты-носителя

Предварительно кристалл с переходом монтируется на металлической рамке-держателе, а затем ее помещают в заливочную форму таким образом, чтобы кристалл с выводами располагался в центральной части рабочего углубления заливочной формы, в которой залит жидкий герметизирующий компаунд. Полимеризация компаунда может происходить как при комнатной, так и при повышенной температуре. После отверждения компаунда металлическую рамку вынимают из формы и разделяют на отдельные части, которые представляют собой готовые герметизированные приборы.

Второй способ – жидким компаундом заполняют пустоты предварительно нагретой литевой формы с находящимися в ней блоками арматуры (рис. 7.21).

Рассмотрим типовые технологические операции заливки.

Важной операцией является приготовление компаундов для заливки. Так, для получения эпоксидных компаундов компоненты, взятые в определенных соотношениях, тщательно перемешивают, выдерживают при определенных температурах и перед заливкой смешивают

с отвердителем. Во избежание образования пузырей воздуха и раковин в корпусе, как правило, при приготовлении жидких заливочных композиций применяют их вакуумирование (иногда достаточно нагреть компаунд на 20–30 °С ниже температуры его полимеризации). В зависимости от применяемого герметизирующего компаунда литьевые формы могут быть из пластмасс, силиконовой резины, металла или комбинации этих материалов. Резиновые формы перед заливкой обезжиривают путем их вакуумирования или нагревания.

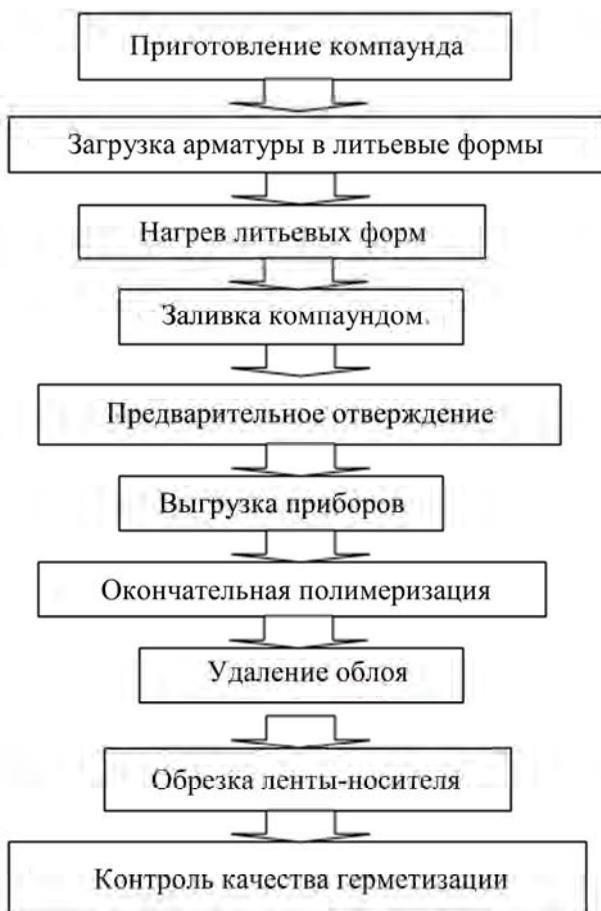


Рис. 7.21. Схема технологического процесса герметизации методом заливки (нагретая литьевая форма с загруженными приборами заполняется компаундом)

Металлические и пластмассовые формы перед заливкой также прогревают при определенной температуре и смазывают антиадгезионным составом-смазкой – обычно раствором кремнийорганических каучуков. Нагрев загрузочных форм необходим для повышения текучести компаунда.

Герметизируемая арматура на металлической рамке-держателе помещается в рабочее гнездо нижней матрицы заливочной формы и плотно прижимается верхней матрицей. В верхней части заливочной формы имеются специальные отверстия, а внутри – система каналов для подачи герметизирующего компаунда в рабочие гнезда. Формы заполняются компаундом с помощью специального устройства или вручную дозирующим шприцем. Наполненные формы выдерживаются для предварительного отверждения при повышенной температуре от 70 до 170 °С (в зависимости от применяемого компаунда и конструкции изделий).

После предварительного отверждения компаунда заливочные формы охлаждаются и из них извлекаются металлические рамки с загерметизированными в пластмассу приборами. Затем приборы на металлических рамках проходят дополнительную термообработку до полного отверждения пластмассы (полной полимеризации), после чего снимается облой и рамка с приборами разделяется на отдельные части, которые представляют собой готовые загерметизированные приборы.

Контроль качества герметизации проводится с помощью лупы или микроскопа. Не допускаются значительные сколы, раковины и другие дефекты корпуса, обнажающие нижележащие слои, затекание заливочной массы и вывода на большую площадь, чем указано в технической документации. С целью объективной отбраковки приборов по внешнему виду используются специально подобранные эталонные образцы.

Качество заливки определяется не только выбором соответствующего компаунда, но и оптимальным технологическим режимом, т. е. температурой и длительностью отверждения, соотношением количеств смолы, отвердителя и наполнителя, конструкцией литевой формы и другими факторами.

На рис. 7.22 показана полупроводниковая диодная матрица, загерметизированная заливкой.

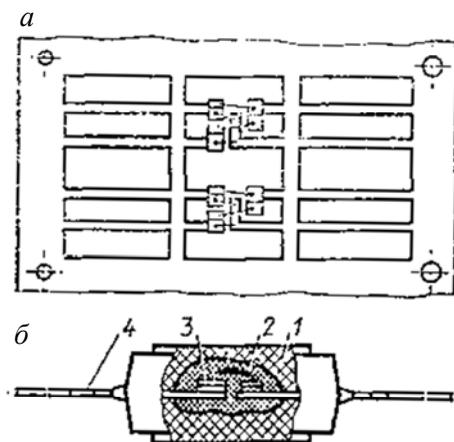


Рис. 7.22. Диодная матрица, загерметизированная пластмассой:
а – до герметизации; *б* – после герметизации; 1 – пластмассовый корпус;
 2 – защитное покрытие; 3 – полупроводниковая структура; 4 – вывод

Наиболее часто встречающиеся отклонения от технологического режима, их возможные причины и пути устранения приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Виды брака и способы его устранения при герметизации методом свободной заливки

Виды брака	Причины брака	Способ устранения брака
1	2	3
Заливочная масса остается жидкой (не твердеет) или очень мягкой и клейкой	Слишком низкая температура отверждения или недостаточная длительность процесса отверждения	Привести температуру сушильной камеры и длительность процесса отверждения в соответствии с технологической документацией
	Неточное соотношение компонентов смеси или плохое их смешивание	Тщательно перемешать компоненты

1	2	3
Отделение пластмассы по выводам	Загрязнение поверхности маслами; окисление поверхности металлических деталей изделий	Тщательно очистить поверхность изделия перед заливкой
Пузыри или поры на поверхности	Недостаток выбранного компаунда для герметизации или технологии его приготовления	Вакуумировать компаунд до заливки; использовать более медленную систему отверждения или более низкую температуру полимеризации; произвести предварительный нагрев компаунда и формы с герметизируемым изделием для уменьшения вязкости компаунда; улучшить конструкцию заливочной формы для обеспечения выхода воздуха
Шероховатая или пятнистая поверхность	Шероховатая поверхность заливочной формы	Произвести очистку или полировку заливочной формы
Трещины при отверждении	Заливочный компаунд отвержден неполностью Слишком высокая температура полимеризации	Увеличить время отверждения Снизить температуру полимеризации, т. е. привести в соответствие с технологической документацией

Метод герметизации полупроводниковых приборов и микросхем заливкой отличается простотой, не требует значительных затрат, так как используются довольно простое оборудование для дозирования компаунда и дешевые заливочные формы. Кроме того, при герметизации микросхем (особенно гибридных) свободная заливка компаунда без давления снижает возможность обрывов электродных выводов (30–50 мкм). Недостатки этого метода связаны с применением заливочных компаундов и относительно невысокой производительностью.

8. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

8.1. Характеристика заключительных операций

Заключительные операции сборочного производства выполняются после того, как загерметизированный прибор или микросхема прошли весь комплекс технологических испытаний и измерений, т. е. прибор фактически изготовлен и может быть отправлен потребителям. Но собранный и загерметизированный прибор, особенно корпус и выводы, необходимо защитить от внешних воздействий, отмаркировать и подготовить выводы, если это необходимо, для пайки в аппаратуре.

К заключительным операциям полупроводникового производства обычно относят окраску, лакировку, маркировку, лужение и рихтовку выводов, нанесение защитных покрытий на микросхемы или полупроводниковые приборы гальваническим методом, упаковку изделий.

Для защиты приборов и микросхем от внешних воздействий при эксплуатации в различных условиях применяют окраску и (или) лакировку корпусов приборов и лужение горячим способом, а также гальванические покрытия всей конструкции приборов. Наиболее часто собранные приборы покрывают сплавом олово-висмут. Разработанные электролиты позволяют получать плотные светло-серые осадки с содержанием висмута до 5 %. Коррозионная стойкость осажденного сплава незначительно отличается от коррозионной стойкости олова.

Для защиты приборов, работающих в жестких климатических условиях, применяют сплавы олово-никель и олово-кадмий.

Луженые и золоченые выводы полупроводниковых приборов и микросхем хорошо смачиваются припоем и хорошо паяются при монтаже в аппаратуре, что является необходимым требованием к конструкциям приборов и микросхем.

В зависимости от специфических особенностей работы прибора и конструкции иногда защиту металлических деталей от внешних воздействий и обеспечение требований надежного контакта проводят при изготовлении деталей корпусов, т. е. до сборки приборов. Например, металлические детали многих СВЧ-диодов покрывают тонким слоем золота.

Для защиты от коррозии основного металла золотые покрытия должны быть практически непористыми или иметь толщину порядка 12–15 мкм. Пористость золотых покрытий зависит как от толщины слоя, так и от характера основы или подложки, методов нанесения золота и электролитов.

Маркируют полупроводниковые приборы и микросхемы для обозначения типа приборов и микросхем, даты изготовления, товарного знака завода-изготовителя и знака (клейма) отдела технического контроля, подтверждающего годность данных изделий.

Окрашенные и отмаркированные приборы и микросхемы помещают в специальную упаковочную тару, которая обеспечивает сохранность изделий от механических повреждений при транспортировке. Обычно приборы и микросхемы упаковывают в пластмассовые или картонные коробки, разложив их в специальные вкладыши (укладки), где каждое изделие помещено в отдельное гнездо, чтобы не было перемещений. На рис. 8.1 изображен полиэтиленовый вкладыш с загруженной микросхемой. При упаковке между крышкой и вкладышем прокладывают гофрированный картон или поролон. Коробки с приборами закрывают крышками и оклеивают бандеролями, на которых обозначены тип приборов и их количество. Полупроводниковые приборы малых габаритов укладывают в полиэтиленовые ленты, состоящие из отдельных карманов, которые завариваются на сварочной машине для пластмасс.



Рис. 8.1. Полиэтиленовый вкладыш с загруженной микросхемой:
1 – вкладыш; 2 – микросхема

8.2. Окраска, лакировка и маркировка

Окраска. Операция окраски полупроводниковых приборов и микросхем является одной из основных заключительных операций полупроводникового производства.

Окрашивают микросхемы и полупроводниковые приборы для защиты корпусов от внешних воздействий, в первую очередь от коррозии и от воздействия светового излучения, которое вызывает появление дополнительных носителей тока в структурах и может изменить нормальный режим работы изделия. Кроме того, окраска применяется для придания полупроводниковым изделиям хорошего внешнего вида.

Выбор лакокрасочных материалов для покрытия корпусов определяется прежде всего:

- условиями эксплуатации полупроводниковых приборов и микросхем (умеренный или тропический климат, температура окружающей среды и пр.);

- максимальной температурой, до которой можно нагревать полупроводниковые устройства при сушке лакокрасочных покрытий;

- требованиями, предъявляемыми к внешнему виду окрашиваемых изделий;

- материалом поверхности, подлежащей покрытию.

Сами лакокрасочные покрытия должны обладать удовлетворительной механической прочностью и высокими адгезионными свойствами к покрываемому материалу корпусов (никелю, ковару, стеклу, стали, латуни, олову), минимальной влагопоглощаемостью, высокой влагостойкостью, светонепроницаемостью, хорошими электроизоляционными свойствами, теплостойкостью и морозостойкостью; жизнеспособность лакокрасочного материала после добавления отвердителя не должна быть кратковременной, т. е. жизнеспособность должна быть в пределах необходимого времени для технологических операций.

Сущность технологического процесса окраски заключается в нанесении тонкого слоя краски (или грунта, а затем краски) на корпус полупроводникового прибора или микросхемы с последующей сушкой.

Основными лакокрасочными материалами являются грунты ФЛ-ОЗКК и ФЛ-ОЗК и эмали ПФ-163, ЭЭ-341-1, ЭП-716, ЭП-933, ЭП-288, НЦ-11.

Грунты ФЛ-ОЗК и ФЛ-ОЗКК имеют фенолформальдегидную основу, растворителем ее является ксилол или сольвент каменноугольный, или смесь уайт-спирита с ксилолом или сольвентом в соотношении 1 : 1; рабочая вязкость по ВЗ-4 при 20 °С составляет 18–20 с; грунт ФЛ-ОЗК коричневого, а ФЛ-ОЗКК – красно-коричневого цвета. Основные свойства некоторых эмалей приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Основные свойства эмалей для окраски корпусов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

Марка	Цвет	Основа	Растворитель или разжижитель	Рабочая вязкость по ВЗ-4 при 20 °С, с	Режим сушки	
					Температура, °С	Время, ч, не более
ЭЭ-341-1	Черный	Эпоксидная	Смесь этилцеллозольва 80 % и ацетона 20 %	16–18	80–120	4
ЭП-716	Разный	То же	Смесь ксилола с этилцеллозольвом в соответствии 7 : 3	14–16	20–25 или 70	24 1
НЦ-11	То же	Нитроцеллюлозная	№ 647	17–23	20–25	1

Примечание. ЭЭ-341-1 – термостойкое покрытие, влагопоглощаемость низкая, влагостойкость высокая (после 24-часового пребывания в воде оно не изменяется). Эмаль наносят без грунта по стали, ковару, никелированным поверхностям, стеклу, олову окунанием и кистью. ЭП-716 – влаго- и атмосферостойкое покрытие, устойчиво при эксплуатации в условиях сухого тропического климата; пленки механически прочны и достаточно эластичные, обладают хорошей адгезией, твердостью; наносят по грунту распылением. НЦ-11 – атмосферостойкое покрытие, устойчиво к периодическому воздействию минерального масла, бензина и воды при нормальной температуре. Пленки горючие, глянцевые, обладают высокой декоративностью. НЦ-11 стойко к одновременному воздействию тропической влажности и повышенной температуры (тропический климат); наносят по грунту распылением, окунанием, кистью.

Технологический процесс окраски полупроводниковых приборов и микросхем включает в себя подготовку деталей к окраске (обезжиривание, промывка), процесс грунтования, окраску, сушку и контроль качества окрашенной поверхности.

Перед окраской поверхность корпусов изделия тщательно обезжиривают в органических растворителях: обычно или кипятят в четыреххлористом углероде в течение 10–15 мин, или промывают в толуоле или ацетоне. Сушку производят в вытяжном шкафу до полного удаления растворителя.

Как уже указывалось выше, в полупроводниковой промышленности применяют в основном два вида грунтов: ФЛ-ОЗК и ФЛ-ОЗКК; перед употреблением в них добавляют 5 % нефтяного сиккатива № 63 или № 64. Приборы и микросхемы, покрытые грунтами, сушат в сушильных шкафах или сушильных установках при температуре 100–150 °С в течение 0,5–2 ч в зависимости от материала поверхности корпусов, на которую накладываются грунты. Отдельные типы полупроводниковых приборов и микросхем подвергают окраске без предварительного грунтования.

Существует много различных способов окраски полупроводниковых приборов и микросхем, основные из них – окунание, струйное обливание, пульверизация и окраска кистью.

Наиболее простым является способ окраски корпусов кистью. Для примера рассмотрим подробно технологический процесс окраски эмалью ПФ-163 выпрямительных диодов общего назначения. Рабочий раствор эмали перед применением тщательно размешивают и разливают в тару. На этой операции применяют небольшие электродвигатели, которые устанавливают на рабочем столе с вытяжкой. На валу якоря электродвигателя приспособлена цанга для крепления выводов окрашиваемых приборов (в данном случае диодов). Диод, подлежащий окраске, вставляют в цангу и включают электродвигатель. Кисточкой, смоченной эмалью, окрашивают вращающийся диод. Затем его вынимают из цанги и устанавливают на специальную подставку, на которой вся партия окрашенных приборов отправляется на сушку. Рабочий раствор эмали во время работы тщательно перемешивают стеклянной палочкой; загустевший раствор эмали необходимо разбавить ксилолом.

Для окраски методом окунания применяют специальные приспособления (рис. 8.2). Шпиндель 2 приводится во вращение электродвигателем. Полупроводниковые приборы (транзисторы) 5, подлежащие окраске, помещают в многоместной кассете 3, которая специальным устройством закрепляется на шпинделе станка. Кассету с приборами окунают в краску, приподнимая сосуд 4 с краской, затем включают шпиндель. При вращении шпинделя лишняя краска удаляется с приборов. Через определенное время кассету останавливают, сосуд 4 с краской опускают на стол, а кассету с окрашенными приборами снимают со шпинделя и передают на сушку.

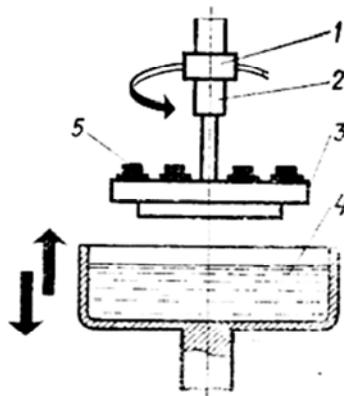


Рис. 8.2. Окраска приборов и микросхем методом окунания:

1 – электродвигатель; 2 – шпиндель; 3 – многоместная кассета с закрепленными приборами; 4 – сосуд с краской; 5 – окрашенные приборы

Метод струйного обливания использован в основном в автоматах покраски. Окраска производится за счет струйного обливания эмалью из штуцера при движении диодов на транспортной цепи. Краска перекачивается насосом. Излишки краски стекают в воронку. Окрашенные приборы поступают на следующую операцию – сушку.

Недостатком струйного обливания является возможность образования подтеков и наплывов. Для снятия лишней краски изделия «обкатывают», пропускают через туннели с парами растворителя, последние задерживают улетучивание растворителей из нанесенного слоя и позволяют избежать преждевременного загустения лакокрасочного материала.

Широко применяется и метод пульверизации – окрашивание изделий с помощью ручных или автоматических листолеетообразных краскораспылителей. Этим высокопроизводительным методом можно окрашивать полупроводниковые приборы и микросхемы в корпусах различной формы. Окрашивают изделия в специальной камере, оборудованной внешней вентиляцией. Изделия помещают в кассету, которая удерживает их и защищает места, не подлежащие окраске.

Недостатками метода являются большие потери лакокрасочного материала (до 50 %) на распыление в окружающем воздухе («туманообразования») и тяжелые условия работы. Окрашенные изделия сушат в сушильных шкафах или в установках инфракрасной сушки,

которые представляют собой туннельные конвейерные печи. Режим сушки окрашенных изделий выбирают в зависимости от типов полупроводниковых изделий и материалов корпусов, термостойкости их узлов и типа эмали. Температура сушки 60–150 °С, время 0,5–4 ч.

После окраски и сушки изделия подвергают 100%-му контролю по внешнему виду. Лакокрасочное покрытие на изделии должно быть равномерно распределено, без потеков, больших наплывов и морщин. Не допускается на изделиях непрокрашенных мест, трещин, отслаивающейся краски, царапин, пузырей, вздутий и посторонних включений под слоем краски.

Изделия, забракованные при контроле качества окраски, отдают на перекраску, предварительно сняв с них лакокрасочное покрытие.

Свеженанесенную эмаль или грунт рекомендуется снимать растворителем подлежащего смывке лакокрасочного покрытия. Снятие высушенного покрытия эмали или грунта рекомендуется производить при помощи специальных смывок или смеси органических растворителей. Так, например, лакокрасочное покрытие с диодов, окрашенных эмалью ПФ-163, снимают смесью толуола, этилцеллозольва, аммиака в соотношении 1 : 1 : 0,25. После удаления покрытия приборы промывают под сильной струей воды, ополаскивают четыреххлористым углеродом и сушат.

Маркировка. Технологический процесс маркировки полупроводниковых приборов и микросхем с помощью красок состоит из операций нанесения маркировочных знаков на корпуса приборов и последующей сушки нанесенного клейма. Пример маркировки интегральной микросхемы приведен на рис. 8.3.

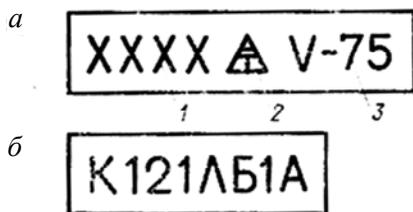


Рис. 8.3. Пример маркировки микросхемы:
а – развертка; б – пример шифра; 1 – шифр микросхемы;
2 – товарный знак; 3 – месяц и год изготовления

Маркировку на полупроводниковые приборы и микросхемы наносят печатным способом ручными приспособлениями, а также на автоматах и полуавтоматах в зависимости от количества изготавливаемых приборов, размера шрифта, маркировочных знаков, конструкции и размера корпусов.

Маркировочные краски должны обладать хорошими печатными и пишущими свойствами, обеспечивающими укывистость и четкость маркировки, и должны иметь хорошую адгезию к маркируемой поверхности. У отдельных полупроводниковых приборов, имеющих очень малые габариты, не представляется возможным отмаркировать корпус. В этих случаях маркировочные знаки проставляют на бумажных этикетках, которые при упаковке вкладывают в одну ячейку с прибором.

На полупроводниковых приборах и микросхемах в пластмассовых корпусах маркировочные знаки получают при отливке их, так как в гнездах заливочных форм или форм для опрессовки выбиты необходимые маркировочные знаки. В интегральных микросхемах и полупроводниковых приборах применяют маркировочные краски БМ, ЧМ, СН, КН, ЭП-572, МА-514 и др.

Технология нанесения маркировочных знаков проста. Ее используют в механизированных приспособлениях и автоматах маркировки. Клише с маркировочными знаками вставляют в рамку маркировочной машинки и, приводя в движение резиновые валики, наносят на клише краску. Клише прижимается к резиновой подушке и на ней получают четкий отпечаток обратного изображения. Корпус прибора прижимают к резиновой подушке и тем самым переносят на него изображение маркировки.

В случае маркировки цилиндрической поверхности корпус прибора необходимо прокатать по отпечатку клише, отмаркированные изделия сушат, соблюдая режим, соответствующий технологической документации. Маркировочные обозначения после полного высыхания краски должны быть механически прочными, не должны стираться, растрескиваться и отслаиваться. Не допускаются просветы по толщине отпечатка, разрывы.

Если маркировочные обозначения не удовлетворяют предъявленным к ним требованиям, то свеженанесенные обозначения необходимо стереть чистой сухой или смоченной в спирте тканью, а высохшие обозначения смыть ацетоном (если они нанесены непосред-

ственно на металлические или на стеклянные поверхности) или специальными составами из смеси органических растворителей (если маркировка производилась по лакокрасочному покрытию). В последнем случае вместе с маркировкой снимается лакокрасочное покрытие, после этого изделия повторно красят и маркируют.

Лакировка. Назначение лакировки в основном то же, что и окраски, т. е. защита корпусов полупроводниковых приборов от коррозии; кроме того, лаковой пленкой закрывают маркировочные знаки для повышения стойкости маркировки. Лакируют как окрашенные корпуса приборов и микросхем, так и неокрашенные.

В полупроводниковой промышленности для лакирования наибольшее распространение получил лак УР-231. Он представляет собой раствор алкидноэпоксидной смолы Э-30 в органических растворителях. Выпускается в виде двух компонентов: полуфабриката УР-231 и 70%-го раствора уретана в циклогексаноне. Компоненты смешивают непосредственно перед употреблением. Лак наносят тонким слоем на твердую поверхность корпусов приборов или микросхем. Растворитель улетучивается при сушке, а лаковая поверхность затвердевает, образуя механически прочную, гладкую, блестящую пленку.

Полупроводниковые приборы и микросхемы, покрытые лаком УР-231, могут работать в условиях тропического климата. Для дополнительной защиты маркировки применяют также эпоксидный лак Э-4100.

8.3. Лужение выводов горячим способом

В полупроводниковом производстве применяют два способа облуживания выводов: погружением и волной припоя. Для лужения выводов обычно употребляют в полупроводниковой промышленности свинцово-оловянистые припои. В качестве флюсов используют спиртовой или скипидарный раствор канифоли или раствор хлористого цинка.

Наиболее распространенным способом облуживания выводов является погружение в ванну с припоем. Процесс может быть ручным и автоматизированным. Предварительно отфлюсованные выводы транзисторов, диодов или микросхем медленно погружают в припой и через небольшой промежуток времени вынимают из него. Преимуществом данного способа облуживания является то, что

сила тяжести и температура припоя определяют его количество, оставшееся на детали. Если оно превышает допустимые пределы, то излишний припой можно сбросить, слегка встряхивая деталь после изъятия ее из ванны.

Поверхность ванны припоя необходимо непрерывно очищать. Слой загрязнений обычно удаляют несмачивающимся материалом, который выдерживает рабочие температуры пайки, не растворяясь в припое и не загрязняя его (керамика, нержавеющая сталь). Поверхность жидкого припоя можно поддерживать чистой не только непрерывной очисткой, но и защитой ее слоем жидкости (например, глицерина) или газа (например, азота).

На рис. 8.4 изображено приспособление для лужения выводов микросхем и показана схема лужения выводов в ванне с припоем ПОС-61. Ванна должна быть сконструирована таким образом, чтобы ее дно было нагрето сильнее стенок, и тогда благодаря конвекции будет происходить непрерывное перемешивание припоя. При этом достигается высокая степень однородности припоя. Качество и однородность лужения в значительной степени зависят от чистоты припоя в ванне.

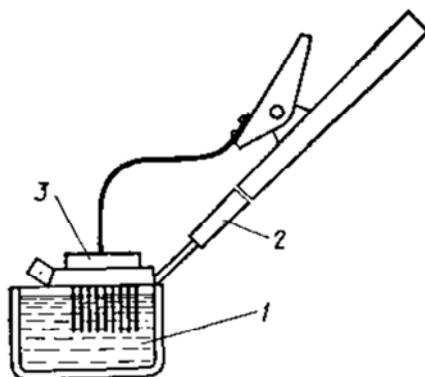


Рис. 8.4. облуживание выводов микросхем:
1 – ванна с припоем; 2 – приспособление для облуживания выводов;
3 – микросхема

Облуживание выводов волной припоя относится к числу автоматических способов. Насос непрерывно накачивает жидкий припой

в установленное под углом к горизонту сопло, и струя образует своего рода волну, через гребень которой проводят транзисторы или микросхемы. Такой способ облуживания выводов обладает многими достоинствами. Движение припоя по поверхности выводов, подлежащих смачиванию, значительно уменьшает время облуживания. В гребень непрерывно подается свежий припой, таким образом предотвращается контакт выводов со шлаком, плавающим на поверхности, и устраняется необходимость в непрерывном очищении припоя. Кроме того, флюс и его остатки, смываемые с выводов и обычно остающиеся сверху ванны, уносятся припоем в специальный резервуар, так что они уже не могут контактировать с выводами последующих транзисторов или микросхем. Припой, приходящий в контакт с выводами изделий, имеет всегда постоянную температуру, которую легко контролировать и поддерживать.

9. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИС

9.1. Системы управления процессами сборки полупроводниковых приборов и ИС

В оборудовании сборки ИС используются системы управления *централизованные, иерархические, распределенные* (использующие различные управляющие устройства от комбинационных схем до микропроцессоров). Их отличительной особенностью является большое количество преобразований систем координат (пространственная, в которой расположен объект, механическая система координат привода, пространственная система после преобразования изображения объекта, электрическая система ТВ датчика, электрическая система после дискретизации и квантования видеосигнала и т. д.).

9.1.1. Структурные схемы системы управления

Обобщенная *структурная схема* системы управления сборочной установкой показана на рис. 9.1.

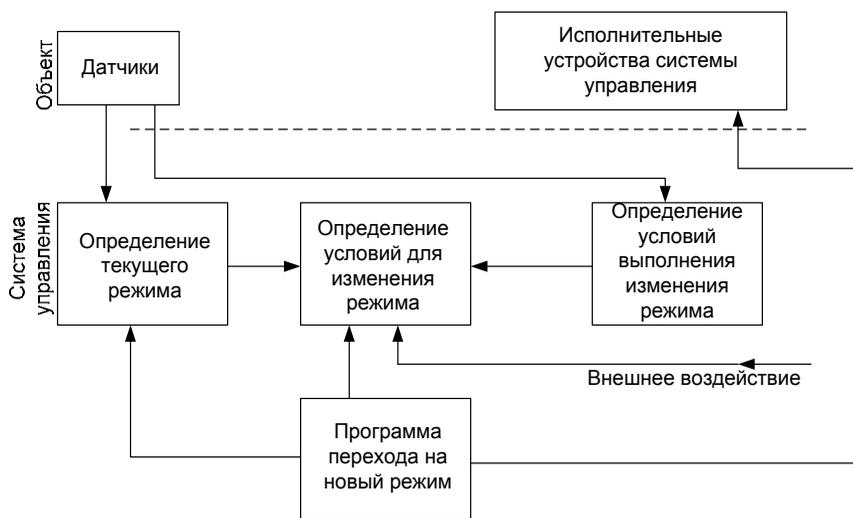


Рис. 9.1. Обобщенная структурная схема управления

Система управления постоянно получает информацию о значениях параметров, поступающих с датчиков, расположенных на объекте управления. На основе анализа этих значений система управления определяет текущий режим работы объекта. Кроме того, благодаря этому анализу и наличию внешних сигналов о желаемом изменении режима система управления выявляет необходимость в изменении режима объекта и проверяет технологическую возможность требуемого изменения режима. Если имеются условия для организации смены режима, то система управления переключается на выполнение программы смены режима и реализует ее. В процессе выполнения программы перехода система управления может при необходимости контролировать реализацию программы и возможность дальнейшего ее выполнения.

Системы управления сборочного оборудования строятся по централизованному или иерархическому принципу. В первом случае имеется только одно устройство управления, например ЭВМ общего назначения, которое выполняет все функции управления в установке от реализации общего алгоритма до специфических циклограмм отдельных узлов. В такой системе все исполнительные устройства автономно функционировать не могут и являются пассивными. Пример такой системы управления установкой присоединения проволочных выводов дан на рис. 9.2.

Устройство управления анализирует состояние датчиков, клавиатуры управления, определяет внутреннее состояние и перемещает координатные приводы в заданную позицию с требуемой характеристикой движения. Для этого коммутируются фазные обмотки шаговых двигателей в режимах разгона, постоянной скорости и торможения двигателя. В заданные по циклу моменты времени включаются и выключаются электромагниты, выполняющие различные функции. Все это требует достаточно большого быстродействия устройства управления, зависящего в первую очередь от скоростей перемещения двигателей или от частоты коммутации их фазных обмоток.

Основным достоинством такой системы является компактность – минимальное количество аппаратуры и программного обеспечения (из-за отсутствия различных протоколов обмена между устройствами, имеющими собственное программное обеспечение) для управления сборочной установкой.

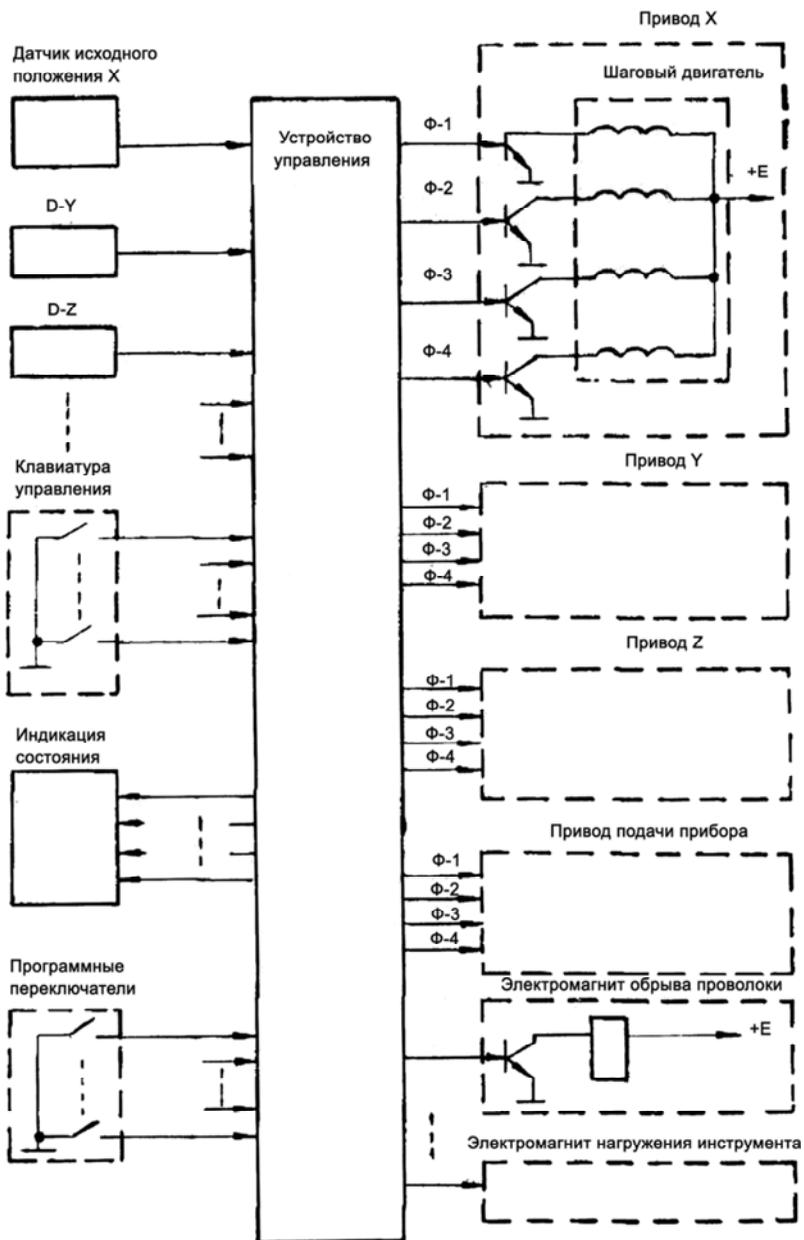


Рис. 9.2. Центрированная структурная схема управления установкой

Однако необходимость высокого быстродействия устройства управления для высокопроизводительных установок, имеющих четыре и более координатных привода с необходимой частотой коммутации фаз более 10 кГц и выполняющих при этом различные другие операции, например преобразование координат, контроль величины перемещений, привела к тому, что централизованные системы управления в сборочном оборудовании практически не используются.

подавляющее большинство систем управления сборочных установок имеет иерархическую структуру, т. е. исполнительные устройства, реализующие сложные функции, выполняются активными с собственной системой управления, более того, зачастую их реализуют в виде модулей (под модулем понимается устройство, обладающее функциональной полнотой и конструктивной завершенностью). По количеству аппаратуры иерархическая система управления проигрывает централизованной, и ее основное достоинство – высокое быстродействие, т. е. система управления своим быстродействием не ограничивает производительность сборочных установок.

Пример иерархической структурной схемы системы управления установкой присоединения проволочных выводов с линейными шаговыми двигателями дан на рис. 9.3.

Устройства управления установкой и координатными приводами выполнены на основе микропроцессора K580BM80. Они реализуют функции преобразования координат, интерполяцию перемещения инструмента по трем координатам для формообразования проволочной переключки, формирование траектории перемещения каждого из линейных шаговых двигателей, компенсацию статической погрешности позиционирования координатных приводов, осуществление диалоговой связи с оператором для гибкой и оперативной перестройки режимов работы механизмов и узлов установки и др.

Устройства управления сборочным оборудованием имеют различную техническую базу и представляют собой цикловые схемы на базе стандартных функциональных элементов, программно-логические на основе микропрограммного управления, программно-вычислительные на основе микропроцессоров и микроЭВМ, а также ряд простейших специальных вычислителей, предназначенных для преобразования координат.

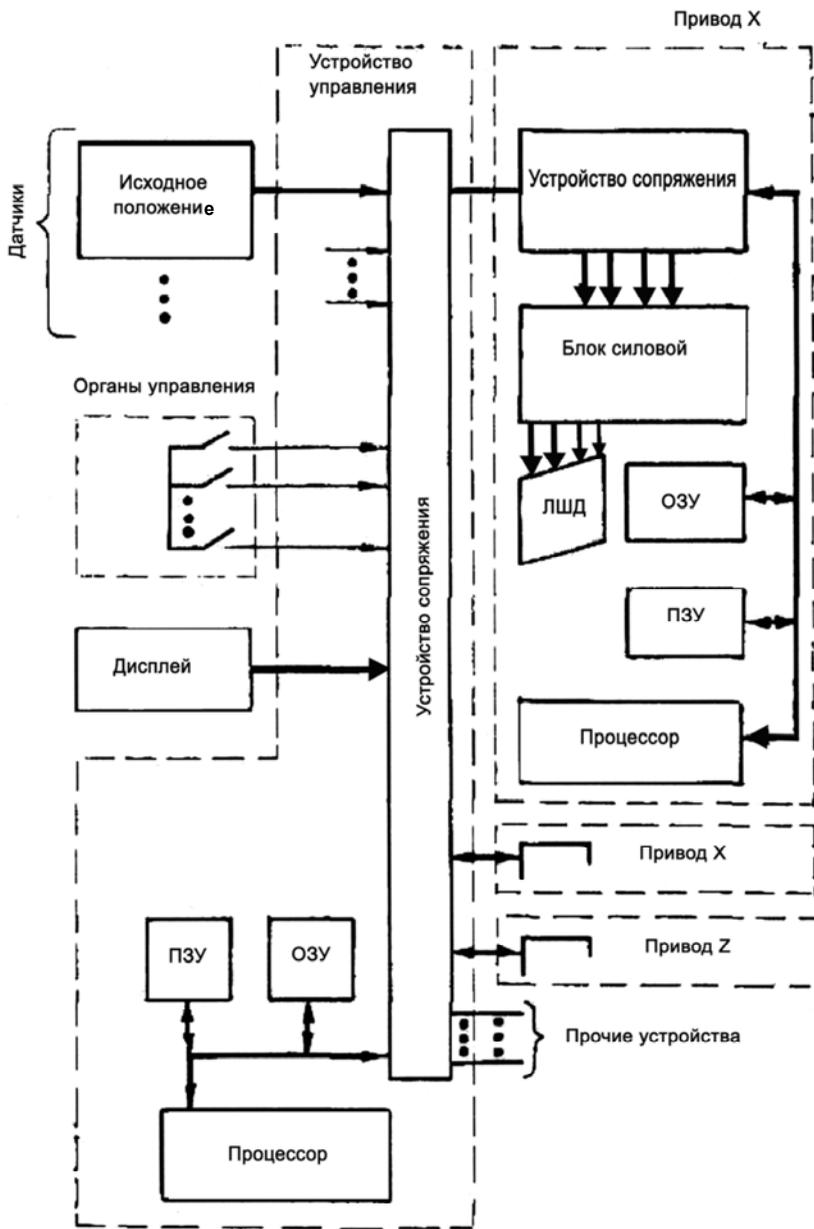


Рис. 9.3. Иерархическая структурная схема управления установкой

Рассмотрим обобщенную структурную схему системы управления сборочной установкой (рис. 9.4) (конкретные установки могут не иметь отдельных узлов и блоков). Центральный контроллер установки выполняет функции управления, реализует циклограмму работы механизмов сборки и обеспечивает связь с автономными устройствами управления. Связь с датчиками и исполнительными механизмами осуществляется через устройство сопряжения контроллера, поэтому для каждой конкретной установки она будет отличаться как по количеству цепей, так и по электрическим сигналам, подаваемым по этим цепям. Для электромагнитов, например, необходим определенный ток для их срабатывания, а сигнал с датчика Холла может составлять доли милливольт, если в датчике отсутствует предварительный усилитель.

Режимы работы установки задаются с клавиатуры управления, связь которой с контроллером может осуществляться по нестандартному каналу, поскольку в каждой установке имеются различия как в режимах, так и в функциях, выполняемых в этих режимах. Поэтому данная часть программного обеспечения в каждой установке также будет оригинальной. Применение в этих условиях универсального канала связи влечет за собой значительное усложнение программного обеспечения, осуществляющего обмен, что нельзя признать рациональным. По этим же причинам редко используется универсальный интерфейс типа ИРПР или ИРПС с ультразвуковым генератором, терморегулятором, блоком формирования шарика и координатными приводами. Такие устройства могут иметь упрощенный, стандартный внутри своей группы интерфейс, поскольку при отсутствии хотя бы одного из этих устройств установка неработоспособна.

Некоторые узлы в установке являются автономными и не функционирующими в процессе автоматической сборки или же имеют большие отличия во внутреннем содержании. К первым относятся дисплей и общая клавиатура, позволяющая оператору общаться в диалоговом режиме с установкой. Эти стандартные элементы, очевидно, должны иметь стандартный канал, а в ряде случаев они могут быть даже вынесены за пределы установки. Дисплей должен отображать не только алфавитно-цифровую и графическую информацию, но и стандартный телевизионный видеосигнал, поступающий с ТВ-датчиков системы технического зрения.

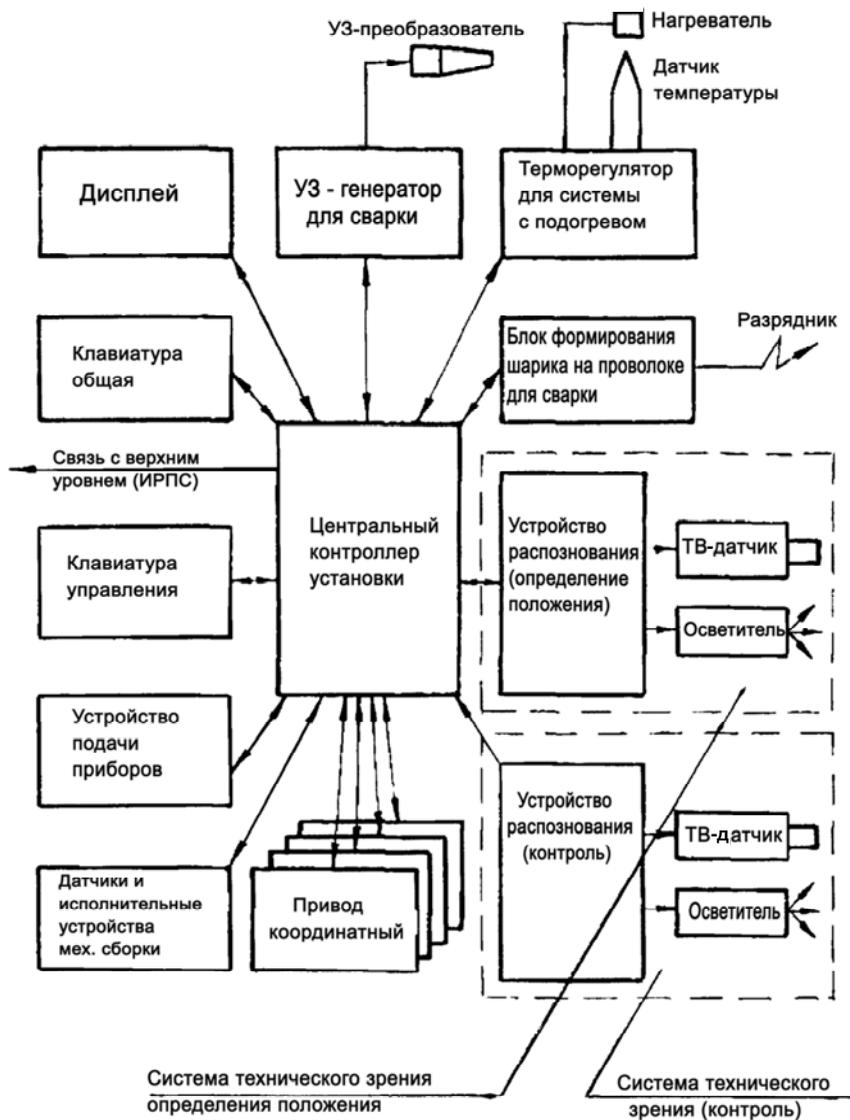


Рис. 9.4. Обобщенная структурная схема установки присоединения проволочных выводов

Устройствами, для которых предпочтительным может быть универсальный интерфейс, являются устройства подачи приборов на

позицию сборки и системы технического зрения, определяющие положение объекта и выполняющие контрольные операции после сборки. Это связано с тем, что такие устройства в ряде случаев имеют различные циклограммы работы, алгоритмы и являются достаточно сложными. В этих условиях связь с контроллером по некоторому протоколу обмена необходимо значительно сократить для того, чтобы при новых задачах либо в установке, либо в системе технического зрения, либо в устройстве подачи приборов остальная часть установки не претерпевала значительных изменений.

Недостатком стандартного последовательного канала ИРПС является необходимость его обслуживания сложным программным обеспечением и сравнительно низкая скорость передачи информации (9600 бод), что с некоторых случаев может привести к удлинению цикла сборки на 20–50 мс (правда, имеется возможность увеличить скорость передачи в 5–6 раз, введя синхронный режим).

9.1.2. Устройства управления

Устройства управления сборочным оборудованием реализуют основные функции алгоритмической взаимосвязи систем приводов, исполнительных элементов, датчиков выполнения команд и операций, а также реагируют на команды оператора. Решаемые задачи могут быть логическими или комбинированными (т. е. логическо-вычислительными). Появление вычислительных операций в сборочных установках связано со следующими видами оборудования: полуавтоматическими установками, требующими от оператора предварительной ориентации объекта относительно инструмента, после чего происходит вычисление его положения; полуавтоматическими установками группового обслуживания, которые принципиально не отличаются от предыдущих, но оператор может выполнять свои функции дистанционно, при помощи специального пульта; автоматическими установками, выполняющими все операции без участия человека.

Логические операции реализуют комбинационные схемы либо управляющие логические устройства с временными задержками. Алгоритм функционирования этих систем определяется только их структурой, т. е. они реализуют логические сети, не содержащие управляющих логических операторов. Данные устройства разрабатываются индивидуально для каждой установки и не имеют каких-либо

особенностей, характерных для оборудования сборки. Более универсальным является программное устройство, позволяющее реализовать логические сети с управляющими логическими операторами.

В *программно-логических устройствах*, реализация алгоритмов управления происходит последовательно во времени. Каждый шаг алгоритма требует определенного времени, а суммарное время реализации алгоритма определяется как $\tau \cdot n$, где τ – время одного такта, а n – число стандартных команд в реализуемом алгоритме. Это суммарное время не должно превышать допустимого запаздывания по управлению, определяемого циклограммой работы установки. Предполагается, что алгоритмы функционирования системы управления хранятся в ПЗУ и поступают оттуда в систему управления в виде последовательности стандартных команд. Достоинством такой системы управления является ее гибкость. Чтобы изменить алгоритм функционирования, нет необходимости менять структуру всей системы, достаточно лишь изменить коды в ПЗУ.

Пример функциональной схемы логического многоканального устройства для программного управления дан на рис. 9.5.

Данное устройство позволяет организовать последовательную и непоследовательную смену состояний по приоритетно распределенным внешним условиям в соответствии с тем алгоритмом, для реализации которого устройство предназначено. Устройство программного управления содержит произвольное число каналов, каждый из которых состоит из n -разрядного мультиплексора MS, информационные входы которого являются входами устройства, двоичного n -разрядного дешифратора DC, выходы которого являются выходами устройства, и регистра RG-1. Кроме того, в схеме имеются k -разрядный двоичный счетчик СТ-2 ^{k} , k -разрядный регистр RG-2 и устройство синхронизации (УС).

Для описания работы данного многоканального устройства для программного управления введем следующие обозначения: i – значение текущего состояния устройства; g – произвольное состояние устройства; γ – селектируемое условие; $F_i(l)$ – функция передачи, вырабатываемая в устройстве при значении u , соответствующем его выполнению; $F_i(0)$ – функция передачи, вырабатываемая в устройстве при значении γ , соответствующем его невыполнению.

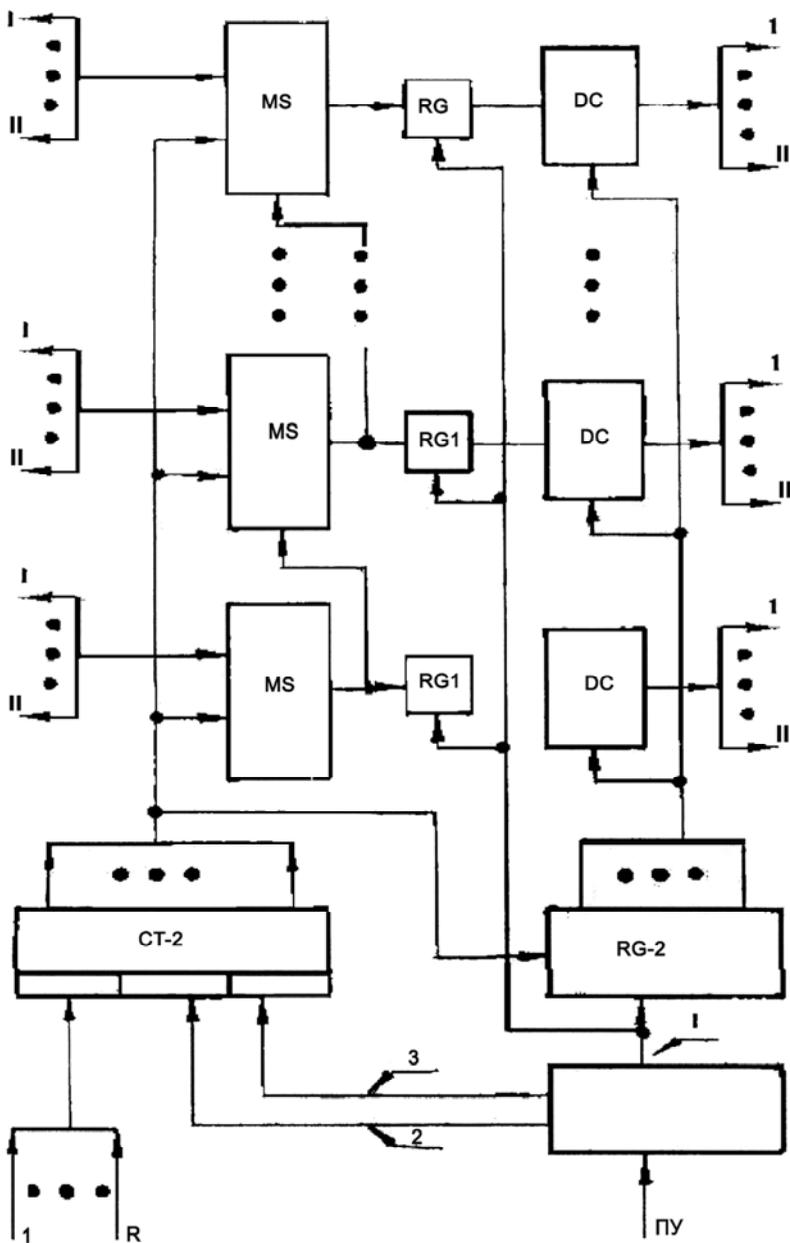


Рис. 9.5. Многоканальное устройство для программного управления

В состоянии i n -разрядные мультиплексоры селективируют условие γ . Импульс с выхода УС по шине 1 переписывает информацию с выходов СТ-2^k в RG-2 и с выходов мультиплексоров MS в регистры RG-1 в каждом канале. В зависимости от значения условия дешифраторы DC вырабатывают функцию $F_i(0)$ или $F_i(1)$, используемую как для управления какими-либо внешними устройствами, так и для формирования адреса перехода и сигнала передачи управления, которые подаются по обратной связи соответственно на шины адреса перехода 1-R и шину передачи управления ПУ, поступающей на вход УС. Импульс со второго входа УС по шине 2 переписывает информацию с шин адреса перехода в СТ-2^k, и импульс с третьего выхода УС по шине 3 увеличивает содержимое СТ-2^k на единицу. Работа УС определяется состоянием шины передачи управления ПУ. Если на ней присутствует сигнал, то УС вырабатывает в соответствии с описанной последовательностью импульсы на первом и втором выходах, если же сигнал отсутствует – на первом и третьем выходах.

Последовательная смена состояний осуществляется путем подачи импульса на тактовый вход СТ-2^k по шине 3. Этот импульс вырабатывается при отсутствии сигнала ПУ. Таким образом, обеспечивается большая гибкость устройства программного управления: в любом случае, когда нет необходимости в непоследовательной смене состояний, устройство автоматически переходит последовательно из одного состояния в другое, не зависит от значений входных условий и от того, в каком канале они селективируются.

Для непоследовательной смены состояний при переходе устройства в состояние i будет селективироваться условие γ , имеющее значение, соответствующее его невыполнению. Импульс с УС по шине 1 переписывает информацию с выхода СТ-2^k в RG-2 и значение выходов MS в регистры RG-1. При этом дешифраторы DC вырабатывают функцию $F_i(0)$. По этой функции формируется адрес перехода g и сигнал передачи управления ПУ, который разрешит формирование импульса на выходе УС по шине 2 и занесет значение g с шин адреса перехода в СТ-2^k. Таким образом, устройство перейдет в состояние g , как и следует по алгоритму.

К *программным вычислительным устройствам*, являющимся наиболее распространенными в сборочном оборудовании, относятся ЭВМ или микропроцессорная система управления. Структуры их

идентичны, и термин «ЭВМ» чаще употребляют по отношению к законченному, не подлежащему перекомпоновке изделию, а термин «микропроцессорная система управления» (МПСУ) – к комплексу, который можно легко трансформировать. В сборочном оборудовании применяются как одни, так и другие устройства, однако углубление иерархической структуры, появление в различных исполнительных устройствах программных вычислительных блоков приводят к более широкому распространению гибкой МПСУ.

Основу МПСУ составляет микропроцессор – программно-управляемое устройство для обработки данных, выполненное на одной или нескольких больших интегральных схемах. На рис. 9.6 показана типичная структура 8-разрядного микропроцессора с длиной машинного слова 8 разрядов, являющегося сейчас наиболее распространенным.

Микропроцессор имеет общую внутреннюю шину и ряд связанных через нее блоков. Блок управления и дешифратор команды обмениваются управляющими сигналами с внешними устройствами и управляют работой блоков микропроцессора (внутренние управляющие связи на рис. 9.6 не показаны). Обработка данных производится в арифметико-логическом устройстве (АЛУ). С АЛУ связан регистр признаков, описывающих работу АЛУ (например, переполнение, перенос из старшего разряда, перенос из разряда 3 в разряд 4 (для десятичной арифметики), отрицательный результат, нулевой результат и др.).

Для управления работой прерывания программно устанавливается признак – маска прерывания. Если маска установлена, то соответствующий ее запрос на прерывание игнорируется. 8-разрядные регистры общего назначения (РОН) используются как внутренняя сверхоперативная память. Число РОН нередко превышает 8. Кроме того, имеются 16-разрядные (2×8) регистры: индексный, указатель стека, счетчик команд. Их назначение – общепринятое в ЭВМ. Разрядность здесь увеличена для упрощения адресации больших объемов памяти. Один 16-разрядный регистр выполнен в виде двух независимо адресуемых 8-разрядных регистров. Для обмена данными с внешними устройствами используется регистр данных, связанный с внешней двунаправленной 8-разрядной шиной. Для выдачи адресов служит 16-разрядный регистр адреса. Выполняемая команда помещается в регистр команд. Типичная команда микропроцессора занимает один-два байта. Работа с короткими командами и малая длина машинного слова (8 разрядов) усложняют адресацию данных. Поэтому в микро-

процессоре способам адресации уделяется большое внимание. Важную роль при этом играют РОНЫ.

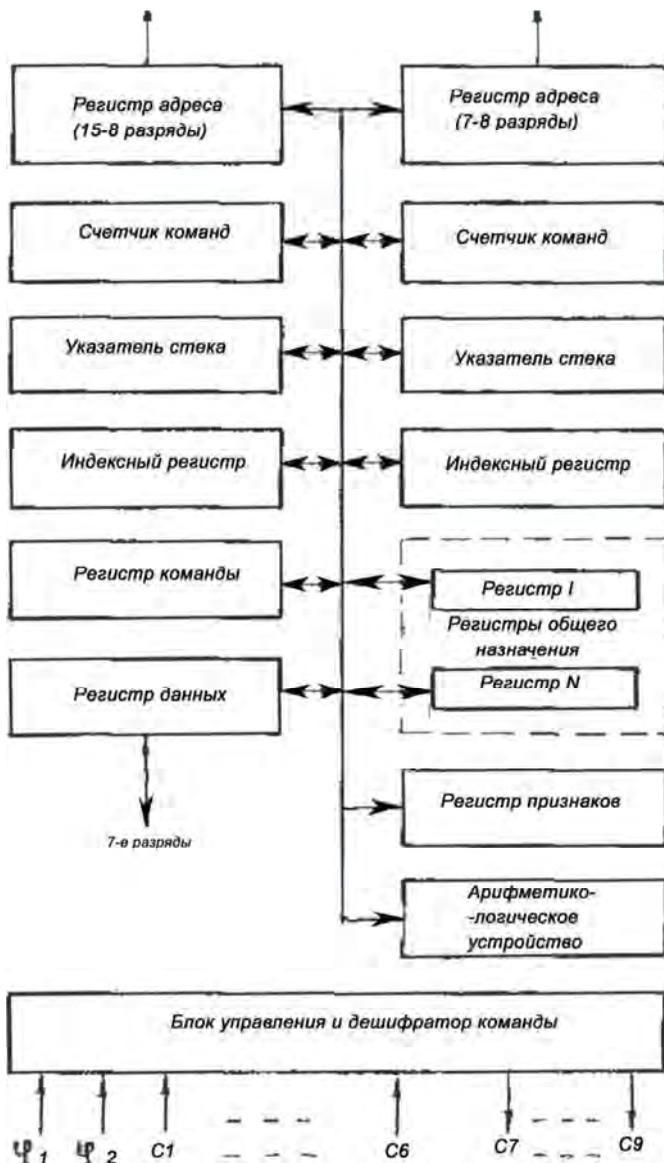


Рис. 9.6. Структура микропроцессора

Блок управления обменивается с системой следующими типичными входными управляющими сигналами: синхронизации Φ_1 и Φ_2 от синхрогенератора; сброс состояния и запуск процессора (C1); немаскируемое прерывание (C2); маскируемое прерывание (C3); останов и отключение от шин (C4); строб шины адреса (C5); строб шины данных (C6). Если в регистре признаков установлена маска, то микропроцессор не реагирует на сигнал C3. Сигналы C5 и C6 указывают интервал времени, в течение которого происходит обмен информацией. Из блока управления выходят следующие сигналы: шина свободна (C7) – ответ на сигнал C4; процессор находится в состоянии чтения/записи (C8) – оповещение устройств системы о готовности к обмену; чтение/запись (C9) – уточняет сигнал C8.

Типичная простая микропроцессорная система управления дана на рис. 9.7. Она содержит непосредственно микропроцессор, ОЗУ, ПЗУ и ряд устройств сопряжения с внешними устройствами. Система с одним микропроцессором (см. рис. 9.7) обычно является частью какой-либо аппаратуры, в которой она является средством управления или вспомогательным вычислителем, например управлением сборочной установкой, частью управления двигателем, частью дисплея и др. Она должна легко адаптироваться к различным условиям и быть простой в эксплуатации. Адаптация в частном случае означает возможность простого электрического и логического сопряжения. Это в значительной степени вопрос стандартизации, и поэтому он очень сложен.

Современные системы управления сборочным оборудованием на базе микропроцессоров содержат несколько десятков стандартных печатных узлов, совместимых с его шиной, таких как центральные процессорные устройства, модули памяти, устройства управления шаговыми двигателями, приводами постоянного тока, модули стандартной периферии и др. Системы управления сборочных установок на основе микропроцессора требуют диалога палаточных комплексов для отладки их программного обеспечения.

Микропроцессорные системы управления подробно описаны в соответствующих технических дисциплинах, и применение их в сборочном оборудовании не имеет специфических особенностей, поэтому предлагается познакомиться с ними глубже в специальной литературе.

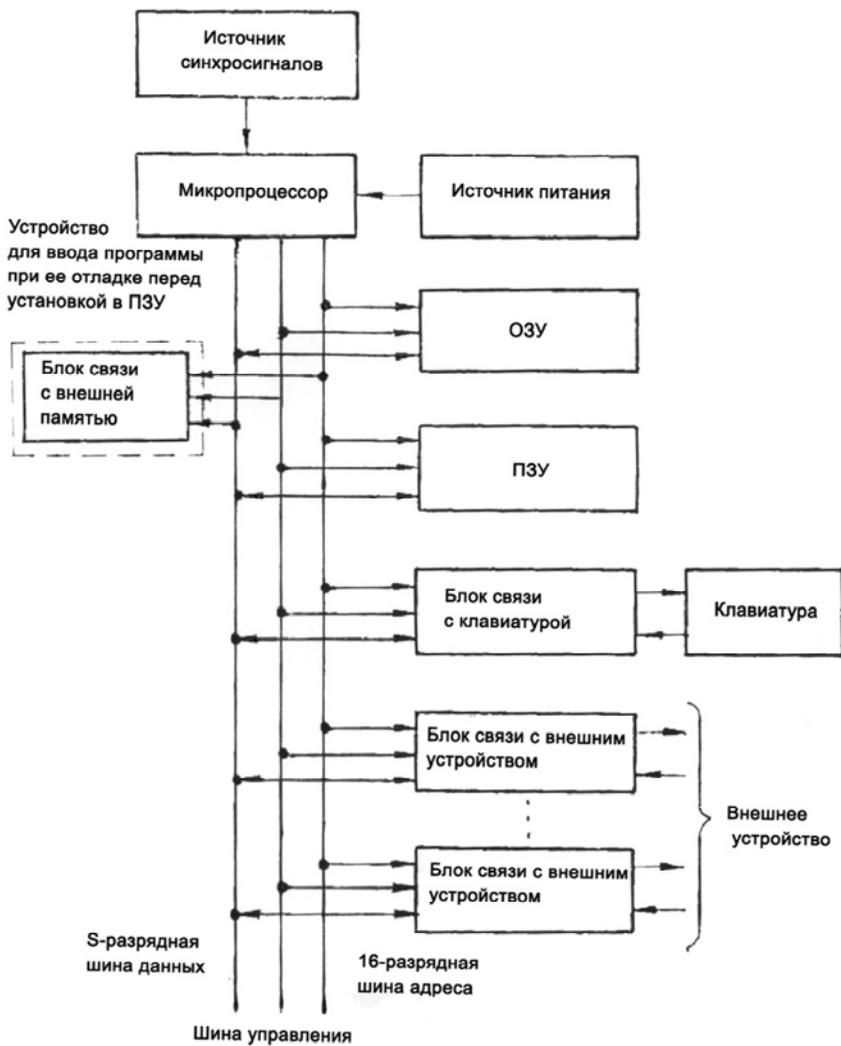


Рис. 9.7. Микропроцессорная система управления

Использование в оборудовании МПСУ решило ряд технических задач простыми средствами. Например, в установке дисковой резки с МПСУ на базе микропроцессора К580ВМ80 расчет обхода по контуру пластины сводится к определению величины хорды по формуле

$$S = 2\sqrt{(hn + k) + (D - kn - k)}, \quad (9.1)$$

где h – размер кристалла по координате Y ;
 n – номер дорожки разделения;
 k – постоянная величина для пластины определенного диаметра;
 D – диаметр пластины.

Расчет занимает 2 мс, выполняется перед началом движения привода и, таким образом, не отражается на производительности установки. Управление приводом рабочей подачи в этой же установке с ее пульта делает возможным оперативное изменение динамических характеристик движения в зависимости от технологии резки. Временные интервалы между импульсами управления шаговым двигателем, необходимые для обеспечения равноускоренного движения на участках разгона и торможения, рассчитываются по формуле

$$\tau_n = (2\Delta\sqrt{N} / V_p)(\sqrt{n+1} - \sqrt{n}), \quad (9.2)$$

где n – порядковый номер импульса;
 Δ – дискретность перемещения;
 N – число импульсов разгона;
 V_p – скорость рабочей подачи.

Величины V_p и N являются переменными и вводятся в МПСУ с пульта управления установкой. Расчет величины τ_n и выдача соответствующего кода на внешнее исполнительное устройство занимают менее 0,6 мс. Для отработанного технологического процесса резания, когда известны оптимальные величины скоростей и ускорений, соответствующие им величины τ_n можно рассчитать заранее и занести в ОЗУ или ПЗУ перед началом перемещения. Это уменьшает время отработки программы до 40–50 мкс, увеличивает максимальную рабочую частоту до 20–30 кГц и дает возможность реализовать кривую разгона произвольной формы.

Рассмотрим запись и хранение информации о типе развариваемого прибора, координатах контактных площадок кристаллов и траверс выводной рамки в установке присоединения проволочных выводов. Вводимая информация предьявляется в виде специальным образом организованного сообщения (программного файла), форматизованная запись которого приведена на рис. 9.8.



Рис. 9.8. Формализованная запись программного файла

Программный файл состоит из идентификатора файла, программных блоков и служебных меток. В свою очередь программный блок содержит также идентификатор блока, программные предложения и служебную метку.

Программный файл – это формализованная запись информации об одном развариваемом приборе, а программный блок – формализованная запись информации об одном кристалле. Программные предложения являются полной записью координат одной контактной площадки.

Служебные метки кристалла (К) и рамки (Р) указывают на физическую принадлежность координат контактных площадок тому или иному объекту, а конец программы (КП) и конец цикла (КЦ) являются управляющими сигналами.

Реально каждая контактная площадка на кристалле имеет соответствующую контактную площадку рамки. Поэтому каждый номер блока с меткой К имеет аналог с меткой Р.

Идентификатор файла представляет собой запись технологического индекса развариваемого прибора, а идентификатор блока – запись номера блока или номера программы.

На рис. 9.9 приведено графическое изображение программного файла в виде направленного графа, состоящего из k одинаковых ветвей, одна из которых выделена. Эти ветви в дальнейшем будут именоваться текущим файлом или просто файлом. В отличие от программного файла текущий содержит оператор «Вывод N_i ». В программном файле этот оператор присутствует как номер предложения или как позиция предложения по отношению к идентификатору блока.

Файл состоит из двух частей: адресной и информационной. К адресной части относятся номер микросхемы, номер программы, номер вывода и служебные метки объекта (К, Р), к информационной – координаты контактной площадки и управляющие метки. В блок памяти заносится только информационная часть файла. Адресная часть файла предназначена для организации быстрого доступа к необходимой информации в памяти.

При вводе и выводе данных из памяти адрес информации представляется в виде адресной части файла или, как она в дальнейшем будет именоваться, логического адреса. В действительности же информация располагается в ячейках с реальными адресами из адресного пространства. Поэтому при обращении к памяти необходимо

производить перевод логического адреса в реальный. Этот перевод осуществляется по специальным формулам, что является отличительной особенностью организации памяти. Другая особенность заключается в том, что распределение памяти динамическое, т. е. программные файлы различной длины занимают различный объем памяти и расположение их в памяти произвольно. Такая организация памяти позволяет максимально использовать ее объем, тратить малое время на извлечение информации, однако усложняет обращение к ней.

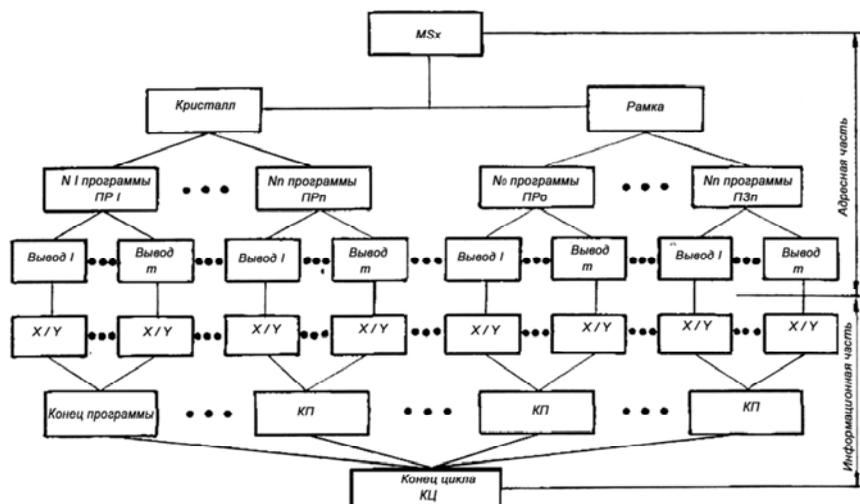


Рис. 9.9. Графическое изображение программного файла

Все адресное пространство $3У$ разбивается на зону реальных адресов и служебную зону. Объем зоны реальных адресов динамически распределяется между программными файлами, в служебной зоне каждому программному файлу отводится определенная зона базовых адресов с фиксированным объемом 64 байта.

Зона базовых адресов предназначена для хранения индекса микросхем и базовых адресов программ кристалла и рамки. Базовым адресом программы называется тот реальный адрес, с которого начинается данная программа в зоне реальных адресов.

Для расчета адресов ячеек, содержащих базовые адреса кристалла и рамки, служат следующие формулы:

$$A_{\text{пр}}^{\text{К}} = A_{\text{н. зоны}} + 8 + 2N_{\text{пр}}; \quad (9.3)$$

$$A_{\text{пр}}^{\text{К}} = A_{\text{н. зоны}} + 34 + 2N_{\text{пр}}; \quad (9.4)$$

$$A_{\text{пр}}^{\text{К}} = A_{\text{н. зоны}} + 4(N_{\text{выв}} - 1), \quad (9.5)$$

где $A_{\text{пр}}^{\text{К}}$ – адрес i -й программы для кристалла в зоне базовых адресов;

$A_{\text{пр}}^{\text{Р}}$ – адрес i -й программы для рамки в зоне базовых адресов;

$A_{\text{н. зоны}}$ – начальный адрес зоны базовых адресов для данного файла;

$N_{\text{пр}}$ – номер программы;

$A_{\text{р}}$ – реальный начальный адрес файла;

$A_{\text{баз}}$ – реальный базовый адрес программы;

$N_{\text{выв}}$ – номер вывода.

Для точек совмещения рамки реальные адреса располагаются в зоне базовых адресов и рассчитываются по формуле

$$A_{\text{р. совм}} = A_{\text{н. зоны}} + 2 + 4(N_{\text{выв}} - 1). \quad (9.6)$$

Таким образом, алгоритм обращения к памяти будет определяться следующей последовательностью действий:

1) в служебной зоне производится поиск заданного индекса микросхемы;

2) при наличии индекса микросхемы по формуле для $A_{\text{пр}}^{\text{К}}$ (для кристалла) или для $A_{\text{пр}}^{\text{Р}}$ (для рамки) производится вычисление адреса ячейки, в которой хранится базовый адрес файла;

3) производится выборка базового адреса из найденных ячеек;

4) в соответствии с формулой для $A_{\text{р}}$ находится начальный адрес файла;

5) в ячейку с реальным адресом заносится содержимое младшего байта (МБ) регистра X , в следующую ячейку – содержимое старшего байта (СБ) регистра X , в очередные – содержимое МБ и СБ регистра Y ;

6) если индекс микросхемы не найден, то производится поиск зоны с незанятыми ячейками хранения индекса микросхемы и занесение туда искомого индекса;

7) в зоне реальных адресов отыскивается ячейка, в которой записан управляющая метка КП;

8) по формуле для $A_{пр}^K$ или для $A_{пр}^P$ вычисляется адрес ячейки хранения базового адреса;

9) на найденную ячейку заносится значение реального адреса, найденного выше и увеличенного на единицу;

10) вновь выполняется алгоритм обращения к памяти.

МПСУ решили многие проблемы в оборудовании сборки изделий микроэлектроники и поставили новые, в первую очередь вопрос надежности программного обеспечения (ПО), теория которого в настоящее время находится в стадии развития по сравнению с теорией надежности аппаратных средств. Между ними имеются следующие различия:

1) отказы аппаратуры обусловлены физическими дефектами, а отказы ПО – программными ошибками. Надежность ПО определяется качеством ее проектирования. Следует отметить, что надежное программное обеспечение должно иметь средства защиты от сбоев аппаратуры;

2) аппаратура подвержена физическому износу, а программа – нет, т. е. при хранении программ в течение разумных сроков на каких-либо носителях они не искажаются. Отказ программы во время ее прогона из-за сбоя аппаратуры квалифицируется как отказ аппаратуры, а не программы;

3) для аппаратуры разработана и достаточно исследована теория надежности, теория надежности для ПО в настоящее время развита недостаточно;

4) такие характеристики надежности аппаратуры, как интенсивность отказов, среднее время между отказами, наработка на отказ, как правило, не имеют смысла для ПО;

5) методы тестирования, априорного предсказания надежности, ее оценки для аппаратуры и для ПО значительно отличаются;

6) большинство избыточных методов, используемых для повышения надежности аппаратуры, не улучшает надежность ПО;

7) отказы ПО нельзя устранить с помощью запасных модулей.

МПСУ позволили значительно повысить надежность аппаратуры, переложив значительную часть функций на ПО, обеспечивающее, кроме того, и диагностирование различных узлов и элементов.

Объем ПО автоматических установок сборки в среднем составляет 24–48 кбайт и имеет тенденцию к увеличению с повышением интеллекта машин.

9.1.3. Датчики в системе управления сборочного оборудования

Оборудование сборки изделий микроэлектроники работает с погрешностями позиционирования рабочих узлов и механизмов от единиц до десятков микрометров. Соответственно и датчики выполнения операций в системе управления должны иметь не меньшую погрешность срабатывания. Общее количество датчиков в оборудовании достаточно большое, и они, кроме того, разнообразны по решаемым задачам (например, датчики положения, температуры, ускорения и т. д.). Разделим их на две группы. К первой отнесем *датчики универсальные*, используемые в системах управления практически любой сборочной установки. Это *датчики положения концевые* и *линейного перемещения*. Ко второй группе отнесем *датчики специального назначения*, необходимость использования которых появляется при реализации определенных технологических операций (например, датчик температуры позиции монтажа кристаллов или датчик ускорения на координатном приводе для получения определенных его динамических характеристик).

Проанализируем только первую группу. В сборочном оборудовании нашли наибольшее распространение среди концевых датчиков положения индуктивные и фотодатчики, а среди датчиков линейного перемещения – емкостный, на основе эффекта Холла, и фотоэлектрический с прецизионными шкалами.

Датчик положения индуктивный (ДПИ) содержит генератор синусоидальных колебаний с частотой генерации приблизительно 1 мГц и каскад согласования. Датчик срабатывает при введении металлической пластины в зону торцевой поверхности, при этом изменяется величина положительной обратной связи в генераторе синусоидальных колебаний, нарушаются условия самовозбуждения, происходит срыв генерации. Таким образом, различают два состояния генератора – наличие генерации и отсутствие ее. Каскад согласования анализирует ток потребления генератора при наличии генера-

ции и при ее отсутствии и устанавливает на выходе логические сигналы «0» или «1».

При введении стальной пластины датчик срабатывает на расстоянии примерно 1,5 мм, при этом воспроизводимость расстояния включения при температуре окружающей среды 25 ± 5 °С и отклонении питающего напряжения от номинального значения на ± 1 % не более 20 мкм. Дифференциал хода датчика, т. е. разность между точками включения и отключения, 0,1–0,2 мм. Зависимость расстояний включения и выключения от напряжения питания показана на рис. 9.10. Датчик может срабатывать и от пластин, изготовленных из других металлов, при этом изменяются расстояния включения и выключения (например, для алюминия расстояние включения уменьшается и становится менее 0,5 мм, а для стали 20Х13 увеличивается более чем на 1,7 мм).

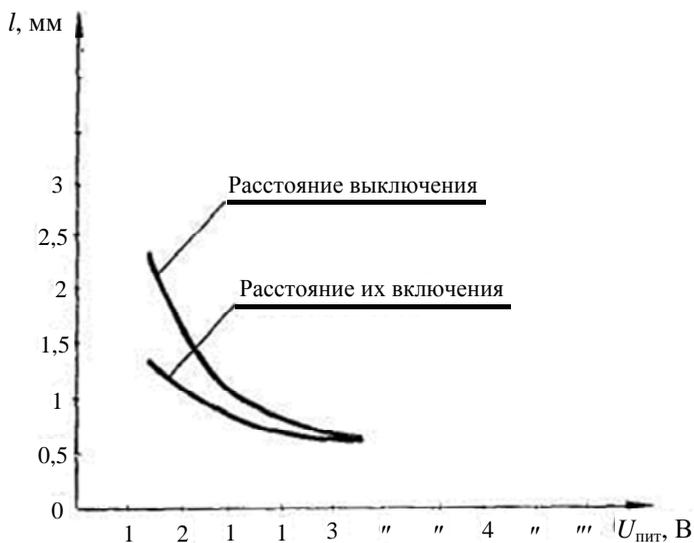


Рис. 9.10. Выходные характеристики ДПИ

Фотоэлектрический датчик представляет собой опто-электронную пару, оптическую связь которой можно разрывать механическим введением некоторого предмета.

Основное достоинство датчика – относительно высокое быстродействие срабатывания, однако по сравнению с ДПИ этот датчик

меньше распространен в оборудовании, поскольку при одинаковом функциональном назначении имеет больше ограничений в применении в конкретных конструкциях установок.

Емкостный датчик линейного положения (ДПЕ) предназначен для определения положения поверхности кремниевой пластины при зондовом контроле, чтобы обеспечить заданную скорость перемещения зонда при его контактировании с контактными площадками кристаллов на пластине. Схематическое подключение датчика показано на рис. 9.11.

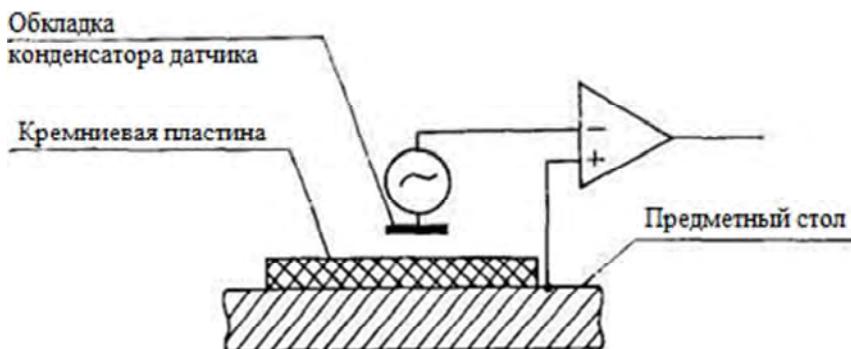


Рис. 9.11. Подключение ДПЕ

Обкладка датчика представляет собой торцевую поверхность штыря диаметром примерно 3 мм, заключенного в специальный экран для устранения паразитных влияний внешних элементов и локализирующего электрическое поле. При изменении расстояния между пластиной и штырем датчика на 1 мкм емкость изменяется приблизительно на 0,2 пФ, что дает соответственно изменение тока приблизительно 100 нА при подаче на датчик переменного напряжения с частотой 100 кГц. Изменение тока регистрирует операционный усилитель. Кремниевая пластина для такой частоты имеет внутреннее сопротивление на несколько порядков меньше, чем воздушный зазор между ней и штырем датчика, поэтому датчик регистрирует изменение расстояния от поверхности пластины до торцевой поверхности штыря. Датчик позволяет определять разновысотность поверхности пластины в пределах до 0,1 мм с погрешностью приблизительно 1 мкм. Поскольку пластина изготовлена с малой

непараллельностью, высоту ее достаточно измерить один раз перед началом работы в одном положении пластины, так что к быстродействию датчика не предъявляется жестких требований. Скорость перемещения привода по координате Z при измерении положения поверхности пластины не превышает 10 мм/с.

Микроминиатюрные преобразователи Холла из эпитаксиальных пленок InSb и GaAs используются в установках присоединения проволочных выводов для определения высоты поверхности кристалла. Поскольку поверхность кристалла может быть расположена по отношению к основанию под углом 2° и более (особенно при монтаже кристаллов с помощью клея), необходимо на кристалле определять положение по высоте каждой из его контактных площадок с погрешностью 3–5 мкм.

В качестве исходных технологических пластин использованы эпитаксиальные структуры, содержащие пленки InSb (толщиной 2–7 мкм) и GaAs (толщиной 0,2–1,5 мкм) на подложках из полупроводникового арсенида галлия: $n\text{-InSb-}i\text{-GaAs}$ и $n\text{-GaAs-}i\text{-GaAs}$ с $n = 10^{16} \dots 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Преобразователи Холла из гетероэпитаксиальной структуры $n\text{-InSb-}i\text{-GaAs}$ отличаются стабильностью, низким уровнем шумов, возможностью достижения малых значений остаточного напряжения, малыми температурными коэффициентами сопротивления и чувствительности (не более десятых и сотых долей процента на градус соответственно). Они обладают высокой линейностью по магнитной индукции и имеют чувствительность 0,1–0,5 В/Тл.

Преобразователи из эпитаксиальной структуры обладают высокой чувствительностью (1–5 В/Тл), повышенной теплостойкостью (до 200°C), малыми температурными коэффициентами сопротивления и ЭДС Холла, а также сравнительно низкими значениями тока управления (5–15 мА)

В сборочных установках скорость перемещения привода по координате Z при определении высоты объекта с помощью датчика Холла обычно не превышает 100 мм/с.

9.1.4. Системы технического зрения

Системы технического зрения (СТЗ) для сборки изделий микроэлектроники – это комплекс устройств, выполняющих функции

идентификации, определение дефектов поверхности, ориентацию либо определение пространственного положения объекта сборки. СТЗ включают оптико-телевизионные системы, осуществляющие освещение объекта и проецирование его изображения на мишень преобразователя свет – сигнал, и устройства распознавания изображения средствами электронной техники.

В качестве преобразователя свет – сигнал рассматриваем исключительно электрические преобразователи растрового типа – ТВ-датчики па основе вакуумных трубок либо твердотельных приборов с зарядовой связью (ПЗС).

Оптико-телевизионная система (ОТС) может компоноваться в сборочной установке несколькими способами:

1) распознавание осуществляется на той же позиции, на которой осуществляется сборка, и процесс сборки практически не выходит из поля зрения ТВ-датчика (рис. 9.12, а);

2) распознавание осуществляется на той же позиции, на которой осуществляется сборка, однако инструмент на время распознавания выводится из поля зрения ТВ-датчика, либо при неподвижно закрепленном инструменте и оптико-телевизионной системе объект, расположенный на координатном приводе, последовательно подается на позиции распознавания и сборки (рис. 9.12, б);

3) распознавание осуществляется на отдельной позиции, параллельно операции сборки (рис. 9.12, в).

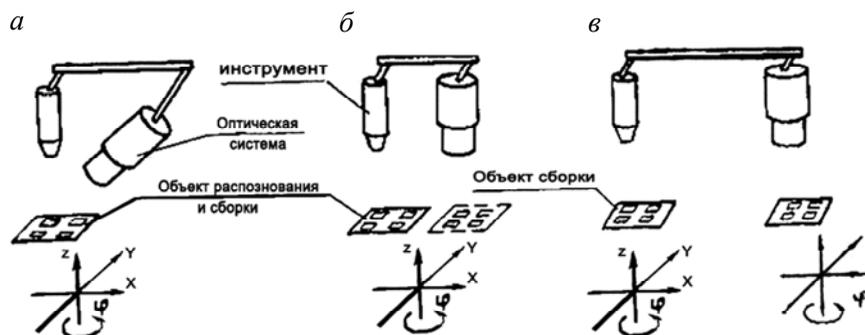


Рис. 9.12. Схема выполнения визуальной операции:
 а – на одной позиции; б – последовательное выполнение операций;
 в – параллельное выполнение операций на разделенных позициях

Первый способ позволяет осуществлять контроль непосредственно в процессе сборки, однако технические сложности его реализации очевидны: требуется быстродействующий ТВ-датчик, загоразивание инструментом части рассматриваемой сцены, распознавание в трехмерном пространстве и т. д. Все это привело к тому, что автоматизация визуальных операций таким способом практически не реализуется.

Наиболее распространен второй способ. Объектив ТВ-датчика фиксируется рядом с инструментом сборки. Это позволяет установить параллельно систему координат ТВ-датчика и пространственную систему координат объекта, распознавая при этом плоскостное изображение.

В ряде установок, таких как зондовые или разделения, инструмент и объектив ТВ-датчика неподвижны, а объект располагается на координатном приводе, в других же, например в некоторых установках присоединения выводов, объект неподвижен, а объектив с инструментом находится на координатном приводе. В обоих случаях координатный привод может совмещать объект сборки либо с инструментом, либо с объективом ТВ-датчика. Недостаток данного технического решения заключается в том, что расстояние между инструментом и объективом ТВ-датчика определено конструкцией установки и при смене инструмента изменяется произвольным образом. Для определения этого расстояния в установки вводится специальный режим обучения.

Естественно, что в полностью автоматической установке необходимо решить задачу автоматической коррекции расстояния между инструментом и объективом ТВ-датчика. Погрешность в его определении будет входить в общую погрешность позиционирования инструмента. Если объектив и инструмент сборки размещаются на координатном приводе, масса оптико-телевизионной системы ухудшает динамические характеристики привода, снижая тем самым производительность оборудования.

Третий способ автоматизации визуальной операции на отдельной позиции обладает достоинствами параллельного выполнения любых операций: он увеличивает производительность оборудования, и отдельная позиция позволяет не связывать конструкцию оптико-телевизионной системы с конструкцией установки. Этот способ имеет больше недостатков по сравнению с предыдущим. Необходимо решить вопрос совмещения инструмента с системой коор-

динат ТВ-датчика, только эта задача значительно сложнее. Кроме того, может оказаться необходимым дублировать некоторые устройства, например координатный привод, если поле зрения ТВ-датчика меньше размеров распознаваемого объекта. К недостаткам относится и то, что действия, выполняемые установкой после получения информации с позиции распознавания, в дальнейшем не контролируются, т. е. установка может производить бракованную продукцию вплоть до выявления брака на очередной операции визуального или иного контроля. Следовательно, для автоматических систем такая компоновка менее предпочтительна.

Структурные схемы СТЗ

Структурная схема каждой конкретной СТЗ определяется несколькими составляющими: техническими характеристиками, конструкцией установки и технической базой, которой располагает разработчик.

При проектировании изделия все составляющие взаимосвязаны и оказывают влияние друг на друга. Ведущую роль играют технические параметры СТЗ, такие как быстродействие, коэффициент распознавания и погрешность ориентации либо определения положения объекта.

Ориентация объекта однопольной оптической системой

Распознавание объектов предполагается осуществлять в растровых изображениях, представленных электрическим видеосигналом. При этом широко распространенные сравнительно простые телевизионные датчики, имеющие развертку, близкую к стандарту вещательного телевидения, позволяют реализовать координатную систему разрядностью до $l \times l$ элементов, где l – разрешающая способность ТВ-датчика (обычно $l = 300\text{--}600$ линий). Независимо от коэффициента увеличения оптической системы минимальная погрешность определения углового разворота объекта в такой координатной сетке составляет $1/l$ рад.

Максимально допустимая угловая погрешность ориентации пластин $\Delta\varphi \gg 1/l$ практически для любого их диаметра, а это означает, что осуществить ориентацию пластин с требуемой точностью в ко-

ординатной системе ТВ-датчика невозможно, тем более что зона неточного первоначального положения ее может превышать поле зрения ТВ-датчика. Получение требуемой погрешности ориентации пластины по углу и поиск заданного фрагмента пластины решаются второй, пространственной, системой координат, реализуемой координатными приводами, на которых расположена пластина. Таким образом, для зондовых установок и установок разделения, объектом распознавания которых является кремниевая пластина, СТЗ включает (рис. 9.13) оптико-телевизионную систему с системой освещения, устройство распознавания, обрабатывающее видеосигнал от фрагмента изображения пластины, устройство управления координатными перемещениями и координатный привод.

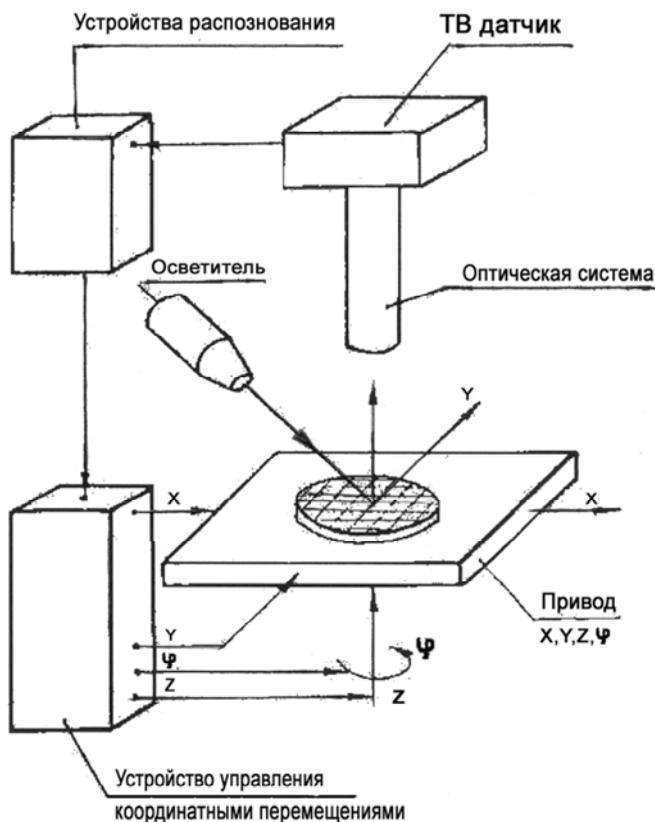


Рис. 9.13. Структурная схема СТЗ

Следует отметить еще несколько достоинств данной структурной схемы СТЗ:

1) система использует при распознавании и ориентации координатный X, Y, ϕ привод, имеющийся в установке для выполнения основной технологической операции;

2) оптико-телевизионная система фиксируется неподвижно, поскольку относительно ее перемещается объект (пластина), расположенный на координатном приводе, в связи с чем ее масса и габаритные размеры не ухудшают динамических характеристик привода и не уменьшают производительности оборудования;

3) стационарное положение оптико-телевизионной системы позволяет сравнительно несложно решить задачу равномерного освещения ее поля зрения;

4) требуемая для оборудования погрешность ориентации пластины по углу достигается с помощью ее перемещений координатным приводом относительно оптикотелевизионной системы, поэтому отклонений от ортогональности систем координат ТВ-датчика и координатного привода могут достигать $0,3^\circ$. (В любом случае произвести юстировку с погрешностью, меньшей чем $1/l$ рад, на реальном оборудовании не удастся.)

Анализируемый фрагмент пластины может иметь одинаковые размеры для любых ее типов и размеров, поскольку с помощью координатного привода можно последовательно осмотреть всю пластину. Это позволяет иметь оптическую систему с постоянной кратностью увеличения.

СТЗ установок монтажа кристаллов предназначена для ориентации объекта относительно инструмента – вакуумной присоски, только объектом распознавания является кристалл, а не пластина. Кроме функции ориентации, на этих установках необходимо распознавать маркировочные отметки на кристалле, сколы и царапины на его поверхности, неразделенные кристаллы и т. д.

Погрешность ориентации центра кристалла относительно инструмента в некоторых случаях допускается различной в зависимости от его размеров и составляет от 5 до 20 % размера меньшей стороны. Например, для кристаллов размером 1×1 мм эта погрешность может составлять $\pm 10\text{--}20$ мкм, а для кристаллов размером 10×10 мм – $\pm 20\text{--}50$ мкм. Быстродействие системы должно быть высоким – распознавание и ориентация должны выполняться за $0,1\text{--}0,3$ с, по-

сколько каждый кристалл анализируется индивидуально перед монтажом в корпус прибора, а это сказывается на производительности оборудования.

Структурная схема СТЗ может быть выбрана в соответствии с рис. 9.13, чему способствует наличие координатного ХУ привода в установке, однако при распознавании по фрагментам быстрдействие системы прямо пропорционально числу анализируемых фрагментов. Поэтому в установках монтажа кристаллов используется один фрагмент для распознавания, а поскольку анализу должна подвергаться поверхность всего кристалла, то в зависимости от его размеров изменяется кратность увеличения оптической системы. Такое решение приемлемо для некоторого диапазона кристаллов, если допускается уменьшение точности определения его положения с увеличением линейных размеров. Ограниченные возможности данного решения обуславливаются следующими обстоятельствами: во-первых, допускаемое увеличение погрешности ориентации не пропорционально увеличению стороны кристалла и, во-вторых, с уменьшением кратности увеличения оптической системы уменьшаются размеры всех элементов, подлежащих распознаванию.

Следовательно, распознавание по фрагментам для больших размеров кристаллов в установках монтажа кристаллов является вынужденной мерой.

Ориентация объекта двупольной оптической системой

СТЗ с однополюсной оптической системой имеют недостаток – низкое быстрдействие, непосредственно влияющее на производительность оборудования. Специальная конструкция оптической системы с *двумя разнесенными каналами* и проекцией двух фрагментов изображения пластины на мишень ТВ-датчика обеспечивает значительное уменьшение погрешности угловой ориентации пластины без применения координатного привода. Соответствующая структурная схема СТЗ позволяет сократить время ориентации за счет исключения «переездов» координатным приводом. Она целесообразна и в том случае, если в установке отсутствует координатный ХУ-привод, а имеется только привод ϕ , например в установке ломки, где необходима ориентация пластины только по углу. Введение в такую установку координатного ХУ-привода исключительно для СТЗ не может оправдать себя в первую очередь по экономическим соображениям.

Отметим ряд недостатков двупольной оптической системы, ограничивающих широкое ее применение: 1) проекция двух оптических изображений на одну мишень ТВ-датчика требует выравнивания их средней яркости раздельной регулировкой осветителей (операция повторяется при старении и смене ламп освещения); 2) затруднены юстировка и проверка правильности установки оптической системы координат, особенно в том случае, если имеется привод только по φ ; 3) конструктивно двупольная оптическая система требует значительного свободного пространства для установки и поэтому, например, в зондовом оборудовании на рабочей позиции практически не компоуется; 4) разрядность координатной системы каждого канала уменьшается до $l \times l/2$ элементов.

Таким образом, несмотря на значительный выигрыш в быстродействии, нельзя однозначно утверждать, что СТЗ с двупольной оптической системой имеет преимущество перед аналогичной СТЗ с однопольной оптической системой.

СТЗ определения положения объекта

Многие сборочные установки не ориентируют кристалл или корпус относительно инструмента, а определяют с помощью СТЗ их положение в пространственной системе координат с тем, чтобы в заданные координаты, полученные расчетным путем, вывести рабочий инструмент для выполнения операции. Положение объекта – кристалла – определено его линейным смещением ΔX , ΔY и угловым разворотом $\Delta\varphi$ относительно эталонного положения. По этим данным процессор установки вычисляет необходимые координаты, в частности координаты центров контактных площадок, в которые затем перемещается сварочный инструмент.

Корпуса приборов могут быть базовыми и безбазовыми. В первом случае они подаются на позицию сварки с точностью, достаточной, чтобы сварочный инструмент попадал на их контактные площадки, перемещаясь по жесткой программе. Во втором случае присоединять проволочные выводы к контактным площадкам, обходя их по жесткой программе, нельзя. Необходимо корректировать положение инструмента по данным, полученным от СТЗ.

Допустимая погрешность определения положения кристаллов (δ_x , δ_y) и разрядность координатной системы ($l \times l$) определяют *поле*

зрения ОТС ($\delta_x l \times \delta_y l$), которое в ряде случаев будет меньше размеров распознаваемых кристаллов и, безусловно, меньше поля, в котором располагаются контактные площадки безбазовых корпусов приборов. Поэтому при небольших размерах распознаваемых кристаллов и базовых корпусах распознавание и определение положения объекта могут происходить только в системе координат ТВ-датчика. В общем же случае она должна включать координатный ХУ-привод. Поскольку кристалл в установках присоединения проволочных выводов фиксируется неподвижно вместе с корпусом, то перемещать необходимо оптическую систему. В ряде установок объектив разделяется на подвижную и неподвижную части. Подвижная часть объектива имеет небольшие габаритные размеры и устанавливается рядом со сварочным инструментом на координатном приводе. Это позволяет не ухудшить динамические характеристики привода нагружением большой массой оптико-телевизионной системы.

Таким образом, в сборочных установках для производства изделий микроэлектроники реализованы следующие принципиальные построения структурных схем СТЗ:

1) неподвижная оптико-телевизионная однополюсная система с переменным оптическим увеличением и объект, расположенный на координатном приводе (может быть использована в зондовых установках разделения, монтажа кристаллов и в некоторых установках присоединения проволочных выводов);

2) неподвижная оптико-телевизионная двупольная система с постоянным оптическим увеличением и объект, расположенный на координатном приводе (может быть использована в установках разделения);

3) неподвижно расположенные оптико-телевизионная система и объект (может быть использована в установках присоединения проволочных выводов);

4) подвижная оптическая система (либо часть ее), расположенная на координатном приводе, и неподвижный объект (может быть использована в установках присоединения проволочных выводов).

9.1.5. Устройства распознавания

Распознавание изображений обычно понимают как отнесение данного изображения к одному из заранее описанных теми или

иными средствами классов изображения. Устройство распознавания СТЗ сборочного оборудования анализирует поступающий видеосигнал, опознает по нему наличие объекта сборки и определяет его положение в плоскости.

*Устройство распознавания полупроводниковых пластин
методом проекций и сравнения с эталоном*

Данное устройство предназначено для СТЗ автоматической установки дисковой резки полупроводниковых пластин. Основная цель, преследовавшаяся при его разработке, – простота технической реализации при обеспечении заданной погрешности ориентации пластины относительно разделяющего инструмента.

Среди различных методов первичного преобразования видеосигнала своей простотой и эффективностью при значительном сокращении видеoinформации привлекает *метод проекций*, или интегрирования видеосигнала по направлению ориентации деталей изображения. Двухмерное изображение преобразовывается в *одномерное распределение* интегрированной яркости объекта по координате, ортогональной к направлению интегрирования. В общем случае это преобразование видеосигнала неинвариантно (зависимо) к сдвигу объекта распознавания вдоль направления интегрирования, так как в поле зрения ТВ-датчика могут располагаться различные фрагменты изображения объекта.

Однако существуют такие изображения, например ортогональная сетка параллельных прямых на плоскости, для которых интегрирование на заданном отрезке вдоль направления линии есть преобразование, практически инвариантное к сдвигу, если соотношение толщины линии и протяженности интегрирования меньше некоторой величины, положим 10 %. Это утверждение можно проиллюстрировать примером (рис. 9.14), где показаны два распределения яркостей от двух фрагментов изображения пластины, имеющей рисунок параллельных прямых линий по ортогональным направлениям. Очевидно, что отличие в распределениях интегрированной яркости для двух изображений будет тем больше, чем больше толщина линии b по сравнению с длиной интегрирования l . Если ширина дорожки разделения пластины 100 мкм, требуемая погрешность определения ее центра ± 5 мкм, разложение ТВ-растра 512 строк ($j = 0-511$), то,

исходя из требуемой погрешности определения положения пластины, поле зрения ОТС в направлении развертки кадра не должно превышать 2,5 мм. Если необходимо соблюдать требование 10%-го соотношения толщины линии и длины интегрирования, поле зрения ОТС в направлении развертки строк должно быть не менее 1 мм.

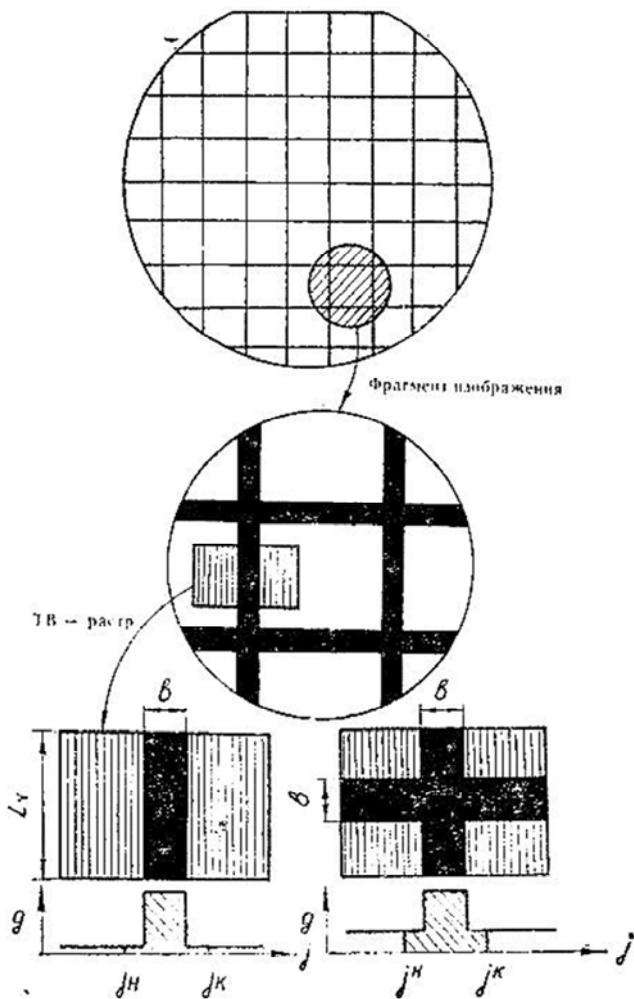


Рис. 9.14. Изображение, для которого преобразование интегрирования на заданном отрезке практически инвариантно к сдвигу

Таким образом, с помощью ОТС, в которой поле зрения можно перестраивать в пределах 1,0–2,5 мм (по одной стороне квадратного растра), необходимо распознавать кристаллы в диапазоне от 0,4 до 10 мм одной стороны. Для этой цели используется метод сравнения эталонного распределения, полученного от изображения перекрестия дорожек разделения, и распределений, полученных от произвольных фрагментов изображения пластины, попадающих в поле зрения ОТС. Различные распределения будут коррелировать между собой в том случае, если они получены при ориентированном положении пластины относительно направления интегрирования. Это говорит о необходимости предварительной ориентации пластины по углу с погрешностью $\Delta\varphi$ ($\Delta\varphi \leq 0,5^\circ$). Величина погрешности установлена экспериментально, однако ее несложно вычислить, зная длину интегрирования и ширину дорожки разделения.

В рассматриваемом устройстве распознавания предварительная ориентация пластины по углу осуществляется посредством дискриминантного анализа распределений яркостей, полученных в результате проекций изображения пластины на прямые под различными углами в пределах допустимой неточности положения пластины по углу. Такая возможность в определении углового разворота пластины по любому фрагменту ее изображения объясняется ярко выраженной ориентацией топологического рисунка на пластине, кристаллах вдоль ортогональных координат.

При совпадении преимущественной ориентации деталей изображения объекта с направлением развертки растра распределение имеет наиболее крутые перепады яркости от строки к строке разложения растра (рис. 9.15). Объект (пластина) зафиксирован неподвижно, а направление проекции изменяется электрическим вращением растра ТВ-датчика. Для каждого направления сканирования изображение интегрируется по каждой строке:

$$U_j = \frac{1}{L_x} \int_0^{L_x} U(t, j) dt. \quad (9.5)$$

Полученное распределение яркости U_j подвергается дифференцированию, а результирующий сигнал суммируется по модулю в течение кадра. Поскольку суммирование осуществляется для сигнала,

являющегося производной от распределения U_j , низкочастотные искажения, связанные с неравномерностью освещенности и отражательной способности объектов, не имеют большого значения, даже при том, что они усиливаются операцией интегрирования при формировании распределений. Поэтому в реальном устройстве интегратор не усложняется и реализует обычную функцию интегрирования.

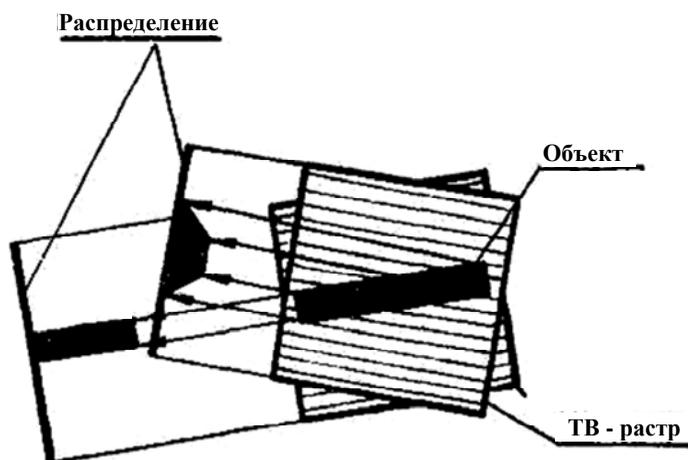


Рис. 9.15. Вид распределений для различных направлений интегрирования

Угловой разворот пластины по любому фрагменту изображения определяется с помощью *суммирующего пикового детектора* (рис. 9.16). Распределение U_j и ее инверсное значение \bar{U}_j дифференцируются на элементах R1, C1 и R2, C2. При появлении положительного импульса на неинвертирующем входе одного из двух операционных усилителей ОУ1 или ОУ2 накопительный конденсатор С3 заряжается выходным током операционных усилителей до величины напряжения, присутствующего на его неинвертирующем входе. Накопительный конденсатор через вентили D1 и D2 разрядиться не может. Вследствие этого, как только на неинвертирующих входах ОУ1 или ОУ2 амплитуда входного сигнала начинает снижаться, отрицательная обратная связь разрывается и на накопительном конденсаторе сохраняется пиковое значение амплитуды входного сигнала.

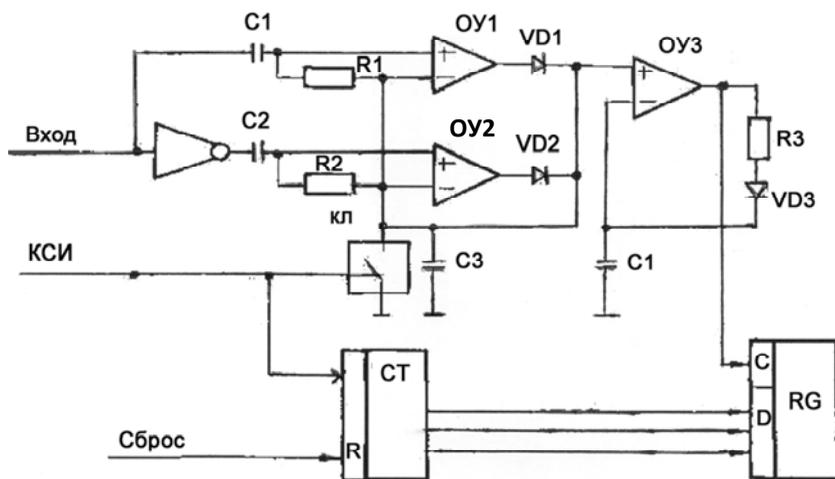


Рис. 9.16. Схема суммирующего пикового детектора

Суммирование положительных и отрицательных пиковых амплитуд дифференцированного распределения производится в течение одного кадра, после чего накопительный конденсатор $C3$ разряжается ключом КЛ от импульса кадровой синхронизации КСИ. Пиковый детектор, выполненный на ОУ3 и накопительном конденсаторе $C4$, фиксирует максимальную суммированную амплитуду дифференцированных распределений, при этом на выходе ОУ3 появляется импульс в том кадре, в котором сумма амплитуд превысила наибольшую из ранее зафиксированных. Импульс с выхода ОУ3 заносит в регистр фиксируемый счетчиком кадров номер этого ТВ-кадра, запускаемого в начале поиска углового положения пластины. Растр поворачивается через $0,1^\circ$ в секторе $\pm 5^\circ$, поэтому для предварительного определения положения пластины используется 100 кадров. Дискретность поворота раstra выбрана в 3–5 раз меньше, чем фактическая погрешность определения углового разворота пластины данным методом, так как при использовании более «крупных» шагов фрагмент изображения в растре значительно изменяется, при этом необходимо вводить выдержку времени в течение нескольких кадров для установления изображения.

По окончании цикла последовательных поворотов раstra и анализа распределений яркости для каждого его положения в пределах анализируемого угла в регистре сохраняется номер того кадра, в ко-

тором суммированные перепады дифференцированного распределения яркости имеют максимальное значение. Это соответствует ориентации ортогональных линий топологии пластины вдоль направления развертки раstra. Предварительная ориентация пластины по углу осуществляется независимо от того, что находится в поле зрения ОТС – дорожка разделения или фрагмент топологии кристалла. Грубая ориентация пластины по углу не может быть выполнена только в том случае, если на фрагменте изображения пластины топологический рисунок не имеет преимущественной ориентации вдоль координат X, Y (например, реперный знак без рисунка). В этом случае СТЗ с помощью координатных приводов помещает в поле зрения ОТС другой фрагмент изображения.

Ориентация пластины относительно инструмента осуществляется, как упоминалось выше, методом сравнения с эталонным распределением яркости сформированных распределений посредством интегрирования по строкам в прямом и повернутом на 90° растре ТВ-датчика. Рассмотрим особенности получаемых распределений. Как было отмечено выше, интегрирование изображения пластины осуществляется по всей длине раstra, при этом часть распределения (рис. 9.17), полученная в зоне дорожки разделения, не зависит от смещения пластины относительно раstra в направлении интегрирования. Форма этой части распределения достаточно проста, но амплитуда сравнительно велика из-за большой протяженности интегрирования и относительно постоянной величины сигнала от дорожки разделения. Ширина зоны эталона не должна быть значительно больше ширины дорожки разделения (в устройстве принята величина 128 строк), так как остальная часть распределения яркости является инвариантной к сдвигу в направлении интегрирования и уменьшает амплитуду корреляционного пика.

Вычислитель меры соответствия двух распределений в устройстве реализует следующую метрику:

$$H = \sum_{k=0}^N |g(j+k) - t(j)|. \quad (9.6)$$

где g_j – распределение яркости объекта поиска заданное в полном растре (0–511 строк);

t_j – распределение эталона, заданное в области 0– N строк.

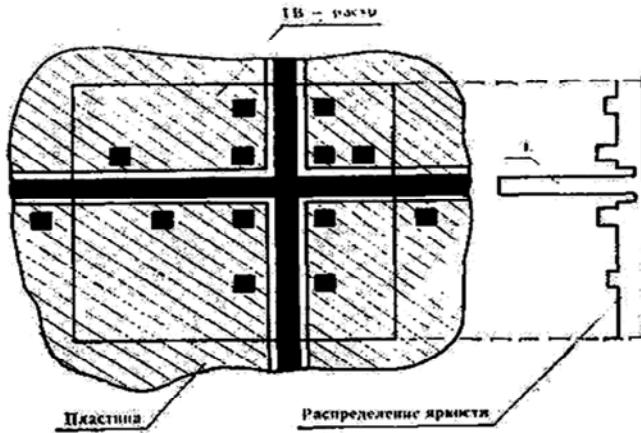


Рис. 9.17. Распределение, полученное при интегрировании пластины

Функция корреляции H стремится к нулю при совпадении эталонного и анализируемого распределений яркости, однако полное их совпадение возможно только при совпадении изображений с учетом неинвариантности преобразования интегрирования. При фиксированном поле зрения ОТС (1,0–2,5 мм по одной стороне) и значительно большем по сравнению с ним диапазоне размеров кристаллов на пластине может встретиться два вида изображений. В первом, когда поле зрения ОТС больше или равно размеру кристаллов, в растре могут случайно появиться фрагменты изображения пластины без дорожек разделения, с одной или двумя ортогональными дорожками. Во втором случае в растре всегда находится как минимум одно перекрестье дорожек разделения.

Рассмотрим алгоритм ориентации пластины для первого случая. В качестве эталонного фрагмента изображения примем перекрестье дорожек разделения, помещенное в центр растра (рис. 9.18). Эталонными будут соответствующие распределения яркости, полученные в результате проекций на ортогональные координаты. В поле зрения ОТС может попасть один из фрагментов изображения $a-l$, распределения каждого из которых коррелируют в определенной степени с эталонными. В общем случае каждое из изображений $a-l$, представленное распределением, коррелирует различным образом, в зависимости от того, в каком месте относительно перекрестья находится растр. Поскольку, кроме дорожек разделения, в распределениях яр-

кости присутствуют различные изображения топологии кристалла, устройство предварительно обучается и оценивает возможность ориентации данного типа пластины. На этом этапе пластина, ориентированная вдоль направления развертки растра, фиксируется относительно его в различных положениях, и для каждого положения анализируется амплитуда корреляционного пика, полученная при сравнении распределения яркости с эталонными распределениями перекрестья дорожек разделения. Распределения от горизонтальных дорожек разделения должны коррелировать с эталонными по координате Y , а от вертикальных (полученных при повороте растра на 90°) – с эталонными по координате X . Таким образом, при наличии в растре дорожки разделения корреляционный пик должен быть достаточно выраженным (иметь малую величину) по соответствующей координате и, наоборот, большую величину в противном случае.

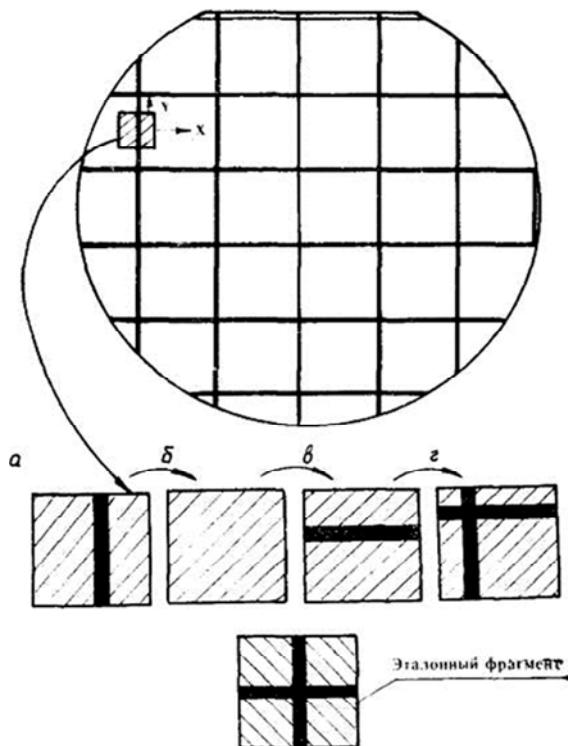


Рис. 9.18. Поиск эталонного фрагмента на пластине

Устройство распознавания вычисляет среднеквадратичное отклонение амплитуды корреляционного пика при наличии и отсутствии дорожки разделения по соответствующей координате в кадре:

$$k_1 = \left(\sum_{i=0}^M \delta_i^2 \right)^{1/2} ; \quad (9.9)$$

$$k_2 = \left(\sum_{i=0}^N \delta_i^2 \right)^{1/2} , \quad (9.10)$$

где δ_i, δ_j – величины i -го и k -го корреляционных пиков от сравнения эталона с различными фрагментами изображения пластины, как содержащими, так и не содержащими дорожку разделения в растре;

M и N – количества проанализированных фрагментов изображения.

Если $k_1 < k_2$, то принимается решение, что данный тип пластины может ориентироваться устройством распознавания в автоматическом режиме, и значение порога, с которым сравнивается величина корреляционного пика в режиме поиска эталона (перекрестья), рассчитывается как $\varepsilon = (k_2 - k_1)/2$. Если величина корреляционного пика меньше ε , то принимается решение, что в данном фрагменте изображения присутствует дорожка разделения, в противном случае ее нет.

В процессе ориентации координатный привод перемещает пластину до тех пор, пока последовательно не будут найдены две ортогональные дорожки разделения и их перекрестье не совместится с эталонным фрагментом. Координатный привод совмещает с эталонным положением другие перекрестья дорожек разделения, корректируя при этом положение пластины по углу. Этот итерационный процесс заканчивается после проверки правильности ориентации пластины по перекрестьям дорожек разделения в противоположных ее сторонах, помещаемых в центр растра координатными приводами установки.

Структурная схема устройства распознавания (рис. 9.19) содержит ТВ-датчик с электронным вращением и поворотом растра, интегратор по строке, блок выборки-хранения амплитуды интегрированного видеосигнала каждой строки растра, аналого-цифровой преобразователь АЦП, суммирующий пиковый детектор, выполняющий функцию предварительной ориентации пластины по углу, два запоминающих

устройства (одно – для эталонных распределений, второе – для распознаваемых), вычислитель меры соответствия пары распределений и контроллер устройства распознавания на основе микропроцессора K580BM80. Устройство работает в двух основных режимах: в первом формируются эталонные распределения яркости и заносятся в ЗУ эталона, во втором происходит ориентация пластины.

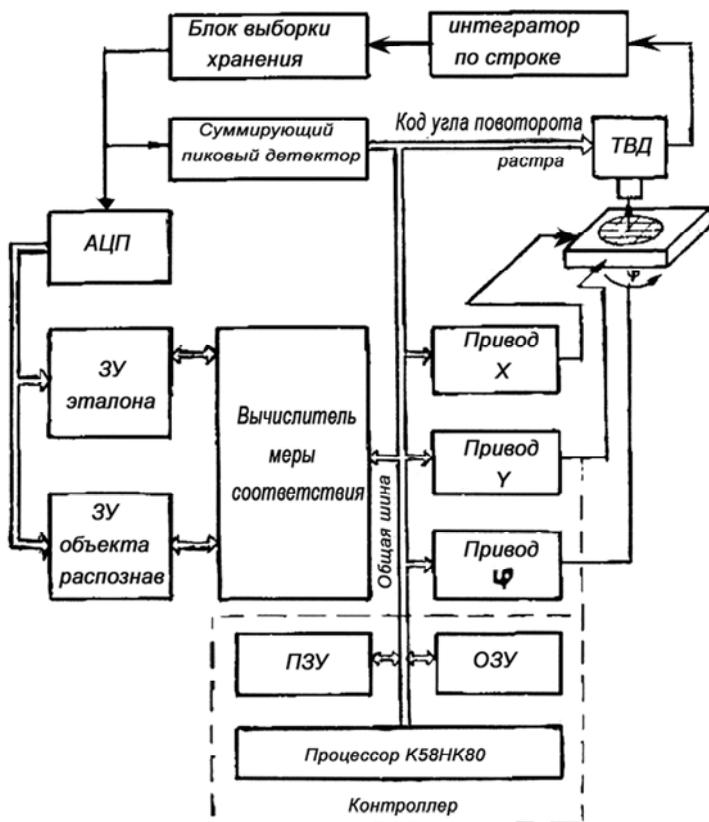


Рис. 9.19. Структурная схема устройства распознавания

При записи эталона на координатный стол X, Y, φ устанавливается пластина таким образом, чтобы направление дорожек разделения совпадало с направлением развертки раstra ТВ-датчика по координате X. Видеосигнал ТВ-датчика интегрируется за период строки, и в конце строки результирующий сигнал запоминается, преобразу-

ется в цифровую форму и заносится по соответствующему адресу в ЗУ эталона. Затем развертка ТВ-датчика коммутируется на 90° , и второе распределение заносится в ЗУ эталона.

В режиме ориентации на координатный стол попадает пластина, дорожки разделения которой повернуты относительно координаты X в пределах $\pm\Delta\varphi$ ($\pm 5^\circ$). Растр ТВ-датчика дискретно поворачивается в пределах этого угла, а суммирующий пиковый детектор вычисляет угол разворота пластины с погрешностью $\pm 0,3^\circ$. Далее пластина поворачивается на этот угол, т. е. ориентируется вдоль координаты X с погрешностью $\pm 0,3^\circ$. Формируются два распределения как проекции изображения на ортогональные направления раstra таким же образом, как и эталонные, только заносятся они в ЗУ объекта.

Рассмотренное устройство распознавания установки разделения пластин имеет простую техническую реализацию, в режиме обучения дает ответ о распознаваемости данного типа пластин из анализа корреляционных пиков, сводит к минимуму влияние неточности масштабирования между пространственной и телевизионной системами координат на погрешность ориентации, так как координатный привод всегда помещает пластину в позицию, в которой произошло обучение устройства.

Устройство имеет следующие недостатки: большое время ориентации пластины (около 30 с), связанное с большим числом позиционирований координатного привода, необходимость хорошей контрастности дорожки разделения по отношению к топологии кристалла, так как преобразование интегрирования последней является неинвариантным к сдвигу изображения.

9.1.6. Гибкие автоматизированные производства

Обсуждая проблемы автоматизации оборудования на пути создания автоматизированных комплексов и гибких производственных систем (ГПС) как основы малолюдных производств, необходимо определить степень автоматизации оборудования, стабильность исходных материалов и полуфабрикатов и решить вопросы систем распознавания, управления, датчиков и т. д.

Главная черта ГПС – гибкость – понимается в настоящее время в двух аспектах: способность машин осуществлять сборку разных изделий без модернизации системы (устойчивость к оперативной смене

номенклатуры) с сохранением высокой производительности (устойчивость к неполадкам оборудования и др.), а также готовность и способность производства в нужный момент практически безубыточно пре-кратить изготовление освоенной продукции и в короткий срок приступить к выпуску новых изделий с любым их количеством в партиях.

Выделим основные операции, выполняемые оператором в производственном цикле сборки приборов на современном автоматическом оборудовании: переналадка установки на выпуск определенного типа прибора; смена изношенного инструмента с последующей подстройкой установки; заправка проволоки в капилляр при неприварах и обрывах проволоки; ремонт приборов (если это возможно или целесообразно); подстройка установки при отказе системы технического зрения от распознавания; ремонт установки; профилактические работы.

Первые два пункта связаны с несовершенством конструкции и системы управления установок, а остальные – с недостаточной надежностью их работы. При традиционном многостаночном обслуживании оператором автоматических установок такие быстро устраняемые отказы, как обрыв проволоки или приведение в непригодность инструмента ввиду его износа, незначительно влияли на коэффициент готовности оборудования, поскольку оператор участвовал в производственном процессе, выполняя определенные действия, и имел возможность прогнозировать по косвенным признакам ухудшение качества работы установки (например, из-за старения инструмента: появление сколов на дорожках разделения или изменение размеров отпечатков зондов на контактных площадках кристаллов). Для автоматизированных комплексов все эти сбои в работе установок классифицируются как отказы, а отсутствие постоянного оператора приводит к уменьшению коэффициента готовности оборудования.

Решение этих вопросов может идти двумя путями: 1) автоматизация операций, выполняемых оператором, с оснащением установки необходимыми датчиками и исполнительными механизмами; 2) повышение надежности выполняемых технологических процессов и инструментов за счет применения новых материалов и обеспечения стабильности параметров полуфабрикатов.

Автоматизированные комплексы могут проектироваться с различными структурными построениями на базе:

1) единого транспорта приборов с последовательной их сборкой (последовательное объединение установок);

2) параллельного обслуживания группы однотипных установок роботом-загрузчиком и взаимодействия между группами через склад-накопитель (параллельное объединение установок);

3) параллельно-последовательного транспорта приборов (параллельно-последовательное объединение оборудования).

На основе первого принципа создан интегрированный комплекс монтажа кристаллов, присоединения выводов и предварительной герметизации. В этом комплексе отдельные группы автоматов для одноименных операций соединены между собой последовательно через межоперационный буфер-накопитель. Автоматы внутри однофункционального назначения сгруппированы по принципу параллельного агрегатирования, при этом каждый автомат снабжается деталями и полуфабрикатами по мере их обработки через единую транспортную ветвь из межоперационного накопителя. Для подачи отрезков лент из накопителя к сборочным позициям и обратно используется пневмотранспорт, по одной ветви которого отрезки подаются на посты сборки, по другой – уходят в межоперационный накопитель. Такая транспортная система, позволившая отказаться от использования магазинов (контейнеров) для отрезков ленты, имеет простую и надежную конструкцию.

Достоинством таких комплексов также является малый межоперационный задел приборов, что выгодно при часто сменяемой номенклатуре собираемых приборов и небольшом коэффициенте их запуска. Основной их недостаток – повышенные требования к транспорту, поскольку при сбоях в системе управления, заклинивания отрезков, профилактическом обслуживании выпуск приборов практически прекращается.

На основе второго принципа созданы комплексы монтажа кристаллов на базе установок ЭМ-4085 и присоединения проволочных выводов на базе ЭМ-4060, в которые входят по 10 и более единиц однотипного оборудования. Загрузочно-разгрузочные устройства большой емкости (1800 приборов) обеспечивают автономность каждой единицы оборудования. Приборы размещены в 15-кадровых отрезках, которые помещены в магазине по принципу этажерки. Количество загружаемых магазинов – 6 шт. Поддон с магазинами подается и принимается с установки роботом-манипулятором. Магазины хранятся в центральном складе. Коэффициент готовности такого комплекса достаточно

высок из-за полной автономности работы установок, однако большой межоперационный задел является его существенным недостатком.

Параллельно-последовательное объединение оборудования предполагает большие выгоды: сочетание общего транспорта с простыми межоперационными накопителями с полной автономией работы отдельных установок позволит получить малый межоперационный задел и высокий коэффициент готовности оборудования, поскольку расчет надежности автоматизированного комплекса будет производиться исходя из его структурного построения. При этом в качестве отказа учитываются как восстанавливаемые, так и невосстанавливаемые отказы, включая сбои, приводящие к любой остановке машины для вмешательства персонала.

Примером параллельно-последовательного объединения оборудования может быть комплекс разделения пластин ЭМ-0201. Комплекс предназначен для разделения полупроводниковых пластин диаметром от 75 до 150 мм толщиной 0,25–0,8 мм на кристалле с сохранением ориентации на основе автоматических установок формирования спутника-носителя с полупроводниковой пластиной (ЭМ-2008), дисковой резки, мойки и сушки пластины (ЭМ-2005) и укладки годных кристаллов на спутник-носитель (ЭМ-4018), поста управления, обслуживаемых подвесным роботом.

Система управления комплексом обеспечивает:

- диагностирование и контроль готовности оборудования к работе, сообщение о готовности к работе на цеховой уровень управления;
- запуск комплекса и программирование его в соответствии со сменным заданием, полученным от цехового уровня управления (либо заданным оператором);
- управление работой оборудования, обработку, хранение и отображение оперативной информации о работе, сбоях, состоянии оборудования комплекса;
- запрос на верхний уровень управления о подаче необходимых материалов и объектов обработки;
- управление транспортными операциями между причалом и транспортно-накопительными модулями комплекса;
- формирование протокола о выполнении сменного задания, передачу его на верхний уровень управления и печать.

Работа комплекса может осуществляться в двух режимах: автоматическом и наладочном.

Рассмотрим один из вариантов работы комплекса в автоматическом режиме. Первыми включаются установки ЭМ-4018 № 1 и 2 (рис. 9.20), при этом если позиции *И* и *К*, *Н* и *П* не содержат магазина 5 и 6, то пост управления (ПУ) запрашивает цеховую ЭВМ об их подвозе на причал со склада. В случае отсутствия нужных магазинов на складе ПУ инициирует работу автоматов ЭМ-2005 и ЭМ-2008 для их изготовления. Вновь анализируется наличие исходных полуфабрикатов-магазинов 4 на позициях *Г* и *Е*, и, в случае их отсутствия, запрашивается склад цеха. При отсутствии магазинов на складе ПУ инициирует работу ЭМ-2008 для их изготовления. Исходными полуфабрикатами для установки ЭМ-2008 являются кассета с полупроводниковыми пластинами 1 и магазин с рамками 2 на позициях *А* и *Б*. Если их нет на этих позициях и в буферных накопителях I–IV, ПУ посылает запрос на подвод их к причалу со склада. Автоматическая установка ЭМ-2008 формирует магазин 6 с адгезионной пленкой для установок ЭМ-4018, который может помещаться в позиции VIII, X, *И* и *Н*, и магазин 4 с приклеенной пластиной, который через позицию *В* передается на позиции *Г* и *Е*, V, VI и VII установок ЭМ-2005. Пустая ладовская кассета 3 возвращается на склад через позицию *А*. Таким образом, продукцией автоматических установок ЭМ-2005 являются магазины 5 с разрезанными на кристаллы полупроводниковыми пластинами, а установок ЭМ-4018 – магазины 7 с годными кристаллами.

Архитектура управления автоматическим производством может быть достаточно разнообразной, исходя из возможностей имеющихся аппаратных и программных средств. Например, предлагаемый фирмой Kulicke and Soffa (США) вариант системы управления имеет три уровня: первый – оборудования, второй – локального производства и третий – главного производства. Информация с первого уровня на второй поступает через концентраторы данных. Система работает при подсоединении определенного количества сборочных и контрольных установок ко всей коммуникационной сети производства. Современное сборочное оборудование и оборудование будущих поколений должно быть разработано таким образом, чтобы оно было совместимо с протоколами связи SECS. Трехуровневая распределенная иерархическая структура обработки данных позволяет значительно ограничить зависимость выхода продукции от возможных неверных действий оператора.

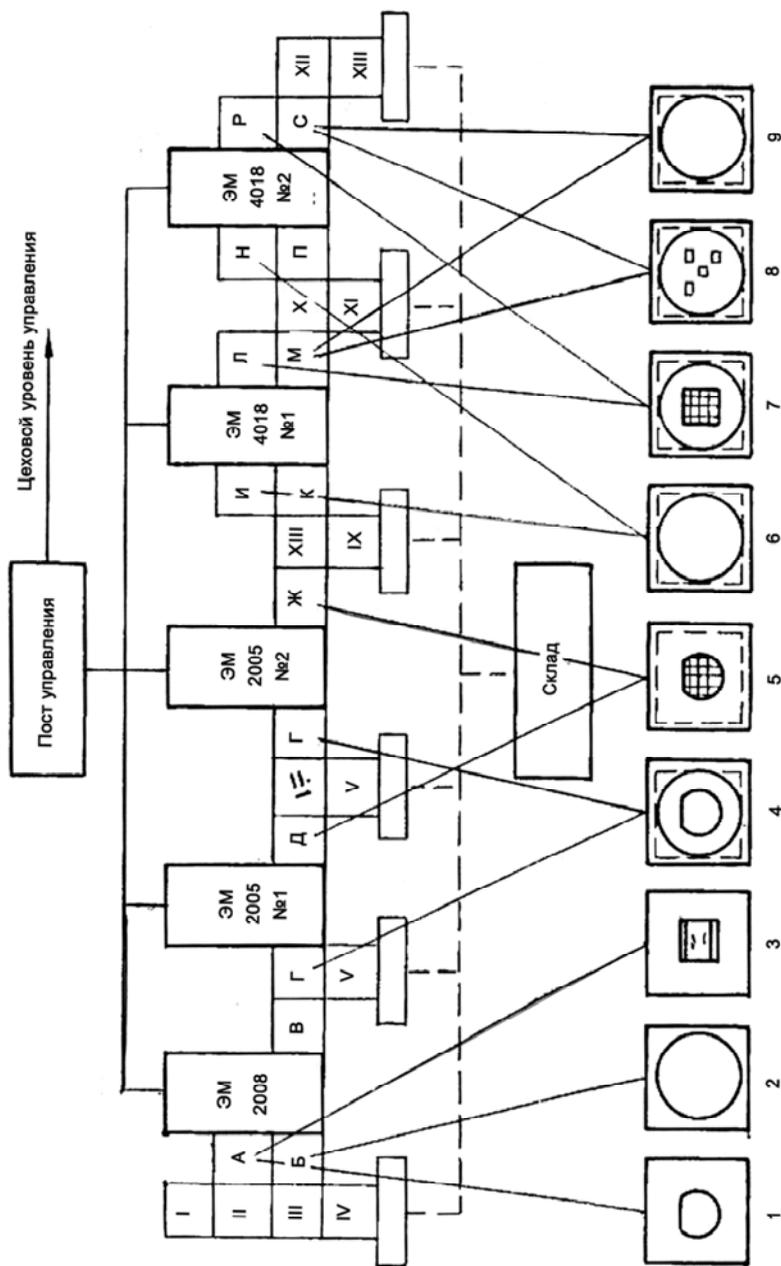


Рис. 9.20. Структурная схема комплекса разделения пластин ЭМ-0201

Распределение аппаратных средств на три уровня объясняется условиями эксплуатации и функциями управления. Первый уровень обеспечивается контроллером сборочной установки, основная функция которого – управление данной установкой, второй – контроллером, управляющим всеми сборочными машинами. Между первым и вторым уровнями управления включен интеллектуальный концентратор данных для управления прохождением данных от оборудования определенного типа. Третий уровень – это ЭВМ управления производством.

Контроллер первого уровня посылает данные об аварийных ситуациях, данные обработки, распознавания и другие в виде маркированных во времени сообщений. Он получает различные инструкции и данные об управлении установкой.

Концентратор данных представляет собой обычную микроЭВМ с расширенными средствами передачи данных и буферизации. Он может передавать данные в обоих направлениях между контроллером второго уровня и контроллером сборочной установки. Концентратор может также запоминать данные, если контроллер второго уровня вышел из строя или если его нет в наличии.

Контроллер второго уровня управляет системой локального производства и подсоединен ко всем концентраторам данных через высокоскоростную линию связи, а также к существующей ЭВМ предприятия. Он может выполнять следующие функции:

- получать и запоминать данные о начальных стадиях производства (запасы материалов, полуфабрикатов, состояние оборудования и т. д.);
- поддерживать связь между транспортировщиками материалов и устройствами, которые они в настоящее время обслуживают;
- обрабатывать полученные сообщения и принимать решения по выходным сообщениям;
- фиксировать ошибки и потерю информации;
- выполнять сбор требуемых заказчиком статистических данных и параметров изделий;
- давать отчет в виде распечатки или на экране ЭЛТ диспетчерского управления рабочими характеристиками установок, формирования данных и управления работой сети;
- готовить и передавать необходимые характеристики и информацию для главной ЭВМ;
- хранить библиотеку параметров приборов и режимов установок сборки.

Архитектура системы управления собственно сборочной установки строится в настоящее время по иерархическому принципу из-за достаточно четкого разграничения элементов системы управления по функциональному назначению. Каждое из этих устройств (устройства управления координатным приводом, распознавания, управления загрузочно-разгрузочными механизмами и т. д.) может иметь самостоятельное развитие, без привязки к сборочной установке, поэтому нет очевидных причин перехода от иерархических микропроцессорных систем к мультипроцессорным. Однако наблюдается тенденция к использованию быстродействующих контроллеров с 16- и 32-разрядными словами. Это связано с введением интерполяции перемещений по трем и более координатам, быстрой обработкой двумерной информации при распознавании образов для сложных задач контроля и другими задачами.

Системы технического зрения включают оптико-телевизионное и вычислительное устройства с программным обеспечением, реализующие алгоритм распознавания. Как уже известно, распознавание есть не что иное, как классификация, т. е. процесс, когда неизвестные объекты относят к заранее сформулированному классу. В сборочном оборудовании распознавание объектов необходимо в первую очередь для определения их положения или ориентации. В значительной мере эти задачи, удовлетворяющие автоматизированному производству изделия микроэлектроники, решены, однако практически не рассмотрены контрольные визуальные операции. Из-за отсутствия автоматизации визуального контроля в автоматическом производстве бракованная продукция может производиться до тех пор, пока она не обнаружится на последующей установке сборки.

Автоматизации подлежат следующие основные визуальные операции:

- 1) на установках зондового контроля – ориентация пластин, контроль отпечатков зондов, контроль положения и вида маркировочных отметок;

- 2) на установках разделения – ориентация пластин, контроль ширины и качества реза, контроль точности разделения;

- 3) на установках монтажа кристаллов – ориентация кристалла, определение положения корпуса, контроль поверхности и качества монтажа кристалла;

4) на установках присоединения выводов – определение положения кристалла и корпуса, контроль формы перемычек, контроль качества присоединения выводов.

Оптические системы в сборочном оборудовании имеют два различных назначения. Первое – помочь человеку увидеть микробъекты сборки (контактные площадки на кристаллах, имеющие линейные размеры 50–120 мкм, проволоку диаметром 10–40 мкм и т. д.) при подготовительных, наладочных, контрольных работах. Эту задачу в настоящее время успешно решают бинокулярные стереомикроскопы с передним отрезком более 100 мм. Стереомикроскопы имеют переключаемую кратность увеличения, что значительно расширяет диапазон их использования.

Второе назначение оптических систем – обеспечить проекцию изображения объекта сборки на мишень ТВ-датчика для распознавания и определения положения данного объекта средствами вычислительной техники. В этом случае оптическая система должна быть жестко фиксирована, так как она включена в общую метрологическую систему, измеряющую координаты объекта сборки. Оптическая система не может оперативно и гибко изменять свои параметры (величину переднего отрезка, апертуру, кратность увеличения и т. д.), однако реальная конструкция установки требует определенных конструктивных параметров, поэтому для автоматизации визуальных операций различных установок необходим определенный набор оптических систем, удовлетворяющих следующим требованиям:

- реализации светлого и темного полей формирования изображения объекта (наличие двух способов формирования изображения объясняется тем, что в ряде установок распознавание лучше осуществляется в темном поле благодаря высокой контрастности изображения, а наладочные и юстировочные операции, выполняемые оператором, – в светлом поле из-за высокого разрешения изображения полупроводниковых пластин и кристаллов);

- реализации (по выбору) постоянной либо переменной кратности увеличения;

- обеспечению малой неравномерности освещенности в плоскости мишени ТВ-датчика (как правило, менее 10 %);

- обеспечению заданной величины освещенности в плоскости мишени ТВ-датчика (обычно 1–50 лк);

- обеспечению минимальной потери контрастности изображения в оптической системе;
- обеспечению малых геометрических искажений (как правило, менее 10 % допустимой погрешности определения положения объекта);
- обеспечению малых массогабаритных размеров оптической системы, особенно если она предназначена для установки на координатном приводе.

Перечисленные требования принципиально не отличаются от требований к характеристикам оптических систем. Это следует из того, что вопросы распознавания объектов сборки и определения их положения в значительной мере решены в существующем оборудовании. Остаются открытыми вопросы визуального контроля качества выполненной технологической операции, поэтому следует ожидать появления потребности в оптических системах с полем зрения $D \approx 15$ мм, небольшой кратностью увеличения и разрешающей способностью 300–400 линий/мм. Получение такой разрешающей способности возможно только при большой апертуре объектива и малой глубине резкости. Поэтому возникает необходимость быстрой автофокусировки такого объектива, так как разновысотность объектов сборки составляет 50–100 мкм, а в некоторых случаях может достигать 1 мм.

Телевизионные датчики СТЗ, преобразующие оптическое изображение в электрический видеосигнал, используются двух типов: с передающей электровакуумной трубкой типа видикон или с твердотельной матрицей на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). В настоящее время созданы передающие трубки, позволяющие на своем фоточувствительном слое получить разрешение до 4000 телевизионных линий на растр, ПЗС-матрицы, содержащие до 800×800 элементов, и ПЗС-линейки, обеспечивающие разрешающую способность до 2000 линий. Однако в оборудовании наибольшее распространение получили ТВ-датчики с разрешением до 512 линий, при этом, несмотря на то что инерционность видиконных камер значительно больше, чем ПЗС, геометрические искажения могут достигать 2 %, а для получения стабильности раstra менее 0,3 % требуются определенные усилия, их применение в отечественном и зарубежном оборудовании практически не уменьшается. Это объясняется рядом причин: во-первых, отработанностью конструкции видиконных ТВ-датчиков и большим разнообразием видиконов с различными светотехническими характери-

ками; во-вторых, температурной нестабильностью видеосигнала ПЗС-приборов и смещением спектральной чувствительности в область инфракрасного света, не видимого человеческим глазом, что становится неудобным при настройке осветителя, проверке работоспособности установки с помощью микроскопа, т. е. при наладочных и контролирующих действиях, выполняемых человеком.

Наибольшее распространение получили ТВ-датчики, имеющие стандартный чересстрочный растр вещательного телевидения, при этом практически любой ТВ-датчик может работать в составе сборочной установки. Однако построчное разложение, несмотря на определенную сложность отображения на стандартном видеоконтрольном устройстве, является более предпочтительным для систем распознавания, так как уменьшает погрешность определения положения объекта в кадре.

В будущих разработках СТЗ, предназначенных для оборудования автоматизированных комплексов, следует ожидать значительно более широкого использования ТВ-датчиков с ПЗС-приборами из-за малой инерционности, что позволит увеличить производительность оборудования и наработку на отказ. ТВ-датчики с электровакуумными приборами, имеющие повышенное разрешение, найдут применение в устройствах контроля. При этом большое разрешение по полю позволяет сформировать растр в разных участках мишени ТВ-датчика и тем самым исключить в устройствах визуального контроля координатный привод, расширяющий телевизионную систему координат последовательным сканированием объекта. Контрольные визуальные операции в полной мере могут быть автоматизированы при обработке цветного изображения ТВ-датчика, поскольку значительная часть дефектов при черно-белом формировании изображения не наблюдается.

В заключение сделаем несколько замечаний, относящихся к автоматизации производства ИС.

1. В ходе эксплуатации ГПС основные проблемы и «узкие места» определяются не оборудованием и программным обеспечением, а организационной структурой производства. Поэтому главные усилия должны быть направлены на изучение самого производственного процесса.

2. При создании ГПС резко повышается роль контрольных операций: контроль за ходом процесса и работой машин, материалами

и полуфабрикатами, передаваемой информацией и др. Поэтому необходимо расширить поиск эффективных методов и средств контроля, внедряемых в оборудование электронного машиностроения.

3. До настоящего времени не выработаны критерии для определения, какой способ автоматизации лучший, поэтому автоматизировать производство следует только в тесном сотрудничестве с заказчиком.

9.2. Комплексная автоматизация сборочных процессов изделий микроэлектронной техники

Трудоемкость сборочных процессов от общей трудоемкости изготовления приборов составляет 35 % и создание автоматов и полуавтоматов для осуществления сборочных работ позволяют существенно уменьшить эту цифру и соответственно снизить себестоимость и увеличить объем выпускаемых дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Для производства планарных транзисторов в пластмассовых корпусах была создана автоматизированная линия «Поток» применительно к машинному варианту сборки.

Процесс сборки маломощного $n-p-n$ -транзистора в пластмассовом корпусе основан на использовании непрерывной многослойной ленты с полосчатым золочением, которая служит не только транспортирующим элементом, но и одновременно основой конструкции прибора.

В качестве транспортирующего и накопительного устройства применяется магнитный барабан. Поточно-механизированная линия состоит из следующих установок:

1. Пресс-автомат вырубки перфорации на ленте (номинальное усилие 10^4 Н; производительность 6000 транзисторных элементов в час);

2. Установка напайки кристаллов на ленту (производительность 700 присоединений в час). Разработанный технологический процесс автоматизированной сборки транзистора является универсальным и используется в качестве базового при производстве широкой номенклатуры полупроводниковых приборов, загерметизированных пластмассами.

Для сборки интегральных микросхем в плоских металлостеклянных корпусах была разработана линия автоматизированной сборки, являющаяся составной частью комплекса оборудования «Корунд-С».

На всех стадиях сборки используются десятиместные кассеты, являющиеся сквозными. Благодаря им удалось применить элементы групповой сборки в ранее дискретно выполняемых процессах, резко сократить перекладки деталей и приборов и свести к минимуму их повреждения.

Линия автоматизированной сборки интегральных схем в плоском корпусе состоит из следующих установок:

1. Установки монтажа кристаллов в корпус типа УК-03; ее производительность – 700 шт./ч.

Технологический процесс монтажа состоит из следующих операций: шаговая подача корпусов в десятиместной кассете; ориентация выводов корпуса по шаблону; ориентация кристалла, находящегося в групповой кассете, расположенной на манипуляторе установки; захват и перенос кристалла инструментом на позицию пайки; создание давления; подача вибрации; выдержка, возвращение инструмента в исходное положение.

Монтаж кристалла в корпус производится методом контактно-реактивной пайки с образованием эвтектики золото-кремний. Температура процесса – 420 °С, давление – $5 \cdot 10^3$ Н/м². Установка управляется от программатора, обеспечивающего поддержание необходимых технологических режимов, включая трехступенчатый цикл нагрева корпуса.

2. Двух установок УЗП-02М и УЗП-03 для микросварки. Установка УЗП-02М предназначена для ультразвуковой микросварки алюминиевой проволоки внахлестку без подогрева изделия и инструмента. Программатор обеспечивает независимые технологические режимы при сварке на кристалле и корпусе. Производительность установки – одна перемычка в секунду.

Установка УЗП-03 используется для ультразвуковой микросварки золотой проволоки методом опаленного шарика с подогревом до 250 °С прибора в процессе сварки. Производительность – одна перемычка за 1,5 с.

Лента подается автоматически с помощью вибробункера; кристалл присоединяют к ленте методом ультразвуковой сварки с нагревом столика до 400–420 °С с образованием эвтектического сплава золото-кремний.

Две установки для присоединения выводов к кристаллу и разводки выводов на ленту; процесс производится методом термокомпрес-

сионной сварки с помощью двойного рубинового капилляра для одновременного присоединения двух выводов. Термокомпрессия осуществляется шариками при 300–340 °С. Установка производит две операции: первая – термокомпрессия двух золотых проволок, кончающихся шариками, к металлизированным площадкам на кристалле; при этом все переходы операции осуществляются автоматически, вручную под микроскопом производится только точное совмещение; вторая – автоматическая приварка выводов к контактным участкам рамки; эта операция проводится контактной сваркой без участия оператора; производительность двух агрегатов – 700 приборов/ч.

Установка подготовки к герметизации имеет две рабочие позиции: смотка ленты с транзисторными сборками с барабана и заправка в кассету-спутник для последующей герметизации; обрезка одной из технологических перемычек на ленте. Емкость одной кассеты-спутника 20 приборов, производительность установки 700 шт./ч.

Установка герметизации представляет собой плунжерный дозатор компаунда типа ЭКМ, дозировка компаунда обеспечивается одновременно 20 соплами. Рабочий стол установки имеет механизм автоматического перемещения на один очередной ряд заливочных форм, которое производится после каждой дозировки.

Автомат маркировки снабжен подающим вибробункером и сушильной камерой улиточного типа; его производительность – 300 шт./ч.

Автомат с подающим вибробункером для упаковки приборов в полиэтиленовую ленту; его производительность – 3000 шт./ч.

Магнитный накопительный барабан предназначен для накопления ленты на отдельных сборочных операциях и последующего переноса сборок на ленте на следующую технологическую операцию.

Сборки состоят и в том, что он позволяет использовать ленточную технологию и автоматизировать процесс сборки, а также обеспечивает возможность контроля качества сварки.

В настоящее время действует линия автоматизированной сборки интегральных микросхем в пластмассовом корпусе методом промежуточной контактной рамки («паучка»).

Линия состоит из следующих установок:

– установки укладки кристаллов в кассету; производительность – 1600 шт./ч. Она предназначена для определения годных полупро-

водниковых кристаллов, расположенных ориентированно на липкой пленке, съема их с пленки и укладки в многорядную кассету;

– пресс-автомата для подготовки контактных рамок из алюминиевой ленты к травлению; производительность – 2000 шт./ч;

– установки электролитического травления для получения промежуточных контактных рамок путем электрохимического травления алюминиевой ленты с отпечатками требуемого рисунка; производительность – 700–800 шт./ч;

– установки для присоединения кристаллов к контактной рамке; производительность – 400 кристаллов/ч. Присоединение алюминиевой контактной рамки к металлизированным площадкам кристаллов осуществляется с помощью ультразвука частотой 59–61 кГц;

– установки для присоединения контактной рамки к выводам наружной рамки; производительность – 500 приборов/ч. На установке производится автоматизированное присоединение 14 выводов контактной рамки с приваренным кристаллом к выводам наружной рамки методом ультразвуковой сварки;

– установки визуального контроля; производительность – 1000 приборов/ч. На установке осуществляется внешний осмотр под микроскопом выводов «паучка», проверка прочности приварки выводов «паучка» к выводам наружной контактной рамки путем обдува их очищенным сжатым воздухом, последующей доварки ненадежных соединений и маркировки неисправимого брака. Установка работает в полуавтоматическом режиме.

Линия автоматизированной сборки интегральных микросхем с помощью промежуточной контактной рамки позволяет выпускать 1,5 млн приборов в год.

С помощью обеих установок можно производить сварку единичных, уложенных в десятиместную кассету, а также собираемых на отрезках ленты приборов, для чего установки снабжены соответствующими видами унифицированных механизмов:

– установкой визуального контроля УВК-01 для контроля микросварных соединений, позволяющей осуществлять контроль внешнего вида кристаллов, корпусов, сборок и других объектов и производить раскладку по видам (группам) брака с автоматическим счетом количества брака по отдельным дефектам и суммированием общего количества брака в партии. Для контроля используются микроскопы ММУ-3 и МБС-2;

– установкой УКПМ-1 для контроля прочности микросоединений путем наложения разрушающих нагрузок к выводам, приваренным к контактным площадкам кристалла, и к траверсам корпуса с регистрацией величины усилий отрыва по шкальному прибору с точностью 0,5 г;

– установкой ОЖФ для отмывки деталей и корпусов интегральных схем от органических и неорганических загрязнений. Производительность установки – 1000 шт./ч;

– десятипозиционной установкой типа Г-10 для герметизации интегральных схем, позволяющей запаивать все приборы, находящиеся в групповой кассете. Пайка осуществляется струей нагретого инертного газа. Температура инертного газа в 10 паяльниках поддерживается автоматически. Производительность установки – 500 шт./ч.

Все сборочные операции (от электроконтроля до упаковки) производятся в едином сквозном спутнике без перекладки изделий из одной технологической тары в другую. Применение спутников позволяет полностью автоматизировать процессы контроля и предохранить микросхемы от механических повреждений.

Описанная автоматизированная линия сборки микросхем дает возможность существенно сократить производственный цикл изготовления, увеличить процент выхода годных изделий, надежность и снизить трудоемкость и себестоимость микросхем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко, В. М. Ультразвуковая микросварка / В. М. Колешко. – Минск : Наука и техника, 1997. – 328 с.
2. Комаров, Ф. Ф. Ионная имплантация в металлы / Ф. Ф. Комаров. – М. : Metallurgia, 1990. – 216 с.
3. Красников, Г. Я. Физико-технологические основы обеспечения качества СБИС / Г. Я. Красников, Н. А. Зайцев. – М. : Микрон-пресс, 1998. – 809 с.
4. Технология СБИС : в 2 кн. / под ред. С. Зи. // К. Пирс [и др.]; Пер. с англ. Ю. Д. Чистякова. – М. : Мир, 1986. – Кн. 1. – 406 с.; кн. 2. – 455 с.
5. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема. – М. : Радио и связь, 1988. – 496 с.
6. Гуськов, Г. Я. Монтаж микроэлектронной аппаратуры / Г. Я. Гуськов, Г. А. Блинов, А. А. Газаров. – М. : Радио и связь, 1986. – 176 с.
7. Емельянов, В. А. Корпусирование интегральных схем / В. А. Емельянов. – Минск : Полифакт, 1998. – 358 с.
8. Колешко, В. М. Контроль в технологии микроэлектроники / В. М. Колешко, П. П. Гойденко, Л. Д. Буйко. – Минск : Наука и техника, 1979. – 312 с.
9. Миллер, Ю. Г. Физические основы надежности интегральных схем / Ю. Г. Миллер, В. Ф. Синоров; под ред. Ю. Г. Миллера. – М. : Советское радио, 1976. – 320 с.
10. Фитер, В. Методы ускоренных испытаний микроэлектронных элементов / В. Фитер // Зарубежная радиоэлектроника. – 1982. – № 11. – С. 3.
11. Емельянов, В. А. Микроконтактирование проволочных выводов в твердой фазе / В. А. Емельянов [и др.] // VI Научно-техническая конференция «Контактроника-88». – Быдгот, ПНР, 9–11 мая 1988 г. – С. 1–12.
12. Чернышев, А. А. Автоматизация сварки микропроволокой при сборке интегральных схем / А. А. Чернышев, Р. А. Голубенко // Зарубежная электронная техника. – 1980. – № 2. – С. 15–16.
13. Смитт, К. Новые возможности автоматизированной сборки на ленту-носитель / К. Смитт // Электроника. – 1983. – № 1. – С. 16.

14. Дударчик, А. И. Перспективы перевода сборки ИМС в плоские стеклокерамические корпуса / А. И. Дударчик [и др.] // Электронная промышленность. – 1988. – Вып. 6 (174). – С. 40–41.

15. Куценко, В. М. Гибкие автоматизированные системы производства и управления в гальванотехнике / В. М. Куценко [и др.]. – Минск : БелНИИНТИ, 1988. – 47 с.

16. Емельянов, В. А. Аппаратные средства контроля параметров твердотельных структур в производстве СБИС / В. А. Емельянов [и др.]. – Минск : НПО «Интеграл», 1997. – 94 с.

17. Емельянов, В. А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий / В. А. Емельянов, И. А. Иванов, Ж. А. Мрочек. – Минск : Бестпринт, 1988. – 284 с.

18. Емельянов, В. А. Сборка ИМС на ленточных носителях по стандартам «LG» / В. А. Емельянов, В. Л. Ланин, В. Ф. Ласточкина // II Междунар. научно-техн. конф. – Нарочь, 1977. – С. 186–191.

19. Достанко, А. П. Моделирование и оптимизация ультразвуковой микросварки для микромонтажа интегральных схем / А. П. Достанко [и др.] // Электронная промышленность. – 1988. – Вып. 6. – С. 16–17.

20. Емельянов, В. А. Ультразвуковая микросварка соединений в корпусах ИМС, не содержащих драгоценных металлов / В. А. Емельянов, В. П. Ланин, А. А. Хмыль // Состояние и перспективы развития сборочного оборудования. Материалы научно-практич. конф. – Минск, 1991. – С. 57.

21. Мазур, А. И. Процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов / А. И. Мазур, В. П. Алехин, М. Х. Шоршоров. – М. : Радио и связь, 1981. – 224 с.

22. Емельянов, В. А. Ультразвуковая микросварка проволочных выводов с контактными площадками ИС / В. А. Емельянов, В. П. Ланин, А. А. Хмыль // Электронная промышленность. – 1987. – Вып. 2. – С. 71.

23. Емельянов, В. А. Методы контроля параметров твердотельных структур СБИС / Емельянов В. А. [и др.]. – Минск : Бестпринт, 1998. – 108 с.

24. Емельянов, В. А. Сборка ИМС в корпусах с ультратонким золотым покрытием / В. А. Емельянов, В. Л. Ланин, В. Ф. Ласточкина // Науч.-техн. конф. «Материалы, технологии, инструмент». – Минск, 1998. – Т. 3, № 2. – С. 112.

25. Емельянов, В. А. Ультразвуковая микросварка межсоединений интегральных схем по никелевым покрытиям / В. А. Емельянов, В. П. Ланин, А. А. Хмыль // XXXIX Всесоюз. науч. сессия, посвященная Дню радио. – М., 1984. – С. 85.

26. Емельянов, В. А. Проволочный микромонтаж интегральных схем с никелевым покрытием / В. А. Емельянов [и др.] // XII Всесоюз. науч. конф. по микроэлектронике. – Ч. VI. – Тбилиси, 1987. – С. 183.

27. Дроздов, О. Я. Автоматическая линия сборки и сварки арматуры ИС типа 401.14-5 (Сх. 74) / О. Я. Дроздов [и др.] // Передовой производственно-технический опыт. ИЛ № 92-0006. ВИМИ. – 2 с.

28. Емельянов, В. А. Лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / В. А. Емельянов [и др.] // Лазерные новости. – М. : НИИ «Полюс», 1996. – Вып. 3. – С. 37–41.

29. Емельянов, В. А. Технология микромонтажа интегральных схем / В. А. Емельянов. – Минск : Бел. наука, 2002. – 335 с.

30. Онегин, Е. Е. Автоматическая сборка ИС / Е. Е. Онегин, В. А. Зенькович, Л. Г. Битно. – Минск : Вышэйшая школа, 1990. – 383 с.

31. Онегин, Е. Е. Точное машиностроение для микроэлектроники / Е. Е. Онегин. – М. : Радио и связь, 1986. – 22 с.

32. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, Д. М. Карпинос, С. П. Листовничая. – М. : Высшая школа, 1980. – 216 с.

33. Современные методы и оборудование для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы / В. А. Зенькович [и др.] // Зарубежная электронная техника. – 1978. – № 11. – С. 16–26.

34. Емельянов, В. А. Ультразвуковая микросварка проволочных выводов с повышенным качеством соединений / В. А. Емельянов, В. П. Ланин, А. А. Хмыль // XLVI Всесоюзная научн. сессия, посвященная дню радио. – М., 1991. – С. 140.

35. Чернышев, А. А. Корпуса для больших интегральных схем и перспективы их совершенствования / А. А. Чернышев, А. А. Стадник, А. А. Чюхин // Зарубежная радиоэлектроника. – 1984. – № 9. – С. 83–95.

36. Чернышев, А. А. Автоматизация сварки микропроволокой при сборке интегральных схем / А. А. Чернышев, Р. А. Голубенко // Зарубежная электронная техника. – 1986. – № 2. – С. 48–59.

37. Исмаилов, Ш. Ю. Автоматические системы и приборы с шаговыми двигателями / Ш. Ю. Исмаилов. – М. : Энергия, 1968. – 136 с.
38. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2003. – С. 192.
39. РД 110705–89. Оборудование для производства СБИС уровня ДОЗУ 1-4 Мб. Общие технические требования.
40. Данилин, А. Д. Интегрированные технологические системы в микроэлектронике / А. Д. Данилин [и др.] // Электронная промышленность. – 2004. – № 4. – С. 129–144.
41. Гордеев, Д. Д. Технология вертикально интегрированных полупроводниковых структур для создания СБИС / Д. Д. Гордеев [и др.] // Зарубежная электронная техника. – 1987. – Вып. 10 (137). – С. 3–55.
42. МОП СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / под ред. А. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Диттона, У. Оудхема ; пер. с англ. – М., 1988. – С. 222–223.
43. Мулдашев, В. И. Технологические аспекты получения СБИС с диэлектрической изоляцией / В. И. Мулдашев [и др.] // Электронная промышленность. – 1990. – № 4. – С. 30–33.
44. Моряков, О. С. Устройство и наладка оборудования полупроводникового производства / О. С. Моряков. – М. : Высшая школа, 1971.
45. Рыдзевский, А. Я. Ультразвуковая сварка в микроэлектронике / А. Я. Рыдзевский // Обзор по электронной технике. – Вып. 7. – М., 1974.
46. Тареев, Б. М. Герметизация полимерными материалами в радиоэлектронике / Б. М. Тареев. – М. : Энергия, 1974.
47. Емельянов, В. А. Технология электрических соединений в производстве электронной аппаратуры: учебное пособие / В. А. Емельянов, В. П. Ланин, А. А. Хмыль. – Минск : Беспринт, 1997. – 113 с.
48. Ануфриев, Л. П. Повышение качества сборки монтажа интегральных схем / Л. П. Ануфриев [и др.] // Электронная промышленность. – 1990. – Вып. 5. – С. 11–12.
49. Чернышов, А. А. Автоматизация сварки микропроволокой при сборке интегральных схем / А. А. Чернышов, Р. А. Голубенко // Зарубежная электронная техника. – 1986. – № 2. – С. 48–59.
50. Битно, Л. Г. Система технического зрения установки присоединения проволочных вывоов ЭМ-4060 / Л. Г. Битно, В. С. Седа-

кин, Л. Н. Напалкова // Электронная промышленность. – 1986. – Вып. 10. – С. 34–37.

51. Тхорик, Ю. А. Физические методы диагностики в производстве полупроводниковых приборов / Ю. А. Тхорик // Электронная промышленность. – 1990. – № 6. – С. 12–18.

52. Горлов, М. И. Конструкционные методы повышения надежности ИС / М. И. Горлов. – Воронеж, 1995. – 60 с.

53. Дунаев, С. А. Оперативная оценка качества логических микросхем / С. А. Дунаев, А. А. Сычев // Состояния и пути повышения надежности видеоманитофонов : тез. докл. VII научно-техн. отр. конф. – Воронеж, 1993. – С. 27–29.

54. Турцев, А. С. Специальные технологические средства в производстве СБИС и УБИС / А. С. Турцев // Зарубежная электронная техника. – 1991. – № 4. – С. 3–39.

Учебное издание

СЫЧИК Василий Андреевич

ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Конспект лекций
по дисциплине «Технология сборки
полупроводниковых приборов и интегральных схем»
для студентов специальности 1-41 01 01
«Технология материалов и компонентов электронной техники»

Редактор *Т. А. Зезюльчик*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 06.06.2014. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 17,79. Уч.-изд. л. 13,91. Тираж 80. Заказ 1447.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.