

Филиал БНТУ
«Минский государственный политехнический колледж»

Электронное учебно-методическое пособие
по учебной дисциплине
**«Технология и оборудование литографических
процессов»**
для специальности 2-41 01 31 «Микроэлектроника»

Минск 2019

Автор:
Лаврова Л.К.

Рецензенты:

Деревянко Т.Ф., преподаватель филиала БНТУ «Минский государственный политехнический колледж»

Щербакова Е.Н., доцент кафедры «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета, канд. физ.-мат. наук, доцент

Учебно-методическое пособие предназначено для самостоятельного и дистанционного изучения учебной дисциплины «Технология и оборудование литографических процессов» учащимися специальности 2-41 01 31 «Микроэлектроника». В учебно-методическом пособии представлен теоретический материал, а также материал, обеспечивающий контроль знаний для проведения самоконтроля и текущей аттестации.

Белорусский национальный технический университет.
Филиал БНТУ «Минский государственный политехнический колледж».
пр - т Независимости, 85, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: (017) 292-13-42 Факс: 292-13-42
E-mail: mgpk@bntu.by, mgpkby@mail.ru
<http://www.mgpk.bntu.by/>
Регистрационный № ЭИ БНТУ/МГПК – 103.2019

Содержание

Пояснительная записка

Выписка из типового учебного плана

Междисциплинарные связи

Учебная программа учебной дисциплины

Тематический план

Содержание учебной программы

Перечень существенных и несущественных ошибок

Перечень разделов и тем учебной программы

Теоретический материал по темам учебной программы

Введение

Раздел 1 Технология и оборудование литографии

Тема 1.1 Подготовка пластин перед литографическими процессами

Тема 1.2 Нанесение и сушка фоторезиста

Тема 1.3 Экспонирование фоторезиста

Тема 1.4 Изготовление литографических шаблонов

Тема 1.5. Проявление и задубливание фоторезиста

Тема 1.6. Травление пленок

Тема 1.7. Удаление фоторезиста

Раздел 2 Перспективы литографии

Тема 2.1 Перспективные методы и материалы литографии

Тема 2.2 Литография больших энергий

Самоконтроль знаний

Примерный перечень вопросов к ОКР №1

Примерный перечень вопросов к ОКР №2

Перечень учебных изданий и информационно - аналитических материалов

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Электронное учебно-методическое пособие по учебной дисциплине «Технология и оборудование литографических процессов» может использоваться преподавателями и учащимися дневной формы получения образования для самостоятельного и дистанционного изучения материала учебной дисциплины «Технология и оборудование литографических процессов».

Программой учебной дисциплины «Технология и оборудование литографических процессов» предусматривается изучение технологических процессов и оборудования фотолитографических процессов, как основного направления литографии, так и основ технологии и оборудования процессов литографии больших энергий, не имеющих широкого практического применения.

Базовыми учебными дисциплинами для изучения являются следующие учебные дисциплины: «Материаловедение», «Технология производства МЭУ», «Оборудование производства МЭУ», «Технология и оборудование термических вакуумно-элионных и плазмохимических процессов».

В результате изучения учебной дисциплины учащийся должен знать:

- сущность процессов литографии;
- методы проведения технологических процессов;
- конструктивные особенности и правила эксплуатации оборудования для фотолитографических процессов;
- причины брака на фотолитографии и их предупреждение;
- пути повышения процента выхода годных изделий на фотолитографии, требования к качеству согласно стандартам серии 1S09000;
- перспективы развития фотолитографии и литографии.

Учащийся должен уметь:

- выполнять основные процессы фотолитографии;
- определять и корректировать режимы процессов;
- выполнять подналадку оборудования при выполнении технологических процессов;
- выполнять контроль качества фотолитографии;
- определять брак, предупреждать пути его возникновения;
- проводить оптимальный подбор технологических режимов процессов.

Выписка из типового учебного плана специальности

по специальности 2-41 01 31

«Микроэлектроника».

утвержденного Министерством образования Республики Беларусь

№150Д/тип от 15.07.2013 года

Учебная дисциплина «Технология и оборудование литографических процессов» изучается на протяжении двух семестров

Виды работ	Количество часов	Количество часов
	6 семестр обучения	7 семестр обучения
Всего часов	60	60
Из них: практических занятий	8	8
лабораторных работ	16	8
курсовое проектирование	-	-
Количество: тематических контрольных работ	-	-
обязательных контрольных работ	1	1
*домашних контрольных работ	-	-
Экзамен	-	-

Междисциплинарные связи



Министерство образования Республики Беларусь
Филиал БНТУ
«Минский государственный политехнический колледж»

УТВЕРЖДАЮ

Директор филиала БНТУ «МГПК»

_____ Квасюк С.А.

**УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ
ЛИТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ»**

Специальность 2-41 01 31 «Микроэлектроника»

Минск
2019

Тематический план

Наименование разделов и тем	Количество часов		
	Всего	В том числе на лабораторные работы	В том числе на практические работы
Введение	2		
Раздел 1 Технология и оборудование литографии	102	40	
1.1 Подготовка пластин перед литографическими процессами	12	4	
1.2 Нанесение и сушка фоторезиста	22	4	4
1.3 Экспонирование фоторезиста	31	8	12
Обязательная контрольная работа №1	1		
1.4 Изготовление литографических шаблонов	10	4	
1.5 Проявление и задубливание фоторезиста	8		
1.6 Травление пленок	10		
1.7 Удаление фоторезиста	8	4	
Раздел 2 Перспективы литографии	16		
2.1 Перспективные методы и материалы литографии	6		
2.2 Литография больших энергий	9		
Обязательная контрольная работа №2	1		
Всего	120	24	16

Содержание учебной дисциплины

Цель изучения раздела, темы	Наименование и содержание раздела, темы	Результат
Введение		
Сформировать общее представление о литографическом процессе и основных этапах литографии, целях и задачах изучения учебной дисциплины.	Цели и задачи изучения учебной дисциплины. Понятие «литография» и «фотолитография». Основные этапы литографии.	Ориентируется в содержании и назначении литографических процессов. Поясняет этапы процессов.
Раздел 1 Технология и оборудование литографии		
Тема 1.1 Подготовка пластин перед литографическими процессами		
Сформировать знания о видах загрязнений на поверхности полупроводниковых пластин (ППП) и методах очистки пластин. Сформировать знания о классификации методов очистки. Дать понятие адгезии, гидрофобной и гидрофильной поверхностей. Сформировать знания о методах обеспечения и определения адгезии. Сформировать знания о назначении и сущности гидромеханической очистки пластин, об основных конструктивных элементах установок гидромеханической очистки пластин (ГМО) – автоматах гидромеханической очистки (АГМО) линии «Лада-125», «Лада-150». Сформировать знания об использовании поверхностно-активных веществ (ПАВ) для обеспечения адгезии, о схеме обработки пластин в парах гексаметилдисилазана (ГМДС). Сформировать знание об основных видах брака ГМО, причинах их возникновения и влияние на качество фотолитографии. Сформировать знание о безопасных приемах работы с ГМДС и моющими растворами.	Обзор и классификация методов очистки пластин. Понятие адгезии. Гидрофобная и гидрофильная поверхности. Методы обеспечения и определения адгезии. ГМО пластин на автоматических линиях «Лада-125» и «Лада-150». Принцип действия и конструктивные элементы АГМО. Контрольные процессы на АГМО. Использование ПАВ. Установка обработки пластин в ГМДС. Виды брака, влияние на качество технологического процесса. Техника безопасности при работе с ГМДС и моющими растворами.	Перечисляет классификацию методов очистки поверхностей ППП. Поясняет на примерах понятия адгезия, гидрофобная и гидрофильная поверхности. Излагает принципы ГМО пластин, очистки пластин в ПАВ. Делает выбор моющих растворов, ПАВ. Излагает конструкцию и принцип действия АГМО «Лада-125» и «Лада-150». Проводит выбор режимов обработки пластин на этих установках. Описывает основные виды загрязнений: пятна, разводы и др. Перечисляет основные виды брака ГМДС, понимает причины их возникновения и влияние на качество фотолитографии. Понимает и может предотвратить возникновение основных вредных и опасных факторов при ГМО.
Лабораторная работа №1 (4 часа)		
Сформировать навыки работы на оборудовании ГМО в имитационном режиме.	Исследование работы оборудования для подготовки пластин перед литографией.	Умеет выбирать режимы и проводить процесс ГМО в имитационном режиме.
Тема 1.2 Нанесение и сушка фоторезиста		
Сформировать знание о назначении, составе и свойствах фоторезистов. Сформировать знание о классификации фоторезистов и их основных характеристиках. Изучить методы нанесения и сушки фоторезиста. Сформировать знание о выборе оптимальных методов в конкретных условиях производства.	Классификация и основные параметры фоторезистов Методы нанесения фоторезиста: пульверизация в электростатическом поле, центрифугирование, погружения, наколки, их достоинства и недостатки. АНФ «Лада-125» и «Лада-	Приводит классификацию фоторезистов. Называет основные характеристики и свойства фоторезистов. Излагает основные методы нанесения и сушки фоторезистов, определяет их возможности, достоинства

Цель изучения раздела, темы	Наименование и содержание раздела, темы	Результат
Сформировать знания об основных конструктивных элементах автоматов нанесения фоторезиста (АНФ) автоматических линий «Лада-125» и «Лада-150». Сформировать знание о принципе работы АНФ и приемах работы на АНФ.	150», конструктивные особенности. Контрольные процессы на АНФ. Сушка и методы сушки фоторезиста. Оборудование для сушки фоторезиста. Виды брака при нанесении фоторезиста и их влияние на качество фотолитографии. Безопасные приемы работы с фоторезистами на АНФ.	и недостатки. Производит выбор метода для конкретных производственных условий. Определяет виды брака, их причины и способы предупреждения. Объясняет влияние брака на качество фотолитографии. Понимает и может предотвратить возникновение основных вредных и опасных факторов при нанесении фоторезиста.
Лабораторная работа №2 (4 часа)		
Научить проводить процесс нанесения фоторезиста на АНФ «Лада-125» в имитационном режиме, проводить выбор оптимальных режимов	Исследование работы оборудования для нанесения фоторезиста.	Знает конструкцию оборудования для нанесения фоторезиста. Умеет проводить процесс в имитационном режиме и выбирать режимы процесса.
Практическая работа №1 (4 часа)		
Научить составлять управляющие программы для совмещения по различным исходным данным.	Составление управляющей программы на АНФ «Лада-150»	Умеет составлять управляющие программы с различными исходными данными.
Тема 1.3 Экспонирование фоторезиста		
Сформировать знание о методах совмещения и экспонирования, их преимущества и недостатки. Сформировать знание о методике контактного совмещения и экспонирования для установки ЭМ 576А. Сформировать знание о методике проекционного совмещения и экспонирования для установок класса ЭМ 584. Сформировать знание об определении параметров операции «совмещения и экспонирования»: точности совмещения, разрешающей способности, масштабе переноса изображения, глубине резкости. Сформировать знание об определении видов и причин брака, их влиянии на качество. Сформировать знания о методах контроля качества.	Методы экспонирования, их преимущества и недостатки. Контактный метод фотолитографии. Установка контактной фотолитографии ЭМ 576А, принцип действия и конструкция. Проекционный метод фотолитографии. Установки типа ЭМ 584, конструктивные отличия. Параметры операции «совмещения и экспонирования»: точность совмещения, разрешающая способность, масштаб переноса изображения, глубина резкости. Виды брака и их влияние на качество фотолитографии. Контроль качества.	Знает методы совмещения и экспонирования, их преимущества и недостатки. Излагает методику контактного совмещения и экспонирования, возможности и ограничения метода. Излагает конструкцию и принцип действия установки ЭМ 576А и установок типа ЭМ 584, их особенности и отличия. Определяет параметры операции «совмещения и экспонирования»: точность совмещения, разрешающую способность, масштаб переноса изображения, глубину резкости. Определяет виды брака фотолитографии и их влияние на качество фотолитографии. Излагает методы контроля качества.

Цель изучения раздела, темы	Наименование и содержание раздела, темы	Результат
Обязательная контрольная работа №1		
Лабораторная работа №3 (4 часа)		
Сформировать навыки работы с практическими методами выполнения совмещения и экспонирования на установке ЭМ 576	Исследование работы установки контактной литографии ЭМ576	Умеет проводить совмещение и экспонирование в имитационном режиме, определять качество процесса.
Лабораторная работа №4 (4 часа)		
Научить определять точность совмещения и контролировать линейные размеры элементов с помощью тестовых структур.	Исследование и контроль точности совмещения и линейных размеров элементов с помощью тестовых структур.	Умеет проводить контроль точности совмещения и линейных размеров элементов с помощью тестовых структур.
Практическая работа №2 (4 часа)		
Научит разрабатывать управляющие программы для установок класса ЭМ584 с различными исходными данными	Составление управляющих программ для установок класса ЭМ584	Умеет составлять управляющие программы для установок класса ЭМ584 с различными исходными данными.
Практическая работа №3 (4 часа)		
Научить разрабатывать программы для определения смещения «нуля» фокусировки и глубины резкости для установок класса ЭМ 584.	Определение смещения «Нуля» фокусировки и глубины резкости для установок типа ЭМ 584	Умеет определять смещение «нуля» фокусировки и глубины резкости для установок класса ЭМ 584.
Практическая работа №4 (4 часа)		
Научить разрабатывать программы для контрольного отъема на повторяющиеся дефекты на установках класса ЭМ 584	Исследование контрольного отъема на повторяющиеся дефекты для установок типа ЭМ 584	Умеет проводить контрольный отъем на повторяющиеся дефекты для установок класса ЭМ 584
Тема 1.4 Изготовление литографических шаблонов		
Сформировать знания о классификации литографических шаблонов и структурной схеме процесса изготовления шаблонов. Сформировать знания о методах генерации изображения на различном оборудовании, дефектах фотошаблонов и их влиянии на качество ТП.	Классификация шаблонов. Структурная схема процесса изготовления шаблонов. Методы генерации. Генератор изображения. Дефекты шаблонов, влияние на качество технологического процесса (ТП). Контроль параметров фотошаблонов.	Знает классификацию литографических шаблонов и структурную схему процесса изготовления шаблонов. Поясняет методы генерации изображения на различном оборудовании. Знает дефекты фотошаблонов и их влияние на качество ТП. Знает методы контроля параметров фотошаблонов.
Лабораторная работа №5 (4 часа)		
Научить проводить подготовку металлизированного промежуточного оригинала (МПО) к работе	Подготовка металлизированного промежуточного оригинала (МПО) к работе	Умеет готовить металлизированного промежуточного оригинала (МПО) к работе
Тема 1.5 Проявление и задубливание фоторезиста		
Сформировать знания о механизме процессов проявления позитивных и	Механизм проявления негативных и позитивных	Понимает механизмы проявления позитивных и

Цель изучения раздела, темы	Наименование и содержание раздела, темы	Результат
<p>негативных фоторезистов. Изучить конструкцию и принцип действия автоматов проявления фоторезиста (АПФ) «Лада-125» и «Лада-150». Сформировать знание о методах задубливания фоторезиста. Познакомить с видами брака и задубливания, и их влиянием на качество ТП</p>	<p>фоторезистов. Методы проявления фоторезиста, из достоинства и недостатки. Конструктивные особенности АПФ «Лада-125» и «Лада-150». Методы задубливания. Ступенчатое и жесткое задубливание. Брак проявления, брак задубливания. Их влияние на качество ТП.</p>	<p>негативных фоторезистов. Знает методы проявления и задубливания фоторезистов. Объясняет конструкцию и принцип действия АПФ «Лада-125» и «Лада-150». Знает виды брака проявления и задубливания. Объясняет их причины и влияние на качество ТП.</p>
Тема 1.6 Травление пленок		
<p>Сформировать знания о методах травления технологических слоев, проведении сравнительного анализа жидкостных и «сухих» методов травления. Сформировать знания о методах травления Si, SiO₂, Si₃N₄, Al, а также многослойных структур. Сформировать знания о методике плазмохимического травления, селективности, профилях травления, обеспечиваемых этим методом. Сформировать знания о видах брака при травлении, их причинах, методах контроля качества травления.</p>	<p>Методы травления. Травители, основные характеристики. Жидкостное травление. Изотропное, анизотропное, селективное травление. Травление Si, SiO₂, Si₃N₄, Al, а также многослойных структур. Плазмохимическое травление. Селективность. Брак травления. Контроль качества.</p>	<p>Характеризует методы травления технологических слоёв. Сравняет жидкостные и «сухие» методы. Знает методику травления Si, SiO₂, Si₃N₄, Al, а также многослойных структур и состав травителей для этих структур. Характеризует метод плазмохимического травления, его селективность, получаемые профили травления. Определяет виды брака травления, причины возникновения брака, Знает методы контроля качества травления</p>
Тема 1.7 Удаление фоторезиста		
<p>Сформировать знание о методах удаления фоторезистов. Сформировать знание о конструктивных особенностях и принципе работы оборудования для жидкостного удаления фоторезиста – установок линии «Кубок», установки ЩЦМЗ.240.212, установки для плазмохимического снятия 08ПХО-100Т-001. Сформировать знание о проведении сравнительного анализа жидкостных и «сухих» методов удаления фоторезиста и выборе оптимального метода в конкретной производственной ситуации.</p>	<p>Методы удаления фоторезиста. Удаление фоторезистов в кислотах и органических растворителях. Плазмохимическое удаление фоторезиста. Установка 08ПХО-100Т-01, конструктивные особенности. Установка ЩЦМЗ.240.212. Конструктивные особенности. Автоматическая линия «Кубок».</p>	<p>Знает методы удаления фоторезиста. Характеризует особенности и основные режимы удаления фоторезиста в кислотах, органических растворителях и плазме кислорода. Знает основные конструктивные элементы и принципы работы установок для жидкостного снятия фоторезиста линии «Кубок», ЩЦМЗ.240.212, установки плазмохимической обработки 08ПХО-100Т-01. Сравняет жидкостные и «сухие» методы удаления фоторезиста, объясняет выбор оптимального</p>

Цель изучения раздела, темы	Наименование и содержание раздела, темы	Результат
		метода удаления фоторезиста.
Лабораторная работа №6 (4 часа)		
Научить проводить контроль качества фотолитографии, определять дефекты процесса и их предполагаемые причины.	Исследование дефектов фотолитографии	Умение контролировать дефекты фотолитографии, называть из предполагаемые причины.
Раздел 2 Перспективы литографии		
Тема 2.1 Перспективные методы и материалы литографии		
Познакомить с «сухими» методами травления технологических слоёв. Дать понятие о безрезисторных технологиях, радиационно-чувствительных резистах, светочувствительных добавках.	«Сухое» травление технологических слоёв. Радиационно-чувствительные резисты. Безрезисторная технология. Светочувствительные добавки.	Знает назначение и методику «сухого» травления технологических слоёв. Поясняет назначение и область применения безрезисторных технологий, светочувствительных добавок.
Тема 2.2 Литография больших энергий		
Познакомить с основами методов электролитографии, рентгенолитографии, ионолитографии, областью их применения, достоинствами и недостатками.	Электролитография. Область применения. Принцип рентгенолитографии, достоинства и недостатки. Ионолитография, принцип метода, достоинства и недостатки.	Поясняет принцип методов электролитографии, рентгенолитографии, область их применения, достоинства и недостатки
Обязательная контрольная работа №2		

**Перечень
существенных и несущественных ошибок
по учебной дисциплине «Технология производства микроэлектрон-
ных устройств»
для специальности 2-41 01 31 «Микроэлектроника»**

Существенные ошибки:

В изложении теоретического материала:

- ошибки в характеристике этапов фотолитографии;
- ошибки в изложении физико – химических основ литографических процессов;
- ошибки в характеристике методов и критериев контроля качества фотолитографических процессов;
- ошибки в выявлении причин забракований и направлений предотвращения брака;
- ошибки в изложении конструктивных основ современного оборудования литографии

В изложении практического материала:

- ошибки в реализации алгоритма технологического процесса;
- ошибки в проведении аттестационных процессов;
- ошибки в выборе методики контроля качества технологического процесса, приводящие к увеличению или пропуску брака;
- ошибки в расчетах, приводящие к искажению результатов

Несущественные ошибки:

В изложении теоретического материала:

- ошибки в характеристике конкретных значений вспомогательных режимов процессов;
- ошибки в определении влияния качества фотолитографии на надежность интегральных микросхем;
- ошибки в выборе оптимальной методики анализа брака.

В изложении практического материала:

- ошибки в выборе рациональной методики контроля качества технологического процесса, не приводящие к увеличению или пропуску брака;
- ошибки в расчетах, не приводящие к искажению результатов;
- нерациональные приемы работ со справочной литературой;
- наличие опечаток (менее 5);
- неточность в оформлении работ;
- небрежное выполнение записей, схем, рисунков;
- присутствие единичных грамматических ошибок

Перечень разделов и тем учебной программы

Введение

Раздел 1 Технология и оборудование литографических процессов

Тема 1.1 Подготовка пластин перед литографическими процессами

Тема 1.2 Нанесение и сушка фоторезиста

Тема 1.3 Экспонирование фоторезиста

Тема 1.4 Изготовление литографических шаблонов

Тема 1.5. Проявление и задубливание фоторезиста

Тема 1.6. Травление пленок

Тема 1.7. Удаление фоторезиста

Раздел 2 Перспективы литографии

Тема 2.1 Перспективные методы и материалы литографии

Тема 2.2 Литография больших энергий

Введение

Массовое производство изделий микроэлектроники невозможно без литографических операций. Это в равной мере относится как к дискретным полупроводниковым приборам (диоды, транзисторы) так и к интегральным микросхемам любой сложности (ИС, БИС, СБИС).

Более того, при исключительной важности абсолютно всех технологических операций, процессы литографии в первую очередь определяют качество выпускаемой продукции и научно-технического уровня производства в целом.

Сущность литографии — создание микрорельефа требуемой конфигурации на поверхности подложки либо тонкой пленки.

Литография в электронной промышленности развивалась от производства печатных плат до изготовления СБИС путем совершенствования технологических процессов воспроизведения геометрии рисунка, оборудования и материалов. Современная литография позволяет получать микрорельеф с размерами элементов вплоть до нескольких микрометров, а в отдельных случаях до долей микрометра (так называемая субмикронная технология).

Несмотря на то, что прецизионная литография основана на автоматизированном высокоточном оборудовании, квалификация оператора и уровень его профессиональной подготовки в первую очередь определяют качество процесса и сам конечный продукт литографии.

Литография — это процесс формирования в чувствительном (светочувствительном) слое рельефного рисунка, повторяющего топологию интегральной микросхемы или полупроводникового прибора и последующего переноса этого рисунка на подложку.

Процесс литографии состоит из двух стадий:

- формирование необходимого рисунка элементов в слое чувствительного вещества (резиста) путем его экспонирования и дальнейшего проявления;
- травление через резистный рисунок нижележащего технологического слоя (диэлектрическая, металлическая, эпитаксиальная пленки, пленка поликремния).

Классификация методов литографии приведена на рисунке 1.

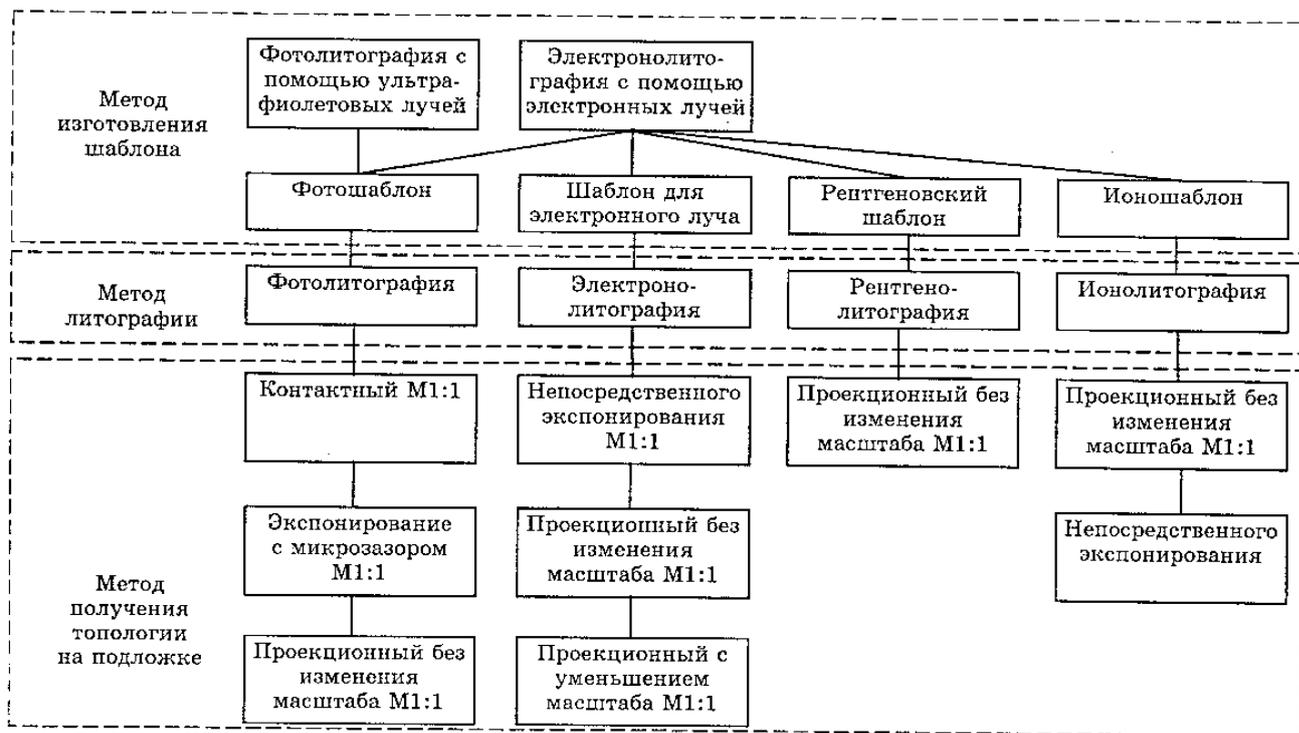


Рисунок 1- Классификация методов литографии

Раздел 1 Технология и оборудование литографических процессов

Тема 1.1 Подготовка пластин перед литографическими процессами

Качество очистки поверхности технологического слоя перед нанесением фоторезиста во многом определяет качество всего фотолитографического процесса.

Источниками загрязнения поверхности подложки являются: абразивные, смазочные и клеящие материалы, используемые при механической обработке полупроводниковых подложек; пыль, водяные пары, пары масел и другие загрязнения, попадающие из атмосферы производственных помещений; технологически среды (газы, вода, химические реактивы), в которых обрабатывают полупроводники; инструмент, оснастка, тара, с которыми соприкасаются полупроводниковые пластины. Продукты дыхания, отпечатки пальцев, кремы, пудра и другие косметические средства также сильно загрязняют поверхности полупроводниковых подложек.

Все поверхностные загрязнения можно разделить на молекулярные, ионные и атомные.

К молекулярным загрязнениям относятся органические (натуральный и синтетический воски, смолы, масла, жиры, остатки фоторезиста, растворители и т.д.) и механические (пыль, абразивные частицы, ворсинки, частицы металлов, полупроводников, кварца и других технологических материалов) загрязнения; пленки химических соединений (оксиды, сульфиды, нитриды и т.д.), образующиеся при химической и термической обработках и хранении полупроводниковых пластин. Молекулярные загрязнения закрепляются на поверхности электростатически. Исключение составляют пленки химических соединений, имеющие прочную химическую связь с поверхностью полупроводника. Молекулярные загрязнения вызывают технологический брак. Остатки их снижают качество процессов фотолитографической обработки (увеличивают число дефектных модулей) и вызывают быстрый износ фотошаблонов. Нерастворимые в воде органические загрязнения делают поверхность гидрофобной (не смачиваемой), что препятствует ее очистке от ионных и атомарных примесей.

К ионным загрязнениям относятся растворимые в воде соли, кислоты и основания, которые осаждаются на поверхности из травильных и моющих растворов, образуя с ней физическую и химическую связи.

К атомарным загрязнениям относят атомы металлов (золото, серебро, медь, железо), осаждающиеся в виде металлических микрочастиц из термических реактивов. При изготовлении БИС используют в основном химикаты и реактивы марки «ОСЧ» (особо чистые), реже используют химикаты «ХЧ» (химические чистые) и «ЧДА» (чистые для анализов). Химические материалы марки «Ч» (чистые) применяют только для обработки вспомогательных деталей, инструментов и оснастки, используемых в фотолитографии. Для дополнительной очистки материалов «ОСЧ», «ХЧ» и «ЧДА» непосредственно на рабочих местах используется фильтрация с помощью насосов для агрессивных жидкостей.

Фильтруют агрессивные жидкости с помощью фильтров, которые подразделяются на мембранные и патронные и имеют диаметр сквозных пор от 0,2 до 1 мкм. Распространенный в отрасли мембранный фильтр ФПП-03-3/20 выполнен на основе ткани Петряинова. Объемные или патронные фильтры, нашедшие широкое применение в производстве выполнены из фторопластовых мембран.

Чистота воды, используемой в фотолитографии при отмывке и остановке химических реакций, а также компонент травителей также должны быть исключительно высокой. Основными показателями чистоты воды являются удельное сопротивление, окисляемость и содержание кремний-кислот. По уровню удельного сопротивления различают три марки воды: А — 18 Мом см, Б — 10 Мом см, В — 1 Мом см.

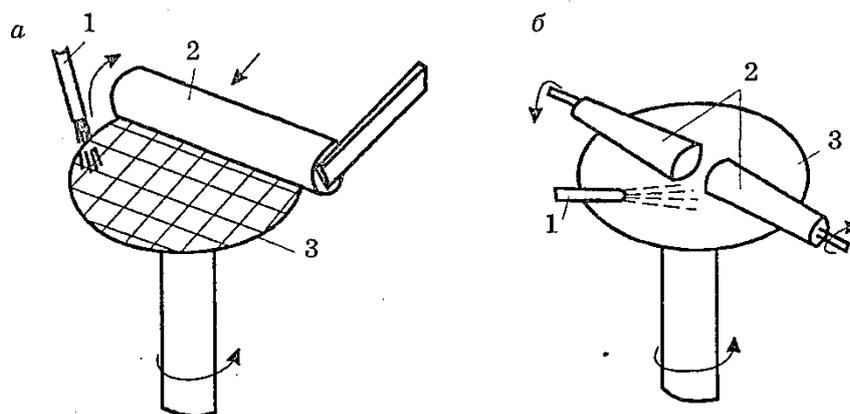
Высокое удельное сопротивление свидетельствует об отсутствии носителей заряда (тока) в воде, каковыми в основном являются ионы металлов и кислот. Очистка воды от ионов достигается путем ее пропускания через анионитные и катионитные смолы. Такую воду называют деионизованной.

В фотолитографии используют деионизованную воду со следующими параметрами:

- удельное сопротивление — не менее 18 Мом см;
- содержание микрочастиц размером 2 мкм — не более 10 шт/мл;
- содержание микроорганизмов — не более 1 мол/мл;
- содержание кремнекислот — не более 0,09 мл/л;
- содержание меди — не более 0,005 мг/л;
- содержание железа — не более 0,008 мг/л;
- окисляемость — не более 0,5 мл/л.

Обычно на поверхности полупроводниковой подложки присутствуют все виды загрязнений: молекулярные, ионные, атомные.

Поверхностные загрязнения удаляют: механическим способом с помощью кистей и щеток, под струей воды (гидромеханическая отмывка, рисунок 2); ультразвуковой отмывкой; потоком жидкости и газа; растворением в органических растворителях; обработкой в растворах поверхностно активных веществ. Кроме этого, используются обработки в неорганических кислотах (азотной, серной, соляной, фтористоводородной) для удаления ионов металлов. Вышеуказанные способы обработки не позволяют по отдельности решить задачу очистки сразу от всех видов загрязнений, поэтому их надо применять в комплексе. В технологии ИС фотолитографии подвергаются в основном технологические слои кремния, диоксида кремний, нитрида кремния, алюминиевой разводки и пленок фосфорносиликатного стекла. Вышеуказанные способы обработки не позволяют по отдельности решить задачу очистки сразу от всех видов загрязнений, поэтому их надо применять в комплексе. В технологии ИС фотолитографии подвергаются в основном технологические слои кремния, диоксида кремний, нитрида кремния, алюминиевой разводки и пленок фосфорносиликатного стекла.



- 1 — форсунка,
 2 — щетки,
 3 — подложка

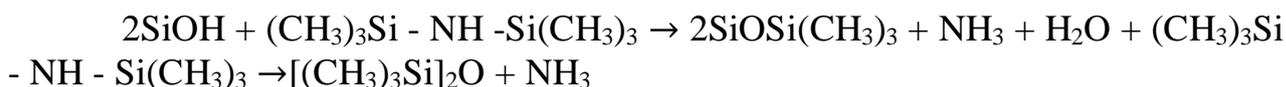
Рисунок 2- Схемы гидромеханической отмывки подложек цилиндрической (а) и конической (б) щетками

Адгезия — это способность слоя фоторезиста препятствовать проникновению травителя к подложке по периметру создаваемого рельефа рисунка элементов. Критерием адгезии является время отрыва слоя фоторезиста заданных размеров от подложки в ламинарном потоке травителя. В большинстве случаев адгезию считают удовлетворительной, если слой фоторезиста 20x20 мкм отрывается за 20 мин.

Таким образом, понятие адгезии в фотолитографии специфично. Оно несколько отличается от общепринятого понятия адгезии, когда ее величину определяют силой отрыва пленки от подложки. Об адгезии фоторезиста к подложке можно судить по краевому углу смачивания, который определяется качеством обработки поверхности. Плохо обработанная поверхность сворачивает воду в шарики (вода не растекается), т.е. образует угол смачивания 90°. Такую поверхность называют гидрофобной. Если капля воды на поверхности растекается с углом смачивания менее 40°, поверхность обработана хорошо и ее называют гидрофильной.

При фотолитографии необходимо, чтобы поверхность подложки была гидрофильна по отношению к фоторезисту и гидрофобна к травителю, тогда вытравленный рисунок будет точно повторять рисунок фотошаблона. Сразу после термического окисления пленка диоксида кремния гидрофобна. Однако через некоторое время на ней адсорбируются молекулы воды из атмосферы. Поверхность становится гидрофильной, образовавшаяся водяная пленка препятствует адгезии фоторезиста к поверхности диоксида кремния. Поэтому для улучшения адгезии подложки перед нанесением фоторезиста термообработывают при 700-800°C в сухом инертном газе или вакууме. Подложки с пленками ФСС термообработывают при 100-500°C в течение 1 ч в сухом инертном газе или вакууме. Режим термообработки выбирают в зависимости от конкретной технологии и конструкции микронэлектронного изделия. Для удаления влаги с поверхности применяют также гексаметилдисилоксан (ГМДС) — $(\text{CH}_3)_3\text{Si} - \text{NH} - \text{Si}(\text{CH}_3)_3$, который хорошо гидролизуется влагой воздуха

На поверхности подложки протекают следующие реакции:



Θ , град

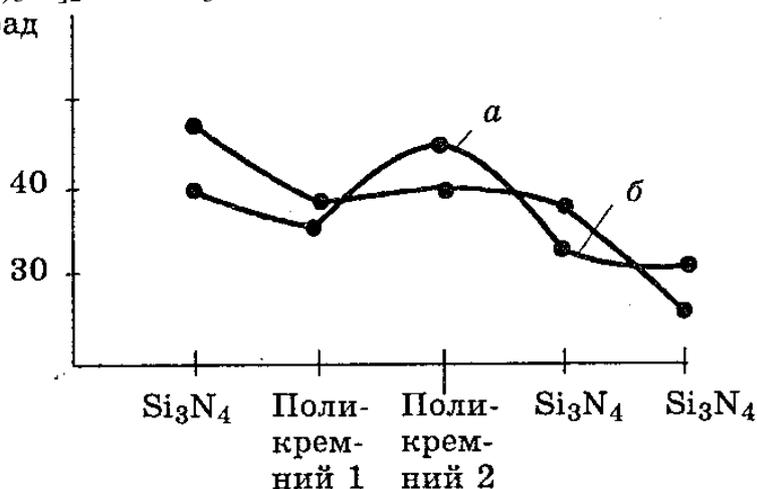


Рисунок 3- Влияние метода подготовки поверхности пластин на угол смачивания Θ : *a* — высокотемпературный отжиг; *б* — гидромеханическая обработка деионизованной водой и парами ГМДС

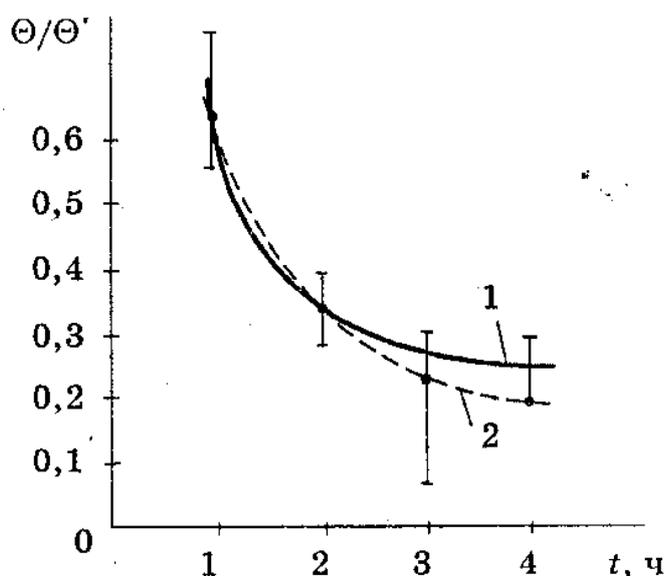


Рисунок 4- Зависимость Θ/Θ' от времени при воздействии на подложки паров ГМДС (1) и после хранения этих подложек в течение 24 ч (2); Θ' — угол смачивания по воде после обработки парами ГМДС

В первой реакции образуется аммиак и новая группа Si - O - Si(CH₃)₃ со строго ориентированными функциональными группами CH₃, обладающими большой инертностью к молекулам другого вещества. Вода не адсорбируется на поверхности подложки, обработанной ГМДС, и фоторезист имеет хорошую адгезию к подложке. Во второй реакции образуем гексаметилдисилоксан и аммиак, которые испаряются с поверхности подложки. Обычно подложки обрабатывают в парах

ГМДС при нагреве с последующим центрифугированием с частотой 3000-6000 об/мин. Срок хранения обработанных подложек перед нанесением фоторезиста не должен превышать 15 ч.

Контроль качества подготовки поверхности

В процессе очистки следует непрерывно производить выборочный контроль качества обработанной поверхности. Различают прямые и косвенные методы контроля качества очистки. При прямых методах определяют загрязнения непосредственно на очищаемых поверхностях. Обычно это делается исследованием образцов в темном поле микроскопа. При обследовании поверхности под «косым» пучком осветителя в темном поле микроскопа лучи света, падающие под углом к поверхности, рассеиваются инородными частицами и делают их различимыми в виде светящихся точек, число которых контролируют обычно на всей поверхности или на единице площади (1 см^2). Их плотность не должна превышать 10 см^2 . Чистоту поверхности проверяют методами окунания в чистую воду, распыления воды, запотевания, конденсации и измерения угла смачивания. При окунании в чистую воду очищенная поверхность, свободная от жировых загрязнений, вследствие адгезии способна удержать сплошную пленку воды. Жировые загрязнения делают поверхность гидрофобной и нарушают целостность пленки, что обычно наблюдают визуально после стекания воды с поверхности извлеченной подложки. Аналогичное явление наблюдается при распылении чистой воды на сухую очищенную поверхность. Чистую поверхность вода сразу же покрывает сплошным слоем, а на грязной удерживается в виде отдельных пятен. Такой метод распыления в несколько раз чувствительнее метода окунания, так как позволяет обнаружить загрязнения малых размеров. Метод запотевания основан на визуальном наблюдении поверхности пластины после обдува влажным воздухом. Влага, конденсируемая на поверхности, образует «фигуры запотевания». При наличии загрязнений поверхность покрыта мелкими каплями воды («серая фигура запотевания»), при хорошем качестве ее отмывки — сплошной пленкой воды («черная фигура запотевания»). Метод конденсации основан на аналогичном наблюдении поверхности, но при этом пластину охлаждают жидким азотом до температуры ниже точки росы. Смачивание поверхности конденсатом из воздуха наблюдается после таяния инея. Угол смачивания очищенной поверхности каплей воды определяют теневым методом на установке УКСУС-1, на экране которой проецируется изображение (профиль) капли на поверхности. На гидрофильной поверхности капля растекается и угол смачивания составляет $1-3^\circ$, на гидрофобной — остается в форме шарика, угол смачивания составляет 90° . В реальном случае угол промежуточен.

Метод трения основан на измерении усилия, необходимого для перемещения металлической иглы по поверхности пластины. Органические загрязнения работают как смазка и уменьшают силу трения при перемещении, на чистой поверхности коэффициент трения значительно выше. Этот метод является разрушающим (царапает поверхность), поэтому выполняется только на пластинах-спутниках.

Косвенные методы основаны на удалении загрязнений с поверхности растворителями или травителями и дальнейшем качественным и количественным анализом полученного раствора. Косвенные методы используются только в лабораторных исследованиях.

Тема 1.2 Нанесение и сушка фоторезиста

Фоторезисты — светочувствительные полимерные композиции, в которых под действием света протекают необратимые химические процессы, приводящие к изменению их физических и химических свойств. Внешним проявлением действий света на такие композиции является изменение характера их растворимости.

В состав фоторезистов входят светочувствительные и пленкообразующие вещества, а также растворители.

В негативных фоторезистах (ФН) растворимость экспонированного участка уменьшается, а в позитивных фоторезистах (ФП) возрастает.

Основу образования рельефного рисунка фоторезиста составляют:

1) фотополимеризация — образование нерастворимых участков. Это типично для ФН на основе поливинилцианамата;

2) сшивание линейных полимеров радикалами, образующимися при фотолизе светочувствительных соединений. Это типично для ФН на основе каучуков с добавками светочувствительных соединений;

3) фотолиз светочувствительных соединений с образованием растворимых веществ. Это типично для ФП на основе нафтохинондиазида.

К важнейшим параметрам фоторезистов относятся следующие:

1 Светочувствительность — величина, обратная экспозиции (количеству световой энергии), требуемой для перевода фоторезиста в растворимое (для ФП), или нерастворимое (для ФН) состояние. После экспонирования проявитель взаимодействует как с облученными, так и с необлученными участками, поэтому процесс проявления существенно влияет на светочувствительность.

Фоторезисты характеризуются также пороговой светочувствительностью, определяющей начало фотохимической реакции. Светочувствительность и пороговая светочувствительность определяются не только физико-химическими свойствами самого фоторезиста, но и конкретными условиями фотолитографии (толщина слоя фоторезиста, состав и концентрация проявителя, температура процесса и т.д.). Поэтому светочувствительность определяют экспериментально, измеряя скорость проявления фоторезиста в зависимости от степени его облучения.

2 Разрешающая способность — максимальное количество линий одинаковой ширины, разделенных промежутками той же ширины, которые можно получить в данном фоторезисте на отрезке длиной 1 мм. Разрешающую способность определяют также экспериментально с помощью специальных фотошаблонов со штриховым рисунком различного шага. При этом выбирают тот участок хорошего качества проявления, где количество линий максимально (или где шаг минимальный).

Разрешающая способность определяется также не только самим фоторезистом, но и процессом фотолитографии, который зависит от режимов травления технологического слоя. Поскольку конечной целью фотолитографии является не рисунок фоторезиста, а рисунок технологического слоя, то на практике

нужно ориентироваться на разрешающую способность процесса фотолитографии.

При наиболее распространенной для кремния эпитаксильно-планарной технологии разрешающую способность принято оценивать по травлению слоя диоксида кремния толщиной 0,5-1 мкм. В этом случае лучшие современные фоторезисты обеспечивают разрешающую способность до 1500-2000 линий/мм, что позволяет получать субмикронный рисунок с размерами элементов до одного микрометра.

3 Стойкость к воздействию агрессивных сред (например, кислотостойкость). Это понятие не имеет общего определения.

В частном случае может означать то максимальное время, которое выдерживает фоторезист в травителе до начала отслаивания его с поверхности подложки. Поскольку эта стойкость в первую очередь определяется дефектностью слоя (пористостью), то на практике ее обычно определяют, как плотность дефектов на 1 мм², передающихся при травлении на подложку. Часто стойкость определяют, как устойчивость к стандартному травителю. Она должна быть как минимум на порядок выше реального времени травления в таком травителе.

4 Стабильность эксплуатационных свойств во времени (срок службы при правильных условиях хранения и эксплуатации). К основным свойствам фоторезистов относятся спектры поглощения и характеристические кривые. Спектры поглощения (рис.4.) определяют тип источников экспонирования и помогают выбрать материал для экранирования пластин с фоторезистом от засвечивания при хранении. При экспонировании слоя резиста вид спектра поглощения изменяется.

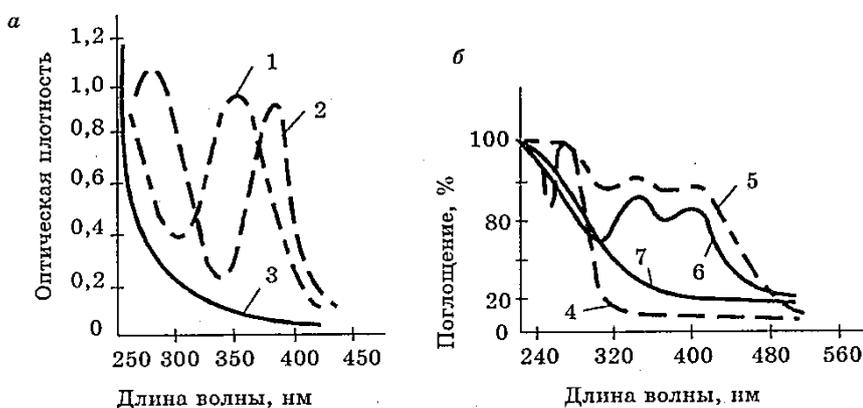


Рисунок 5 - Спектры поглощения: а — негативного фоторезиста, б — позитивного фоторезиста:

1 — каучук с бисазидом; 2 — сенсibilизированный ПВХ поливинилцианамат; 3 — экспонированный резист; 4 — новолочная смола №18 (0,73 мкм); 5 — ФР на основе НХД №7 (1,7 мкм); 6 — НХД (нафтохинондиазид) №7 (0,17 мкм) до экспонирования; 7 — то же после экспонирования

После проявления изменяется толщина фоторезиста, причем это изменение во многом определяется экспозицией. Характеристические кривые (рис.5) позволяют определить ряд важных параметров. Кривая 1 показывает, как увеличивается толщина негативного фоторезиста по мере роста экспозиции. Из этой кривой находят следующие параметры: чувствительность $s = 1/H_2$, где

H_2 — экспозиция, при которой слой полностью задублен (или разрушен в случае позитивного фоторезиста); контрастность $\gamma = (h_2 - h_1) / (H_2 - H_1)$ и фотографическую широту $L = H_2 - H_1$, где — экспозиция, при которой начинается сшивание или разрушение слоя.

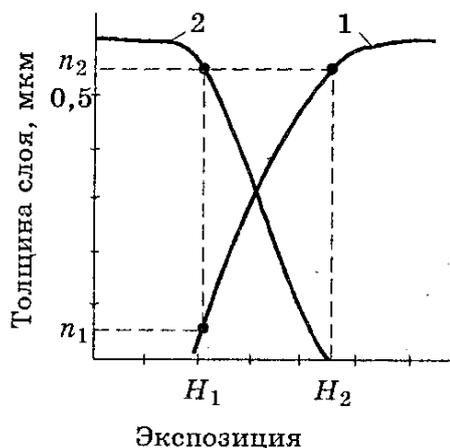


Рисунок 6 - Характеристические кривые для негативного (1) и позитивного (2) фоторезистов

Для позитивного фоторезиста можно снять аналогичную кривую (кривая 2 на рисунок 6). Более полную информацию о поведении позитивного фоторезиста дает зависимость скорости проявления от экспозиции, которую также называют характеристической. При работе с ФП важно, чтобы слой находился в травителе минимальное время (при этом число дефектов минимально), т.е. следует определить экспозицию, обеспечивающую максимальную скорость проявления.

При экспонировании ФН по краю рисунка часто возникает характерный ореол, вызванный отражением света от подложки. В проявителе пленка ФН набухает, что приводит к искажению размеров. При выборе типа фоторезиста большое значение имеют не только разрешающая способность, но и кислото- или щелочестойкость. Позитивные фоторезисты не выдерживают щелочных травителей. Негативные фоторезисты устойчивы к воздействию кислот и щелочей, особенно ФН на основе каучуков. Нашей промышленностью используются как импортные (AZ 1350, AZ 1450), так и отечественные ФН и ФП.

Отечественной промышленностью серийно выпускаются позитивные (ФП-383, ФП-РН-7, ФП-25, ФП-051МК, ФП-151МК) и негативные (ФН-5ТК, ФН-11, ФН-11К, ФН-4ТВ) фоторезисты. В электронной промышленности используются чаще позитивные.

Приведем характеристики некоторых из них.

Фоторезисты ФП-383, ФП-330 — вязкие прозрачные жидкости оранжевого цвета, представляющие собой растворы светочувствительных продуктов и новолачной смолы в диоксане. Вязкость при 293 К равна $(5,9 + 0,5) \cdot 10^{-6}$ м²/с; разрешающая способность 400 лин/мм; кислотостойкость пленки толщиной 1 мкм характеризуются плотностью дефектов диоксида кремния и для ФП-330 равна 0,75 мм², для ФП-383 — 0,5 мм². Устойчивость в проявителе (2%-ный водный раствор тринатрийфосфата) необлученной пленки фоторезиста составляет 60 с.

Светочувствительные продукты — порошки желтого цвета, содержащие до 5% азота; 0,6% влаги и 1,5% нерастворимых соединений.

Фоторезист ФП-РН-7 — прозрачная жидкость темно-оранжевого цвета, представляющая собой раствор светочувствительного ортонафтохинондиазида и фенолформальдегидных смол в смеси органических растворителей. Содержание сухого осадка 20%; вязкость при 293 К равна $(2,28-2,54) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; плотность $0,9 \text{ г/см}^3$; разрешающая способность при толщине пленки фоторезиста $0,7-0,8 \text{ мкм}$ равна 500 линий/мм. Маскирующие свойства фоторезиста в буферном травителе при толщине пленки $0,7 \text{ мкм}$, определяемые как плотность проколов в пленке, не превышают 3%.

Операция нанесения фоторезиста на подготовленную подложку представляет собой процесс создания однородного слоя толщиной 1-3 мкм. От качества фоторезистивной пленки во многом зависит качество проведения всех фотолитографических операций: четкость края, отсутствие невытравленных участков, количество проколов (пор) на элементах схемы и т.д. Поэтому к технологической операции нанесения фоторезиста представляют исключительно жесткие требования:

- 1) чистота среды и отсутствие загрязнений в растворе фоторезиста;
- 2) условия хорошей адгезии фоторезистивной пленки к подложке;
- 3) высокая равномерность толщины пленки фоторезиста по всей поверхности подложки.

В настоящее время для нанесения фоторезиста на подложку в серийном производстве используется в основном метод скоростного центрифугирования. Такие методы, как пульверизация, напыление в электростатическом роле, накатка сухого фоторезиста недостаточно хорошо отработаны для производственных условий.

Метод центрифугирования (рисунок 7) основан на растекании фоторезиста под действием центробежных сил. Прилегающий к подложке граничный слой формируется в результате уравнивания центробежной силы, пропорциональной частоте вращения, и силы сопротивления, зависящей от прочности связей между молекулами резиста.

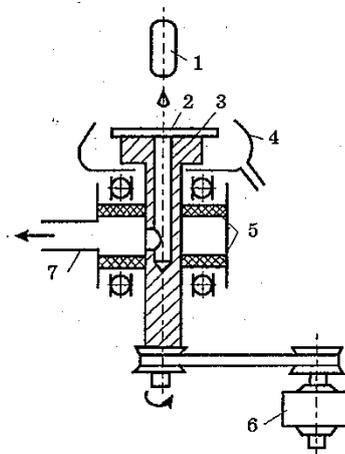


Рисунок 7 - Установка нанесения слоя фоторезиста центрифугированием: 1 — дозатор (капельница); 2 — подложка; 3 — столик; 4 — кожух для сбора

избытка фоторезиста; 5 — вакуумные уплотнители; 6 — электродвигатель; 7 — трубопровод к вакуумному насосу

Подложка устанавливается на столике центрифуги и удерживается на нем вакуумной присоской. Фоторезист подается каплями из дозатора. При вращении пластины фоторезист растекается по всей поверхности подложки, а его излишки сбрасываются и стекают в кожух. Толщина полученного слоя зависит от вязкости и скорости вращения центрифуги. Метод центрифугирования позволяет формировать резистивный слой на подложке диаметром до 350 мм с отклонением в центральной ее части 0,05 мкм от общей толщины 0,86 мкм. Формирование слоя происходит в течение 20-30 с. При подаче фоторезиста из дозатора на неподвижную подложку время между нанесением резиста и включением центрифуги должно быть минимальным (0,5-1 с), чтобы вязкость резиста не менялась в результате его испарения. Толщина и качество слоя определяются типом фоторезиста и его вязкостью, максимальной частотой вращения, ускорением и замедлением центрифуги, температурой и влажностью окружающей среды, свойствами поверхности подложки. Ускорение центрифуги влияет на равномерность толщины формируемых резистивных слоев. Время достижения заданной частоты вращения центрифуги реально изменяется в пределах 0,1-3,6 с. При более высоких ускорениях пленка получается тоньше и равномернее по всей поверхности подложки. Утолщение слоя фоторезиста у края подложки (валик) уменьшается при увеличении частоты вращения. Длительное центрифугирование приводит к неравномерностям толщины слоя. Это связано с увеличением вязкости фоторезиста за счет испарения растворителя во время длительного центрифугирования. Начальная стадия центрифугирования, включая время, в течение которого происходит изменение скорости, оказывает влияние на формирование слоя фоторезиста.

Процесс формирования происходит в три этапа.

1 Растекание резиста. Доза резиста, подаваемая в центр вращения, растекается по ее поверхности неравномерно. Причина — большое начальное ускорение на самых первых оборотах центрифуги, в результате чего из-за влияния сил вязкости образуется пограничный слой. Область фоторезиста, на которую мало влияет его вязкость, в начальный момент вращения пластин под действием центробежных сил смещается от центра, а в дальнейшем ее площадь и смещение увеличиваются. Поверхность подложки полностью покрывается уже на втором - третьем обороте вращения. В это же время начинается сбрасывание излишков фоторезиста.

2 Сбрасывание излишков фоторезиста. Поскольку доза (капля) смещена относительно центра еще до попадания на поверхность, сброс излишков резиста начинается на краю пластины с небольшой дуги, которая постепенно увеличивается, но не замыкается в окружность. Сбрасывание излишков регулируется ускорением и частотой вращения.

3 Формирование профиля. Полученный профиль следует сохранять в течение операции нанесения, не допуская появления «лучевого разбега» и образования краевого валика. Качественный (однородный) профиль фоторезиста

получают медленным или двухступенчатым (сначала медленным, а затем быстрым) изменением скорости вращения центрифуги.

Метод пульверизации (рисунок 8) основан на нанесении фоторезиста распылением с помощью форсунки. Метод позволяет осуществить обработку подложек в автоматическом режиме, и этим перспективен. Он обеспечивает слои толщиной 0,3-20 мкм с точностью $\pm 5\%$. Он обеспечивает возможность изменения толщины в широких пределах, отсутствие утолщений (валиков) по краям, возможность изменения толщины в широких пределах, нанесение резиста на профилированные подложки, экономный его расход, хорошую адгезию. Недостатки метода: требуется подбор специального растворителя, не позволяющего фоторезисту растекаться по подложке и одновременно не затрудняющего выдувание фоторезиста из сопла форсунки; требуется особенно тщательная очистка фоторезиста и продувочного газа.

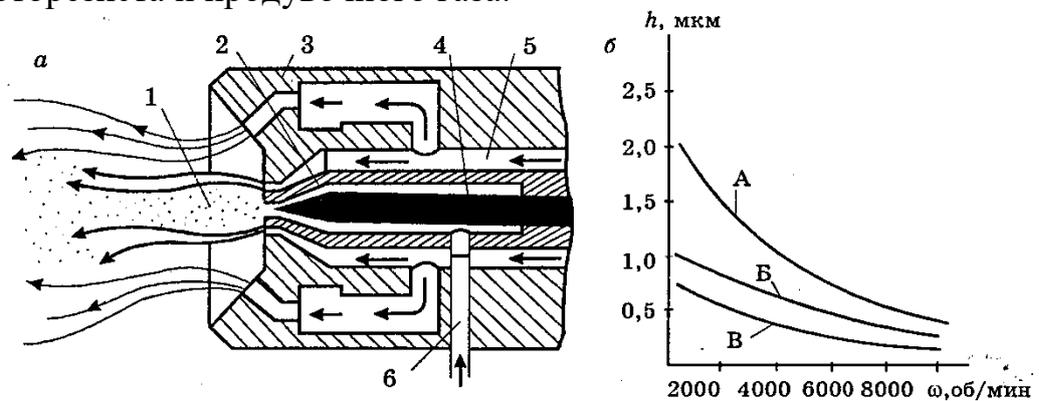


Рисунок 8 - Схема нанесения слоя фоторезиста пульверизацией (а) и зависимость толщины слоя фоторезиста от частоты вращения центрифуги при различных коэффициентах его вязкости (б): 1 — область разрежения, 2 — сопло, 3 — форсунка, 4 — регулирующая игла, 5 — распыляющий газ, 6 — канал для подачи фоторезиста;

А — $v = 0,05$ см/с, Б — $v = 0,04$ см/с, В — $v = 0,02$ см/с

В электростатическом методе (рисунок 9) фоторезист, как и в методе пульверизации, диспергируется с помощью форсунки, а получаемые при этом капли диаметром около 10 мкм дополнительно заряжаются на подложке электрическим полем. При этом напряженность электрического поля достигает 1-5 кВ/см. Метод производителен и позволяет обрабатывать большие площади, однако невоспроизводим по параметрам, что сдерживает его применимость в серийном производстве.

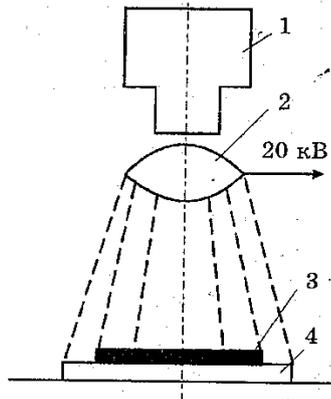


Рисунок 9 - Нанесение фоторезиста в электрическом поле: 1 – форсунка, 2 – кольцевой электрод, 3 – подложка, 4 – столик.

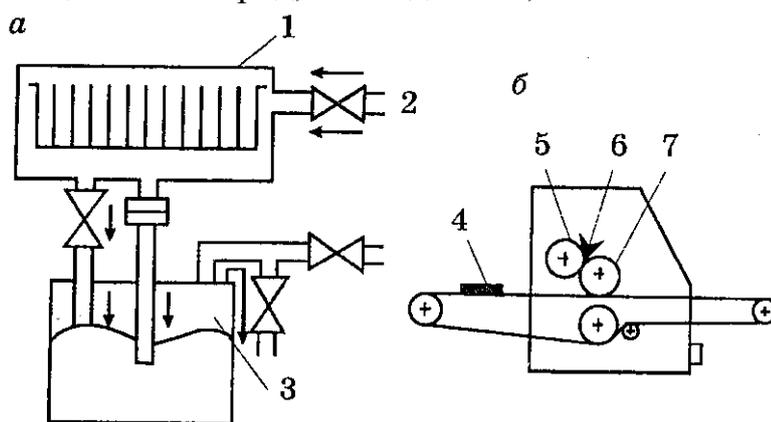


Рисунок 10 - Способы нанесения ФР: а – окунание; б – накатки валиком: 1,4 – подложки; 2 – фильтрованный сжатый воздух; 3 – емкость для сбора ФР; 5 – ведущий ролик; 6 – подача ФР; 7 – ролик нанесения

В электростатическом методе фоторезист, как и в методе пульверизации, диспергируется с помощью форсунки, а получаемые при этом капли диаметром около 10 мкм дополнительно заряжаются на подложке электрическим полем. При этом напряженность электрического поля достигает 1-5 кВ/см. Метод производителен и позволяет обрабатывать большие площади, однако невоспроизводим по параметрам, что сдерживает его применимость в серийном производстве. Методы полива, окунания, накатки валиком, практически не применимы в серийном производстве СБИС из-за невоспроизводимости результатов и трудности получения слоев толщиной около одного микрометра.

Общим недостатком всех способов нанесения жидких фоторезистов является трудность получения сплошных (непористых) пленок толщиной около микрометра. Накатка сухого фоторезиста обеспечивает хорошие результаты только при толщинах фоторезиста 15-20 мкм, а посему практически неприменима в технологии БИС.

Сушка фоторезиста

Окончательному формированию структуры слоя фоторезиста, при котором происходит удаление растворителя, способствует сушка. При сушке в фоторезисте происходят сложные релаксационные процессы, уплотняющие молекулярную структуру слоя, уменьшающие внутренние напряжения и повышающие его адгезию к подложке. Неполное удаление растворителя из слоя фоторезиста снижает его кислотостойкость, так как при дальнейшем экспонировании молекулы растворителя экранируют нижележащий слой, и после проявления, например, позитивного фоторезиста способствуют появлению нерастворимых областей. Правильно организованная сушка должна обеспечивать непрерывный уход растворителя к поверхности слоя и дальнейшее его испарение с поверхности. Уплотнение структуры должно происходить в направлении от подложки к поверхности фоторезиста, полностью вытесняя из него растворитель. Очень важно при этом, чтобы градиент температуры был направлен от поверхности к пластине. В противном случае на высыхающем фоторезисте образуется своеобразная "корка", которая будет препятствовать выходу растворителя из ниже-

лежащих мокрых слоев. В этом случае растворитель уходит из фоторезиста в виде пузырьков, делая пленку пористой. Температура сушки очень сильно влияет как на время экспонирования, так и на точность передачи рисунка (рисунок 11).

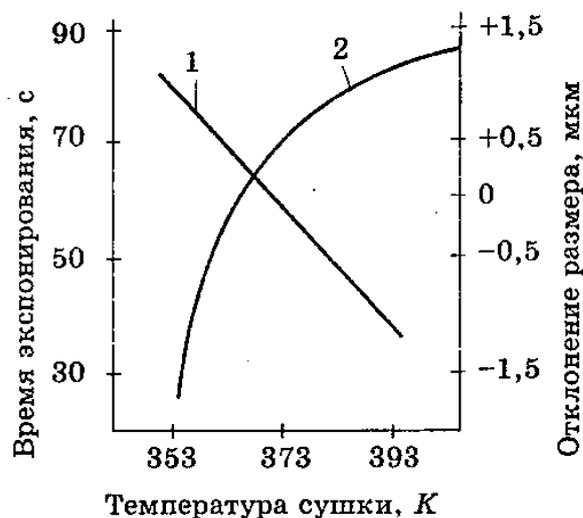


Рисунок 11 - Зависимость времени экспонирования (1) и точности передачи размера элемента (2) от температуры сушки

Режимы сушки (температура, время, скорость подъема и спада температуры) подбирают экспериментально в каждом конкретном случае. Существуют следующие виды сушки слоев фоторезиста:

1 Конвективная сушка, осуществляемая в термостатах, при температурах около 100°C. Здесь градиент температуры направлен от пластины к поверхности фоторезиста, из-за чего на ней образуется указанный выше сухой слой («корка»). Образование его можно затормозить, если приготовить фоторезист на основе смеси растворителей с различной летучестью. В зависимости от состава и толщины фотослоя при конвективной сушке требуется выдержка в течение 10-60 мин. Недостаток метода — низкое качество фоторезистивного слоя.

2 Инфракрасная сушка. Здесь источником теплоты является сама подложка, поглощающая ИК-излучение. При этом окружающая воздушная или специальная газовая среда (как правило азот) сохраняют комнатную температуру за счет непрерывной продувки. Поскольку градиент температуры в этом случае направлен в сторону подложки, «фронт сушки» перемещается от пластины к поверхности фоторезиста, качество сушки существенно улучшается, а время сокращается до 5-15 мин.

3 СВЧ-сушка. Поскольку в этом случае используется энергия электромагнитного СВЧ-излучения (как правило, частотой 2,45 ГГц) при сушке в первую очередь равномерно нагревается сам фоторезист за очень короткое время (несколько секунд). Несмотря на сложность и относительную дороговизну оборудования СВЧ-сушка является перспективной. Поскольку градиент температуры в этом случае направлен в сторону подложки, «фронт сушки» перемещается от пластины к поверхности фоторезиста, качество сушки существенно улучшается, а время сокращается до 5-15 мин.

Тема 1.3 Экспонирование фоторезиста

Начиная со второй фотолитографии необходимо совмещать рисунок фотошаблона с рисунком первой литографии на подложке, точность топографического рисунка в первую очередь определяется точностью совмещения. При первой фотолитографии фотошаблон ориентируют по отношению к базовому срезу полупроводниковой подложки. При последующих фотолитографиях, когда на подложке уже сформированы топологические слои, рисунок фотошаблона ориентируют относительно рисунка предыдущего слоя. Для полного формирования структуры БИС необходим комплект фотошаблонов со строго согласованными топологическими рисунками элементов. Это согласование осуществляется с помощью реперных знаков в фотошаблонах.

В настоящее время для совмещения используются визуальный и автоматизированный фотоэлектрический способы. При визуальном точность совмещения определяется принципом работы и качеством выполнения микроманипуляторов, размером и контрастностью реперных знаков, формой знаков, а также постоянством этих параметров в процессе технологических обработок подложек.

Автоматизированный способ более точен, так как исключает индивидуальные особенности оператора и ручное перемещение подложки. Поэтому процесс совмещения проводят в два этапа. На первом этапе с помощью реперных модулей (это «пустые модули» на пластине) выполняют грубое совмещение в пределах всего поля подложки. На втором этапе по реперным знакам в пределах единичного модуля производят точное совмещение.

Для технологии кремниевых БИС точность совмещения при визуальном способе составляет 0,25-1 мкм, а с использованием автоматизированного фотоэлектрического микроскопа обеспечивается точность 0,1-0,3 мкм. Форма и контрастность реперного знака во многом определяют точность совмещения. Форму знаков выбирают в зависимости от типа используемого резиста. Контрастность определяется в основном профилем травления их в подложке. При этом различают следующие виды профилей: сплошное углубление (рисунок 12,а), плоская поверхность инородного материала (рисунок 12,б), глубинная канавка (рисунок 12,в), шероховатая поверхность (рисунок 13).

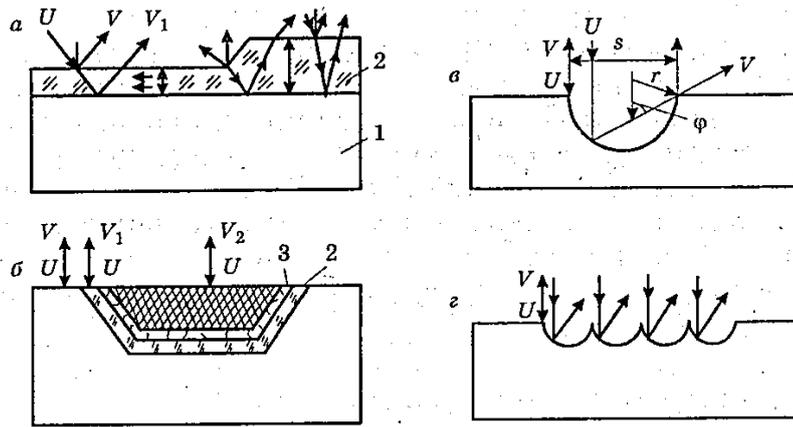


Рисунок 12 - Реперные знаки: *a* — в виде сплошных углублений в оксидной пленке, *б* — с плоской поверхностью поликристалла, *в* — в виде глубокой канавки, *г* — с растровыми углублениями; 1 — кремниевая пластина, 2 — оксидная пленка,

3 — поликристаллический кремний; U, V — соответственно падающие и отраженные лучи, s — размер сечения элемента, r — радиус сферической или цилиндрической поверхности элемента, φ — угол рассеяния

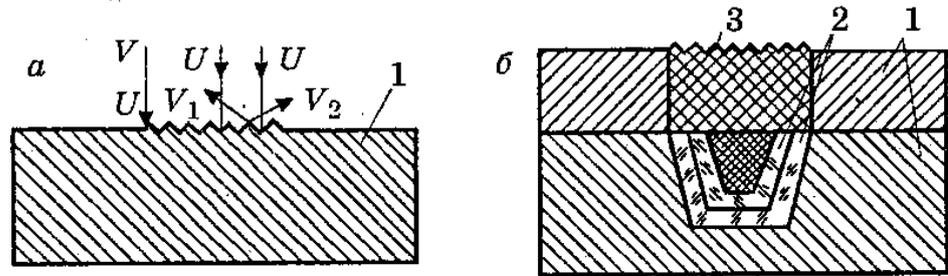


Рисунок 13 - Знаки в виде шероховатости поверхности на кремниевой пластине (*a*) и на подложке из поликристаллического кремния (*б*): 1 — монокристаллическая кремниевая пластина; 2 — оксидная пленка; 3 — поликристаллический кремний

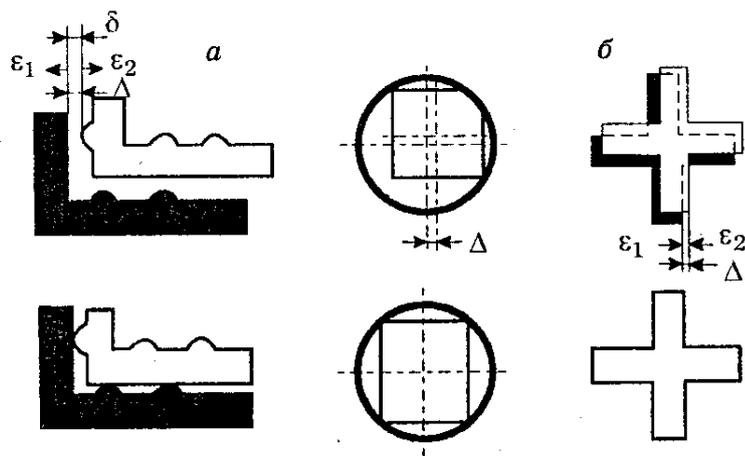


Рисунок 14 - Совмещение знаков в виде контактирующих фигур: *a* — контакт линии с точкой; *б* — контакт линии с линией; Δ — погрешность совмещения; ϵ_1, ϵ_2 — погрешности размеров контактирующих фигур

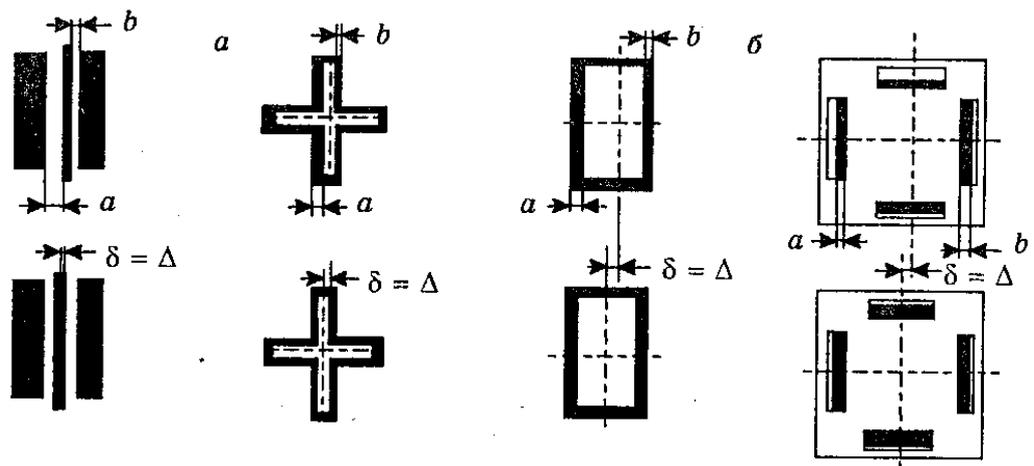


Рисунок 15 - Бисекторные знаки совмещения: a — равенство зазоров между элементами знаков, b — равенство площадей; a , b — зазоры слева и справа; δ — рассовмещение точек пересечения элемента; Δ — погрешности совмещения; $\delta = (2/\text{tg}\psi)/A$, где ψ — угол разворота элементов

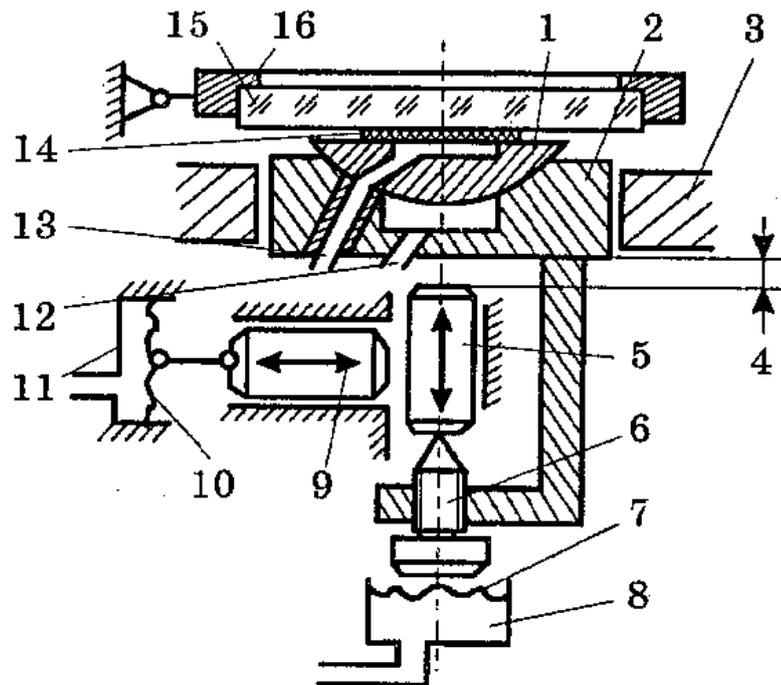


Рисунок 16 - Схема механизма совмещения микроизображений фотошаблона и подложки при контактной фотолитографии: 1 — предметный столик, 2 — его гнездо, 3 — направляющие, 4 — микрозазор, 5 — штифт, 6 — регулировочный винт, 7, 10 — диафрагмы, 8, 11 — камеры, 9 — фиксатор, 12, 13 — трубопроводы, 14 — подложка, 15 — фотошаблон, 16 — рамка

Форма знаков на подложке и фотошаблоне связана с условиями их совмещения, которые определяются плотностью контактов элементов знаков, равенством зазоров или площадей между этими элементами (бисекторные знаки) и, наконец, соосностью точек их пересечения.

Сама процедура осуществляется на механизме совмещения микроизображений. Основными элементами этого механизма являются предметный

шаровой столик со сферическим основанием- гнездом, рамка для закрепления фотошаблона и устройства перемещения рамки и поворота предметного столика.

Подложку размещают на предметном столике так, чтобы слой фоторезиста был сверху и закрепляют фотошаблон в подвижной рамке над поверхностью подложки. Между подложкой и фотошаблоном должен быть зазор для свободного перемещения рамки при совмещении реперных знаков. В отечественных установках ЭМ-576, ЭМ-5006 используется принцип контактной печати с наложением фотошаблона на подложку для экспонирования. При идеальном контакте передача рисунка осуществляется с минимальными искажениями.

После выполнения совмещения (рисунок 17) подложку прижимают к фотошаблону и экспонируют слой фоторезиста. При контактном экспонировании ультрафиолетовое излучение проходит через фотошаблон и попадает на слой фоторезиста.

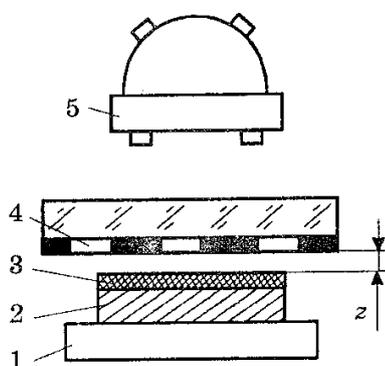


Рисунок 17 - Схема совмещения: 1 – предметный столик, 2 – подложка, 3 – слой фоторезиста, 4 – фотошаблон, 5 – микроскоп; z – зазор между фотошаблоном и подложкой

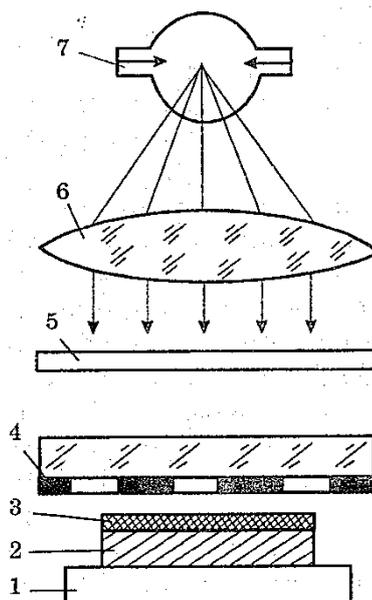


Рисунок 18 - Схема экспонирования: 1 – предметный столик, 2 – подложка, 3 – слой фоторезиста, 4 фотошаблон, 5 – затвор, 6 – конденсатор, 7 – источник света

Установки ЭМ-576, ЭМ-5006 являются полуавтоматическими: подложка с помощью подающей кассеты перемещается по конвейеру в устройство совмещения.

Контактный метод переноса изображения обеспечивает возможность получения элементов с размерами 2 мкм на полях 100x100-200x200 мм. Обеспечить идеальный контакт и отсутствие локальных зазоров по большим площадям практически невозможно.

Зазор при контактировании двух поверхностей носит случайный характер, что приводит к ряду нежелательных оптических эффектов (рисунок 19).

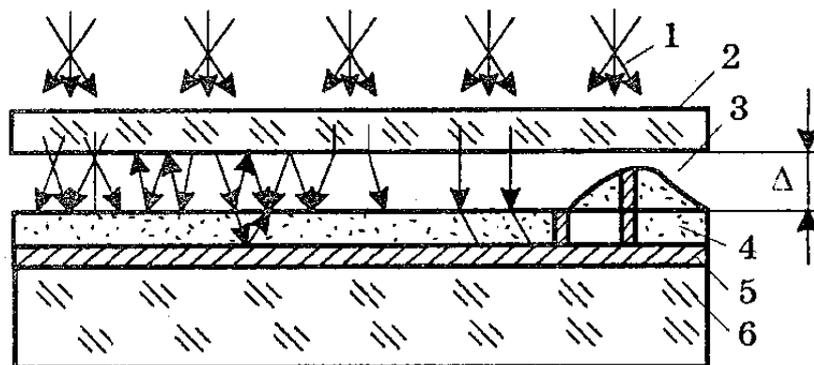


Рисунок 19 - Оптические эффекты при контактной печати

Наличие зазора приводит к тому, что размеры элемента искажаются из-за апертуры источника излучения, т.е. некоторого угла расходимости a пучка 1 световых лучей. При наиболее часто используемых апертурах освещающего пучка $2a = 3-8^\circ$, образующая область полутени увеличивает размер элемента на 0,5-5 мкм при колебании зазора 3 между объектом 2 и светочувствительным слоем 4 в диапазоне $D = 5-20$ мкм. Многократное отражение между контактирующими поверхностями, возникающее из-за высокой зеркальности металлического (хром) рисунка фотшаблона и фотолитографируемой поверхности (блестящий диоксид кремния или зеркальный алюминий) через прозрачный слой фоторезиста приводит к интерференции отраженных пучков. Эти явления обуславливают отклонение размеров элементов и искажению их формы из-за интерференционных эффектов и неравномерности дозы экспонирования.

Принципиально неустранимым оптическим эффектом является дифракция, проявления которой в контактном экспонировании многообразны. Даже при идеальном контакте дифракционные эффекты возникают из-за огибания световой волной краев элементов и некоторого размытия краев изображения, соответствующего толщине светочувствительного слоя. Неидеальный контакт усугубляет ситуацию. Происходит взаимодействие интерферированных и дифрагированных лучей, что приводит к дополнительному искажению рисунка. Наибольшие искажения возникают на углах элементов топологического рисунка, где накладываются интерференционные картины от двух сторон, образующих угол элемента.

Типичное распределение интенсивности в изображении угла элемента рисунка, обусловленное дифракционными эффектами, представлено на рисунок 20. Распределение интенсивности имеет характерную лепестковую структуру,

приводящую к неровности края и неоднородности углов элементов. Для снижения влияния дифракции используют более коротковолновое оптическое облучение, ужесточают технические условия на плоскостность пластин и фотошаблонов.

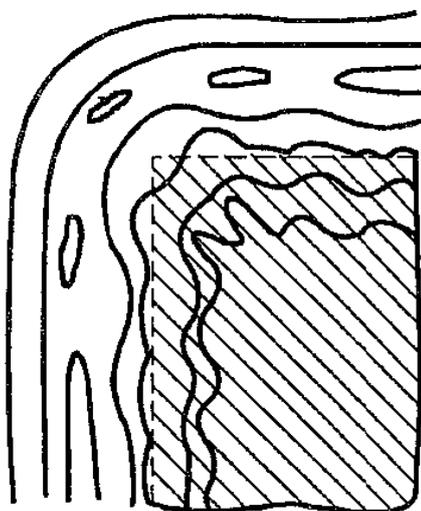


Рисунок 20 - Распределение интенсивности в изображении угла элемента, обусловленное дифракционными эффектами

Устранить дифракционные искажения и области полутени за счет снижения зазора путем увеличения прижима при контактировании поверхностей нельзя, так как это приводит к двум нежелательным эффектам: увеличение давления вызывает повреждение светочувствительного слоя и самой подложки; деформация подложки при принятии ведет к дополнительному искажению рисунка.

Метод контактной печати с использованием прижимных устройств неизбежно приводит к деформации изображения и несовместимости различных слоев.

Для экспонирования в фотолитографии используют проекционный метод переноса изображения фотошаблона на всю технологическую площадь (рисунок 21) поэлементное (шаговое) экспонирование изображения с уменьшением или без уменьшения одного и того же элемента или разных типовых элементов по всей площади (рисунок 22); вычерчивание изображения непосредственно на покрытой фоторезистом технологической площади тонким ультрафиолетовым лучом, управляемым ЭВМ.

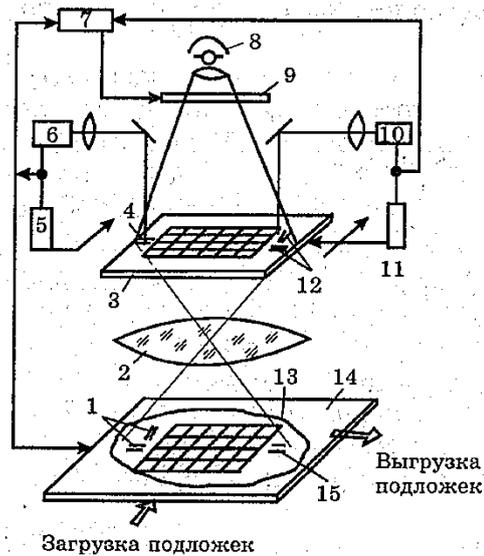


Рисунок 21 - Схема установки проекционной фотолитографии без изменения масштаба переноса изображения: 1, 15 — метки координат x , y и углового разворота на подложке, 2 — проекционный объектив, 3 — фотошаблон, 4, 12 — метки углового разворота и координат x , y на фотошаблоне, 5, 11 — приводы углового разворота и перемещения фотошаблона, 6, 10 — фотоэлектрические микроскопы углового разворота и координат x , y фотошаблона, 7 — блок программного управления, 8 — источник освещения для экспонирования, 9 — высокоскоростной затвор, 13 — полупроводниковая подложка, 14 — предметный столик

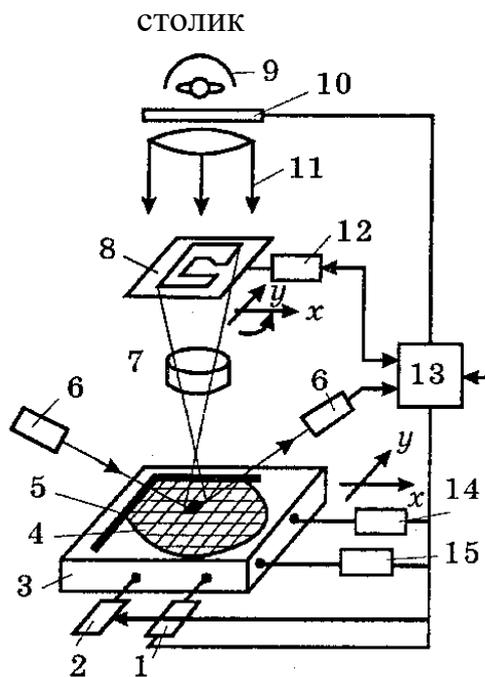


Рисунок 22 - Схема установки мультипликации с совмещением: 1, 15 — приводы стола по осям x и y , 2, 14 — лазерные интерферометры по осям x и y , 3 — координатный стол, 4, 5 — полупроводниковая подложка и упоры для ее ориентации, 6 — система фокусировки, 7 — проекционный объектив, 8 — столик с промежуточным фотошаблоном, 9 — источник света, 10 — затвор, 11 — актиничное излучение, 12 — устройство совмещения меток промежуточного фотошаблона и подложки, 13 — управляющая ЭВМ

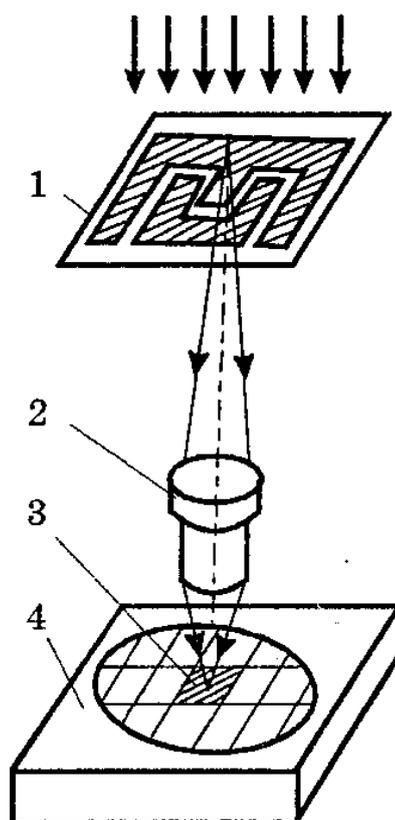


Рисунок 23 - Схема проекционного шагового экспонирования с одновременным уменьшением и мультипликацией по двум координатам: 1 — объект ФШ; 2 — объектив; 3 — плоскость изображения; 4 — двухкоординатный стол

В промышленности наибольшее распространение получил стартстопный метод со сканированием по двум координатам, широко применявшийся для мультипликации при изготовлении эталонных фотошаблонов в настоящее время являющийся одним из наиболее прогрессивных методов формирования непосредственно на подложке. Метод заключается в последовательном экспонировании отдельных полей изображения, соответствующих ИС (модулям), причем операция мультипликации изображений по всему полю проводится с использованием объекта, увеличенного в 5-15 раз (оптимальный масштаб 10:1), что позволяет повысить точность формирования изображения.

При проекционной фотолитографии, как и при контактной, необходимо точно совмещать фотошаблон с подложкой, для чего существуют специальные метки совмещения. Процесс совмещения выполняется автоматически с помощью фотоэлектрического микроскопа, который регистрирует сигнал, поступающий от метки совмещения на подложке, и сравнивает его с сигналом, поступающим от такой же метки на фотошаблоне. Для совмещения меток координатная система перемещает подложку и фотошаблон, а также поворачивает фотошаблон относительно оси проекции.

В частности, для работы на установках ЭМ-584 используют фотошаблоны или так называемые металлизированные промежуточные оригиналы (МПО), на которых топологический рисунок увеличен в 10 раз по сравнению с его истинными размерами. Уменьшенное изображение рисунка, получающееся на пластине в результате экспонирования, называют модулем. Модуль может со-

стоять из одного или нескольких кристаллов в зависимости от размеров той или иной микросхемы. Кристаллы друг от друга отделяются так называемыми дорожками скрайбирования. На дорожках, отделяющих друг от друга модули, располагаются метки контроля шага мультипликации, по которым определяют такие важные характеристики МПО и установки, как разворот и немасштаб.

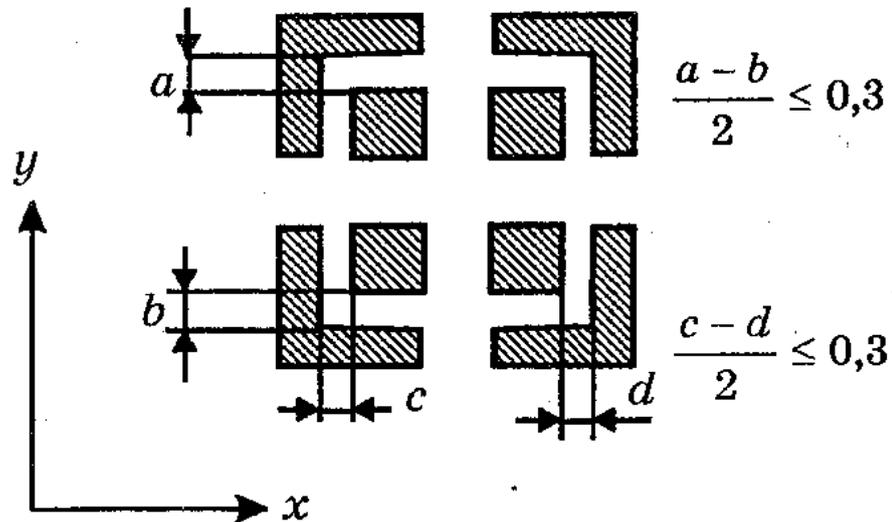


Рисунок 24 - Метки контроля шага мультипликации для определения разворота и немасштаба a, b, c, d — зазоры между метками

Разворот и немасштаб изображения определяются смещением квадратов шаговой мультипликации относительно рамки шаговой метки мультипликации x и y .

Процесс совмещения начинается с «захвата» меток системой наблюдения фотоэлектрического микроскопа, при котором их изображение на подложке попадает в окна фотошаблона и возникает разностный сигнал в каналах совмещения при этом, система совмещения предварительно совмещает фотошаблон и подложку по координатам в соответствии с метками, и затем, выполняя угловую коррекцию, поворачивает фотошаблон относительно меток.

В случае такого совмещения ошибка не превышает $0,1-0,2$ мкм, уменьшается влияние изменения температуры и геометрических искажений подложки на точность передаваемого изображения.

Помодульный перенос изображения обеспечивает снижение плотности дефектов, вносимых в формируемую на слое фоторезиста маску, поскольку дефекты и загрязнения значительно меньше элементов изображения и не переносятся с МПО на слой фоторезиста.

Метки имеют форму в виде канавок травления, на которых рассеивается падающий световой пучок и создается их оптический контраст отношению к остальному полю. Профиль канавки травления зависит от ориентации подложки (рисунок 25).

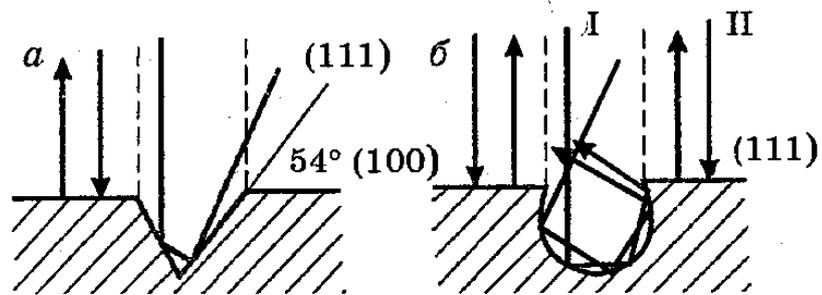


Рисунок 25 - Метки совмещения: *a* — V-образная, *б* — бочкообразная; I, II — области рассеяния и отражения света

После завершения операции совмещения выполняется автофокусировка, а затем экспонирование. Эти три операции составляют единичный цикл мультипликации (размножения) модуля. Весь процесс мультипликации состоит из пропечатки модуля по всему полю подложки с помощью координатного стола, обеспечивающего пошаговое перемещение по осям *x* и *y*.

Современная проекционная фотолитография использует оптические системы, работающие практически на пределе возможностей в условиях дифракционных ограничений. Это налагает очень жесткие требования на качество исполнения и конструкцию проекционной оптики.

Качество проекционного объектива характеризует такой параметр, как числовая апертура:

$$NA = n \cdot \sin \alpha,$$

где *n* — коэффициент преломления среды в пространстве изображения, для воздуха $n \ll 1$;

a — половина максимального угла расходимости лучей, приходящих в точку изображения на оптической оси проекционной системы.

Для устранения возникающих при светопередаче хроматических aberrаций используют ультрафиолетовое излучение, создаваемое мощными ртутными лампами высокого давления, которое дополнительно фильтруется специальными монохроматическими фильтрами и избирательно отражающими зеркалами.

Схема осветительной системы проекционной установки показана на рисунке 26.

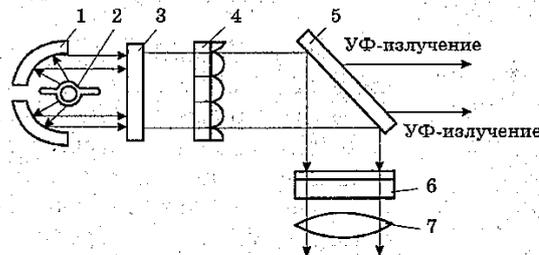


Рисунок 26 - Схема осветительной системы проекционной установки: 1 — эллиптический отражатель, 2 — источник УФ- излучения, 3 — защитное стекло, 4 — сотовый конденсор типа "мушиный глаз", 5 — селективное отражающее зеркало, 6 — полосовой фильтр, 7 — конденсорная линза

Конденсор выполнен из микролинз, что позволяет увеличить равномерность освещения по всему полю. Зеркало имеет селективно отражающее покрытие, пропускающее тепловые лучи, но эффективно отражающие ультрафиолетовые. Это позволяет защитить оптику от мощного потока теплоты, излучаемого ртутной лампой¹. Разрешающая способность (минимальный передаваемый размер элемента) определяется длиной волны излучения и числовой апертурой проекционного объектива по соотношению:

$$b_{\min} = \lambda / 2NA.$$

Важным параметром проекционной системы является глубина резкости σ определяемая как:

$$\sigma = \lambda / [2(NA)]^2. \quad (1)$$

Чем выше глубина резкости, тем меньше влияют искривления пластин и неравномерность толщины слоя фоторезиста на качество передаваемого рисунка. Неправильная фокусировка может существенно влиять на качество передачи рисунка, поэтому точность фокусировки должна быть более $\pm 0,2$ мкм. Для повышения разрешающей способности необходимо уменьшить длину волны излучения, что, однако затруднительно из-за возрастания коэффициента поглощения оптических стекол. Обычно в проекционных системах используют монохроматическое излучение с длиной волны 400-440 нм.

Проекционная фотолитография в настоящее время является самым перспективным методом в серийной технологии производства СБИС.

Оптические эффекты при фотолитографии.

Дифракционные эффекты.

Дифракция на краях маски шаблона вызывает искажение элементов рисунка, формируемого в фоторезисте. Ввиду реальных отклонений фотошаблона и пластины от плоскостности даже при контактной фотолитографии между фотошаблоном и слоем фоторезиста всегда имеется зазор. Поскольку в БИС размеры элементов соизмеримы с толщиной фоторезиста, для повышения разрешающей способности стремятся уменьшить толщину.

При зазоре z между фотошаблоном и фоторезистом минимально передаваемый размер определяется как

$$b_{\min} = \frac{z}{2\sqrt{z + h/2}}, \quad (2)$$

где h — толщина слоя фоторезиста.

Основным параметром, определяющим дифракционные явления в фотолитографии является волновой параметр

$$P = \sqrt{\lambda z / D}, \quad (3)$$

где D — размер элемента на фотошаблоне.

В зависимости от P могут иметь место следующие ситуации.

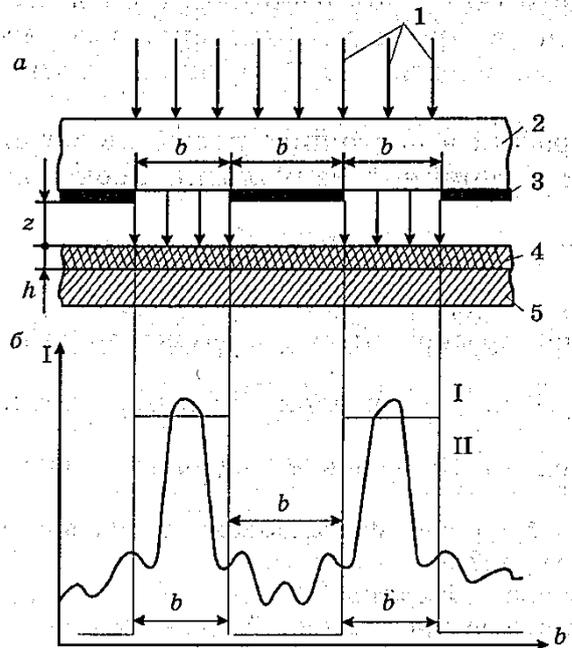


Рисунок 27 - Схема переноса изображения при контактной фотолитографии (а)

и перераспределение интенсивности актиничного излучения на поверхности фоторезиста (б): 1 — поток актиничного УФ-излучения, 2 — стеклянный фотошаблон, 3 — рисунок в маскирующем слое фотошаблона, 4 — слой фоторезиста, 5 — полупроводниковая подложка; I, II — зоны идеальной и фактической светопередачи с учетом дифракции передачи изображения; b — размер рисунка, I — интенсивность излучения

1. Случай Френеля ($P \ll 1$) — размеры топологических элементов достаточно велики, контакт подложки с шаблоном плотный, излучение коротковолновое. Дифракционное перераспределение занимает малую пограничную область, а искажения интенсивности засветки и формы элемента минимальны (рис.36, а).

2. Переходной случай ($P \approx 1$) — дифракционная картина занимает всю область засветки, искажения формы элемента максимальны (рис.36, б).

3. Случай Фраунгофера ($P \gg 1$) — имеет место при малых размерах элементов или большом зазоре z . Максимальное искажение интенсивности засветки всегда лежит в центре. Можно подобрать такие условия экспонирования, при которых элементы переносятся с небольшими искажениями (фотолитография на микрозазоре).

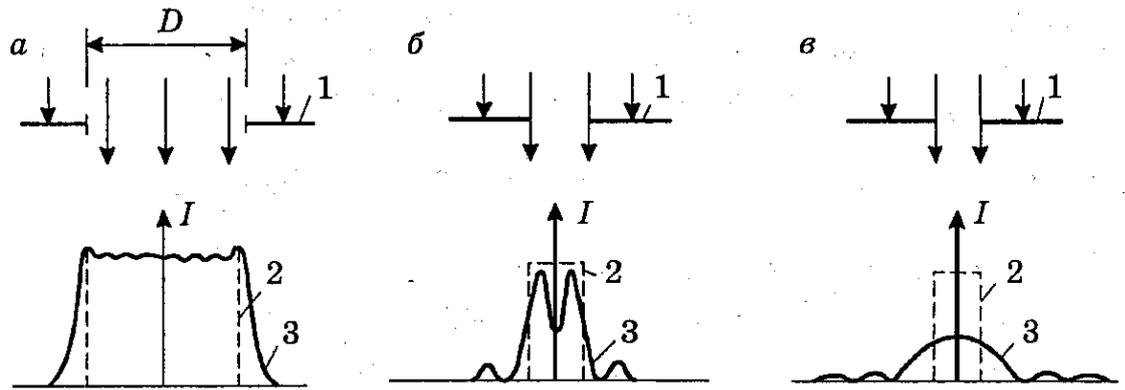


Рисунок 28 - Дифракционное перераспределение интенсивности актиничного излучения в зависимости от значения волнового параметра P : *a* — случай Френеля; *б* — переходный случай; *в* — случай Фраунгофера; 1 — экран (шаблон); 2 — область засветки; 3 — пограничная область

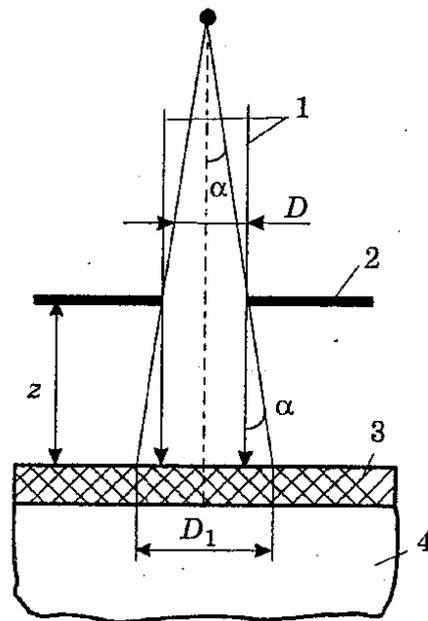


Рисунок 29 - Изменение размера переносимого элемента при расходимости пучка актиничного излучения в системе экспонирования и зазоре z между фотошаблоном и подложкой: 1 — поток актиничного излучения; 2 — фотошаблон; 3 — слой фоторезиста; 4 — подложка; α — угол расходимости пучка; D — исходный размер; D_1 — конечный размер рисунка

Эффекты геометрии оптики. Основным фактор, ограничивающий разрешающую способность контактной фотолитографии, обусловлен расходимостью пучка излучения и многократного его отражениями от поверхности фотошаблона и слоя фоторезиста.

За счет расходимости пучка излучения осветителя происходит изменение размера переносимого рисунка. Очевидно, что оно усугубляется при увеличении зазора между фотошаблоном и слоем фоторезиста. Уменьшить это изменение можно путем использования специальных конденсорных линз.

Используемые в отрасли фотошаблоны имеют блестящий (зеркальный) хромовый рисунок. Поверхность фоторезистивного слоя также зеркальна. Поэтому при расходящемся излучении имеет место многократное отражение меж-

ду поверхностью фоторезиста и металлизацией фотошаблона, что также изменяет размер переносимого элемента. Для уменьшения этого паразитного явления поверхность шаблона матируют с помощью низкоотражающих покрытий, например, оксидов хрома или железа.

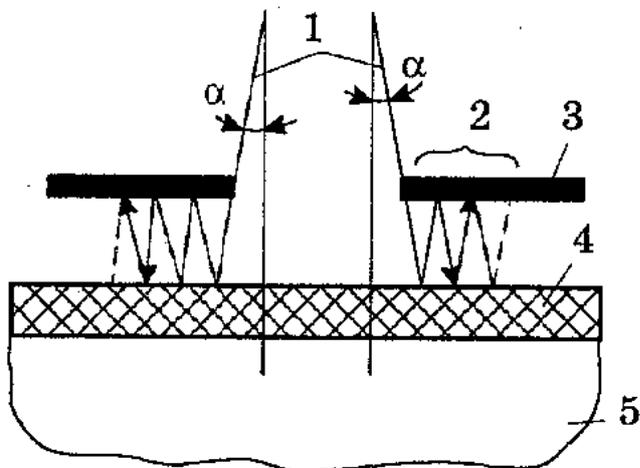


Рисунок 30 - Многократные отражения в системе фотошаблон — слой фоторезиста: 1 — расходящийся пучок актиночного излучения; 2 — область паразитной засветки; 3 — фотошаблон; 4 — слой фоторезиста; 5 — подложка

Поскольку слой фоторезиста является прозрачным и оптически однородным и лежит на отражающей поверхности при освещении его как белым, так и монохроматическим излучением, наблюдаются интерференционные эффекты (эффекты взаимодействия падающей и отраженной волны). Это вызывает засветку слоя фоторезиста по толщине. Этот эффект зависит от толщины фоторезиста. Поэтому это явление используют для оценки однородности толщины фоторезистивного слоя. Если окраска по всей поверхности одинакова — фоторезист имеет одинаковую толщину во всех точках. Если фоторезист имеет цветовые разводы, пленка неоднородна по толщине; такой фоторезистивный слой нельзя применять, особенно в проекционной фотолитографии.

Ограничения фотолитографии по разрешающей способности

Разрешающая способность R и ширина линий L связаны между собой соотношением $R = 1000/2L$. Под L и R следует понимать значения, которые могут быть получены на проявленном фоторезисте.

Предельная разрешающая способность фотолитографии определяется дифракционным критерием Рэля, и соответствующая ей минимальная ширина линий $L_{\min} = 0,6\lambda/h \cdot \sin a/2$, где a — апертурный угол выхода; X — длина волны экспонирующего света. В реальных случаях $h = 1$; $a = 0,95$; $\lambda = 0,4$ мкм. Тогда $L = 0,25$ мкм. Предельная разрешающая способность оптической контактной и проекционной фотолитографии составляет 0,25 мкм.

Качество процесса фотолитографии

В технологическом процессе изготовления микросхем фотолитография составляет около 50% всей трудоемкости. Она производится практически после каждого блока операций (окисление, диффузия, ионное легирование, эпитаксия, напыление). В целом качество фотолитографии определяют более 50 параметров, из которых наиболее существенными, несущими информацию о качестве процесса

являются: внешний вид фоторезистивной маски после проявления, уход размера от заданного, количество дефектных модулей.

Цепочка операций фотолитографии и параметры определяющие процесс, представлены на рисунок 31. Оценку качества проведения фотолитографии, а также ретуширования осуществляют по обобщающим параметрам: толщине, нанесенной фоторезистивной маски; количеству регенераций фоторезистивного рисунка; уходу линейных размеров вытравленных на пластинах фигур элементов; модулей, имеющих локальные дефекты. По этим основным параметрам можно произвести оценку стабильности работы участка в целом:

$$K_c = [1 - (10n_{\delta} + 2p + 10n_o + \Lambda)/100], \quad (4)$$

где K_c — коэффициент стабильности работы участка в целом;

n_{δ} — количество отклонений по линейным размерам после травления;

Λ — количество дефектных модулей при контроле по внешнему виду.

Коэффициент K_c участка фотолитографии определяет процент выхода годных микросхем при контроле пластинка функционирование.

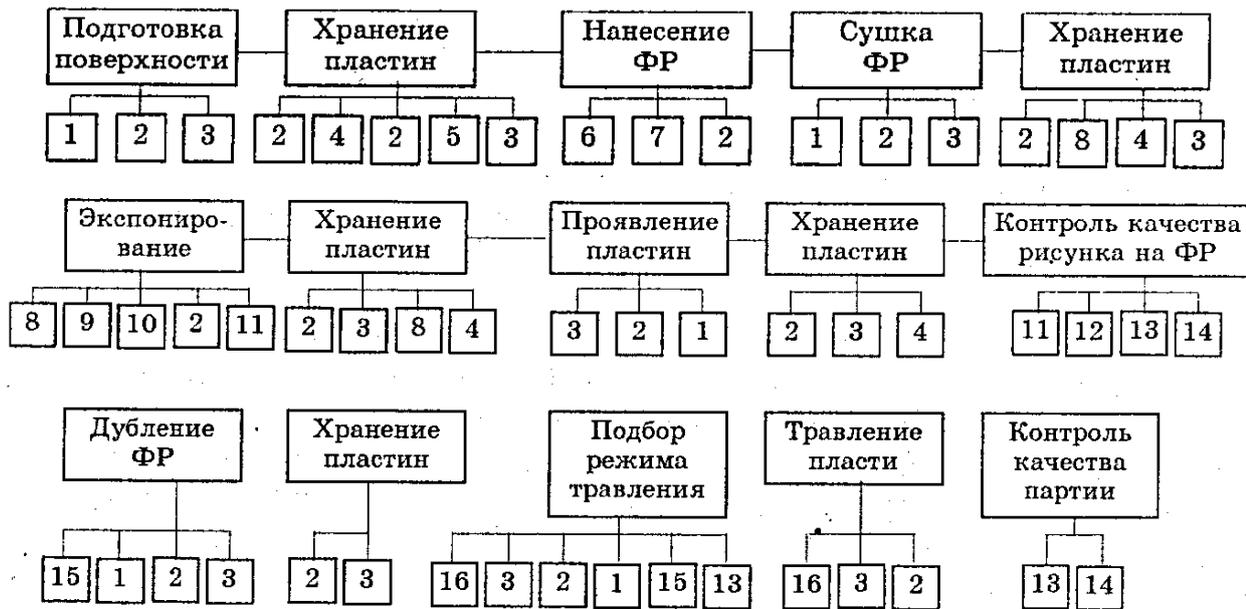


Рисунок 31 - Технологический процесс фотолитографии: 1 — температура;

2 — время; 3 — химический состав среды, раствора; 4 — количество пылинок в 1 м^3 ; 5 — вязкость резистора; 6 — частота вращения;

7 — масса подаваемого вещества, г; 8 — интегральная освещенность;

9 — равномерность освещенности; 10 — зазор; 11 — освещенность;

12 — адгезия; 13 — размер объекта; 14 — количество локальных дефектов;

15 — число регенераций, причины; 16 — выборка из партии, однородность партии

Контрольной операцией фотолитографического процесса является проверка качества выполнения рисунка по фоторезистивной маске. Если геометрия элементов не соответствует требованиям технологической документации, пла-

стины возвращаются на регенерацию (восстановление по определенному маршруту).

Контроль качества фоторезистивной маски позволяет пропускать на следующие операции только ту, на которой с определенной уверенностью можно качественно провести травление технологического слоя.

Регенерации маски проводят по причинам: неправильное по толщине нанесение фоторезиста, пятна или трещины, плохое экспонированное или проявление и т.д. Количество регенераций является одним из важных показателей, способствующих регулированию технологического процесса. При контроле причину брака устанавливают однозначно, либо статистическими методами.

Количество дефектных модулей на пластине во многом говорит о культуре производства, состоянии электронно-вакуумной гигиены на участке, соблюдении технологических режимов проведения операций. Например, локальные нарушения с определенной конфигурацией указывают на повышенную запыленность или длительное и неправильное хранение пластин до фотолитографии.

Фотолитографическим процессом управляют как качеством используемых материалов, так и режимами проведения основных операций: нанесение, сушка, экспонирование, проявление и задубливание фоторезиста.

Толщина слоя фоторезиста зависит от его характеристик (вязкость, поверхностное натяжение, содержание сухого остатка) и режимов нанесения (скорость центрифугирования, время нанесения). Низкую дефектность и хорошие маскирующие свойства обеспечивает максимально допустимая толщина слоя. Режим нанесения устанавливают исходя из максимальной равномерности слоя по всей поверхности подложки при заданной толщине.

Режимы сушки фоторезиста во многом определяют светотехнические характеристики. Температуру и длительность сушки устанавливают такими, чтобы обеспечить необходимую прочность и адгезию слоя фоторезиста при операциях совмещения, экспонирования и проявления. Для этого требуются повышенные температуры и время. С другой стороны, при высокой температуре и длительной сушке ухудшается светочувствительность фоторезиста из-за теплового разложения (термолиза) материала; повышается время проявления и ухудшается контрастность из-за «пересушивания» фоторезиста. Поскольку время и температура сушки существенно зависят от типа резиста и толщины его слоя, в процессе производства необходимо постоянно корректировать режимы. Контраст проявления (отношение скоростей проявления экспонированных и неэкспонированных участков) определяется режимом сушки. Чем выше контрастность, тем легче проявляются маскирующие свойства неэкспонированных фоторезистов. Высокая контрастность обеспечивает устойчивое воспроизведение размеров элементов, низкий уровень дефектов маски в виде остатков фоторезиста на светлом поле и проколов на темном. Следовательно, необходимо добиваться высокой контрастности. Обычно это достигается следующим:

- чем выше температура сушки, тем выше контрастность (но слишком высокая температура приводит к термолизу светочувствительного компонента);

- плотность проколов можно уменьшить увеличением толщины фоторезистивного слоя.

Контрастность более 30-40 считается хорошей и позволяет прецизионно управлять размерами элементов изображения. При высокой контрастности слой фоторезиста выдерживает большее время перепроявления. Это позволяет, в свою очередь, устранить темные точки на светлом поле и недопроявленные участки в слое фоторезиста. Изменение размеров элементов изображения определяется дозой (произведением интенсивности на время) экспонирования.

При использовании позитивных фоторезистов размеры светлых элементов увеличиваются, а темных — уменьшаются. Такие изменения размеров можно предусмотреть на начальной стадии изготовления фотошаблонов. Для этого при их проектировании составляют таблицу размеров элементов и их коррекций на отдельных стадиях генерации и переноса изображения. Таблица должна содержать также перечень комплекта фотошаблонов, контролируемых элементов и их тональностей, указание о толщинах технологических слоев и слоев фоторезиста. На основе этих данных определяют изменение размеров элементов на отдельных операциях и вводят соответствующую коррекцию.

Контроль размеров элементов изображения

При изготовлении фотошаблонов и проведении литографических операций на подложке особое внимание уделяется повышению процента выхода годных изделий на каждой операции процесса. Качество конечной продукции в значительной степени зависит от того, в каком объеме и с какой эффективностью подвергалась тщательному контролю каждая технологическая операция. Качество продукции может гарантироваться только в том случае, если каждый промежуточный продукт подвергается тщательному контролю по геометрической точности, чистоте и качеству рисунка.

С этой целью в электронной промышленности применяется целый ряд контрольно-измерительных приборов, с помощью которых можно своевременно обнаружить ошибки технологии и исключить дефектные изделия из дальнейшего технологического процесса. В фотолитографии для этого используют лупы, простые и универсальные микроскопы и различные координатометры.

Стереомикроскоп. Представляет собой оптический прибор, используемый для микростереоскопических исследований фотошаблонов и топологии рисунка на подложке.

Он имеет ряд важных особенностей: быстрая смена увеличения без расфокусировки; большое поле зрения; возможность работы как в отраженном, так и в проходящем свете.

В стереомикроскопе (рисунок 32) непосредственно над большим передним объективом расположен линзовый барабан с двумя оптическими системами. Фокусное расстояние переднего объектива составляет 100 мм.

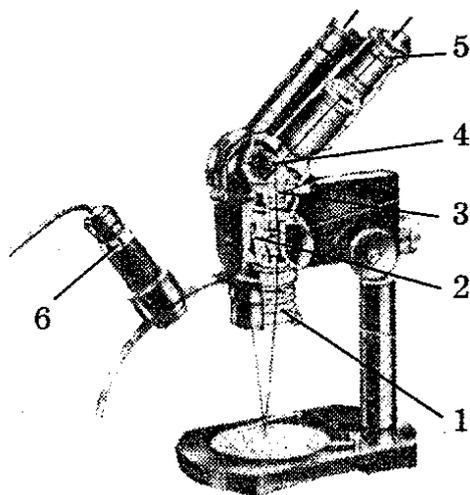


Рисунок 32 - Стереомикроскоп: 1 — передний объектив; 2 — линзовый барабан; 3 — линзы тубуса; 4 — призма; 5 — окуляр; 6 — осветитель

Объектив имеет четыре линзы, его апертура равна 0,08. Он— используется всегда при полном открытии отверстия без диафрагмирования.

Оптические системы на линзовом барабане используются как в режиме уменьшения, так и увеличения. Линзы каждого из тубусов имеют фокусное расстояние 160 мм. Призменная часть оптической системы в виде специальной «призмы с крышей» позволяет производить установку окуляра в удобном положении для глаз оператора, проводящего наблюдения. Кроме этого, она выполняет задачу поворота изображения на прямое и осуществляет наклон потока лучей для удобства наблюдения.

Окуляры представляют собой специальные системы, позволяющие получить плоское изображение и большое поле зрения. Фокусное расстояние окуляров 40 и 10 мм. На линзовом барабане нанесены значения увеличения, на которые рассчитан используемый объектив и оптические системы: 0,63; 1,0; 1,6; 2,5 и 4,0.

Согласно этим значениям определяют общее увеличение микроскопа, умножая их на увеличение окуляра.

Большой универсальный экспериментальный микроскоп включает в себя оптическую систему с осветительными устройствами и камеру для микрофотографической съемки (рисунок 33,34). Этот микроскоп позволяет наблюдать объект в проходящем свете, в светлом и темном полях, в поляризованном свете, фотографировать объект и измерять отрезки на нем с помощью измерительного винта окуляр-микрометра. В таком микроскопе используют два источника света: проекционная лампа и ксеновая газоразрядная лампа сверхвысокого давления, являющаяся идеальным источником света для поляризационной микроскопии и микрофотографии.

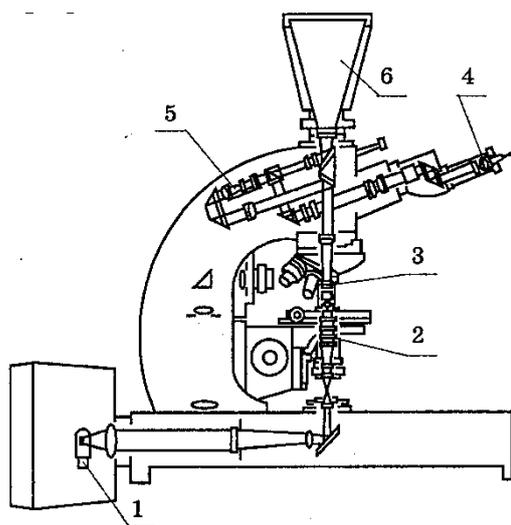


Рисунок 33 - Схема хода лучей в микроскопе Ну2-Е при наблюдении в проходящем свете: 1 — источник света; 2 — конденсор осветителя; 3 — объектив; 4 — окуляр; 5 — система плавного изменения увеличения; 6 — фотокамера

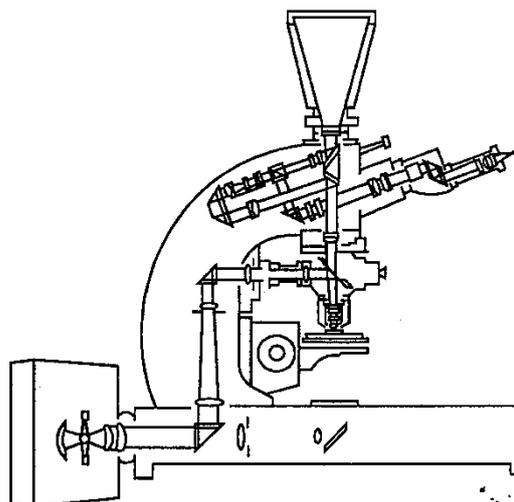


Рисунок 34 - Схема хода лучей в микроскопе Ну2-Е при наблюдении в отраженном свете

Интерференционный фазоконтрастный микроскоп для работы в отраженном свете. Это измерительный прибор высокого класса для визуального наблюдения топологии и измерения малых разностей хода света с помощью интерференционных методов. Вследствие того, что разность хода света при прохождении через микроскопические объекты может рассматриваться как мера их толщины, неровности или шероховатости, такое устройство очень хорошо подходит для количественного исследования самых малых структур. Поскольку этот микроскоп специально разработан для работы в отраженном свете, то на нем исследуются объекты полностью или частично светонепроницаемые. Он преимущественно используется при контроле фотошаблонов и измерении линейных размеров чрезвычайно малых элементов топологии интегральных микросхем. Применяемые интерференционные методы дают наилучшие результаты измерений для таких структур, у которых резко ограниченные структурные детали находятся на однородном фоне. В основе работы микроскопа лежит ин-

терференция, т.е. взаимодействие по крайней мере двух световых волн, связанное с усилением или ослаблением первоначальной интенсивности, причем изменение интенсивности происходит путем сложения взаимодействующих амплитуд с учетом относительной их фазы.

Если амплитуды интерферирующих волн равны, то результирующая амплитуда может колебаться (в зависимости от положения фазы) между нулем и удвоенным ее значением. На рисунке 35 показаны результирующие волны, возникающие при интерференции двух волн с одинаковой амплитудой при разности фаз от 0 до 180° . При разности фаз $0, 360^\circ$ или $\pm 360^\circ$ (где n — целое число) обеспечивая максимальное усиление, при разности фаз 180° или $(2n - 1/2) 360^\circ$ — наибольшее ослабление света.

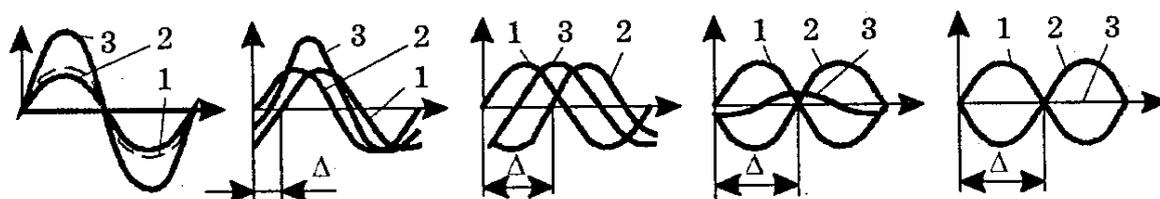


Рисунок 35 - Результат интерференции двух световых волн одинаковой амплитуды при различной разности фаз Δ : 1, 2 — интерферирующие волны, 3 — результирующая волна

Интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды. Поэтому при интерференции двух волн с одинаковой амплитудой результирующая интенсивность может колебаться в диапазоне между нулем или учетверенной амплитудой одной волны. Каждой разности фаз, следовательно, соответствует совершенно определенная интенсивность.

Отдельные точки обычного источника света испускают свет не непрерывно, а как бы излучают отдельные короткие световые импульсы (цуги волн). Благодаря этому, соотношение фаз между волнами, испускаемыми различными точками источника света, беспорядочно изменяется. Чтобы получить видимую картину интерференции, взаимодействующие составляющие света должны излучаться из одинаковых точек. Поэтому обычно расщепляют свет, исходящий от источника света, и его составляющие затем соединяют соответствующим образом.

Свойство света давать наблюдаемую картину интерференции называют когерентностью. Если соединить два когерентных пучка, которые исходят от двух изображений источника света и лежат на небольшом расстоянии друг от друга, то на экране, находящемся на большом расстоянии по сравнению с расстоянием от изображений источников света L_1 и L_2 можно получить систему интерференционных полос (рисунок 36), которое в белом свете кажется цветной, а в монохроматическом — состоящей из светлых и темных полос.

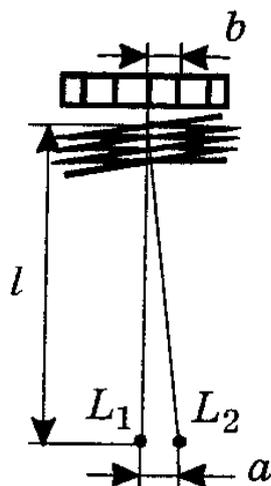


Рисунок 36 -. Схема образования полос интерференции от двух когерентных источников L_1 и L_2

Расстояния от экрана до L_1 и L_2 при смещении точки отсчета m на расстояние между полосами b будут изменяться на длину волны λ . Разность между двумя расстояниями mL_1 и mL_2 называется разностью хода Δ . На симметричной линии, проходящей между двумя изображениями источника света к экрану, Δ всегда равна нулю (средняя светлая полоса). На месте первой темной полосы $\Delta = \lambda/2$ и на месте первой светлой полосы $\Delta = \lambda$.

Расстояние между двумя интерференционными полосами определяется по формуле $b = \lambda l/a$. Если одна из интерферирующих волн имеет локально ограниченную разность хода, например, вследствие прохождения этой волной фазового объекта (рисунок 37), то в результате наблюдается смещение полосы интерференции в месте изображения объекта, по которому можно определить разность хода.

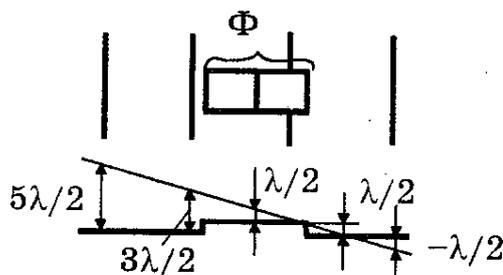


Рисунок 37 - Схема интерференции опорной волны 1 и волны, прошедшей через фазовый объект 2; вверху показано смещение полос интерференции на участке «Ф», соответствующем положению фазового объекта

Если расстояние между двумя изображениями источников света уменьшать, то расстояние b между интерференционными полосами будет увеличиваться.

Если $a = 0$, т.е. оба фронта волны параллельны друг другу, то расстояние между полосами бесконечно и весь экран вплоть до изображения объекта становится одного цвета или одинаковой яркости, которая изменяется соответственно изменению разности хода между интерферирующими волнами.

Для получения очень контрастных полос интерференции протяженность источника света в направлении $L_1 - L_2$ должна быть настолько малой, чтобы

разность расстояний l_1-l_2 отличалась от расстояния $l'_1-l'_2$ максимум на $\lambda/4$ (рисунок 38). Это условие может выполняться, если источник света или его изображение ограничены узкой щелью, причем ширина щели изображение не превышает величину $S = \lambda l/4a$. Если так называемое условие $\lambda/4$ выдерживается, то на экране некоторые составляющие луча усиливаются, а другие ослабляются, в результате чего контрастность ухудшается.

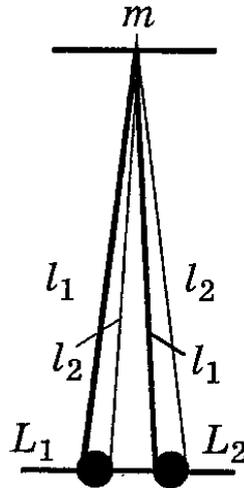


Рисунок 38 - Допустимая величина поперечного размера источников L_1 и L_2

Микроскопическое изображение возникает вследствие интерференции прямого и преломленного на объекте света в плоскости промежуточного изображения. При этом соотношения амплитуд и фаз в плоскости объекта передаются тем совершеннее, чем больше порядок преломленного света, т.е. чем больше дифракционных порядков охватывается объектом.

Под интерференционной микроскопией понимают наложение полного микроскопического изображения на когерентный с ним фон с целью получения и измерения слабо контрастных изображений, так называемых фазовых объектов. Вследствие этого необходимо независимое от объекта расщепление хода луча, чтобы в плоскости промежуточного изображения волна от объекта могла интерферировать с когерентной ей опорной волной. Фазовые объекты отличаются от фона толщиной или показателем преломления. В отличие от них амплитудные объекты изменяют цвет или яркость луча. Из-за различного показателя преломления или толщины они обуславливают разность хода лучей света Δl относительно фона и, следовательно, смещение фазы φ . Разность хода Δl определяется как разность оптических расстояний dn , где d — толщина объекта, n — показатель преломления. Отсюда для $d = \text{const}$ $\Delta l = d\Delta n$, где Δn — разность показателей преломления между фоном и объектом. Если разность хода кратна длине волны, то $\Delta l = d\Delta n/\lambda$. Если произвести наложение микроскопического изображения, представленного на рисунке 39, в виде плоской волны с выраженным смещением фазы φ , с когерентным однородным фоном (представленным на рисунке в виде волны, параллельной волне объекта), то волны от объекта и среды имеют взаимную разность фаз (φ — в среде, $\varphi - \psi$ — в месте изображения объекта). Так как любая разность фаз двух интерферирующих

волн с одинаковой амплитудой соответствует определенной интенсивности, то для рассмотренного примера это означает, что объект имеет яркость, отличную от фона, и поэтому может наблюдаться на этом фоне. Плоскую опорную волну получают расщеплением хода лучей перед объективом и соединением их снова за объективом. Однако техническая реализация этого метода, обеспечивающая требуемое качество изображения, довольно трудна и требует дорогих приборов. Поэтому в интерференционном микроскопе лучи расщепляются за объективом. В рассматриваемом микроскопе это расщепление осуществляется методом «ширинг» или методом «интерфако».

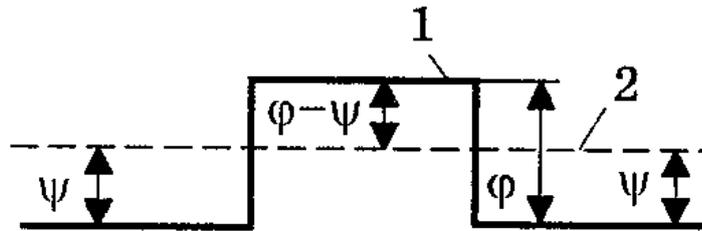


Рисунок 39 - Схема наложения плоской волны с местным смещением фазы (1) и когерентного гомогенного фона (2)

Метод «ширинг». Если микроскопическое изображение расщепить на две равные составляющие и снова их соединить, точно совместив, то по полю изображения между двумя волнами будет постоянная разность хода и оно получается в одном цвете или с одинаковой яркостью, включая структуры объекта. Если же, наоборот, соединить оба изображения с некоторым боковым смещением, то между обеими интерферирующими изображениями появятся разности фаз, изменяющиеся в зависимости от структуры волны. На месте левого изображения объекта возникает разность фаз $\varphi - \psi$, на месте $\varphi - \psi$, а на фоне — ψ . Эти разности фаз в зависимости от φ обуславливают получение более или менее контрастного изображения объекта. Именно этот принцип используется в методе «ширинг».

Если боковое смещение больше объекта, то говорят о полном расщеплении (рисунок 40). Изменяя φ , можно для левого изображения фона или правого изображения объекта последовательно устанавливать различную затемненность или подбирать более выразительный цвет и измерять таким образом разность фаз или разность хода лучей от объекта относительно фона.

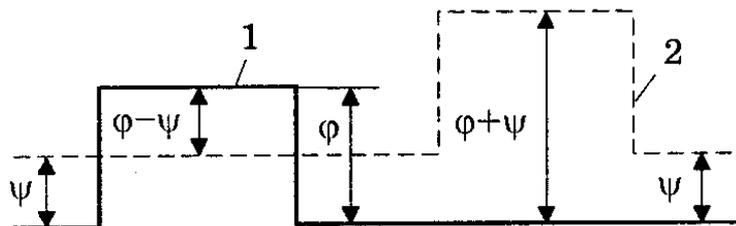


Рисунок 40 - Боковое и фазовое смещения двух одинаковых волн, прошедших через фазовый объект. Схема иллюстрирует «Полное расщепление»: 1 — основная волна; 2 — смещенная волна

Если боковое смещение изображения (рисунок 41) очень мало, то говорят о дифференциальном расщеплении. В этом случае разности фаз уже не вызываются самим смещением фазы объекта, а определяются его местными изме-

нениями. В результате видны и могут быть измерены градиенты показателей преломления и углы наклона профилей травления микроструктур. При этом методе получается стереоскопическое изображение.

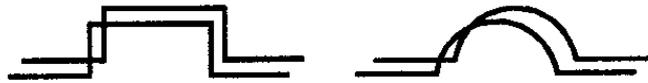


Рисунок 41 - Дифференциальное расщепление волн, прошедших через фазовый объект

Метод «интерфако». Этот метод особенно хорошо подходит для измерения разности хода на минимальных фазовых объектах вплоть до границы разрешения и обеспечивает очень высокое качество изображения. В этом случае опорная волна интерферирует с волной, деформированной объектом. Плоская опорная волна образуется при экранировании света, преломляемого объектом, так как в микроскопе один только прямой свет не может создать никаких структур. При относительно больших объектах невозможно полностью экранировать преломленный свет, вследствие чего метод «интерфако» должен применяться преимущественно для малых объектов, не более чем в 20 раз превышающих границу разрешения.

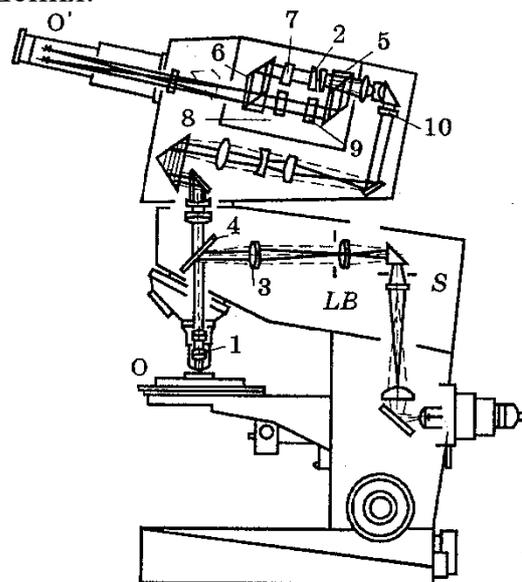


Рисунок 42 - Ход лучей в интерференционном фазоконтрастном микроскопе: 1 — объектив; 2 — поворотный клин; 3 — линза; 4 — зеркало с делениями; 5,6 — призмы; 7 — фазовращатель; 8,9 — компенсационные пластины; L — источник света; S — плоскость щели; O — объект; O' — плоскость изображения

Источник света L конденсором проецируется в плоскость щели S , а затем призмой, системой линз и зеркалом — на заднюю фокальную плоскость объектива 1 через щель 8. Объектив проецирует изображение щели в бесконечность и, после отражения на объекте O , в его заднюю фокальную плоскость через щель S , а затем через группу линз на поворотный клин 2. Диафрагма световой полосы LB проецируется линзой 3 через зеркало 4 с делениями в бесконечность, а объективом 1 — в плоскость объекта. Вместе с объектом изображение диафрагмы световой полосы проецируется объективом в бесконечность, а

затем оптической системой — в плоскость изображения O' лежащую в области окуляра.

Сам интерферометр состоит из двух призм 5 и 6, поворотного клина 2, фазовращателя 7 и компенсационных пластин 8 и 9. На делительной поверхности призмы 5 ход луча расщепляется на два, которые затем снова соединяются на делительной поверхности призмы 6.

При основной регулировке оба луча соединяются без бокового смещения или разности углов, а также без разности хода лучей. Поворотный клин 2 состоит из двух одинаковых клиньев, вращающихся относительно друг друга, и отклоняет лучи от их направления. Это отклонение может принимать любое значение между нулем и удвоенным значением отклонения каждого клина. Если поворотный клин 2 установлен на отклонение, то проходящие через него лучи немного отклоняются от своего направления и изображение, перенесенное верхним пучком лучей, несколько смещается по высоте по сравнению с изображением, перенесенным нижним пучком. В результате получается стереоскопическое изображение объекта.

Тонкий, расположенный перпендикулярно плоскости чертежа, клин 7 служит фазовращателем. Если произвести наложение двух составляющих света, исходящих из двух расположенных рядом стереоскопических изображений одного источника, возникают интерференционные полосы.

Координатометр. Служит для измерения по двум координатам наблюдаемых в проходящем свете объектов, имеющих общую площадь до 300х300 мм, с точностью измерения $\pm 0,0002$ мм.

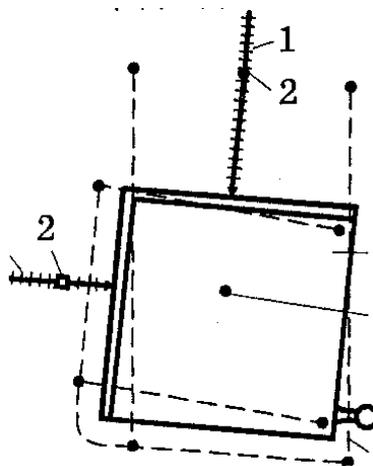


Рисунок 43 - Схема перемещений координатного стола: 1 — масштабные линейки; 2 — отсчетные устройства; 3 — координатный стол (пластиночная рамка); 4 — точка измерения; 5 — ручка перемещения стола; 6 — параллелограммные направляющие

Измерительный прибор снабжен стеклянными «масштабными линейками», расположенными таким образом, что выполняется принцип компаратора Аббе для обеих координат, т.е. продолжение линейки 1 проходит через точку измерения 4 (рисунок 43). Масштабные линейки при движении стола скользят мимо неподвижных устройств отсчета 2. Они перемещаются вместе с рамкой 3. Эта рамка удерживается направляющей 6 в таком положении, что невозможен поворот вокруг перпендикулярной к плоскости измерения оси. Грубая установ-

ка производится вручную с помощью рычага 5 без поворота шпинделя. Масштабные линейки имеют деления в миллиметрах, которые в свою очередь могут быть подразделены на десятые доли микрометра при помощи спирального микрометра, находящегося в потоке лучей отсчета. Отсчет производится путем переключения того же окуляра, с помощью которого устанавливается объект измерения. На рис.86 показан вид в окуляр спирального микрометра. Идея его конструкции состоит в том, что основные детали, а именно: винт и барабан с делителями, с одной стороны, гайка с движком и стеклянная пластина с нанесенными на нее делениями, с другой, объединяются в общий элемент.

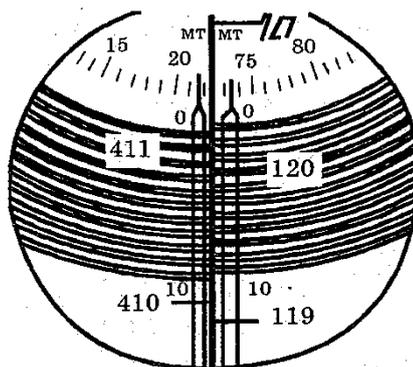


Рисунок 44 - Вид в окуляр отсчетных шкал спиральных микрометров

Этот элемент представляет собой стеклянный диск, разделенный по кругу на 100 частей и имеющий архимедову спираль, полюс которой совпадает с центром круга. Стеклянный диск перемещается в микроскопе на том месте, которое обычно занимает пластина с делениями (объект - микрометр), так деления появляются в микроскопе одновременно с штрихов объект - микрометра (рисунок 45).

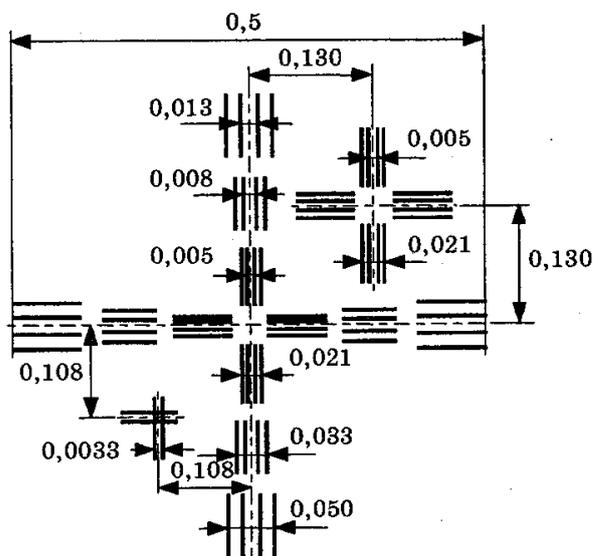


Рисунок 45 - Проверочная фигура для контроля малых размеров (размеры даны в мм)

Увеличение настроено таким образом, что 10 витков спирали соответствуют одному перемещению на 1 мм. Приводом для вращения дисков со спиралью являются два маховичка справа и слева от окуляра. Приводная кнопка служит для фокусировки отсчетного микроскопа.

Проекционный инструментальный микроскоп. Состоит из четырех основных узлов: станина, измерительный стол, измерительная головка и электрический блок питания. Станина стоит на трех регулируемых установочных винтах. Внутри нее вмонтированы оптические системы и электрооборудование для освещения и проецирования масштабной шкалы.

Измерительный стол передвигается по двум координатам по шариковым направляющим с помощью грубого и точного приводных механизмов. Измерение производится сравнением с прецизионными стеклянными масштабными линейками, шкалы которых проецируются на матовые стекла одновременно с нониусом. Расположенный на измерительном столе круглый стол может поворачиваться на 360° . Измерительная головка состоит из бинокулярного микроскопа, проекционного устройства, фотоустановки и двойной призмы. Двойная призма передвигается вдоль оси z по рельсовой направляющей держателя микроскопа. Эта направляющая сделана настолько точной, что можно с очень высокой точностью измерять горизонтальные отрезки на образце на различной высоте.

Двойная призма позволяет использовать микроскоп также для точного измерения симметричных элементов фигур. При проведении измерений образец помещается в поток лучей осветительной установки и под микроскопом в бинокуляр рассматривается теневое изображение. Для визирования измеренных на образце точек в поток лучей помещают в кассете пластину, на которую нанесены или соответствующие деления, или же эталонные штриховые фигуры для сравнения с теневым изображением образца.

Для просмотра часто меняющихся фигур теневое изображение проецируется на экран, с которого рисунок, увеличенный в нужном соотношении, может быть зафиксирован на прозрачной бумаге. Если нужно произвести не только сравнение, но и измерение, то образец перемещается или поворачивается с помощью измерительного стола. Отдельные значения замеров могут при этом сниматься в g - и y - направлениях при цене деления шкалы $0,005$ мм, или же по шкале с ценой деления $3'$. Погрешность метода совмещения при использовании двойной призмы составляет для геометрических фигур с хорошим качеством их краев не более ± 5 мкм.

Тема 1.4 Изготовление литографических шаблонов

Фотошаблоны являются основным инструментом контактной литографии в планарной технологии. Необходимость обеспечения идентичности конфигураций полупроводниковых структур от процесса к процессу накладывает на фотошаблоны жесткие требования. Они должны иметь строго рассчитанный геометрический рисунок с допусками на размер элементов в пределах долей микрон, минимальное количество дефектов и отвечать требованиям совместности различных технологических рисунков всех входящих в комплект фотошаблонов. Для изготовления элементов каждого функционального прибора или интегральной микросхемы требуется комплект фотошаблонов, состоящий из 4-12 стекол. Эти фотошаблоны имеют различные, но взаимосовместимые изображения, изготавливаемые при одинаковых оптических условиях.

При работе с фотошаблонами пользуются следующими терминами и понятиями:

- топология структуры — рисунок (чертеж), включающий в себя размеры элементов структуры, их форму, положение и принятые допуски;
- оригинал — увеличенный, поддающийся воспроизведению рисунок отдельной детали фотошаблона, обычно одной или нескольких отдельных топологии структур изделия, предназначенной для изготовления фотошаблона методом последовательного уменьшения и мультипликации;
- промежуточный оригинал-фотошаблон с рисунком оригинала после его фотографического промежуточного уменьшения в один или несколько приемов, с размножением изображения или без него;
- фотошаблон — плоскопараллельная пластина из прозрачного материала для фотолитографических целей, на которой имеется рисунок, состоящий из непрозрачных и прозрачных для света определенной длины волны участков, образующих топологию одного из слоев структуры прибора, многократно повторенного в пределах активного поля пластины;
- маска — плоская пластина или пленка, содержащие рисунок в виде сквозных окошек и предназначенные для локального экспонирования;
- металлостеклянный (металлизированный) фотошаблон — фотошаблон, экспонирующий рисунок которого представляет собой тонкую металлическую пленку, нанесенную на прозрачную стеклянную подложку;
- эталонный фотошаблон — первый фотошаблон в процессе изготовления структур, с которого обычно получают рабочие или первичные копии фотошаблонов;
- рабочий фотошаблон — фотошаблон, применяемый в фотолитографическом процессе при изготовлении полупроводниковых структур контактной или проекционной печатью на полупроводниковую пластину, покрытую слоем фоторезиста;
- кадр — часть рисунка фотошаблона, полученная за один процесс экспонирования. В кадре обычно содержится одна или несколько топологий структуры;

- элемент топологии — общее понятие для деталей топологии структуры;
- штрих-светопроницаемый прямоугольный элемент изображения, ширина которого существенно меньше его длины;
- щель-светопроницаемый прямоугольный элемент топологии структуры, ширина которого существенно меньше его длины;
- зазор — расстояние d между двумя элементами структуры микросхемы один за другим с разных стекол комплекта фотошаблонов (рисунок 46);
- фигура совмещения — специальный топологический рисунок в виде штриха, щели, креста и т.д. для облегчения юстировки рабочего фотошаблона при определении его совмещения с рисунком на полупроводниковой пластине;
- метки грубо приближенного совмещения — метки на фотошаблоне, позволяющие правильно наложить при совмещении соответствующие строки и столбцы в пределах одного комплекта фотошаблонов. В качестве такой метки может служить отсутствие одного или нескольких кадров на фотошаблоне;

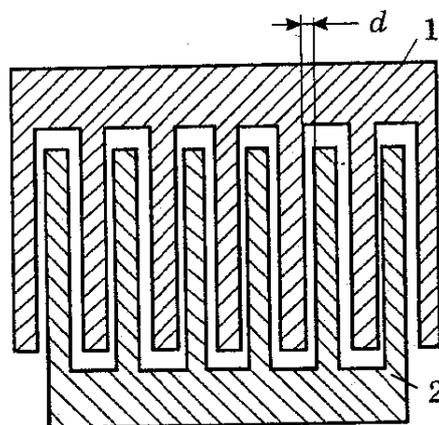


Рисунок 46 - Зазор d между отпечатками совмещенных рисунков 1 и 2, полученных с двух различных фотошаблонов

- поле кадра — диагональ единичного изображения (кадра) на любом из этапов фотографического уменьшения и мультипликации изображения;
- проколы — дефекты фотошаблона в виде мельчайших отверстий в непрозрачных элементах изображения или темных точек на прозрачных элементах. Проколы определяются плотностью дефектов, т.е. их количеством на 1 см^2 фотошаблона;
- неровность края высота микронеровностей (зубцов) прямолинейного края непрозрачного элемента фотошаблона (рисунок 47);

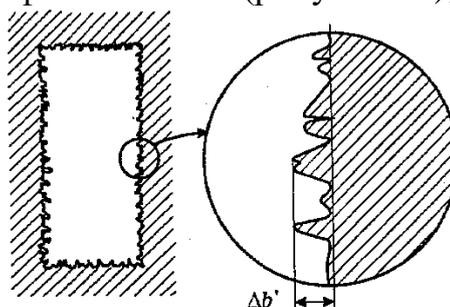


Рисунок 47- Наглядное изображение «неровности края»

- нерезкость (размытость) края b_s — ширина постепенного перехода от прозрачной проницаемой области в элементе изображения, иначе говоря, ширина серой зоны изображения при переходе от белой области к черной (рисунок 48).

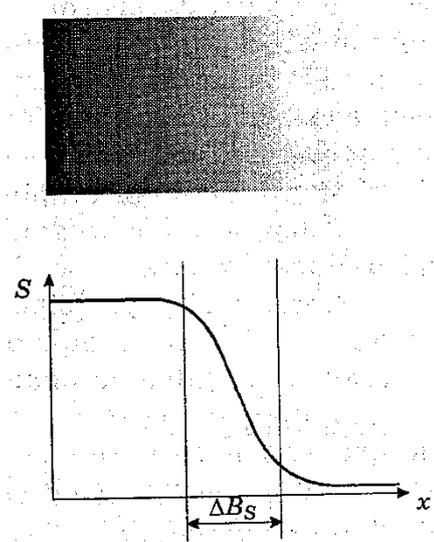


Рисунок 48 - К понятию «размытость края»: S — оптическая плотность; x — координата в плоскости фотошаблона

- ширина элемента b — расстояние между двумя воображаемыми линиями B_1 и B_2 соответствующими среднему прохождению двух краев K_1 и K_2 (рисунок 49).

- колебание Δb ширины элемента — половина разности между максимальной и минимальной шириной двух одинаковых элементов изображения. Величина Δb складывается из неровности края, искажений оптической системы, нерезкости края и связана с колебаниями условий экспонирования от одного кадра к другому и с неравномерностью освещения элементов структуры в пределах одного кадра;

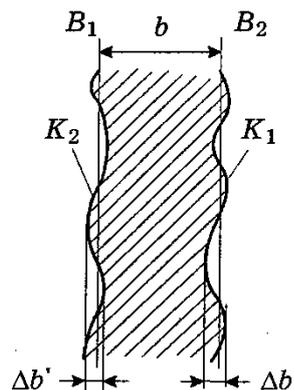


Рисунок 49 - К понятию «ширина элемента»: B_1 и B_2 — средние линии границ элемента; K_1 и K_2 — фактическое положение границ

- наименьшая ширина элемента в мкм (признак сложности для одного фотошаблона или (комплекта фотошаблонов) — ширина наименьшего элемента в данном комплекте фотошаблонов;

- точность шага (x_a, y_b) — абсолютная величина колебаний расстояния между полученными на фотоповторителе по обеим координатным осям;

- воспроизводимость (x_R, y_R) — абсолютная величина колебаний положения кадров фотошаблона, полученного на фотоповторителе по обеим координатным осям по отношению к положению соответствующих кадров других фотошаблонов, полученных на том же тубусе фотоповторителя в результате предыдущего или последующего процессов мультипликации;

- оптическая плотность почернения S — десятичный логарифм отношения светопропускаемости прозрачного участка к светопропускаемости непрозрачного участка поверхности фотошаблона при достаточной ширине элемента структуры. У очень малых элементов оптическая плотность почернения зависит от ширины элемента и должна быть особо обозначена, например, $S(1 \text{ мкм})$ для штриха шириной 1 мкм.

Рабочее поле фотошаблона соответствует диаметру обрабатываемой подпёки.

Поскольку при переносе рисунка с фотошаблона на пластину точность его выполнения ухудшается, требования точности выполнения шаблона значительно выше, чем к точности рисунка на полупроводниковой подложке. Кроме этого, из-за дифракционного перераспределения при переносе рисунка для компенсации этого эффекта вводят технологические коррекции размеров рисунка на фотошаблоне.

Производство фотошаблонов является сложным многостадийным процессом, включающим: проектирование топологии ИС, изготовление увеличенного фотооригинала, промежуточного фотооригинала, промежуточного фотошаблона, эталонного фотошаблона и, наконец, рабочих фотошаблонов.

Проектирование современных фотошаблонов ввиду их сложности и жестких требований, предъявляемым к точности размеров, производится только с помощью систем автоматического проектирования и самых современных средств вычислительной техники.

Генерация изображения.

Самым простым методом генерации изображения является вырезание увеличенного рисунка топологии в лаковой пленке на координатографе (рисунок 50). При этом непрозрачная для света пленка наносится на листы полированного витринного стекла, либо прозрачной полиэфирной пленки. Управление движениями резца осуществляется либо вручную (ручной координатограф), либо автоматически по программе (автоматический координатограф). В зависимости от размера рабочего модуля и требуемой точности изготовления рисунков выполняют в масштабе от 200:1 до 1000:1. Этот увеличенный рисунок и является первичным оригиналом. Методами фотографии с помощью редуционных камер оригинал уменьшают до масштаба 10:1, т.е. получают промежуточный оригинал (рисунок 51). Однако, такой метод является устаревшим и используется для очень для простых топологий полупроводниковых приборов. Современным методом для этих целей является микрофотонаборный метод генерации изображения. Микрофотонаборный метод, реализуется либо оптическим, либо электронным генератором изображения.

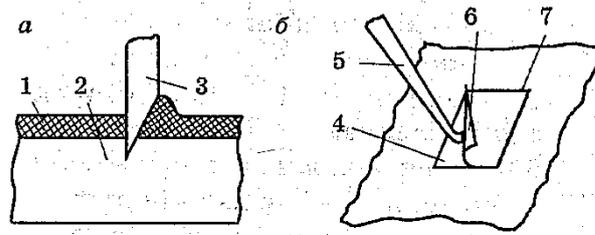


Рисунок 50 - Прорезание двухслойной пленки (а) и снятие ее (б) при получении топологического рисунка вырезкой: 1 — окрашенный верхний слой пленки, прикрепленный клеящим составом к основе; 2 — прозрачная безупрочная основа; 3 — резец; 4 — прозрачная область (топологический элемент); 5 — крючок для снятия пленки; 6 — снимаемая окрашенная пленка; 7 — прорезанный контур

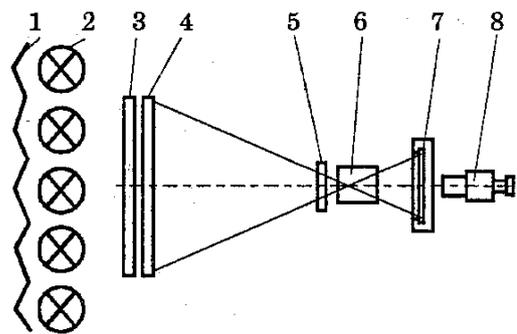


Рисунок 51 - Схема редукционной камеры: 1 — отражающий экран; 2 — источник света; 3 — рассеивающее стекло; 4 — держатель оригинала; 5 — фильтр; 6 — объектив; 7 — кассета с фотопластинами; 8 — микроскоп

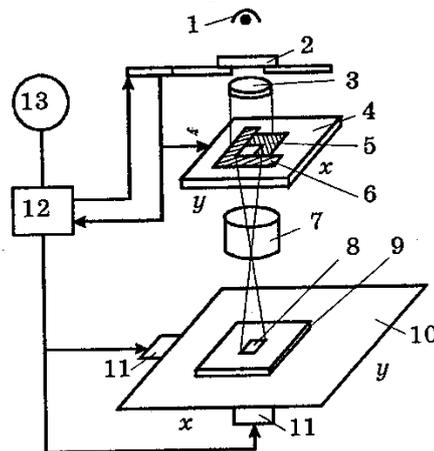


Рисунок 52 - Схема генератора изображений: 1 — лампа-вспышка; 2 — конденсорная система линз; 3 — щелевая наборная диафрагма; 4, 5, 6 — электродвигатели управления соответственно шириной, длиной щели и углом ее поворота; 7 — объектив; 8, 9 — интерферометрические датчики перемещений координатного стола по осям x и y ; 10 — координатный стол; 11 — сервоэлектродвигатели перемещений координатного стола; 12 — программное устройство; 13 — ЭВМ

В оптическом генераторе изображения (рисунок 53) используется оптическая система с вертикальным световым пучком. Пучок света идет снизу вверх, что позволяет сочетать требования точности изготовления рисунка и жесткости конструкции. Установка работает с остановками стола в заданном положении во время экспонирования; используется принцип разбиения создаваемых топологических элементов на элементарные прямоугольники. Эти прямоугольники с помощью специальной программы формируются блоком шторок. Он состоит из неподвижной и подвижной шторок, взаимным расположением которых и определяются размеры элементарного прямоугольника (рисунок 53). Координатный стол обеспечивает точное перемещение пластины с фоторезистом по координатам x и y .

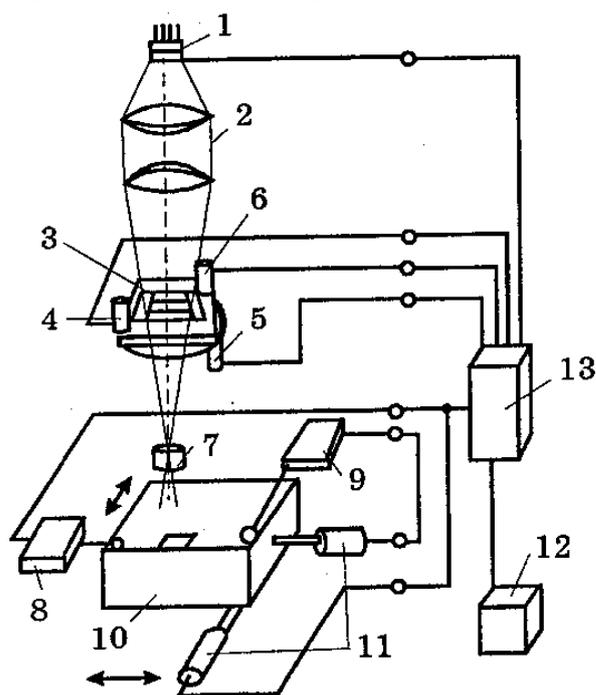


Рисунок 53 - Схема оптического генератора изображения (микрофотонаборной установки): 1 — источник актиночного излучения; 2 — затвор; 3 — конденсор; 4 — блок шторок с управлением от ЭВМ приводом; 5, 6 — неподвижная и подвижная шторки; 7 — проекционный объектив, передающий изображение с уменьшением; 8 — изображение элемента рисунка; 9 — фоторезистовая пластина; 10 — координатный стол с приводами и системой точного контроля положения; 11 — система контроля положения стола, выполненная на дифракционных решетках; 12 — специализированная управляющая ЭВМ; 13 — ввод информации

Оптический генератор позволит осуществить до 300 тысяч экспозиций в час и формировать с большой скоростью сложный топологический рисунок БИС (рисунок 54). Однако ввиду того, что современные БИС имеют до миллиона топологических элементов даже при таком быстродействии формирование одного стекла фотошаблона составляет десятки часов.

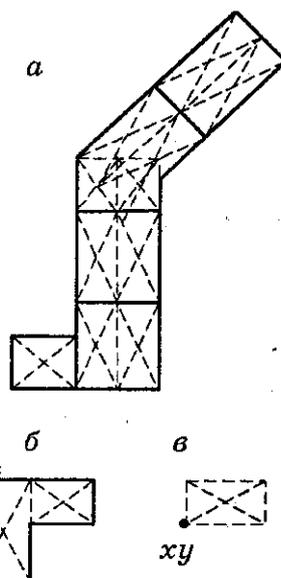


Рисунок 54 - Генерация изображений топологических элементов на микрофотонаборной установке:

a — сложного; *б, в* — простых

Электронно-лучевой генератор изображения в сравнении с оптическим имеет более высокое быстродействие. В нем используется электронный луч круглого либо прямоугольного сечения в режиме векторного сканирования. При этом возможно получение на рабочем поле до 50 млн. элементов, что является достаточным для генерации СБИС.

Маршруты изготовления фотошаблонов.

В зависимости от степени сложности ИМС выбирают различные маршруты изготовления фотошаблонов. При этом учитывают также, что чем короче маршрут генерации и переноса изображения, тем точнее получается рисунок и тем меньше вносимых дефектов. На рисунке 55 приведена общая схема, из которой в зависимости от степени сложности ИМС выбирают конкретный технологический маршрут. Так, для ИМС малой и средней степени интеграции выбирают маршруты: 1-3-5-7-9-10-11-12-13. Это обеспечивает высокую производительность и относительно низкие затраты, однако за счет невысокой точности и высокого уровня дефектности.

В случае ИМС высокой степени интеграции требования к точности существенно возрастают и именно это определяет маршрут 1-3-4-7-8-12-13. Здесь, однако, низка производительность и высоки затраты.

В случае СБИС выбирают маршрут, обеспечивающий максимальную точность и минимальный уровень дефектности несмотря на низкую производительность и очень высокие затраты.

Маршрут электронно-лучевой литографии 1-2-13 используют при производстве схем ультрабольшой степени интеграции.

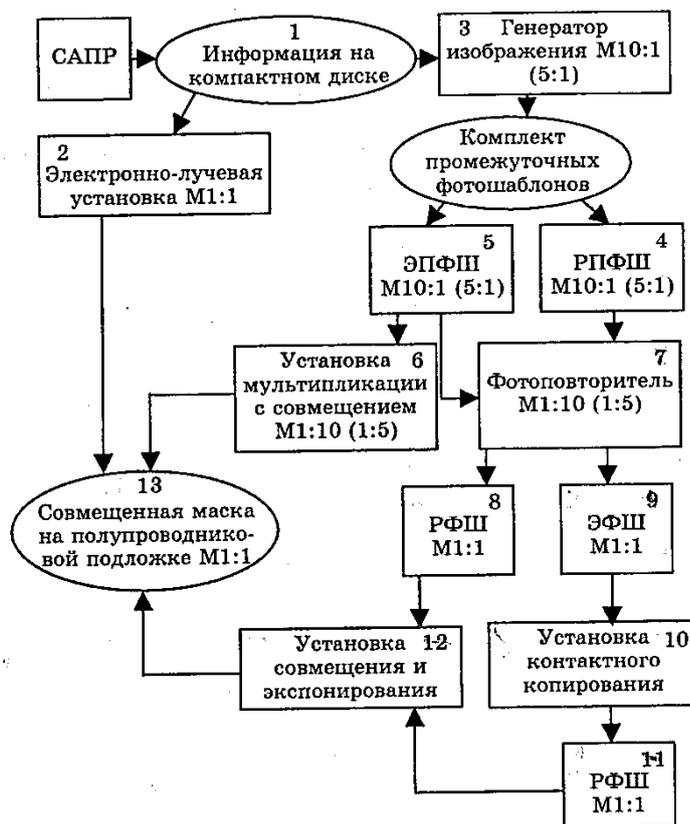


Рисунок 55 - Структурная схема маршрутов генерации и переноса изображения при производстве ИМС

Мультипликация (размножение).

Основное назначение систем мультипликации — изготовление эталонных фотошаблонов. Процесс мультипликации заключается в уменьшении изображения структуры или группы структур, имеющих на промежуточном оригинале, до окончательного размера согласно чертежу и многократном повторении фотопечатью этих изображений на определенной площади светочувствительной пластины при высокой точности взаимного расположения отдельных структур.

Ввиду того, что названные операции являются последним этапом в технологии изготовления эталонных фотошаблонов, основные их параметры фотошаблонов реализуются именно в процессе мультипликации.

В настоящее время существует два базовых метода мультипликации: одновременной съемки и мультипликации набора единичных изображений с помощью линзовых растворов и последовательной мультипликации единичного изображения, основанной на применении прецизионных шагово-повторных фотокамер (фотоповторителей).

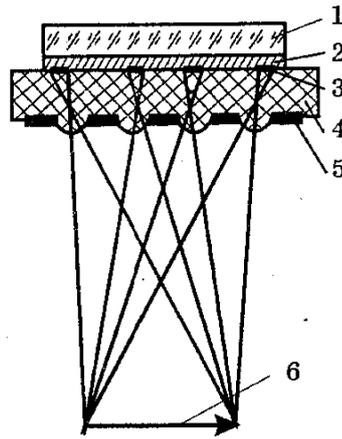


Рисунок 56 - Схема процесса получения изображений с использованием линзовых растров: 1 — стеклянная фотопластина; 2 — светочувствительный слой; 3 — изображения; 4 — линзовый растр из полистирола; 5 — дифрагирующая маска; 6 — объект съемки

Растром называется решетка, служащая для структурного преобразования лучей. В микроэлектронике наибольшее распространение нашли линзовые растры, представляющие собой набор множества маленьких линз, короткофокусных, расположенных в одной плоскости. Общий размер растра и расстояния между этими линзами должны соответствовать площади фотошаблона и расстоянию между единичными кадрами, т.е. шагу структур. Каждая линза создает изображение в общей плоскости изображений. При съемке перед линзовым растром (рисунок 57) располагают объект в виде увеличенного рисунка единичной структуры, а в плоскости изображений — пластину со светочувствительным покрытием.

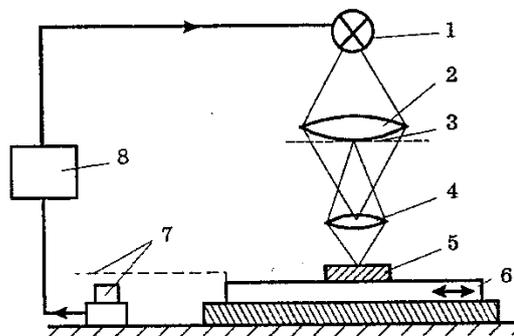


Рисунок 57 - Общая схема однопозиционного фотоповторителя: 1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — объект (промежуточный оригинал); 4 — объектив; 5 — фотопластина; 6 — плита координатного стола; 7 — измерительная система; 8 — система управления работой блока экспонирования

При этом каждая линза растра формирует свое изображение, и в результате на поверхности пластины образуется множество изображений объектов. Относительное их расположение определяется расположением линз-растров. Однако разрешающая способность растровых систем пока не в состоянии удовлетворять требованиям топологии СБИС.

Наиболее универсальным методом эталонных фотошаблонов является использование фотоповторителя (рисунок 58).

Конструктивно фотоповторитель представляет камеру проекционной фотопечати уменьшаемой в определенном масштабе изображения объекта (промежуточного оригинала) на пластину со светочувствительным слоем. Эта фотопластина механически перемещается в плоскости изображений и периодически, при достижении ею определенной координатной позиции, на пластину экспонируется рисунок структуры.

Местоположение каждой позиции определяется измерительной системой отсчета текущих координат и задается путем ввода специальной программы мультипликации. В ряде случаев для повышения производительности используют многопозиционные фотоповторители (рисунок 58). Оптическая система фотоповторителя характеризуется высокой разрешающей способностью (не более 1 мкм на поле 10x10 мм) и очень точным координатным столом с воспроизводимостью перемещений до 0,05 мкм.

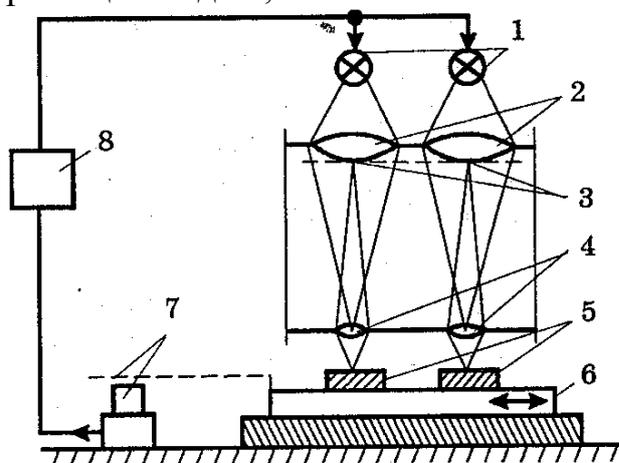


Рисунок 58 - Общая схема многопозиционного фотоповторителя: 1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — объект; 4 — объектив; 5 — фотопластина; 6 — плита координатного стола; 7 — измерительная система; 8 — система управления работой блока экспонирования

Многопозиционные фотоповторители для одновременной мультипликации снижают величину несовмещаемости фотошаблонов, вызванную шаговой погрешностью фотоповторителя, но одновременно вносят свои погрешности, ухудшающие совмещаемость фотошаблонов в комплекте. Это, прежде всего, разномасштабность и неидентичность характеристик объективов, используемых на разных тубусах фотоповторителя, а также некоторое «рыскание» координатного стола при движении, вызванное не прямолинейностью направляющих. Сопоставляя ошибки вызванные погрешностями позиционирования стола и погрешностями оптики конкретного фотоповторителя, и требования по совмещаемости изготавливаемого фотошаблона, необходимо в каждом конкретном случае использовать либо мультипликацию на одной позиции за несколько рабочих проходов, либо мультипликацию на нескольких позициях за один проход, либо комбинированный вариант.

Воспроизводимое позиционирование стола фотоповторителя, а, следовательно, и точность изготовления фотошаблонов в значительной степени зависит от постоянства окружающей температуры. Это особенно заметно для ме-

таллических деталей и узлов ввиду большого ЛКТР — линейного коэффициента температурного расширения ($\sim 10^{-4} 1^\circ\text{C}$). Несмотря на низкий ЛКТР стекла ($\sim 10^{-5} 1^\circ\text{C}$) температурные колебания из-за больших размеров пластины (127x127, 153x153, 178x178 мм) и микронные размеры элементов структуры существенно влияют на точность воспроизведения рисунка.

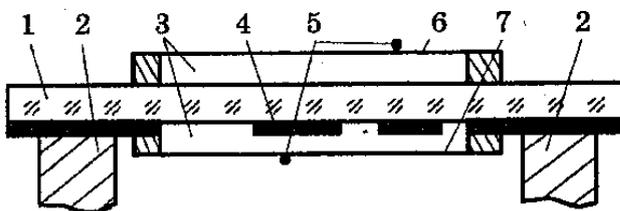


Рисунок 59 - Защита промежуточного фотошаблона полимерной пленкой: 1 — стеклянная пластина; 2 — опорная рамка; 3 — защищенный от внешних загрязнений объем; 4 — маскирующий слой (рабочая поверхность); 5 — пылевые загрязнения; 6, 7 — защищенные пленки нерабочей и рабочей поверхностей

Промежуточный фотошаблон не должен иметь ни одного дефекта, иначе все модули эталонного фотошаблона будут дефектными. Это так называемый повторяющийся дефект. Он образуется вследствие оседания пылинок на рабочую поверхность промежуточного фотошаблона при мультипликации. Для защиты от этих пылинок рабочую поверхность промежуточного шаблона закрывает тонкой полимерной пленкой толщиной 2-4 мкм (рисунок 60) обладающей высокой оптической однородностью и практически являющейся оптически нейтральной, т.е. не вызывающей искажение изображения. Осевшая на такую пленку пылинка не перенесется при мультипликации, так как находится вне фокальной плоскости. Для выявления систематических ошибок проводят контрольную мультипликацию со специальным тестовым промежуточным фотошаблоном. Это позволяет определить и устранить практически все погрешности, связанные с оптическими и механическими узлами фотоповторителя.

Копирование фотошаблонов.

Полученный эталонный фотошаблон копируют и получают рабочие фотошаблоны. Копирование выполняют контактным экспонированием. В технологии БИС используют в основном металлизированные фотошаблоны с маскирующим покрытием из хрома либо, гораздо реже, «цветные» или «транспортные» с маскирующим покрытием из оксидов хрома или железа. Эмульсионные фотошаблоны ввиду низкой износостойкости и невысокой разрешающей способности не используются. Поэтому структура промышленного фотошаблона представляет собой стеклянную подложку — хромовую маску либо стеклянную подложку — маску из оксида железа (хрома). Соответственно получение рабочих фотошаблонов сводится к фотолитографии пленок хрома, либо оксидов железа (хрома).

Копирование выполняют контактным методом. В связи с тем, что эталонный шаблон и заготовка рабочего имеют некоторую кривизну, при свободном положении они не могут хорошо прилегать друг к другу. Поэтому для выбора зазора необходимо обеспечить надежный контакт оригинала и фоторези-

ста заготовки. Наилучшие результаты получают использованием вакуумно-копировальной рамки вместе со схемой осветителя.

Конструкция рамки обеспечивает отсасывание воздуха из зазора и значительное встречно-направленное давление на контактируемые пластины. Создавая вакуумным насосом перепад давлений, изменяют усилие прижима эталонного шаблона к слою фоторезиста заготовки и тем самым задают прогиб в ту или иную сторону. Это, в свою очередь, определяет точность переноса рисунка с эталонного фотошаблона. Скорости вакуумирования камер и напуска воздуха задаются по программе, а давление подбирают экспериментально по минимальному уровню дефектности, наименьшему искажению передаваемого рисунка. Здесь, как и в обычной контактной фотолитографии эталонный фотошаблон загрязняется и повреждается. Поэтому количество контактных экспонирований ограничено. Стоимость фотошаблонов достаточно высока, поскольку стеклянные подложки предварительно шлифуют и прецизионно полируют, а затем они проходят сложный технологический цикл: нанесение маскирующего слоя, процесс литографии, контроль.

Нанесение маскирующего слоя (металлизация) осуществляется в установках для напыления при достаточно высоком вакууме (до 10^{-5} Па). В качестве исходного материала используется чешуйчатый электролитический рафинированный хром высшей очистки. Перед применением чешуйки хрома измельчаются в алундовой ступке, травятся в соляной кислоте (2-3 мин), промываются в деионизованной воде и сушатся при 120-150°C. Напыляются пленки толщиной 0,08 мкм. Они должны быть строго однородны, без присутствия сравнительно крупных монокристаллов и проколов. Получение столь строгой металлографической структуры пленки хрома возможно осуществить при соблюдении оптимальных условий напыления. Прежде всего необходимо обеспечить загрузку напылительной установки, исключая попадание пыли под душем ламинарного потока обеспыленного воздуха над установкой. После химической обработки стеклянной подложки она покрывается защитной пленкой химически стойкого лака ХСЛ. За время сушки эта пленка полимеризуется, захватывает в себя оставшиеся механические загрязнения и предохраняет от попадания новых. Непосредственно перед напылением пленка легко снимается, освобождая чистую поверхность стекла.

С целью дополнительной очистки от остаточных загрязнений, а также создания на поверхности пластины густой сети центров кристаллизации подложки обрабатываются тлеющим разрядом в течение 20-30 мин; для электродов применяется алюминий, очищенный зонной плавкой.

Навеска хрома подвергается предварительному отжигу при температуре, близкой к температуре испарения. При этом специальная заслонка закрыта и защищает подложку от запыления в момент отжига. С целью подавления роста крупных кристаллов хрома напыление ведут в прерывистом режиме с укреплением подложек на вращающемся барабане. Температуру подложек при напылении поддерживают около 100°C, что обеспечивает хорошую десорбцию газов при относительно малой миграционной подвижности атомов осаждаемого хрома. При напылении хрома на слабо нагретые подложки возникают сложные

структуры, характеризующиеся наличием внутри зерен хрома сложных сплетенных дислокаций, искривлением границ зерен, переплетением одного зерна с другим. Кроме этого, наличие внутренних напряжений в пленке вместе со структурными дефектами приводит к появлению микропроколов в виде трещин. Наилучшие результаты появляются при скорости напыления до 1 нм/с.

Защита фотошаблонов.

Даже хромированный фотошаблон при контактной печати изнашивается. Количество дефектов резко увеличивается с увеличением числа контактных пропечаток (рисунок 60). Для увеличения износостойкости фотошаблон защищают нитридом кремния Si_3N_4 толщиной 1000 Å (пленки Si_3N_4 получают на установке реактивного распыления кремния в низкотемпературной плазме). Пленки такой толщины практически не ухудшают оптических свойств фотошаблонов, увеличивая их износостойкость в 2-3 раза.

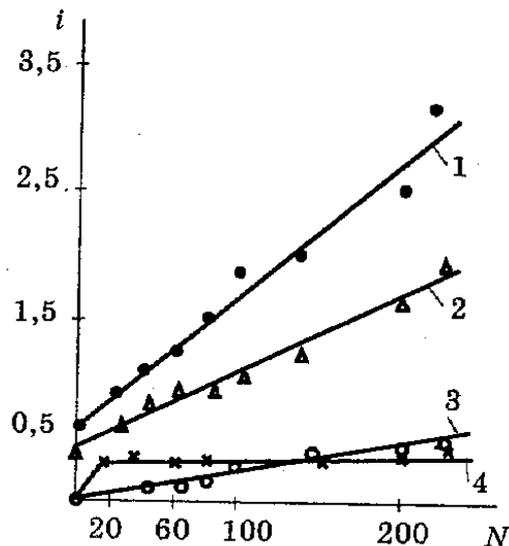


Рисунок 60 - Зависимость средней относительной плотности дефектов i незащищенного хромированного фотошаблона от числа совмещений N : 1 — общая плотность дефектов; 2 — отверстия; 3 — «взрывы»; 4 — царапины стекла

Цветные фотошаблоны.

Для уменьшения эффектов отражения света применяют цветные фотошаблоны, в которых маскирующий слой выполнен из диэлектриков или полупроводников. Лучшую спектральную характеристику имеют цветные фотошаблоны на основе оксида железа (рисунок 61).

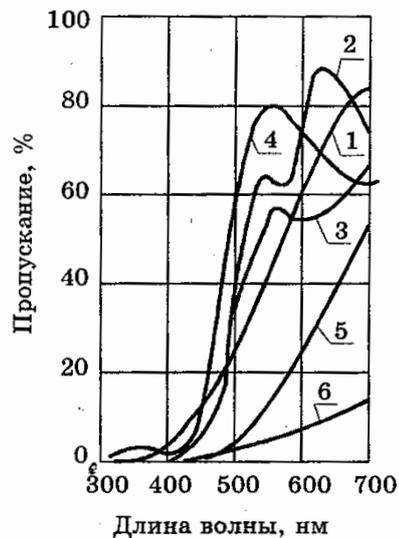


Рисунок 61 - Спектры поглощения пленок различных оксидов: 1— оксид железа (180 нм); 2— оксид ванадия (80 нм); 3— оксид никеля (470 нм); 4— смесь оксидов железа и ванадия, полученная распылением мишени из 25% железа +75% ванадия (386 нм); 5— смесь оксидов железа и ванадия, полученная распылением мишени из 10% железа +90% ванадия (315 нм); 6 — смесь оксидов железа и никеля, полученная распылением мишени из 65% железа +35% никеля (370 нм)

Он непроницаем для излучения тех длин волн, к которым чувствительны обычные фоторезисты. В отличие от пленок хрома оксид железа прозрачен на более длинных волнах, что облегчает процесс совмещения, препятствует экспонированию фоторезистов. Для воспроизведения геометрических размеров элементов и обеспечения однородного травления пленки оксида железа оптическая плотность должна составлять около 2,15. На длине волны 420 нм ей соответствует толщина пленки около 220 нм. Отражающая способность таких пленок гораздо меньше, чем блестящих пленок хрома, что повышает разрешающую способность фотолитографического процесса и увеличивает резкость края изображения в фоторезисте на пластине кремния. Полупрозрачные цветные фотошаблоны на основе оксида железа обеспечивают простоту совмещения, имеют низкие уровни дефектов и значительно большую износостойкость, чем хромовые.

Основные этапы изготовления цветных фотошаблонов на основе оксида железа приведены на рисунке 62.

Для осаждения тонких пленок используют химическое разложение пента-карбонила железа в паровой фазе, разложение металлоорганических соединений и реактивное катодное распыление.

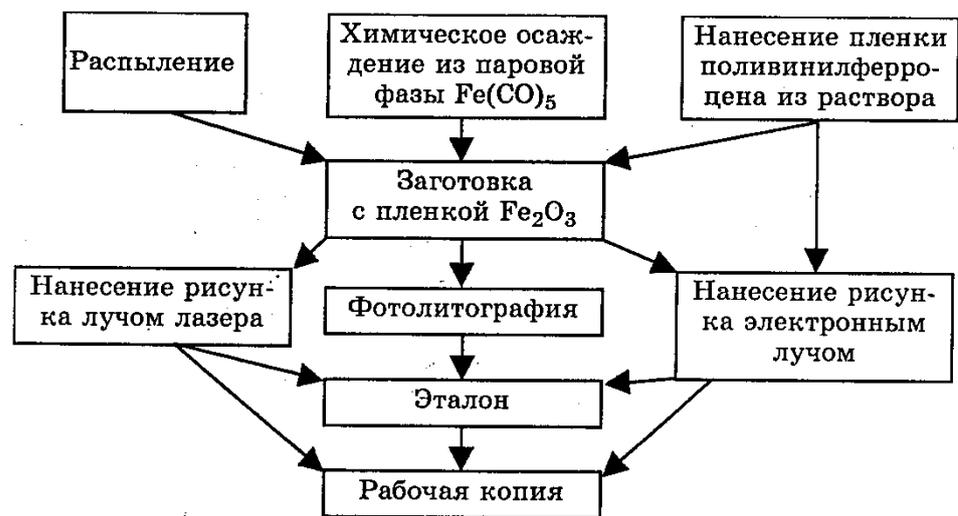


Рисунок 62 - Схема процесса изготовления цветных фотошаблонов на основе оксида железа

Контроль параметров фотошаблонов.

Основные виды дефектов и их определение.

Контроль фотошаблонов осуществляется с целью измерения размеров их элементов, определения соответствия этих размеров указанным чертеже с учетом допуска, а также наличия и плотности дефектов. Измерение ширины линий и плотности дефектов дает информацию, на основании которой шаблон либо признают годным, либо бракуют.

Ширину линий измеряют визуально на просвет под микроскопом, либо с помощью автоматизированной телевизионной аппаратуры.

Структурная схема опико-механического устройства автоматизированной установки для контроля элементов топологии приведена на рисунке 64. В состав установки входят осветитель, двухкоординатный стол с датчиками линейного перемещения и оптический блок с фотоэлектрическим каналом. Опико-механическое устройство имеет проектор с увеличением 100x для наблюдения контролируемых элементов, управление установкой осуществляется ЭВМ, которая также обрабатывает измерительную информацию и выдает результаты на цифropечатающее устройство. Эта установка работает по принципу фотолитографирования изображения контролируемого элемента при перемещении каретки с фотошаблоном. Отсчет координат каретки ведется с помощью датчиков линейного перемещения, ширина элемента определяется автоматически посредством цифровой обработки сигнала фотолитографирования.

Координатный стол выполнен на воздушной подушке и перемещается по координатам линейным шаговым двигателем, что обеспечивает очень высокую точность перемещения.

Контроль совмещаемости фотошаблонов осуществляется с помощью двухканального микроскопа сравнения, обеспечивающего оптическое наложение друг на друга двух фотошаблонов, окрашенных в дополнительные цвета (обычно красный и зеленый). Микрометры, встроенные в каналы сравнения позволяют количественно контролировать рассовмещаемость фотошаблонов.

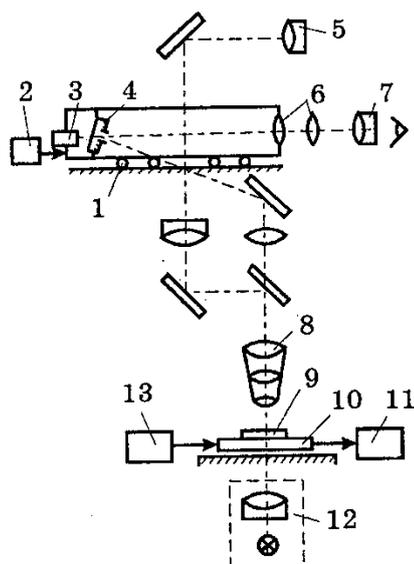


Рисунок 63 - Структурная схема опико-механического устройства
 Высокая точность контроля обеспечивается фотоэлектрическим микроскопом и прецизионными датчиками линейного перемещения.

Упрощенная оптическая схема такой установки представлена на рисунке 64. При контроле совмещаемости на рабочем поле фотошаблона возможны два варианта траектории обхода: «змейка» и «крест» (рисунке 65).

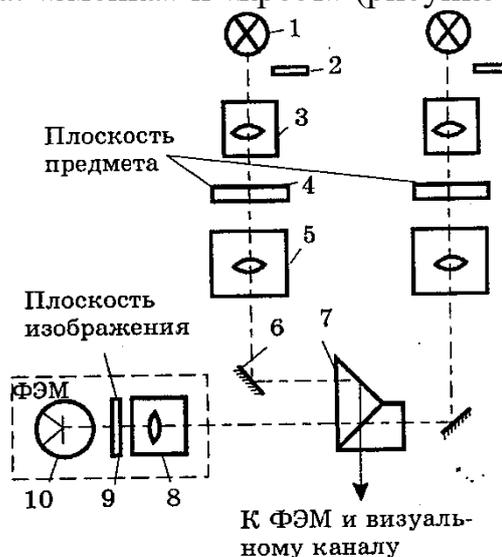


Рисунок 64 — Оптическая схема установки контроля совмещаемости:
 1 — лампа; 2 — затвор; 3 — конденсатор; 4 — контролируемый фотошаблон; 5 — объектив; 6 — зеркало; 7 — блок наложения изображений; 8 — объектив фотоэлектрического микроскопа ФЭМ; 9 — анализирующая диафрагма; 10 — фотоприемник

Выбор контролируемых параметров зависит от типа фотошаблонов и технологического маршрута их изготовления. Контроль проводят в соответствии со следующими планами.

1. План контроля промежуточного фотошаблона (норма контроля 100%):

-соответствие топологического чертежа и изображения, сформированного на промежуточном фотошаблоне; дефектность (нарушение или загрязненность);

-совмещаемость в соответствии с порядком совмещения топологических слоев ИМС.

2. План контроля эталонного фотошаблона (норма контроля 100%);

-контроль повторяющегося дефекта;

-контроль размера выбранного контрольного топологического элемента;

-контроль дефектности;

3. План контроля рабочих фотошаблонов (норма контроля 100%):

-контроль критического размера;

-контроль дефектности;

-контроль повторяющегося дефекта.

Фотошаблоны, не удовлетворяющие требованиям по какому-либо из контролируемых параметров, подлежат выбраковке.

Основные виды дефектов фотошаблонов приведены на рис.60 и сведены в таблицу 1.

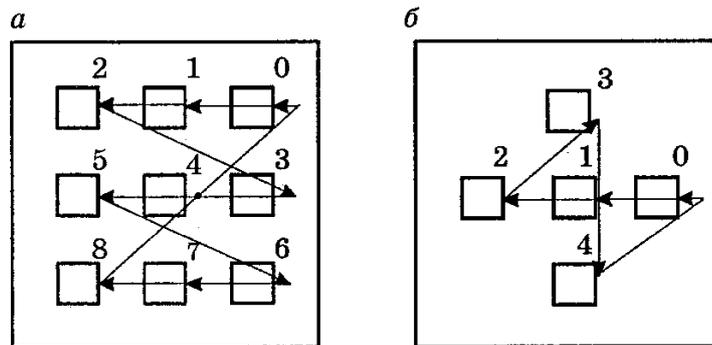


Рисунок 65 - Траектории обхода топологии фотошаблонов при контроле: а — «змейка»; б — «крест»

Таблица 1 -Дефекты, возникающие в процессе литографии фотошаблонов

Вид дефекта	Условия наблюдения, описание	Возможные причины
1. Подтравливание маскирующего слоя под пленкой фоторезиста	Под микроскопом при увеличении x100 в проходящем свете наблюдается "ободок" (клин травления) под фоторезистом вследствие проникновения травителя	Проявитель слишком агрессивен: а) велика концентрация; б) реактив слишком активен; в) вязкость раствора мала.
2. Уменьшение размера элементов микроизображения	Под микроскопом в отраженном свете наблюдается рыхлый край фоторезиста, клин проявления, «ласточкины хвосты» во внешних углах, закрытых фоторезистом элементов	Переэкспозиция. Плохой контакт (контактная литография). Не подобрана оптическая резкость (проекционная литография)
3. Увеличение размера элементов микроизображения	Кроме соответствующих результатов измерения под микроскопом могут наблюдаться увеличенные элементы часто в «клинном» проявлении и монослой недопроявленного резиста по краям	Мала экспозиция. Мала концентрация проявителя. Велика вязкость проявителя. Реактив малоактивен. Недостаточная оптическая резкость изображения (проекционная литография)

Вид дефекта	Условия наблюдения, описание	Возможные причины
4. Нерезкость изображения или неравномерные уходы размера по рабочему полю пластины	Одни и те же элементы в разных модулях выполнены с различной четкостью; изменение размеров одного и того же элемента в разных модулях дает неодинаковый результат	Пластины неплотно размещены на посадочном месте (проекционная литография). Неравномерная освещенность рабочего поля. Плохой контакт эталона с пластиной (контактная литография). Неплоскостность поверхно-
5. Невытравленные точки	Островки невытравленного маскирующего слоя наблюдаются под микроскопом при увеличении x200	Воздушные пузырьки, образующиеся при погружении пластины в раствор как проявителя, так и травителя, затрудняющие доступ этих растворов к пленке фоторезиста или маскирующего слоя. Пылинки на промежуточном фотошаблоне и на оптических деталях фотоповторителя, экранирующие фоторезистивную пленку от засветки (проекционная литография). В контактной литографии-пылинки, частицы фоторезиста, прилипшие к эталонному фотошаблону при повторном экспонировании. Дефект промежуточного шаблона в проекционной литографии. Дефекты оптики осветителя. Дефект эталонного шаблона в контактной печати. Жировые отпе-
6. "Вырывы", "отливы"	Проколы, часто крупные, почти всегда с остатками маскирующего слоя (при контактной литографии)	Слишком высокое давление в контактной рамке установки экспонирования. Пылинки, частицы фоторезиста, прилипшие к эталонному фотошаблону при неоднократных контактных экспонированиях без отмывки продавливают фоторезистивную пленку.
7. Неровный край элементов изображения	Там, где должна быть прямая линия, край элементов пилообразный, волнистый и т.д.	Загрязнен эталонный фотошаблон. Дефект эталонного шаблона. Дефект оптической системы осветителя. Пере- проявление. Перетравливание
8. Растрескивание пленки фоторезиста	Трещины по всей пленке фоторезиста или в углах элементов	Возникновение механических напряжений в пленке фоторезиста
9. Двойной край элементов изображения	При контактной фотолитографии параллельно истинному четкому краю наблюдается проявленное изображение второй (часто штриховой) линии. При этом возможны "ласточкины хвосты"	Оптическая плотность эталонного фотошаблона ниже 1,8, особенно чувствительные цветные шаблоны. Перезекс- позиция при работе с эталонным шаблоном малой оптической плотности
10. Несовместимость шаблона в комплекте	Осевые линии x и y фигур совмещения расходятся на величину, более допустимой	Качество контроля фотошаблона не соответствует критериям. Установка совмещения имеет случайный собственный сдвиг

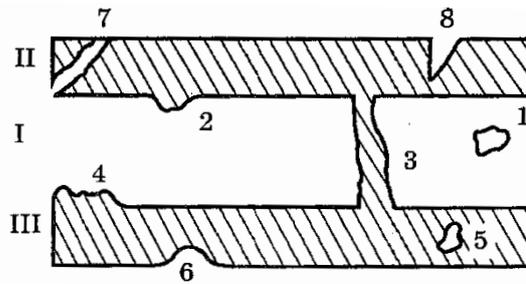


Рисунок 66 - Виды дефектов фотошаблона: I — недотравы; II — проколы; 1 — темная точка; 2 — выступ; 3 — перемычка (закоротка); 4 — неровность края; 5 — светлая точка; 6 — вырыв; 7 — разрыв; 8 — царапина

Ретушь и корректировка фотошаблонов

Число дефектов в фотошаблоне возрастает по мере увеличения степени интеграции и снижения размеров элементов. Для светлопольных фотошаблонов (первый и четвертый слой БИС) основными дефектами являются недотравы (до 20% от общего числа), для темнопольных (второй и третий слой БИС) — проколы (до 25% от общего числа). Устранение лишь одних недотрав позволяет увеличить выход годных в среднем на 2%.

Недотравы дефектов светлого поля ретушируются лазерным методом, т.е. лишние участки металлической маски выжигают лазером. С проколом дело обстоит существенно сложнее (возможно локальное напыление).

Тема 1.5. Проявление и задубливание фоторезиста

Окончательное формирование в пленке фоторезиста изображения элементов схем происходит при его проявлении, когда в зависимости от типа фоторезиста удаляются экспонированные или неэкспонированные участки. В результате на поверхности подложки остается защитная фоторезистивная маска требуемой конфигурации.

Проявителями для негативных фоторезистов служат органические растворители: толуол, бензол, уайт-спирит, трихлорэтилен, хлорбензол и др.

Позитивные фоторезисты проявляют в слабых водных и водно-глицериновых растворах щелочей: 0,3-0,6%-ный раствор КОН; 1-2%-ный раствор тринатрийфосфата. При проявлении негативных резистов основными факторами являются полнота реакции полимеризации при экспонировании и тип проявителя, а позитивных — концентрация проявителя и время проявления. На качество проявления влияют значение pH, температура проявителя и время проявления (рисунок 67, 68).

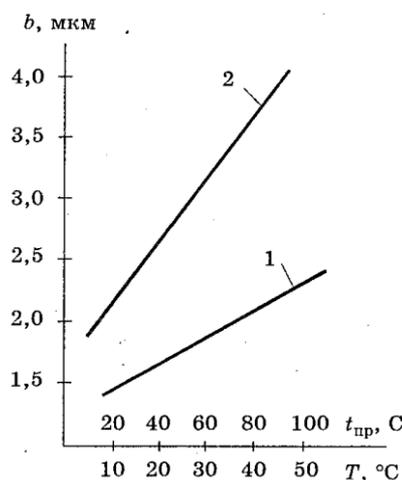


Рисунок 67 - Зависимости размеров проявленных элементов рисунка от температуры проявителя (1) и времени проявления (2)

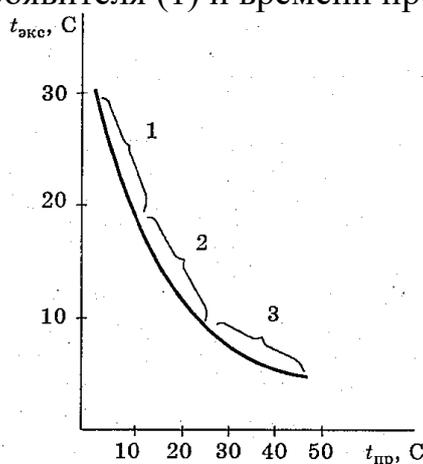


Рисунок 69 - Зависимость между временами экспонирования и проявления, обеспечивающими наилучшую воспроизводимость размеров проявленных элементов рисунка: 1, 3 — области неустойчивых режимов, 2 — область устойчивых режимов

Концентрация проявителей для позитивных резистов, как правило, выбирается минимальной, что обеспечивает контраст проявления, стабилизирует перенос изображения и снижает его дефектность. Для каждого резиста существуют оптимальные сочетания времен экспонирования и проявления, обеспечивающие наилучшую воспроизводимость размеров проявленных элементов рисунка.

Увеличение экспозиции уменьшает время проявления, но приводит к изменению размеров проявленных элементов рисунка (в позитивных резистах размеры увеличиваются, в негативных уменьшаются). Увеличение времени проявления повышает пористость и растравливание границ рисунка по контуру.

При проявлении негативных фоторезистов происходит набухание и затем растворение неэкспонированных участков. При этом естественно набухают и растворяются и экспонированные участки, но в значительно меньшей степени. Поэтому для получения четкого рисунка подбирают такой проявитель, который бы минимально воздействовал на экспонированные участки. При недостаточной экспозиции облученные участки будут растворяться почти также, как и необлученные, что приведет к очень некачественному рисунку.

При проявлении позитивного резиста картина обратная. Сам процесс проявления, как правило, осуществляется методом пульверизации (рисунок 69). Этот метод обеспечивает лучшее качество проявления, чем обычное окунание в проявитель, либо полив проявителем подложки.

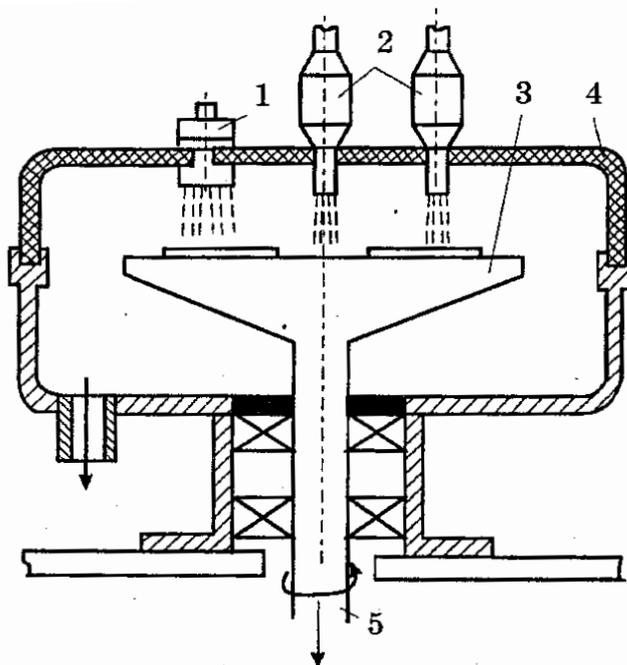


Рисунок 69 - Схема полуавтомата ППФ-2 дисперсионного проявления фоторезиста: 1 — форсунка сушки, 2 — пневматические форсунки проявления и отмывки, 3 — платформа, 4 — съемная крышка, 5 — ротор

После проявления подложки промывают, сушат и подвергают контролю под микроскопом. При контроле обнаруживаются: посторонние включения, пылинки, микрочастицы чистой смолы, которые создают участки, обладающие повышенной растворимостью. Эти дефекты, как правило, незаметны во время

нанесения резиста, выявляются при проявлении, поскольку обладают повышенной растворимостью. В результате растворения они создают поры (проколы) в слое фоторезиста.

Плотность этих пор зависит не только от чистоты и качества резиста, запыленности окружающей среды, но и от толщины наносимого фоторезиста. Как правило, с уменьшением толщины плотность дефектов уменьшается.

При неудовлетворительном качестве проявленного рисунка (повышенная плотность края и т.д.) фоторезист следует удалить и заново повторить все операции. Это возможно, поскольку после первой сушки он не обладает достаточной стойкостью к растворителю, адгезией и механической прочностью.

В случае положительных результатов контроля проявленного рисунка фоторезист подвергают второй сушке, часто называемой задубливанием.

Задубливание проводится при более высоких температурах, чем первая сушка, и обеспечивает повышение стойкости фоторезистивной маски к действию травителей и адгезии к подложке.

В результате воздействия температур задубливания происходит не только окончательная полимеризация фоторезиста, обеспечивающая улучшение стойкости, но и затягивание (залечивание) мелких пор, отверстий и несквозных дефектов.

Задубливание является весьма «капризной» операцией. С одной стороны оно обеспечивает улучшение свойств фоторезиста, с другой — может вызвать термическое разрушение пленки (фоторезист приобретает коричневую окраску, поверхность покрывается мелкими трещинами, могут оплывать четкие границы рисунка). Более того, задублинный резист крайне трудно удалить для реставрации рисунка. Поэтому обычно применяют ступенчатый режим задубливания. Например, для резиста ФП-383 типичным является следующий режим:

- 10-15 мин при номинальной температуре;
- 5-6 мин при 100°C с ИК сушкой;
- 5-6 мин при 130°C с ИК сушкой;
- 5-6 мин при 150-160°C (конвекционная или ИК сушка).

Задубливание является финишной операцией нанесения фоторезистивной маски, поэтому после нее следует окончательный визуальный контроль перед травлением.

Основные виды выявляемых дефектов сводятся к следующему:

- некачественное удаление резиста (вызывается низкой адгезией из-за плохой подготовки поверхности);
- плохо проявленный рисунок (вызывается некачественным фоторезистом, нарушениями температуры первой сушки и режимов экспонирования);
- двойной край или большой клин по краю рельефа (вызывается неоптимальными режимами экспонирования и проявления, большим зазором между подложкой и фотошаблоном при экспонировании);
- неровный («рваный») край рельефа (в основном из-за загрязненного фотошаблона и несоблюдения режимов экспонирования);
- проколы (из-за запыленности среды и фоторезиста, перепроявления, уменьшения толщины, нарушения режимов экспонирования);

- остатки фоторезиста в проявленных окнах (из-за недопроявления или нарушения режимов экспонирования);
- изменение размеров рисунка (из-за ошибки в экспозиции, либо нарушения режимов проявления).

Тема 1.6. Травление пленок

Формирование топологии рисунка на технологическом слое (металлизация, диэлектрическая пленка) является конечной задачей фотолитографии. Это осуществляется химическим жидкостным либо «сухим» (газовым или ионно-плазменным) методами. В связи со спецификой «сухих» методов рассмотрим только химический жидкостной вариант.

Химическое жидкостное травление основано на растворении в химических реагентах незащищенных фоторезистивной маской участков технологического слоя.

Химическое травление подразделяют на изотропное, анизотропное и селективное. Изотропное травление — растворение материала с одинаковой скоростью по всем кристаллографическим направлениям. Оно позволяет получить ровную зернистую поверхность. Такое травление называют химическим полированием и применяют в основном для подготовки поверхности после механических обработок.

Селективное (избирательное) травление — растворение материала с повышенной скоростью в местах выхода на поверхность структурных дефектов. Оно используется в основном для оценки качества полупроводника и его обработок (например, для подсчета плотности дислокаций, дефектов упаковки и т.д.)

Анизотропное травление — растворение полупроводникового монокристалла с разными скоростями по разным кристаллографическим направлениям. Оно позволяет получать глубокие канавки, например, для межкомпонентной изоляции.

В связи с тем, что в фотолитографии мы травим различные технологические слои (эпитаксиальная монокристаллическая пленка кремния, термический диоксид кремния аморфный, поликристаллическая пленка алюминия и т.д.), травление используются как анизотропное — для монокристаллического полупроводника, так и изотропной — для поликристаллических и аморфных пленок.

Процесс травления состоит из следующих этапов:

- диффузии реагентов к поверхности пленки;
- адсорбции их поверхностью;
- химического или электрохимического взаимодействия реагента с поверхностью;
- десорбции продуктов химического взаимодействия; диффузии этих продуктов от поверхности.

Скорость травления определяется скоростью самого медленного этапа. Травители, в которых самыми медленными этапами являются диффузионные, называют полирующими. Они нечувствительны к неоднородностям поверхности, сглаживают неровности микрорельефа. Скорость травления здесь в основном зависит от вязкости и скорости перемешивания травителя и незначительно от температуры.

Травители, в которых самыми медленными являются поверхностные реакции, называют избирательными. Скорость травления в них зависит от температуры, структуры, кристаллографической ориентации и не зависит от вязкости и скорости перемешивания травителя.

Избирательные травители с разными скоростями травления в различных кристаллографических направлениях называют анизотропными, а с большой скоростью растворения в области структурных дефектов — селективными.

Химическое травление полупроводников основано на процессах окисления их поверхности, а затем на растворении образовавшихся оксидов. Поэтому травильные смеси обычно состоят из окислителя, комплексообразователя (для образования растворимых соединений с оксидом), растворителя. А для придания специальных свойств в смесь добавляют: для замедления скорости реакции-ингибиторы (обычно ледяную уксусную кислоты); для ускорения реакции катализаторы (обычно бромисто- или иодистоводородную кислоты), добавки для повышения селективности и т.д. Как правило, составы травителей для конкретных случаев подбирают опытным путем.

При подборе составов следует учитывать, что травитель должен обладать селективностью (избирательностью), Это означает, что он должен активно растворять нужный технологический слой и не реагировать с фоторезистивной маской и нижележащими слоями. Идеальных случаев не бывает, поэтому селективность оценивают по соотношению скоростей травления. Например, мы травим пленку алюминия, лежащую на поверхности диоксида кремния, и травитель растворяет алюминий в сто раз быстрее, чем диоксид кремния. Тогда селективность травления по отношению к диоксиду составляет 100:1

Как правило, при жидкостном травлении процесс изотропен, т.е. при травлении слоя через фоторезистивную маску идет травление не только в глубину, но и имеет место боковое подтравливание. Это приводит к изменению линейных размеров элементов рисунка по сравнению с размерами фоторезистивной маски. Чем больше подтравливание, тем хуже качество процесса (рисунок 70).

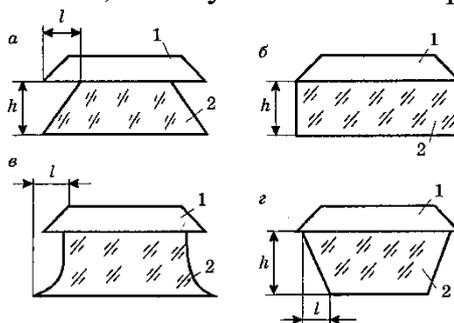


Рисунок 70 - Профили элементов рельефного рисунка после травления: а — жидкостного, б — ионно-химического, в, г — плазмохимического; 1 — слой фоторезиста, 2 — технологический слой; h — толщина слоя фоторезиста, l — величина подтравла

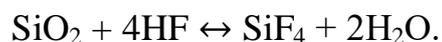
Изменение размеров элементов рисунка не должно превышать допусков, указанных в технических условиях.

При плохой адгезии фоторезиста травитель может проникать под него на значительные расстояния и в этом случае боковое подтравливание становится недопустимо большим.

Клин травления зависит от скорости процесса, адгезии защитной маски фоторезиста с подложкой, толщины вытравливаемого слоя и смачиваемости его поверхности травителем.

Травление диоксида кремния.

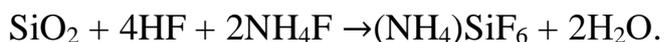
При травлении диоксида кремния через фоторезистивную маску используют, как правило, кислотное травление. Травители для оксида содержат плавиковую кислоту HF. В основу заложено следующее свойство этой кислоты: смачивает и травит оксид и не взаимодействует с поверхностью кремния. Взаимодействие диоксида кремния с растворами плавиковой кислоты выражается уравнением:



Растворенный SiF₄ связывается в прочный комплекс по реакции



Не весь SiF₄ реагирует по этому уравнению. Выделяющийся газообразный SiF₄ отрицательно влияет на защитные свойства пленки фоторезиста: его пузырьки создают трещины под пленкой фоторезиста. Для снижения этого отрицательного эффекта необходимо повысить концентрацию ионов фтора, для чего обычно в состав травителя вводят NH₄F. Это так называемый «буферный» травитель. В этом случае процесс происходит по следующей реакции:



Для равномерного вытравливания оксида поверхности пластины перед травлением предварительно погружают в раствор смачивателя и затем промывают деионизированной водой.

В типовой состав буферного травителя входят: две части 48% плавиковой кислоты, семь частей 40% водного раствора фтористого аммония, одна часть воды. Увеличение концентрации кислоты в травителе повышает скорость травления пленки SiO₂, но при этом ухудшается качество рельефа. Увеличение температуры также увеличивает скорость травления, но одновременно также ухудшает качество рельефа. Исходя из этого обычно травят при температуре 20±1°C.

Травление пленок нитрида кремния

Для травления Si₃N₄ обычно используют травитель на основе ортофосфорной кислоты H₃PO₄ с добавками фосфорного ангидрида P₂O₅. Оптимальная температура травителя 180-200°C. Поскольку при такой температуре резко снижаются защитные свойства фоторезиста, то травление Si₃N₄ проводят обычно через маску SiO₂ по схеме: нанесение на Si₃N₄ тонкой пленки SiO₂ → нанесение на SiO₂ фоторезистивной маски → травление SiO₂ через фоторези-

стивную маску → удаление фоторезистивной маски → травление Si_3N_4 через маску SiO_2 .

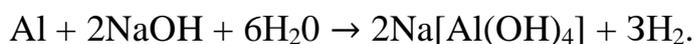
Травление металла

В кремниевой технологии используют пленки алюминия, сплавов алюминия с кремнием и сложные структуры: пленки алюминия с подслоем молибдена, ванадия, вольфрама.

Алюминий относится к амфотерным металлам которые имеют широкий круг травителей; как щелочного, так и кислотного характера. Щелочные травители можно использовать только при работе с негативными резистами. При защите позитивными фоторезистами применяют кислотное травление с использованием составов на основе серной, плавиковой и ортофосфорной кислот, в основном — ортофосфорную кислоту.

Фоторезист имеет плохую адгезию с пленкой алюминия из-за значительного изменения его угла смачивания (от 20 до 80°).

Щелочное травление идет согласно реакции:



Используют 20% NaOH , температура процесса 60-90°C. Выделение пузырьков водорода вызывает образование неровностей контура рельефа травления.

При кислотном травлении в ортофосфорной кислоте процесс идет по реакции:



Реально используют следующий состав (для улучшения равномерности и уменьшения подтравливания): 75 г H_3PO_4 , 15 г CH_3COOH , 3 г HNO_3 , 5 г H_2O .

Этот же состав используют и для травления подслоя ванадия.

Применяют также травитель на основе Cr_2O_3 , NH_4F , $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COOH})$, крахмала и H_2O .

Несмотря на большой опыт работы, в серийном производстве даже в настоящее время травление алюминия вызывает наибольшие трудности.

Иногда при травлении пленки алюминия окисляются и темнеют их отдельные участки, что объясняется электрохимическими процессами, происходящими в системе Al-Si-p-n-переход-травитель. Для устранения этого эффекта обратную и боковые стороны подложек защищают слоем фоторезиста, чтобы изолировать от травителя.

Для травления молибдена применяют состав, состоящий из ферроцианида калия, серной и азотной кислот, либо из ортофосфорной, азотной и уксусной кислот.

При многослойной металлизации (алюминий-подслой титана, молибден-подслой золота и т.д.) травление проводят в две стадии: вначале травят верхний, а затем нижележащий слой. В этом случае важно, чтобы травитель нижележащего слоя не травил вышележащий (иначе будут перетравы вышележащего слоя).

Тема 1.7. Удаление фоторезиста

Удаление (снятие) фоторезиста завершает литографический процесс. Снимать можно физическими или химическими методами. Слабые когезионные связи полимера (0,1 эВ) легко разрываются молекулами растворителя, поэтому простейшим способом является обработка резиста в растворителях. Однако в этих случаях обычно остается межфазная пленка толщиной около 1 нм.

Перевод резиста в летучее состояние физическими методами предполагает интенсивное взаимодействие, зато оставляет после себя весьма чистые поверхности. Выбор метода удаления определяется в основном следующими практическими соображениями:

- 1) чувствительностью поверхности технологического слоя к постоянно-му электрическому активному повреждению (окисление, коррозия, загрязнение ионами, радиационное разрушение);

- 2) стоимостью удаления, включая хранение, ручную обработку, обезвреживание отходов;

- 3) типом резиста;

- 4) предшествующей последовательностью операции резист- ного процесса, включая характеристики первичного слоя, параметры термообработки после экспонирования, задубливания и травления.

Для удаления фоторезистов можно применять множество составов жидких растворителей или использовать газофазные процессы с возбужденным кислородом (сжигание в кислородной плазме).

Позитивные резисты, относящиеся к семейству термопластиков, легко удаляются в органических растворителях. Негативные резисты лучше удаляются при окислении.

При жидкостном методе подложки кипятят в органических растворителях (диметилформамиде и др.). При этом слой фоторезиста набухает и вымывается. Чем больше задублен фоторезист, тем он прочнее, тем сложнее его растворить.

В случае сильного задубливания для снятия резиста используют кипячение в смеси КАРО (одна часть H_2SO_3 и три части H_2O_2). Слой фоторезиста при этом разлагается и растворяется в кислоте, а затем его окончательно удаляют в органическом растворителе. Кислотное удаление фоторезиста недопустимо при фотолитографии металлических пленок. В этом случае наиболее эффективными являются составы: семь частей моноэтаноламина, одна часть H_2O_2 ; три части этилендиамина, 12 частей триэтаноламина, 60 частей диметилформамида; пять частей моноэтаноламина, 15 частей диметилформамида, одна часть воды.

Наличие между металлической пленкой и подложкой, а также в пассивирующем слое пор, трещин, зазоров затрудняет полное удаление его следов с поверхности кристалла. При взаимодействии алюминия со щелочами на поверхности образуется защитная пассивирующая пленка. Поэтому в дальнейшем в присутствии влаги следы органических щелочей способствуют протеканию щелевой коррозии. Чтобы уменьшить разрушение алюминиевой пленки протекания

кающими гальваническими токами, необходимо отмывку водой после снятия фоторезиста сократить во времени, но для качественного смыва остатков растворителя при этом максимально увеличить поток воды.

Эффективное удаление фоторезиста можно проводить в среде кислорода при высоких (до 700°C) температурах, если это позволяет структура подложки. Одновременная окислительная и термическая деструкции увеличивают скорость удаления фоторезиста. Освещение подложки ультрафиолетовыми лучами позволяет резко снизить температуру обработки (резист удаляется при комнатной температуре за 25-40 мин). Добавление 2% озона ускоряет процесс удаления фоторезиста.

Плазмохимическое удаление фоторезиста.

Несмотря на широкое использование химические жидкостные методы снятия фоторезиста имеют ряд недостатков: загрязнение подложки реактивами, высокая их стоимость токсичность, взрыво- и пожароопасность. Поэтому одновременно с этими методами широкое распространение получил плазмохимический метод удаления фоторезиста.

В основе его лежит обработка в низкотемпературной кислородной плазме при давлении $5 \cdot 10^{-2}$ Па. В плазме образуются активные частицы: атомарный кислород, озон и возбужденные молекулы кислорода. Под действием активного кислорода фоторезист разлагается. Схема установки для плазмохимического удаления фоторезиста приведена на рисунке 71.

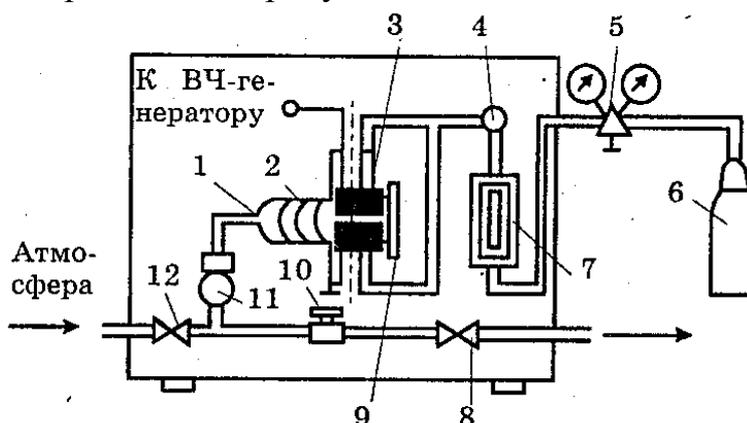


Рисунок 71 - Схема установки плазмохимического удаления фоторезиста: 1 — разрядная камера; 2 — индуктор; 3 — обкладки конденсатора; 4 — нагреватель; 5 — редуктор; 6 — источник газа; 7 — ротаметр; 8 — клапан; 9 — крышка; 10 — вакуумный датчик; 11 — вакуум-привод; 12 — выпускной клапан

Введение в плазму 1% азота позволяет увеличить скорость удаления фоторезиста на 20%, а 1% водорода на 100% по сравнению со скоростью удаления в чистой кислородной плазме.

В результате работы ВЧ-генератора возникает разряд между электронами. Генератор работает на промышленной частоте 13,56 МГц при выходной мощности на электродах около 1 кВт. Кислород поступает в реакционно-разрядную камеру (расход газа 120-1000 см³/мин) и непрерывно откачивается вместе с продуктами сгорания фоторезиста вакуумным насосом для поддержания давления на уровне $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па.

Взрывная фотолитография.

Взрывная фотолитография применяется только для металлических пленок. При этом резистивная маска служит для того, чтобы отделить нужный металлический рисунок от лишнего материала (рисунок 72).

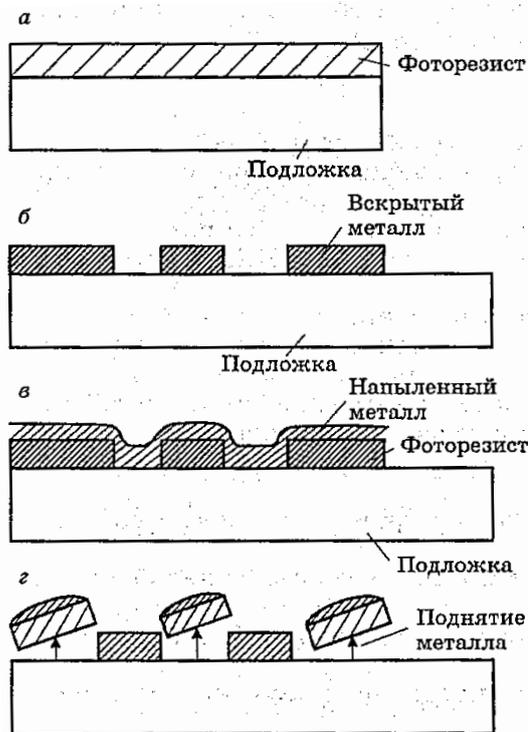


Рисунок 72 - Взрывная литография

Вначале на подложку наносят маску. Причем, в отличие от обычной фотолитографии, где с целью получения высокой разрешающей способности стремится получить маску как можно тоньше, в случае взрывной маска должна быть толще пленки металла. Затем на всю поверхность наносят эту пленку. Поскольку она тоньше слоя рисунка фоторезистивной маски, металл равномерно ложится только на горизонтальные ее участки. Вертикальные (или почти вертикальные) стенки рисунка маски покрываются более тонким слоем металла и, главное, на них существуют участки, не покрытые металлом (в идеальном случае, когда стенки строго вертикальны, а поток металла при напылении строго перпендикулярен поверхности подложки, они вообще не запыляются металлом). После погружения такой структуры в растворитель фоторезиста он будет реагировать только с оголенными участками стенок фоторезистивной маски. При этом фоторезист разбухает, увеличивает свой объем и подрывает слабые места металлической пленки. Дальнейшее растворение отрывает участки металла, лежащие на фоторезистивной маске, и на подложке остается только металл, лежащий на подложке в окнах между стенками маски.

Взрывная литография широко используется в технологии СБИС.

Раздел 2 Перспективы литографии.

Тема 2.1 Перспективные методы и материалы литографии.

Повышение степени интеграции приводит к существенному уменьшению размеров элементов. Размеры элементов менее 1 мкм существенно повышают роль оптических эффектов (дифракция, интерференция), и поэтому для таких малых «субмикронных» размеров необходимо уменьшать длину волны экспонирования.

Одновременно, «субмикронная» топология выдвигает более жесткие требования к форме краев как маски, так и профиля травления технологического слоя. Поэтому для достижения «субмикронных» размеров используются методы более коротковолнового экспонирования, чем ультрафиолетовое при фотолитографии — электролитография, рентгенолитография, ионнолучевая и голографическая литографии.

Одновременно вместо заведомо изотропного жидкостного травления используют «сухие» методы травления: ионно-лучевое и ионно-плазменное.

«Сухое» травление технологических слоев.

При изготовлении БИС высокой степени интеграции из-за размеров элементов, достигающих долей микрометра («субмикронные» размеры) классическое жидкостное травление принципиально не может быть использовано из-за своего изотропного характера, обеспечивающего боковой подтрав. Поэтому в «субмикронной» технологии используют вакуумно-плазменные («сухие») методы травления, которые не только лишены технологических недостатков, присущих жидкостному, но и способствуют повышению культуры производства и санитарно-гигиенического состояния фотолитографических участков; снимают вопросы транспортировки, хранения и утилизации вредных химреативов; увеличивают точность контроля и воспроизводимость процессов литографии.

При вакуумно-плазменных методах травления должны быть обеспечены: высокая селективность травления, отсутствие загрязнений поверхности обрабатываемой подложки, элементов конструкции источника химически активных частиц и внутри-камерной оснастки вакуумной установки, высокая равномерность и однородность травления, высокая производительность, минимальный расход реакционных газов. Вакуумно-плазменное травление — процесс контролируемого удаления материала с поверхности подложки под воздействием ионов низкотемпературной плазмы в среде инертных или химически активных газов.

Классификация существующих систем вакуумноплазменного травления представлена на рисунке 73. Системы подразделяются на: ионно-плазменные, в которых мишень с подложками помещается в газоразрядную плазму, являющуюся источником бомбардирующих ионов, с автономными источниками, в которых мишень с подложками отделена от области газоразрядной плазмы. По числу электродов — на двухэлектродные (диодные), трехэлектродные (триодные), четырехэлектродные (тетродные), многоэлектродные (пять и более электродов).

Системы с автономными источниками могут быть с фокусировкой и без фокусировки ионного пучка, с компенсацией и без компенсации объемного заряда ионного пучка.

Существует три метода «сухого» травления: ионное, ионнохимическое и плазмохимическое. Ионное травление основано на разрушении подложки бомбардировкой ионами инертного газа и подразделяется на ионно-лучевое и ионно-плазменное.

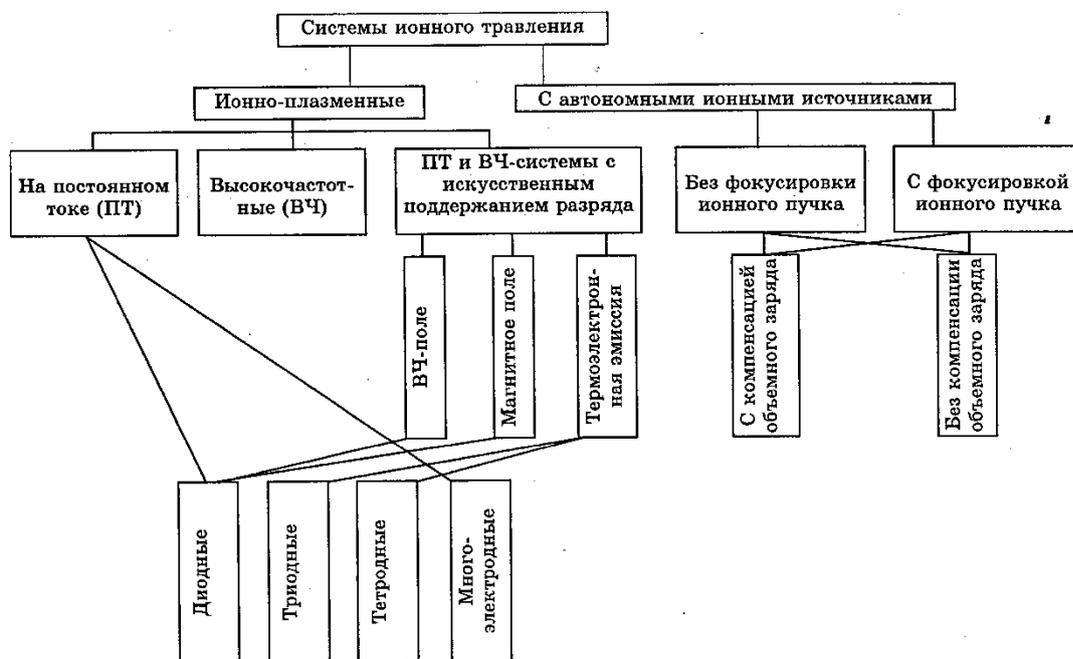


Рисунок 73 - Классификация систем ионного травления материалов

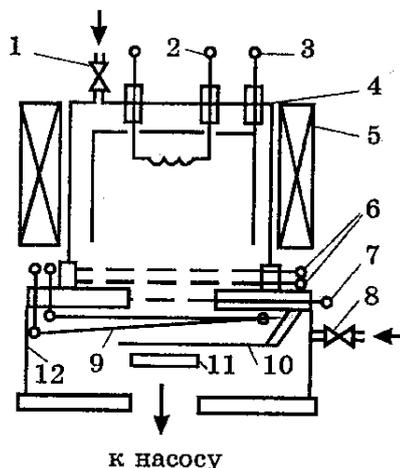


Рисунок 74 - Схема установки ионного травления: 1,8 — микронатекатели; 2 — термокатод; 3 — анод; 4 — разрядная камера; 5 — электромагнит; 6,7 — экстрагирующая и ускоряющая сетка ионно-оптической системы; 8 — нейтронизатор объемного заряда; 9 — заслонка; 10 — водоохлаждаемая мишень; 11 — рабочая камера; 12 — рабочая камера

При ионно-лучевом травлении источником ионов служит специальная ионная пушка (источник типа Кауфмана), схема которой показана на рисунке 75. Инертный газ (как правило, аргон) через натекатели поступает в разрядную камеру, где за счет бомбардировки электронами, движущимися от катода к аноду, возбуждается, превращаясь в положительно заряженные ионы и электроны.

Первая сетка ионно-оптической системы находится под отрицательным по отношению к разряду потенциалом (около -300 В). Поэтому она притягивает к себе положительные ионы аргона, часть из которых «проскакивает» через отверстия в ней. Такая сетка называется экстрагирующей. Вторая сетка ионно-оптической системы своими отверстиями строго съюстирована с первой и находится под более высоким отрицательным потенциалом (500-1000 В). Экстрагированные ионы аргона дополнительно ускоряются этим потенциалом, приобретая энергию 500-1000 эВ соответственно. Из каждого отверстия сетки вырывается поэтому узкий луч ионов аргона. Поскольку отверстия находятся на очень малом расстоянии друг от друга, а сам луч имеет небольшую расходимость, то на некотором расстоянии от сетки эти лучи сливаются, образуя единый ионный поток. Такие ионы, попадая на лежащую на их пути поверхность подложки, обладают достаточной энергией для распыления материала подложки, т.е. осуществляют ее травление.

Это травление выполняется в достаточно высоком вакууме при давлении 10^{-1} - 10^{-3} Па, поэтому загрязнения подложки не происходит. Метод ионно-лучевого травления характеризуется высокими скоростями травления, допускает использование обычных фоторезистивных масок и обеспечивает абсолютно вертикальные профили травления.

При ионно-плазменном травлении подложки располагают на катоде газоразрядного устройства и бомбардируют положительными ионами ВЧ-плазмы (рисунок 75) Этот процесс также проводят при достаточно низком давлении (0,1-1 Па).

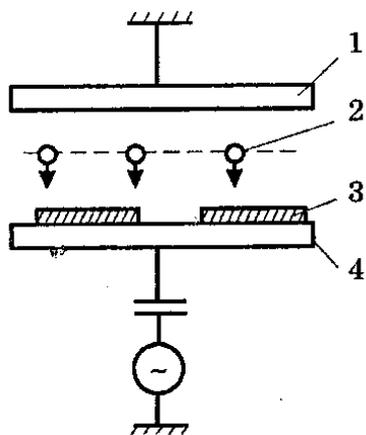
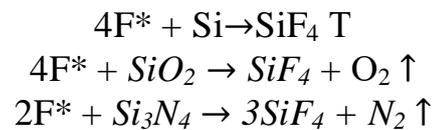


Рисунок 75 - Схема ионно-плазменного травления: 1 — анод; 2 — ионы активного газа; 3 — подложки; 4 — катод

Ионно-химическое травление отличается от ионного тем, что бомбардировка подложки осуществляется ионами химически активных газов (в основном хлор- либо фторсодержащих). В этом случае сочетаются физическое (бомбардировка) и химическое воздействия на поверхность подложки.

Плазмо-химическое травление основано на химическом травлении технологического слоя ионами активных газов и радикалов, образующихся в газоразрядной плазме. В качестве реакционных также используют галогенсодержащие газы, радикалы которых активно участвуют в процессе травления.

Под воздействием ВЧ-плазмы образуются активные радикалы, например, фтора: $CF \rightarrow^{ВЧ} CF_2 + 2F$ которые вступают в реакцию с технологическим слоем:



Достоинством ионно- и плазмохимического травления является их высокая скорость из-за сочетания физического и химического воздействий активных частиц на технологический слой.

Если в реактор ввести магнитное поле, то по закону Лоренца возбуждающие газ электроны будут увеличивать длину своего пробега, т.е. увеличивается вероятность их столкновения с молекулами газа. Таким образом, введение магнитного поля повышает эффективность ионизации, а соответственно, скорость травления подложки.

Тема 2.2 Литография больших энергий.

Электронно-лучевая литография.

Данная литография основана на непосредственном создании или проекционном переносе изображения с помощью пучка электронов. Техника формирования электронного луча во многом напоминает идею телевизионной трубки.

Электронный пучок, ускоренный электрическим полем при разности потенциалов U , характеризуется длиной волны:

$$\lambda = 0,1\sqrt{150/U}.$$

При разности потенциалов 15000 В длина волны составляет 0,01 нм, а это почти в десять тысяч раз меньше длины волны ультрафиолетового излучения, используемого при фотолитографии. Следовательно, при субмикронных размерах топологии такая длина волны не вызовет паразитных оптических эффектов, присущих ультрафиолетовому экспонированию.

С другой стороны, коротковолновое излучение является высокоэнергетичным, поскольку энергия кванта света определяется как

$$E\nu = hc/\lambda.$$

В связи с высокоэнергетичным электронным пучком в электронолитографии применяют не фоторезисты, а специальные электрон-чувствительные полимерные составы — электронорезисты.

Практические возможности электронно-лучевой литографии оцениваются размерами 0,2-0,3 мкм. Другим преимуществом является большая глубина резкости передаваемого изображения. Поэтому здесь не происходит искажения рисунка микросхемы при увеличении глубины рельефа многослойных структур и неплоскостности поверхности пластины. Применение ЭВМ для непосредственного управления электронным лучом позволяет легко перестраивать и корректировать программу экспонирования.

Существует три основных области применения электроннолучевой литографии: в технологии производства эталонных фотошаблонов и промежуточных оригиналов с размерами элементов менее 2 мкм; при изготовлении БИС с размерами менее 1 мкм путем непосредственной микрогравировки технологических слоев; в производстве высокоточных шаблонов для рентгеновской литографии и фотолитографии глубокого ультрафиолета.

Процесс электронно-лучевой литографии показан на рисунке 75. В основе метода лежит воздействие управляющего острогофокусированного электронного луча на резист. Электроны либо локально разрушают его, либо сшивают молекулы, изменяя его свойства. В процессе проявления селективно удаляется экспонированная часть (позитивный резист), либо неэкспонированная часть (негативный резист). В качестве примера на рисунке 76 показан процесс

электронно-лучевой литографии металла. Структурная схема электронно-лучевой установки представлена на рисунке 77.

Электронорезисты представляют собой композиции электронно-чувствительных полимеров в органических растворителях. Важной их характеристикой является чувствительность. За чувствительность позитивного резиста принимается доза облучения D_0 , при которой облученные участки проявляются на полную глубину слоя, а на неэкспонированных участках сохраняется более 90% исходной толщины пленки.

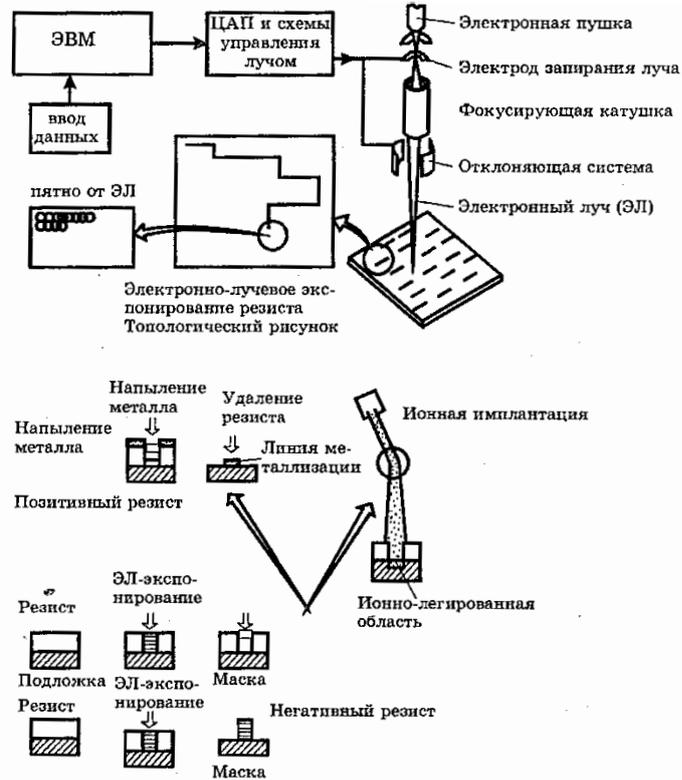


Рисунок 75 - Последовательность операций электронно-лучевой литографии: а — экспонирование, б — варианты использования маски из резиста для создания рисунков и ионно-легированных областей

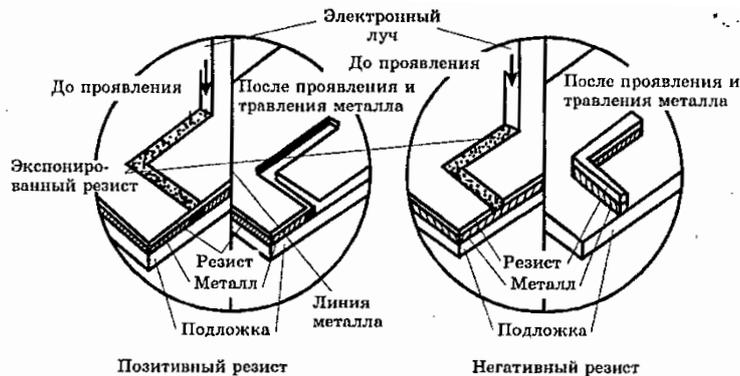


Рисунок 76 - Электронно-лучевое экспонирование позитивного и негативного резистов для формирования линий металла

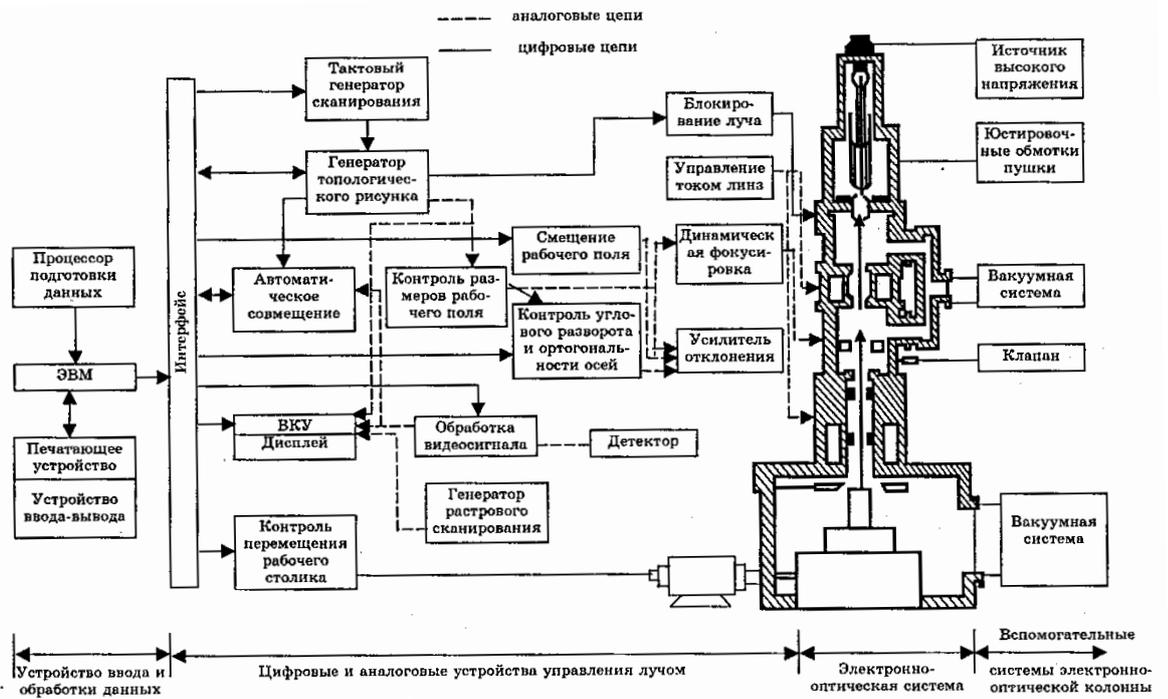


Рисунок 77 - Структурная схема ЭЛУ

Контраст резиста I определяется как тангенс угла наклона характеристической кривой к оси абсцисс (рисунок 78): $I = [\lg(D_0/D_i)]^{-1}$, точка, соответствующая началу проявления позитивного резиста или началу формирования нерастворимой шитой пленки для негативного резиста.

Разрешающая способность резиста может измеряться двумя способами: по числу пар линий проявленного изображения на единицу длины (лин/мм) и по наименьшей ширине отдельной изолированной линии (мкм).

К основным параметрам электронрезистов относятся чувствительность и минимальная доза радиации, необходимая для получения определенной толщины резиста, оставшейся после проявления, которая, в свою очередь, зависит от соотношения скоростей растворения экспонированных и неэкспонированных участков.

Основным классом позитивных электронрезистов являются полимеры — производные полиметилметакрилата (РММА).

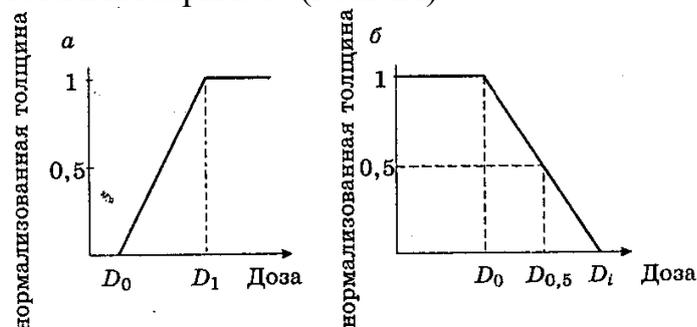


Рисунок 78 - Характеристические кривые для позитивного (а) и негативного (б) электронрезистов

Электронный РММА обладает высокой разрешающей способностью, хорошими пленкообразующими и защитными свойствами. Однако чувстви-

тельность его невысока. Повысить можно введением в состав полимера атомов тяжелых металлов.

Негативные электронрезисты обладают более высокой чувствительностью, чем позитивные, но обладают меньшей разрешающей способностью. В качестве негативных электронрезистов применяют сополимеры глицидилметакрилата (ГМА) с соединениями винилового и акрилового рядов. Введение добавок (например, стирола) позволяет повысить плазмостойкость и термостойкость негативных резистов, но несколько снижает чувствительность. Одним из важных свойств электронрезистов является кроющая способность, т.е. способность резистов образовывать на микрорельефной поверхности пленку равномерной толщины. Высокая кроющая способность обеспечивает необходимую однородность размеров элементов на выступах и впадинах пластины.

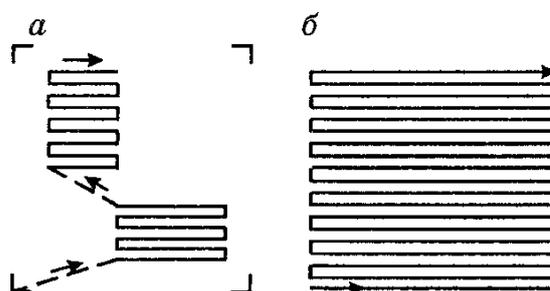


Рисунок 79 - Экспонирование топологического рисунка методом векторного (а) и растрового (б) сканирования

Формирование топологического рисунка осуществляют: векторным сканированием, при котором сначала лучом рисуют требуемую фигуру, затем скачком перемещают его в другое поле сканирования и приступают к формированию следующей фигуры; растровым сканированием, при котором сканирование происходит по всей площади, наподобие телевизионного растра, однако воздействие осуществляется только на тех участках, которые должны быть экспонированы; экспонирование всего топологического элемента сразу лучом с переменным сечением.

Максимальная разрешающая способность определяется минимальной шириной линии экспонирования. Она зависит от диаметра электронного пучка и размера области обратного рассеяния, т.е. области резиста, в которую проникают электроны, отразившиеся от рабочего материала (рисунок 80). Характеристики рассеяния зависят от энергии, плотности тока и геометрии электронного луча, толщины слоя электронрезиста и материала подложки. Обратное рассеяние электронов оказывает влияние на экспонирование электронрезиста.

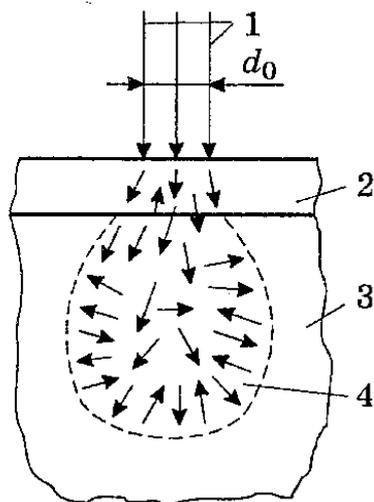


Рисунок 80 - Рассеяние пучка электронов в слое электронорезиста и подложке: 1 — первичный пучок электронов; 2 — слой электронорезиста; 3 — подложка; 4 — область прямого и обратного рассеяния электронов; d_0 — диаметр падающего пучка

Формы клина проявления электронорезиста в зависимости от толщины его слоя показаны на рисунке 81.

Сильное рассеяние электронов не только искажает размеры проявленных областей, но и вызывает взаимное влияние близко расположенных элементов изображения. Такое влияние называют эффектом близости.

Эффект близости в электронолитографии является самым значительным ограничением по точности переноса изображения и формирования элементов малых размеров, причем геометрия элементов может настолько исказиться, что произойдет их полное слияние (рисунок 82).

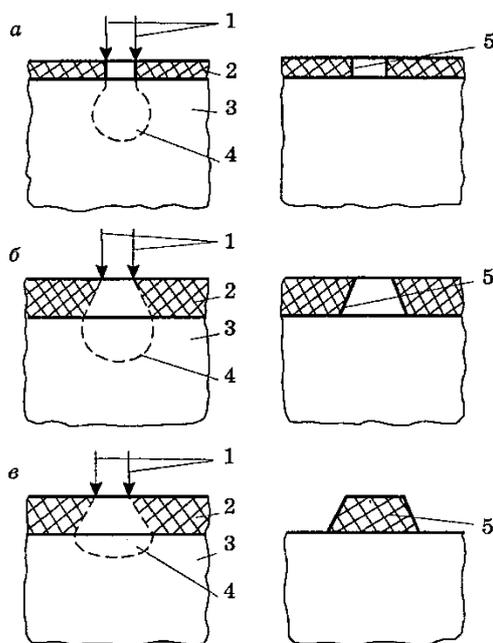


Рисунок 81 - Формы клина проявления на тонком слое положительного (а) и на толстых слоях положительного (б) и отрицательного (в) электронорезистов: 1 — пучок электронов; 2 — слой электронорезиста; 3 — подложка; 4 — область рассеяния и поглощения электронов; 5 — клин травления

и сверхтонкой пленки, эффективно задерживающей (поглощающей) рентгеновские лучи.

Для изготовления подложек обычно используют кремний и его соединения, а в качестве поглощающего материала — золото.

Этапы изготовления рентгеновского шаблона показаны на рисунке 85. Пластины кремния ориентации (100) *n*- или *p*- типа проводимости подвергают химико-механическому полированию с рабочей стороны и химическому полированию с обратной стороны до толщины 200 мкм. На рабочую сторону плазмохимическим методом при 800°C в среде азота наносят слой Si_3N_4 толщиной 0,5 мкм и на него — защитный слой SiO_2 толщиной 0,2 мкм. Пластины термически окисляют с обратной стороны для выращивания пленки SiO_2 толщиной 0,5 мкм. Обе стороны пластины покрывают фоторезистом, и на обратной стороне пластины в слое SiO_2 формируют окно. После удаления фоторезиста на рабочую поверхность методом вакуумного напыления наносят пленки хрома толщиной 0,005 мкм и золота толщиной 0,02 мкм (хром является адгезионным подслоем для золота, а золото — основой для рентгеновской маски), а затем ее покрывают электронрезистом и подвергают электроннолучевому экспонированию для формирования рисунка. На следующем этапе на сформированный рисунок маски электролитическим методом осаждают слой золота толщиной 1 мкм. После удаления электронрезиста обратную сторону пластины травят в селективном травителе до пленки Si_3N_4 . Двухслойная мембрана Si_3N_4 - SiO_2 прозрачна не только для рентгеновского излучения, но и для видимого, что позволяет оптически совмещать маску с подложкой.

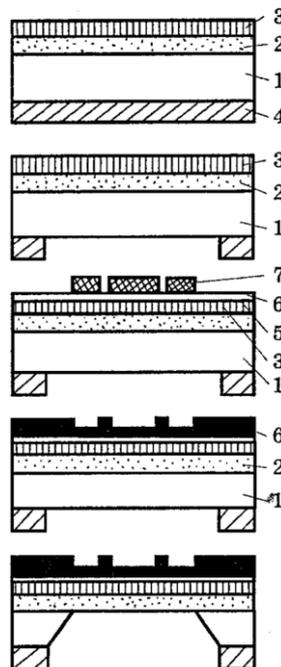


Рисунок 84 - Этапы изготовления рентгеновского шаблона на основе мембраны $\text{SiO-Si}_3\text{N}_4$: 1 — кремний (100), 2 — слой нитрида кремния, 3,4 — слой оксида кремния, 5 — пленка хрома, 6 — пленка золота, 7 — отдельные участки фоторезиста

При рентгенолитографии шаблон помещают в установку экспонирования рентгеновскими лучами, где происходит перенос топологии шаблона на подложку.

Подложка предварительно грубо совмещается с шаблоном, после чего включается рентгеновская установка. Часть рентгеновского излучения, проходя через метки совмещения, частично прозрачные для этих лучей, попадает в детектор, сигнал с которого попадает на пьезоэлектрические приводы, приводящие в движение столик с подложками по осям x и y . Перемещение столика продолжается до тех пор, пока середины реперных меток на шаблоне и подложке не совпадут. В этом случае непрозрачные для рентгеновских лучей области полностью поглотят лучи и детекторы нуля дадут сигнал об окончании совмещения. Для совмещения используют ИК-излучение, имеющее большую, чем у рентгеновских лучей, глубину проникновения в кремний. В зависимости от требований производительности, размеров элементов БИС и типа систем совмещения рентгенолитография взвешивается по двум направлениям:

- использование излучения с $\lambda = 0,4- 1,3$ нм, рентгеновской установки с вращающимся анодом, относительно простых систем совмещения, достаточно чувствительных негативных резистов для изготовления БИС с размерами $0,5-1$ мкм;

- использование синхротронного излучения с $\lambda = 1-2,5$ мкм, более сложных чем в первом случае, систем совмещения, менее чувствительных, но обладающих высокой разрешающей способностью позитивных резистов, обеспечивающих изготовление многослойных структур с размерами элементов $0,005-0,5$ мкм.

Самоконтроль знаний

- 1 Перечислите назначение различных методов литографии.
- 2 Опишите, что является причиной расфокусировки на пластине.
- 3 Опишите, чем вызвана необходимость снятия фоторезиста в плазме, а не в жидких органических растворителях.
- 4 Перечислите основные причины ухудшения адгезии фоторезиста к подложке.
- 5 Перечислите основные причины проколов в пленке фоторезиста.
- 6 Выберите фотошаблоны, применяемые для фотолитографии, которые имеют наибольшую износостойкость.
- 7 Перечислите способы удаления фоторезиста после выполнения фототравлировки.
- 8 Перечислите, какими предварительными обработками поверхности обеспечивается адгезия фоторезиста к подложке.
- 9 Перечислите основные отличия проекционной и контактной литографии.
- 10 Опишите от чего зависит профиль травления канавки метки совмещения.
- 11 Опишите, каким образом осуществляют совмещение подложки с фотошаблоном.
- 12 Опишите, почему на краях маски фотошаблона имеет место дифракционный эффект.
- 13 Поясните, как повысить разрешающую способность фоторезиста.
- 14 Каковы основные дефекты фотошаблонов?
- 15 Поясните, почему эталонные фотошаблоны подвергают 100% контролю.
- 16 Перечислите основные методы мультипликации эталонного фотошаблона.
- 17 Опишите, в чем заключается процесс мультипликации.
- 18 Опишите, чем обусловлена большая разрешающая способность электроннолучевой и рентгеновской литографии по сравнению с фотолитографией.
- 19 Перечислите источники излучения, которые применяют в рентгенографии.
- 20 Опишите, чем обеспечивается высокая контрастность полос интерференции.
- 21 Опишите, в чем достоинство метода «интерфако».

Примерный перечень вопросов к ОКР №1

- 1 Изложите назначение и этапы фотолитографии.
 - 2 Охарактеризуйте методы повышения адгезии фоторезиста.
 - 3 Охарактеризуйте свойства фоторезиста.
 - 4 Поясните классификацию литографических процессов.
 - 5 Изложите методы нанесения фоторезиста, их возможности и ограничения.
 - 6 Предложите контрольные процессы на АГМО «Лада - 125».
 - 7 Охарактеризуйте состав и унифицированные узлы линии фотолитографии «Лада - 125».
 - 8 Охарактеризуйте методы сушки и задубливания фоторезиста.
 - 9 Охарактеризуйте конструкцию и принцип работ АНФ «Лада - 125».
 - 10 Охарактеризуйте конструкцию и принцип работ АГМО «Лада - 125».
- Определите режимы процесса очистки.
- 11 Определите методику контроля качества слоя фоторезиста, виды брака, способы предупреждения и устранения.
 - 12 Охарактеризуйте технические характеристики, конструкцию и принцип работы установки ЭМ-576.
 - 13 Охарактеризуйте технические характеристики, конструкцию и принцип работы установки ЭМ-584.
 - 14 Охарактеризуйте состав и особенности линии фотолитографии «Лада -125».
 - 15 Проведите сравнительный анализ контактной и проекционной фотолитографии.

Примерный перечень вопросов к ОКР №2

- 1 Поясните классификацию литографических фотошаблонов.
- 2 Охарактеризуйте маршруты изготовления фотошаблонов.
- 3 Поясните влияние дефектов фотошаблонов на качество фотолитографии.
- 4 Охарактеризуйте технологический процесс изготовления фотошаблонов.
- 5 Поясните механизм проявления позитивных и негативных фоторезистов.
- 6 Изложите методику выбора режимов проявления фоторезиста.
- 7 Изложите методы проявления фоторезистов.
- 8 Охарактеризуйте конструкцию оборудования для проявления (установки Лада – 125, Лада – 150, Рельеф и др.).
- 9 Предложите методику контроля качества проявления. Назовите основные виды брака и их причины. Предложите способы предупреждения и устранения брака.
- 10 Охарактеризуйте методы задубливания фоторезиста и критерии выбора режимов процесса.
- 11 Охарактеризуйте методику жидкостного травления технологических слоев SiO_2 , Si_3N_4 , Al и др.; требования к качеству травления.
- 12 Охарактеризуйте оборудование для жидкостного травления технологических слоев (установки типа ЩЦМ 3.260.212, линия «Кубок»).
- 13 Охарактеризуйте методы «сухого» травления технологических слоев, их преимущества и ограничения.
- 14 Охарактеризуйте оборудование для плазмохимического травления.
- 15 Изложите методы удаления фоторезиста. Требования к качеству.
- 16 Изложите методы литографии больших энергий (электронно-рентгено-ионолитографии).

Перечень учебных изданий и информационно - аналитических материалов

1 Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии. В 3 томах. Том II / Под редакцией д.т.н. А.Г.Турцевича - Минск : Интегралполиграф, 2003. – 736 с.

2 Лабораторный практикум / Л.П.Ануфриев [и др.]. – Минск : Интегралполиграф 2006. – 80 с.

3 Литография в производстве интегральных микросхем / Ю.А.Родионов. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 96 с.

4 Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. Том 2 / А.П.Достанко [и др.]. Минск : Амалфея, 2001. – 422 с.

5 Технологии изделий интегральной электроники / Л.П.Ануфриев [и др.]. - Минск : Амалфея, 2001.

6 Технологическое оборудование для микроэлектроники / С.В.Камлюк, В. С. Камлюк – Минск : РИПО, 2014. – 391 с.