

Радиальные силы, вызывающие радиальное биение метчика, влияют на ошибки шага нарезаемой резьбы только в условиях ограничения влияния осевых сил.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якушев А.И., Мустаев Р.Х., Мавлютов Р.Р. Повышение прочности и надежности резьбовых соединений. М., 1979, 215 с. 2. Шагун В.И., Фельдштейн Э.И. Прибор для измерения внутренних резьб. Измерительная техника, 1963, №7, с.7-10. 3. Шагун В.И. Влияние геометрических и конструктивных параметров машинных метчиков на размеры резьбы, нарезаемой в стали. - В сб.: Резьбообразующий инструмент. - М., 1968, с. 229-241.

УДК 621.315.592.049.77

Колешко В.М., Гулай А.В., Полынкова Е.В.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ЭЛИТ-ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЕНСОРНЫХ МИКРОСИСТЕМ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Одним из перспективных направлений минимизации размеров, увеличения надежности и снижения стоимости электронных изделий является объединение микроэлектронных процессорных схем и микрообработанных чувствительных элементов в единую приборную микроструктуру с целью получения полностью интегрированных сенсорных устройств с интеллектуальной специализированной системой обработки информации (рис. 1) [1-3]. Для этих целей предложен ЭЛИТ-процесс и автоматизированный комплекс изготовления объемных (трехмерных) микроструктур и сенсорных микросистем в едином технологическом цикле [2, 4, 5]. В основу данного процесса положен принцип сочетания возможностей методов обработки микроэлектронных структур с помощью лазерного излучения, электронного и ионного пучков при обеспечении выбора и изменения параметров каждого из указанных типов воздействия в широких пределах.

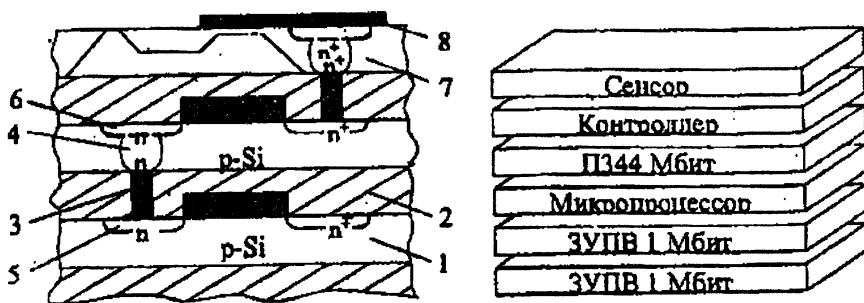


Рис. 1. Структура трехмерной микроэлектромеханической системы: 1 – полупроводниковые слои; 2 – изолирующие слои; 3 – вертикальные проводящие каналы; 4 – вертикальные диффузионные каналы; 5, 6 – сток, исток МДП-транзистора; 7 – профилированная сенсорная микроструктура; 8 – электрическая коммутация

Создание трехмерных интегральных микросистем во многом определяется решением проблемы формирования вертикальных проводящих каналов между различными слоями микроэлектронной структуры. Такие каналы в объеме полупроводниковой подложки по ЭЛИТ-технологии с помощью лазерного излучения, электронного и ионного пучков получают следующим образом. При использовании лазерного коротковолнового излучения $\hbar \nu > E_g$ ($\hbar \nu$ – энергия кванта электромагнитного излучения; E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника), генерирующего свободные носители тока в полупроводнике, и лазерного длинноволнового излучения ($\hbar \nu < E_g$), поглощаемого свободными носителями тока, создается зона электронного расплава в приповерхностном объеме полупроводниковой подложки. Затем с помощью ионного источника вводятся примеси в зону электронного расплава и осуществляется транспортирование данной зоны электрическим полем, возбуждаемым ионным и электронным пучками.

Транспортированные электроны поглощают длинноволновое излучение и передают энергию кристаллической решетке, что приводит к формированию вторичной зоны электронного расплава. Электронный газ вторичной зоны электронного расплава транспортируется электрическим полем дальше в глубь полупроводника и опять поглощает длинноволновое излучение, что приводит к формированию следующей зоны электронного расплава. Таким образом происходит перемещение переднего фронта зоны электронного расплава на заданную глубину, причем создание легированной зоны возможно с обеих сторон полупроводниковой подложки.

Скорость и направление транспорта зоны электронного расплава зависит от величины и направления электрического поля, однако максимальная ско-

рость транспорта зоны расплава не может превышать максимальной скорости дрейфа соответствующих носителей тока (например, для электронов в кремнии максимальная скорость дрейфа равна $8,5 \cdot 10^5$ см/с). Возможна реализация как непрерывного процесса ионного легирования зоны электронного расплава одновременно с прогонкой, так и чередование процесса легирования с прогонкой легированной зоны электронного расплава, а также локальное окисление полупроводника и его микропрофилирование [6]. При этом величина и направление электрического тока задаются с помощью электронных и ионных источников [7], а путем выбора режимов их работы возможна многократная прогонка легированной зоны электронного расплава в проводящем канале для насыщения его примесями.

Лазерное воздействие на формируемые микроструктуры при реализации ЭЛИТ-процесса производится в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах длин волн оптического излучения (табл. 1). Диаметр обрабатываемой зоны и плотность мощности излучения регулируются плавно, независимо для каждого лазерного луча. Время задержки импульса излучения относительно синхронизирующего импульса программируется в пределах 0–5 мкс с шагом 0,01 мкс. Контроль энергии излучения в импульсе и длительности импульсов осуществляется с помощью фотоэлектронного умножителя и стробоскопического осциллографа. Контроль фазового состава материала в области обработки производится с использованием зондирующего излучения непрерывного лазера на аргоне. Измерения параметров отраженного излучения позволяют определять момент плавления и кристаллизации, время существования жидкой фазы, а также оценивать площадь зоны изменения фазового состава (с точностью 20 %).

Таблица 1

Характеристика лазерного излучения для реализации ЭЛИТ-процесса

Параметры излучения	<i>Источники лазерного излучения</i>			
	ИК-диапазона		Видимого диапазона	УФ-диапазона
1	2		3	4
Длина волны, мкм	1,064		0,532	0,314
Активный элемент	АИГ		АИГ, удвоение частоты – LiF	N
Режим работы	Модуляции добротности	Свободной генерации	Модуляции добротности	Свободной генерации
Длительность импульса, мкс	0,1	Непрерывный режим	0,1	0,02

Окончание таблицы 1

1	2		3	4
Плотн. мощ-ности, Дж/см ²	15		1,5	1,8
Диаметр пятна, мм	0,05—2,0		0,05—0,5	0,02—0,5
Частота следования импульсов, Гц	до 10	—	до 10	до 10
Нестабильн. энергии, %	± 2,0		± 5,0	± 1,0

Температура обрабатываемых микроэлектронных структур с помощью устройства стационарного нагрева предметного стола устанавливается в пределах 300—800 К с точностью ± 3 град. Герметичная камера позволяет выполнять обработку в вакууме, а также в различных газовых средах. Предметный стол перемещается по двум координатам, ход стола равен 100 мм, шаг перемещения – 5 мкм, погрешность выхода в заданную точку – ± 2 мкм. Скорость непрерывного движения составляет 5 мм/с, пошагового перемещения – 10 шаг/с.

Автоматизированное управление процессом лазерной обработки позволяет: производить перемещение обрабатываемой структуры по заданной программе; выдавать синхронизирующий импульс на запуск лазеров; устанавливать длительность относительной задержки импульсов излучения; регулировать мощность каждого импульса; устанавливать температуру стационарного нагрева образца. По прикладным программам производится также обработка результатов контроля параметров импульсного лазерного излучения, фазового состава материала в зоне лазерного воздействия, качества поверхности обрабатываемых полупроводниковых структур.

Получение, формирование и перенос в зону обработки управляемого пучка электронов и ионов для реализации ЭЛИТ-процесса производится с помощью разработанного электронно-ионного (СВЧ)-источника. Данный источник включает в себя следующие основные элементы: источник ионов и электронов, узел эмиссионной оптики, канал дифференциальной откачки, узел коррекции и фокусировки луча, узел натекания рабочих газов, узел гальванической развязки СВЧ-генератора, блок согласования импедансов плазмы и СВЧ-генератора, узел принудительного охлаждения, электронный блок питания (рис. 2).

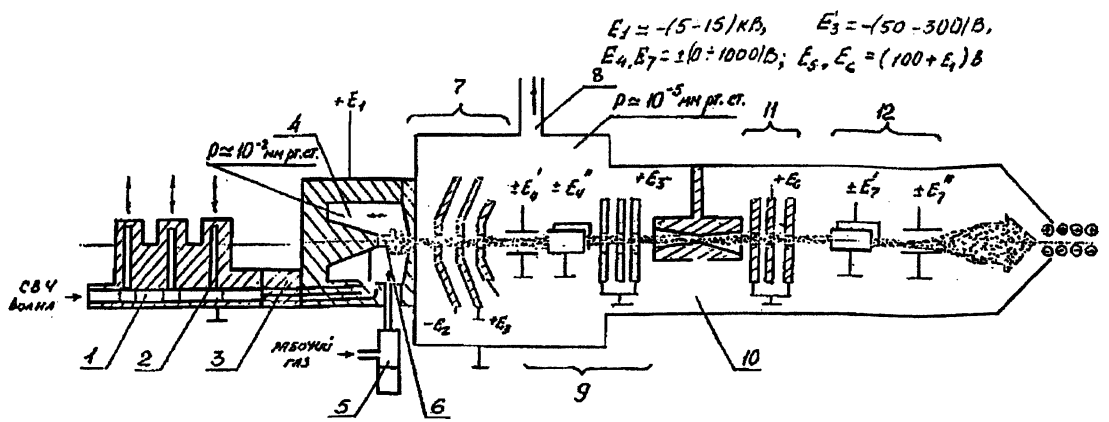


Рис. 2. Ионно-электронный (СВЧ)-источник:

- 1 – СВЧ-тракт; 2 – трехшлейфовый согласующий трансформатор;
- 3 – узел гальванической развязки; 4 – СВЧ разрядная камера;
- 5 – натекатель рабочего газа;
- 6 – подвижный электрод настройки резонатора; 7 – эмиссионный объектив;
- 8 – канал дифференциальной откочки; 9 – оптика переноса пучка;
- 10 – апертура канала дифференциальной откочки;
- 11 – фокусирующая линза; 12 – отклоняющие пластины

Источником ионов (электронов) служит геометрически локализованная газоразрядная плазма, возбуждаемая СВЧ-полем. Эмиттер (диаметром 2 мм) поставляет непрерывный пучок ионов с током 5 мА при работе с газами Ag, H₂, N₂, CO₂, а также при использовании химически активных газов O₂, F₂, SiH₄, (C₂H₅)₄Si. При этом содержание примесей в выведенном пучке ионов чрезвычайно мало и определяется в основном качеством рабочего газа, что позволяет использовать ионные пучки в ЭЛИТ-технологии без масс-сепарации. СВЧ-система источника ионов (электронов) содержит СВЧ-генератор с частотой 2,375 ГГц, работающий в непрерывном режиме, трехшлейфовый согласующий трансформатор и узел связи. Плазма возбуждается в одном из сильно связанных СВЧ-резонаторов с высокочастотным (емкостным) зазором, изменяющимся в пределах 1–5 мм.

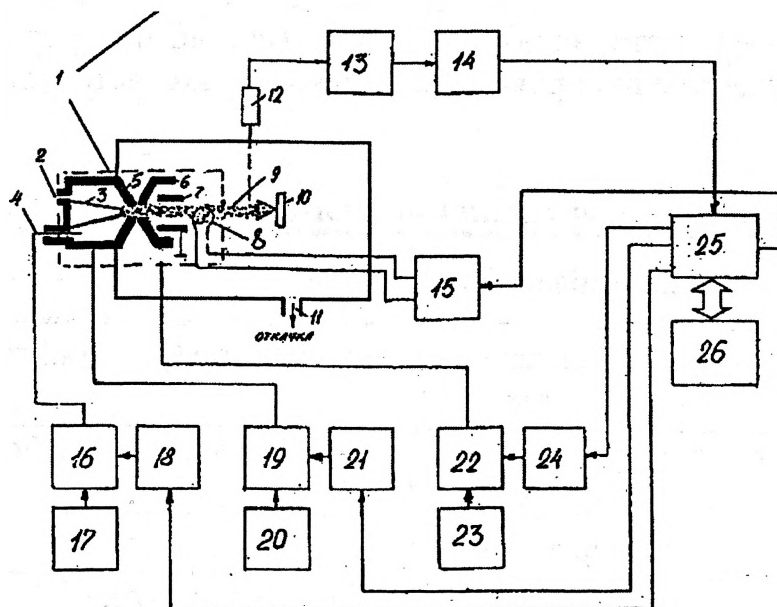
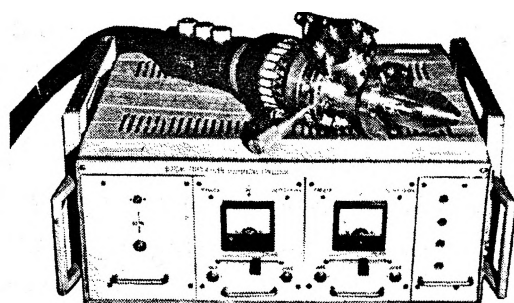


Рис. 3. Функциональная схема автоматизированной системы обработки микроструктур с использованием ионного и электронного пучков:

- 1 – ионно-электронный (СВЧ)-источник; 2 – ввод плазмообразующего газа; 3 – центральный электрод; 4 – петля ввода СВЧ-энергии;
- 5, 6, 7 – трехэлектродная система вытягивания ионов; 8 – нейтрализатор объемного заряда ионов; 9 – пучок ионов; 10 – обрабатываемый образец;
- 11 – вакуумирование реакционной камеры; 12 – эмиссионный оптический датчик; 13 – усилитель; 14 – АЦП; 15 – источник питания нейтрализатора;
- 16 – регулятор СВЧ-мощности; 17 – СВЧ-генератор; 18, 21, 24 – ЦАП;
- 20, 23 – источники питания системы вытягивания ионов;
- 19, 22 – регулятор напряжения источника питания;
- 25 – блок сопряжения; 26 – микропроцессорный блок

С целью повышения эффективности работы канала дифференциальной откачки за счет как можно большего ограничения поступления нейтральной компоненты газа в зону облучения совместно с апертурной диафрагмой применены одиночная линза и осевая коррекция. Формирование пучка заданных размеров и плотности тока в зоне облучения осуществляется одиночной линзой и двухкоординатной отклоняющей системой. По своим основным техническим характеристикам электронно-ионный (СВЧ)-источник отвечает требованиям

проведения ЭЛИТ-технологии (табл. 2) и интегрируется в систему автоматизированного управления процессом получения сенсорных микросистем (рис. 3).

Преимуществом разработанного электронно-ионного (СВЧ)-источника является большой срок службы при высокой яркости и большом энергетическом к.п.д., что обусловлено локализацией плазмы структурой возбуждающего СВЧ-поля. Так, после нескольких сот часов работы источника явных изменений на поверхности электродов не обнаружено, что объясняется преобладающей ролью объемных процессов в газоразрядной плазме СВЧ. Здесь следует заметить, что в известных источниках электронов (ионов) поверхностные изменения электродов существенно проявляются даже в низкочастотной плазме на постоянном токе.

Таблица 2

Параметры электронно-ионного (СВЧ)-источника

Наименование параметра	Величина параметра
Максимальный ток луча на выходе источника ионов (рабочий газ Ar), А	$5 \cdot 10^{-3}$
Максимальный ток луча на выходе источника электронов (рабочий газ Ar), А	$2 \cdot 10^{-1}$
Энергия луча, кэВ	0,5–15
Плотность тока эмиссии ионов (рабочий газ Ar), мА/см ²	до 150
Минимальный диаметр пучка ионов, мкм	5
Рабочее давление, Па	10^{-2} –10
Подводимая СВЧ-мощность, Вт	10–25
Максимальный ток луча ионов на выходе фокусирующей и отклоняющей оптики, А	$2 \cdot 10^{-3}$

Условие реализации ЭЛИТ-процесса заключается также в том, что длина волны лазерного излучения с энергией квантов $\hbar \nu < E_g$ должна находиться в области пропускания обрабатываемого материала. Например, длина волны излучения CO₂-лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) лежит в области пропускания большинства полупроводников: Si (область пропускания $\Delta\lambda = 1,2$ –15 мкм), Ge ($\Delta\lambda = 1,8$ –23 мкм), GaAs ($\Delta\lambda = 1,0$ –15 мкм), CdTe ($\Delta\lambda = 0,9$ –16 мкм), InP ($\Delta\lambda = 1,0$ –14 мкм), InSb ($\Delta\lambda = 7,5$ –16 мкм). С областью пропускания некоторых из указанных материалов совпадает также длина волны АИГ-лазера. От длины волны лазерного излучения зависит коэффициент поглощения α_e на свободных носителях (электронах) и глубина проплавленного слоя d_{nl} . Например, для кремния, если поглощение на электронах обусловлено рассеянием на ионизированных примесных атомах и дефектах, коэффициент поглощения равен:

$$\alpha_e \approx 1,2 \cdot 10^{-39} N_i n_e Z_p^2 \lambda_e^{3,5}, \quad (1)$$

где N_i – концентрация ионизированных примесных атомов и дефектов (см^{-3}); n_e – концентрация свободных электронов (см^{-3}); Z_p – число протонов в ядре примесного атома; λ_e – длина волны излучения, поглощаемого на свободных электронах (мкм); размерность числового множителя такова, что $[\alpha_e] = 1 \text{ см}^{-1}$.

Глубина проплавления слоя d_{nl} определяется из условия баланса между удельной теплотой плавления и энергией, поглощаемой свободными электронами в слое толщиной d_{nl} :

$$Q_{nl}\rho = 1,6 \cdot 10^{-19} \hbar v n_m Q_e (1 - R_e) \alpha_e d_{nl}, \quad (2)$$

где Q_{nl} – удельная теплота плавления; ρ – плотность полупроводника; n_m – предельная концентрация фотогенерированных электронов; Q_e – квантовая эффективность поглощения излучения $\hbar v < E_g$ электронами; R_e – коэффициент отражения излучения $\hbar v < E_g$. Оценка величины d_{nl} для кремния ($Q_{nl} = 164$ Дж/г; $\rho = 2,33$ г/см³; $n_m = 1,49 \cdot 10^{21}$ см⁻³), легированного атомами серы ($Z_p = 16$), при типичных значениях параметров $N_i \approx 1019$ см⁻³, $Q_e \approx 1$, $(1 - R_e) \approx 0,3$ и длине волны лазерного излучения $\lambda_e = 10,6$ мкм дает: $d_{nl} = 9$ нм.

Минимальная плотность потока q_m лазерного излучения с энергией квантов большей ширины запрещенной зоны, необходимая для фотогенерации предельной концентрации носителей тока n_m , определяется соотношением:

$$q_m(\hbar v > E_g) \approx \frac{2 \cdot 10^{-19} n_m}{Q_s (1 - R_s) \alpha_s \lambda_s}, \quad (3)$$

где Q_s – квантовая эффективность поглощения излучения $\hbar v > E_g$ при межзонных переходах; R_s – коэффициент отражения излучения $\hbar v > E_g$; α_s – коэффициент поглощения при межзонных переходах; λ_s – длина волны излучения, соответствующая энергии квантов $\hbar v > E_g$. Величина q_m , например, для кремния ($\alpha_s \approx 10^4$ см⁻¹) при типичных значениях параметров $Q_e = 1$, $(1 - R_e) \approx 0,3$ и длине волны лазерного излучения $\hbar v > E_g$ определяется временем, необходимым для проплавления материала на глубину d_{nl} :

$$t_m(\hbar v > E_g) = t_{nl}(d_{nl}) = Q_{nl}\rho d_{nl}/P(\hbar v < E_g). \quad (4)$$

При плотности потока $P(\hbar v < E_g)$ CO₂-лазера, равной 40 Вт/см², для кремния имеем $t_m(\hbar v > E_g) \approx 8$ мкс. Для лазерного луча, сфокусированного в 10 раз $P(\hbar v < E_g) = 4 \cdot 10^3$ Вт/см², $t_m(\hbar v > E_g) \approx 80$ нс. Минимальная плотность по-

тока $q_m(\hbar \nu < E_g)$ с энергией квантов меньшей ширины запрещенной зоны, необходимая для проплавления подложки толщиной l , определяется удельной теплотой плавления материала:

$$q_m(\hbar \nu < E_g) \approx Q_{пл} \rho l. \quad (5)$$

Например, для кремниевой подложки толщиной $l = 300$ мкм $q_m \approx 11,5$ Дж/см². Минимальная длительность импульса лазерного излучения $\hbar \nu > E_g$:

$$t_m(\hbar \nu < E_g) = Q_{пл} \rho l / P(\hbar \nu < E_g). \quad (6)$$

Для сфокусированного в 10 раз лазерного луча $t_m(\hbar \nu < E_g) \approx 3$ мс.

Электрический ток через локальный объем, равный суммарному току электронных и ионных пучков I , связан с величиной электрического поля $E \approx V/l$ соотношением:

$$I = (S/\rho_k) E. \quad (7)$$

где V – разность потенциалов между поверхностями подложки в проводящем канале; S – поперечное сечение канала; ρ_k – локальное удельное сопротивление подложки в области проводящего канала. Оценка величины тока пучков I дает следующие результаты: например, при $V = 10$ В, $l = 300$ мкм, $S = 60 \times 40$ мкм (площадь эмиттера транзистора) $\rho_k = 20$ Ом·см ток пучков $I \approx 4 \cdot 10^{-4}$ А; при $S = 1$ мкм² и при тех же значениях V , l , ρ_k ток пучков $I \approx 2 \cdot 10^{-7}$ А. В случае использования высокоомной подложки с удельным сопротивлением $\rho_k = 10^3$ Ом·см при $S = 1$ мкм² и прежних значениях V , l необходимый ток пучков равен $4 \cdot 10^{-9}$ А. Таким образом, для ЭЛИТ-процесса предпочтительно использование высокоомных подложек, что оправдано как с энергетической точки зрения (возможно использование слаботочных пучков), так и с технологической (хорошая изоляция компонентов микросистемы).

Поперечное сечение формируемого проводящего канала можно изменять вдоль канала в зависимости от режимов формирования электронного, ионного и лазерных лучей. В составе ЭЛИТ-процесса возможно использование лазерных излучений как в режиме свободной генерации (непрерывное излучение), так и в режиме модулированной добротности (импульсное излучение). Выбор режимов импульсного излучения зависит от характеристик электронного и ионного пучков. Например, если длительности импульсов электронного и ионного лучей равны длительности импульса $t_m(\hbar \nu < E_g)$, необходимой для проплавления подложки, то излучение $\hbar \nu < E_g$ может быть непрерывным. Возможны другие соотношения между длительностями лазерных импульсов и импульсов электронного и ионного излучений, что позволяет реализовать различ-

ные режимы формирования проводящих каналов (например, непрерывный процесс ионного легирования зоны электронного расплава одновременно с прогонкой или чередование процесса ионного легирования с прогонкой легированной зоны электронного расплава).

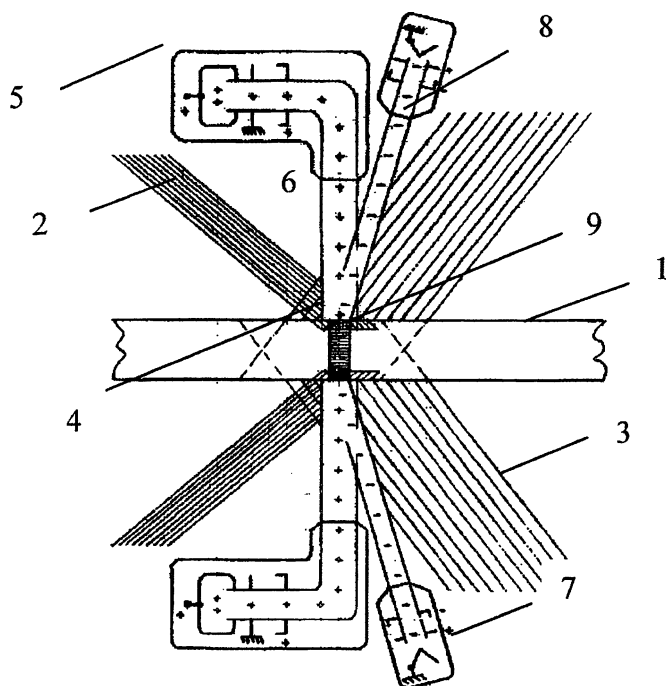


Рис. 4. Схема реализации ЭЛИТ-процесса получения объемных микро-структур: 1 – полупроводниковая подложка; 2 – коротковолновое лазерное излучение; 3 – длинноволновое лазерное излучение; 4 – зона электронного расплава; 5 – источник ионов; 6 – ионный пучок; 7 – источник электронов; 8 – электронный луч; 9 – вертикальный проводящий канал

Схема реализации ЭЛИТ-процесса создания в полупроводниковой подложке вертикальных проводящих каналов может быть реализована следующим образом (рис. 4). Лазерное излучение I_1 с энергией квантов $\hbar \nu > E_g$ образует на одной стороне полупроводникового кристалла жидкофазную область, а с другой стороны полупроводник облучается лазерным лучом I_0 с энергией квантов $\hbar \nu < E_g$, для которого кристалл прозрачен, а поглощение происходит в области жидкой фазы. Если энергия, поглощенная от луча I_0 , превышает теплоту плавления полупроводника и компенсирует поток тепла от жидкофазной области, то луч I_0 может поддерживать эту область в метастабильном состоянии при выключенном излучении I_1 . Прикладывая к системе «твердофазная – жидкофазная – твердофазная области» разность потенциалов (например, при помощи электронного и ионного зондов) и вводя в жидкофазную область ионной имплантацией примесь, можно реализовать условия для направленного движения жидкой фазы через полупроводник. Жидкофазная область везде, за исключением границ, электронейтральна и

имеет структуру электронного расплава, а ее границы находятся в областях полей прямосмещенного и обратносмещенного потенциальных барьеров. Под действием электрического поля обратносмещенного барьера происходит эмиссия электронов в твердофазную область, а сила Лоренца, обусловленная этим полем, воздействует на положительные ионы на границе жидкофазной области и последняя как единая (континуум) перемещается со скоростью V_L , пропорциональной напряженности электромагнитного поля этого барьера.

Скорость V_L определяется из решения системы феноменологических уравнений для обобщенных потоков I_i, I_Q и обобщенных сил X_i и X_Q :

$$I_i = \Sigma L_{ik} X_k + L_{iQ} X_Q, \quad (8)$$

$$I_Q = \Sigma L_{Qi} X_i + L_{QQ} X_Q, \quad (9)$$

где $i, k = A, B, C$; L_{ik}, L_{iQ} – коэффициенты Онзагера; индексы A, B, C относятся к атомам матрицы, примеси и электронам. При стационарных изотермических условиях неравновесной градиентно-зонной кристаллизации:

$$V_L = \frac{eD\varepsilon}{kT} \left(1 - \frac{2r_A + 1}{r_A + 1} \frac{bT}{aH_L}\right)^{-1}, \quad (10)$$

где e – абсолютный заряд; k – постоянная Больцмана; D – коэффициент диффузии атомов; T – температура плавления; r_A – электрохимическая валентность атомов матрицы на границе жидкофазной области; a, b – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности; H_L – величина, близкая к энергии плавления полупроводника. Конкретная оценка для кремния n -типа с концентрацией примеси $\ll 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ дает $V_L = 15 \text{ м/с}$.

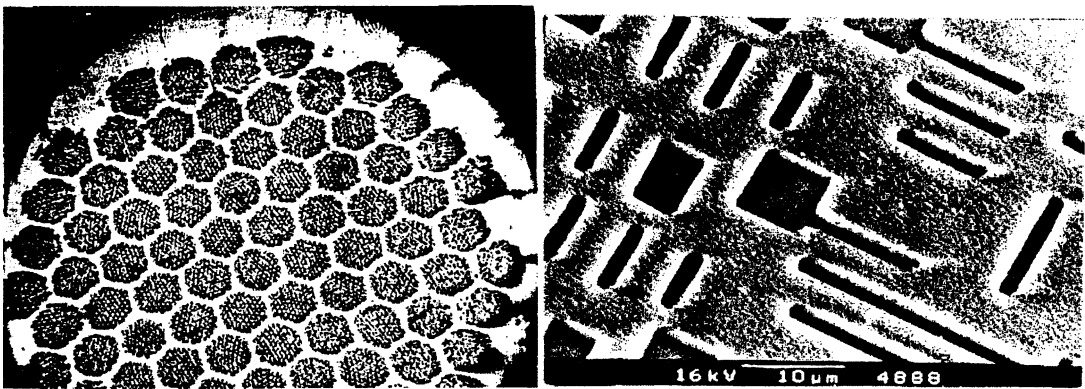


Рис. 5. Микроэлектронные структуры, полученные с использованием ЭЛИТ-технологии

Производительность ЭЛИТ-процесса можно оценить временем формирования проводящего канала (временем разгонки примеси вдоль канала, имплантируемой через одну из поверхностей подложки). Из приведенных оценок для кремния видно, что время проплавления подложки (толщина ~ 300 мкм) составляет 3 мс, а время электродиффузии области расплава, легированной примесью, равно 3 мкс, то есть процесс электродиффузии происходит в 10^3 раз быстрее, чем процесс расплавления. Следовательно, при полном проплавлении подложки она практически на всю толщину равномерно легируется за счет электродиффузии, и при этом формируется проводящий канал или система проводящих каналов (рис. 5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В.М. Инженерия знаний при разработке интеллектуальных машин, технологий и систем. Мн., БИТА, 1998, 60 с.
2. Колешко В.М., Польшкова Е.В. ЭЛИТ-процесс сенсорных микросистем. //Машиностроение. Мн., 2003, вып. 19, с. 666-671.
3. Польшкова Е.В., Примако А.Ф. Нейросетевая технология сенсорных систем обоняния. //Машиностроение. Мн., 2002, вып. 18, с. 580-587.
4. Колешко В.М. Способ изготовления полупроводниковых приборов и программных микросхем. Авт. свид. СССР № 1227052, 1984.
5. Колешко В.М., Евсеев Б.С. Способ обработки полупроводниковых структур. Авт. свид. СССР № 1127705, 1983.
6. Колешко В.М., Сергейченко А.В. Микропрофилирование кремния при создании сенсорных микросистем. //Машиностроение. Мн., 2003, вып. 19, с. 679-689.
7. Колешко В.М. Способ обработки полупроводниковых структур. Авт. свид. СССР № 1144562, 1983.
8. Колешко В.М. Способ создания ионнолегированных слоев. Авт. свид. СССР № 843632, 1982.

УДК 621.382.049.77

Колешко В.М., Гулай А.В.

ИНВАРИАНТНОСТЬ МИКРОТЕХНОЛОГИЙ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Создание интеллектуальных систем научного поиска [1] для такой предметной области как микротехнология требует при построении баз знаний решения проблем структурирования, систематизации, классификации основных признаков и особенностей технологических процессов. В связи с этим представляется необходимым выявление определенных групп или классов