5321

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

КОНСТРУИРОВАНИЕ МИКРО- И НАНОСИСТЕМ

Методические указания
к лабораторной работе № 2

Проектирование топологии тонкопленочного конденсатора

Рязань 2018

УДК 621.315.592

Конструирование микро- и наносистем: методические указания к лабораторной работе № 2 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Рыбина, Н.Б. Рыбин., Д.С. Кусакин. Рязань, 2018. 16 с.

Содержат краткие теоретические сведения о конструкциях и способах расчета топологии тонкопленочных конденсаторов для гибридных интегральных микросхем, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине “Конструирование микро- и наносистем”.

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.03.04.

Ил. 2. Табл. 2. Библиогр.: 2 назв.

Тонкопленочный конденсатор, гибридная интегральная схема, проектирование

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники РГРТУ (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Конструирование микро- и наносистем

Составители: Р ы б и н а Наталья Владимировна
Р ы б и н Николай Борисович
К у с а к и н Дмитрий Сергеевич

Редактор Р.К. Мангутова
Корректор М.Е. Цветкова
Подписано в печать 10.10.18. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 30 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы

Изучение порядка расчета тонкопленочных конденсаторов в гибридных интегральных микросхемах.

1. Краткие теоретические сведения

Интегральная микросхема (ИМС) – это конструктивно законченное изделие электронной техники, выполняющее определенную функцию преобразования информации и содержащее совокупность электрически связанных между собой электрорадиоэлементов (ЭРЭ), изготовленных в едином технологическом цикле [1].

Термин «интегральная микросхема» отражает: объединение значительного числа транзисторов, диодов, конденсаторов, резисторов и соединяющих проводников в единую конструкцию (конструктивная интеграция); выполнение схемой функций преобразования информации, более сложных по сравнению с функциями отдельных ЭРЭ (схемотехническая интеграция); выполнение в едином технологическом цикле одновременно всех ЭРЭ схемы и межсоединений и одновременное формирование групповым методом большого числа одинаковых ИМС (технологическая интеграция).

По способу изготовления различают полупроводниковые и пленочные ИМС. В полупроводниковых ИМС все ЭРЭ и часть межсоединений сформированы в приповерхностном слое полупроводниковой (обычно кремниевой) подложки. В пленочных ИМС пассивные ЭРЭ изготовлены в виде совокупности тонких (менее 1 мкм) или толстых (10 – 50 мкм) пленок, нанесенных на диэлектрическую подложку. Гибридные ИМС (ГИМС) представляют

собой комбинацию пленочных пассивных ЭРЭ с миниатюрными бескорпусными дискретными активными приборами (полупроводниковыми ИМС, транзисторами, диодами), расположенных на общей диэлектрической подложке. ЭРЭ, которые являются неотъемлемой составной частью ИМС и не могут быть выделены из нее как самостоятельное изделие, называют элементами ИМС, а дискретные активные ЭРЭ ГИМС – навесными компонентами (или просто компонентами), подчеркивая тем самым, что их изготавливают отдельно в виде самостоятельных приборов, которые могут быть приобретены изготовителем ГИС как покупные изделия. В отличие от дискретных компонентов элементы ИМС называют интегральными (интегральный резистор, интегральный диод) [1].

В совмещенных ИМС ЭРЭ выполнены в приповерхностном слое полупроводникового кристалла (как у полупроводниковой ИМС), а пассивные нанесены в виде пленок на покрытую диэлектриком поверхность того же кристалла (как у пленочной ИМС).

ГИС по сравнению с полупроводниковыми имеют ряд преимуществ: обеспечивают широкий диапазон номиналов, меньшие пределы допусков и лучшие электрические характеристики пассивных элементов (более высокую добротность, температурную и временную стабильность, меньшее число и менее заметное влияние паразитных элементов).

Одна из основных характеристик микроэлектронного изделия – рассеиваемая мощность. При гибридном исполнении можно обеспечить изготовление изделий достаточно большой мощности, что важно при создании аналоговых устройств, управляющих мощными входными цепями.

Конструкции пленочных конденсаторов

Так как емкость тонкопленочного конденсатора определяется площадью перекрытия его обкладок (активной площадью или площадью верхней обкладки), то он может быть изготовлен в нескольких конструктивных вариантах, приведенных на рис. 1 [2].

На рис. 1, а приведена конструкция конденсатора с площадью верхней обкладки более 5 мм^2. Так как верхние обкладки формируют масочным методом, то для устранения погрешности совмещения маски в месте вывода верхней обкладки с противоположной стороны от вывода делают компенсатор. При значительной площади верхней обкладки эта погрешность мала и компенсатор не нужен. При активной площади от 1 до 5 мм^2 обкладки конденсатора можно выполнять в виде двух взаимно пересекающихся полосок (рис. 1, б). Если расчетная площадь конденсатора меньше 1 мм^2, конденсатор можно выполнять в виде последовательно соединенных конденсаторов (рис. 1, в). Если расчетная площадь слишком мала и не позволяет конструировать конденсатор приемлемых размеров, можно использовать в качестве диэлектрика подложку (рис. 1, г), которая должна быть пригодна для напыления обкладок с обеих сторон. Можно конструировать также гребенчатый конденсатор (рис. 1, д). Емкость такого конденсатора почти целиком определяется емкостью, обусловленной краевым эффектом.

Материалы конденсаторов. Обкладки конденсаторов должны иметь высокую проводимость, коррозионную стойкость, технологическую совместимость с материалом подложки и диэлектрика конденсатора: температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР), близкие к ТКЛР подложки и диэлектрика, хорошую адгезию к подложке и диэлектрику, высокую механическую прочность.

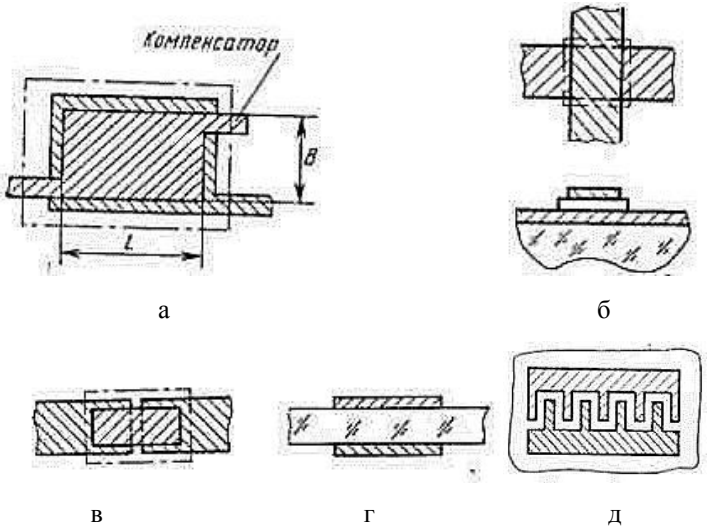


Рис. 1. Конфигурации пленочных конденсаторов: а – площадь верхней обкладки более 5 мм^2; б – площадь от 1 до 5 мм^2; в – расчетная площадь конденсатора меньше 1 мм^2; г – конструкция с использованием подложки в качестве диэлектрика; д – гребенчатый конденсатор [1]

Наилучшим материалом для обкладок конденсаторов является алюминий, который, однако, имеет плохую адгезию к подложке. Для предотвращения отслаивания нижней обкладки вначале напыляют подслой титана или ванадия. Верхняя обкладка, напыляемая на диэлектрик, не требует подслоя. Применение золота для обкладок не рекомендуется из-за высокой подвижности атомов и возможной диффузии сквозь диэлектрик, приводящей к короткому замыканию обкладок.

Материал диэлектрика должен иметь хорошую адгезию к подложке и материалу обкладок, обладать высокой электрической

прочностью и малыми потерями, иметь высокую диэлектрическую проницаемость и минимальную гигроскопичность, не разлагаться в процессе формирования пленок. В качестве диэлектрических материалов наиболее часто используют моноокиси кремния и германия. В табл. 1 приведены основные параметры диэлектрических материалов тонкопленочных конденсаторов.

Конструкции пленочных конденсаторов должны учитывать особенности топологической структуры пленочного функционального узла (размеры подложки, количество и расположение выводов и т.д.), величину номинала, характеристики используемых материалов, технологию производства, требуемую и возможную точность воспроизведения номиналов, условия эксплуатации микросхем [2]. В соответствии с этим основными исходными данными для проектирования резисторов являются:

- номинальная емкость C_i, Ом;
- погрешность номинальной емкости γ_{Ci}, %;
- рабочий диапазон температур, $T_{\max} - T_{\min}$, ºС;
- технологические ограничения;
- шаг координатной сетки, мм;
- напряжение питания схемы $U_{раб}$, В;
- диапазон рабочих частот.

Технологические ограничения при использовании различных методов создания тонкопленочных конденсаторов [масочного (М), фотолитографического (Ф), комбинированного масочного и фотолитографического (МФ), электронно-ионного (ЭИ) и по танталовой технологии (ТА)] приведены в табл. 2 [1].

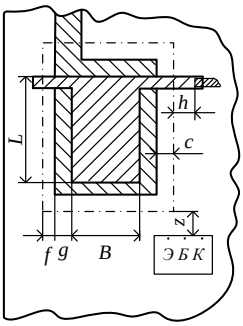
Таблица 1. Параметры диэлектрических материалов тонкопленочных конденсаторов [1]

Материал		Параметры							
диэлектрика	обкладок	Удельное поверхностное сопротивление обкладок ρs, Ом/□	Удельная емкость C_0, пФ/см^2	Рабочее напряжение $U_{раб}$, В	Диэлектрическая проницаемость ε при f = 1 кГц	Тангенс угла диэлектрических потерь tgδ при f = 1 кГц	Электрическая прочность $E_{пр}$, В/см	Рабочая частота f, МГц	Температурный коэффициент емкости ТКС при T=-60÷125 °С
Моноокись кремния	Алюминий А99	0,2	5000	60	5,0-6,0	0,01-0,02	$(2\text{-}3)\cdot10^6$	500	$2\cdot10^{-4}$
			10000	30					
Моноокись германия			5000	10	11-12	0,005-0,007	$1{,}0\cdot10^6$	300	$3\cdot10^{-4}$
			10000	7					
			15000	5					
Боросили-катное стекло			2500	24	4	0,001-0,0015	$(3\text{-}4)\cdot10^6$	300	$0{,}35\cdot10^{-4}$
			5000	15					
			10000	10					
			15000	8					

Окончание таблицы 1

7	Стекло электроваку-умное			15000	12,6	5,2	0,002-0,003	$(3\text{-}4)\cdot10^{6}$	300	$(0{,}5\text{-}1)\cdot10^{-4}$ при T=-60÷25 °C, $(1{,}5\text{-}1{,}8)\cdot10^{-4}$ при T=25÷155 °C
				20000	10-12,6					
				30000	6,3-10					
				40000	6,3					
	Пятиокись тантала	Тантал ТВЧ, нижняя обкладка	1-10	60000	15	23	0,02	$2\cdot10^{6}$	0,1	$4\cdot10^{-4}$
				100000	10					
		Алюминий А99, верхняя обкладка	0,2	200000	3					

Таблица 2. Конструкторско-технологические ограничения при проектировании тонкопленочных конденсаторов [1, 2]

Топология конденсатора	Содержание ограничения	Размер ограничения, мм, при использовании метода				
		М	Ф	МФ	ЭИ	ТА
	Точность изготовления линейных размеров элемента Δl, Δb, Δa, ΔL, ΔB, мм	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01
	Минимально допустимые расстояния, мм: - между краями диэлектрика и нижней обкладкой конденсатора f	0,1	0,1	0,1	0,1	-
	Между краями верхней и нижней обкладок g	0,2				
	Между краем диэлектрика и нижней обкладкой в месте вывода верхней обкладки c	0,2				
	Между краем диэлектрика и соединением вывода конденсатора с другим пленочным элементом h	0,3				

Окончание таблицы 2

	От пленочного конденсатора до навесных компонентов *z*	0.5
	Минимальная площадь перекрытия обкладок *L*×*B*, мм	0,5×0,5
	Максимальное отклонение емкости конденсатора от номинального значения, %	±12

Порядок расчета тонкопленочных конденсаторов

Конденсатор показан на рис. 2.

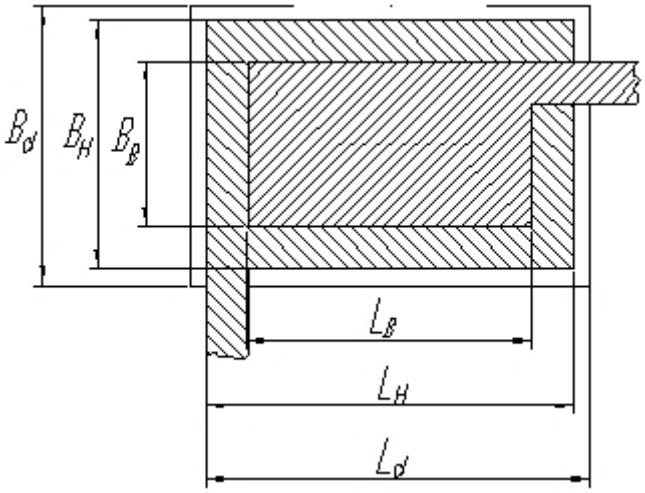


Рис. 2. Тонкопленочные конденсаторы с емкостью до $5 \cdot 10^5$ пФ

Общий порядок расчета (рис. 2) включает несколько приведенных ниже этапов.

1. Выбор материала диэлектрика по рабочему напряжению производится в соответствии с данными, приведенными в табл. 1. Следует ориентироваться на материал диэлектрика с возможно более высокими диэлектрической проницаемостью ε, электрической прочностью $E_{пр}$, малыми значениями *ТКС* и $tg\delta$ для обеспечения минимальных геометрических размеров конденсатора, тип которого приведен на рис. 2.

2. Определение минимальной толщины диэлектрика производится из условий обеспечения необходимой электрической прочности по формуле

$$d_{min} \geq k_з U_{раб} / E_{пр}, \qquad (1)$$

где $k_з$ – коэффициент запаса электрической прочности (обычно для тонкопленочных конденсаторов $k_з$ = 2...3); $E_{пр}$ – электрическая прочность материала диэлектрика, *В/мм*; $U_{раб}$ - рабочее напряжение. Толщину диэлектрика чаще выбирают в пределах 0,1...1 *мкм*. Минимальная толщина диэлектрического слоя ограничена требованием получения сплошной пленки без сквозных отверстий и с заданной электрической прочностью, а максимальная толщина ограничена механическими напряжениями в растущей пленке. Оптимальной толщиной принято считать величину в 0,3...0,5 *мкм*.

3. Определение удельной емкости конденсатора ($нФ/см^2$) ведется по формуле

$$C_{0v} = 0{,}0885\varepsilon / d, \qquad (2)$$

где d – толщина диэлектрика, *см*.

4. Определение относительной температурной погрешности производится из выражения

$$\gamma_{Ct} = \alpha_C \cdot (T_{max} - 20\ ^0\text{C}), \tag{3}$$

где α_C – температурный коэффициент емкости материала диэлектрика.

5. Определение допустимой относительной погрешности активной площади конденсатора осуществляется по формуле

$$\gamma_{S\,\text{доп}} = \gamma_C - \gamma_{Co} - \gamma_{\text{ст}} - \gamma_{Ct}, \tag{4}$$

где γ_{Co} – относительная погрешность удельной емкости, характеризующая воспроизводимость удельной емкости в условиях данного производства (зависит от материала и погрешности толщины диэлектрика и составляет 3 – 5 %); $\gamma_{ст}$ – относительная погрешность, обусловленная старением пленок конденсатора (зависит от материала и метода защиты и обычно не превышает 2 – 3 %).

6. Определение удельной емкости конденсатора с учетом точности изготовления:

$$C_{0\text{точн}} = C \cdot \left[\frac{\gamma_{S\text{доп}}}{2\Delta L}\right]^2 \frac{\text{К}_\text{ф}}{(1+\text{К}_\text{ф})^2}, \tag{5}$$

для обкладок квадратной формы (при $K_\phi = 1$)

$$C_{0\text{точн}} = C \cdot \left[\frac{\gamma_{S\text{доп}}}{2\Delta L}\right]^2. \tag{6}$$

Точность изготовления линейных размеров пленочных элементов и расстояний между ними Δl, Δb, ΔL, ΔB выбирается с учетом метода формирования элемента (табл. 2).

Определяем, какой должна быть удельная емкость конденсатора с учетом технологических возможностей изготовления по площади перекрытия обкладок и толщине диэлектрика. Задаемся S_{min} = 1 мм^2.

$$C_{0min} = \frac{C_{min}}{S_{min}}. \quad (7)$$

7. Выбор минимального значения удельной емкости конденсатора с учетом электрической прочности и точности изготовления

$$C_0 < min\ \{C_{0v};\ C_{0точн};\ C_{0min}\}.$$

Определяем, какая толщина диэлектрика соответствует выбранной удельной емкости C_0: $d = 0{,}0885\varepsilon / C_0$.

Далее проводим расчет геометрических размеров конденсатора.

8. Определение коэффициента, учитывающего краевой эффект:

$$K = \begin{cases} 1;\ C/C_0 \geq 5\ мм^2, \\ (1{,}3...0{,}06)\cdot C/C_0;\ 1 \leq C/C_0 \leq 5\ мм^2. \end{cases}$$

9. Определение площади верхней обкладки конденсатора:

$$S = \frac{C}{C_0 \cdot K}. \quad (8)$$

10. Определение размеров верхней обкладки конденсатора при $K_ф$ = 1:

$$L = B = \sqrt{S}. \quad (9)$$

11. Вычисление размеров нижней обкладки конденсатора с учетом допусков на перекрытие:

$$L_H = B_H = L + 2g, \quad (10)$$

где g – размер перекрытия нижней и верхней обкладок конденсатора (табл. 2).

12. Определение размеров диэлектрика:

$$L_Д = B_Д = L_H + 2f, \quad (11)$$

где f – размер перекрытия нижней обкладки и диэлектрика.

13. Определение площади, занимаемой конденсатором:

$$S_Д = L_Д \cdot B_Д. \quad (12)$$

Форма обкладок конденсатора выбирается на этапе разработки эскиза топологии. Сначала проектируется обкладка конденсатора квадратной формы, а при отсутствии места на чертеже топологии для расположения квадрата следует задаться одной из сторон конденсатора, коэффициентом формы обкладок и вычислить размеры обкладок прямоугольной формы.

Для контроля емкости в процессе или после изготовления микросхемы конденсатор проектируется со специальными контактными площадками.

14. Конденсатор спроектирован правильно при выполнении приведенных ниже условий:

а) рабочий тангенс угла диэлектрических потерь не превышает заданного:

$$tg\delta_{раб} \leq tg\delta,$$

где $tg\delta_{раб} = tg\delta_Д + tg\delta_{об}$.

Тангенс угла потерь в обкладках $tg\delta_{об}$ следует вычислять по формуле

$$tg\delta_{об} \approx (4\pi / 3) \cdot f_{max} \cdot R_{об} \cdot C, \qquad (13)$$

где $R_{об}$ – сопротивление обкладок конденсатора, *Ом*; C – емкость конденсатора, *Ф*; f_{max} – максимальная рабочая частота, *Гц*.

Сопротивление обкладок конденсатора зависит от его формы и рассчитывается по формуле

$$R_{об} = \rho_{Sоб} \cdot K_{ф}, \qquad (14)$$

где $\rho_{Sоб}$ – удельное поверхностное сопротивление материала обкладок;

б) рабочая напряженность электрического поля $E_{раб}$ не превышает $E_{пр}$ материала диэлектрика $E_{раб} \leq E_{пр}$:

$$\mathrm{E_{раб}} = \frac{U_{\mathrm{раб}}}{d}; \qquad (15)$$

в) погрешность активной площади конденсатора не превышает допустимую:

$$\gamma_{S\,\mathrm{раб}} \leq \gamma_{S\,\mathrm{доп}},$$

где $\gamma_{S\,\mathrm{раб}}$ вычисляется по формуле

$$\gamma_{S\mathrm{раб}} = \Delta L \cdot \frac{1+K_{\mathrm{ф}}}{\sqrt{K_{\mathrm{ф}} \cdot S}}. \qquad (16)$$

Проверки показывают, что конденсатор не выходит за пределы точности, имеет запас по электрической прочности и активной площади, тангенс угла диэлектрических потерь меньше заданного.

2. Последовательность выполнения работы

1. Изучите теоретическую часть работы.

2. Получите задание в виде принципиальной схемы у преподавателя.

3. Выберите материалы диэлектрика и обкладок конденсатора.

4. Рассчитайте конструкции всех конденсаторов.

5. Сделайте проверку расчетов.

6. Определите суммарную площадь, занимаемую всеми конденсаторами.

3. Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Результаты расчетов.

3. Чертежи тонкопленочных конденсаторов в масштабе с указанием размеров.

4. Выводы по полученным результатам.

Контрольные вопросы

1. Что такое гибридная интегральная схема?

2. Назовите требования, предъявляемые к материалам диэлектриков конденсаторов.

3. Назовите требования, предъявляемые к материалам обкладок конденсаторов.

4. Назовите основные материалы пленок диэлектриков конденсаторов ГИМС.

5. Назовите основные материалы обкладок конденсаторов ГИМС.

6. Какие конструкции бывают у тонкопленочных конденсаторов?

7. Что такое краевой эффект в конденсаторе?

8. Что такое коэффициент формы тонкопленочного резистора?

9. Как работает гребенчатый конденсатор?

10. Конструкции конденсаторов малой емкости.

11. Порядок расчета конденсатора.

12. Расскажите о подстраиваемых конденсаторах.

13. Как проводится проверка правильности расчета конструкции конденсатора?

Библиографический список

1. Коледов Л.А. Конструирование и технология микросхем: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1984. 232 с.

2. Меркулов А.И., Меркулов В.А. Основы конструирования интегральных микросхем. Самара: Издательство СГАУ, 2013. 270 с.

5200

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

КОНСТРУИРОВАНИЕ МИКРО- И НАНОСИСТЕМ

Методические указания
к лабораторной работе № 1

Проектирование топологии тонкопленочных резисторов

Рязань 2017

УДК 621.315.592

Конструирование микро- и наносистем: методические указания к лабораторной работе № 1 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Рыбина, Н.Б. Рыбин. Рязань, 2017. 16 с.

Содержат краткие теоретические сведения о конструкциях и способах расчета топологии тонкопленочных резисторов для гибридных интегральных микросхем, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине “Конструирование микро- и наносистем”.

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.03.04

Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 2 назв.

Тонкопленочный резистор, гибридная интегральная схема, проектирование

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Конструирование микро- и наносистем

Составители: Р ы б и н а Наталья Владимировна
Р ы б и н Николай Борисович

Редактор Р.К. Мангутова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 25.09.17. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 30 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы

Изучение порядка расчета тонкопленочных резисторов в гибридных интегральных микросхемах.

1. Краткие теоретические сведения

Интегральная микросхема (ИМС) – это конструктивно законченное изделие электронной техники, выполняющее определенную функцию преобразования информации и содержащее совокупность электрически связанных между собой электрорадиоэлементов (ЭРЭ), изготовленных в едином технологическом цикле [1].

Термин «интегральная микросхема» отражает: объединение значительного числа транзисторов, диодов, конденсаторов, резисторов и соединяющих проводников в единую конструкцию (конструктивная интеграция); выполнение схемой функций преобразования информации, более сложных по сравнению с функциями отдельных ЭРЭ (схемотехническая интеграция); выполнение в едином технологическом цикле одновременно всех ЭРЭ схемы и межсоединений и одновременное формирование групповым методом большого числа одинаковых ИМС (технологическая интеграция).

По способу изготовления различают полупроводниковые и пленочные ИМС. В полупроводниковых ИМС все ЭРЭ и часть межсоединений сформированы в приповерхностном слое полупроводниковой (обычно кремниевой) подложки. В пленочных ИМС пассивные ЭРЭ изготовлены в виде совокупности тонких (менее 1 мкм) или толстых (10 – 50 мкм) пленок, нанесенных на диэлектрическую подложку. Гибридные ИМС (ГИМС) представляют собой комбинацию пленочных пассивных ЭРЭ с миниатюрными бескорпусными дискретными активными приборами (полупроводниковыми ИМС, транзисторами, диодами), расположенных на общей диэлектрической подложке. ЭРЭ, которые являются неотъемлемой составной частью ИМС и не могут быть выделены из нее как самостоятельное изделие, называют элементами ИМС, а дискретные активные ЭРЭ ГИМС – навесными компонентами (или просто компонентами), подчеркивая тем самым, что их изготавливают отдельно в виде самостоятельных приборов, которые

могут быть приобретены изготовителем ГИС как покупные изделия. В отличие от дискретных компонентов элементы ИМС называют интегральными (интегральный резистор, интегральный диод) [1].

В совмещенных ИМС ЭРЭ выполнены в приповерхностном слое полупроводникового кристалла (как у полупроводниковой ИМС), а пассивные нанесены в виде пленок на покрытую диэлектриком поверхность того же кристалла (как у пленочной ИМС).

ГИС по сравнению с полупроводниковыми имеют ряд преимуществ: обеспечивают широкий диапазон номиналов, меньшие пределы допусков и лучшие электрические характеристики пассивных элементов (более высокая добротность, температурная и временная стабильность, меньшее число и менее заметное влияние паразитных элементов).

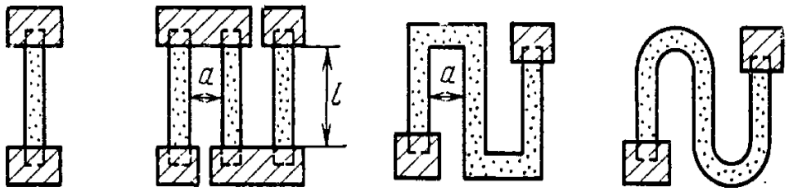
Одна из основных характеристик микроэлектронного изделия – рассеиваемая мощность. При гибридном исполнении можно обеспечить изготовление изделий достаточно большой мощности, что важно при создании аналоговых устройств, управляющих мощными входными цепями.

Конструкции пленочных резисторов

Резисторы являются наиболее распространенными элементами пленочных микросхем.

Параметры тонкопленочных резисторов определяются свойствами применяемых резистивных материалов (табл. 1). В качестве резистивных материалов используют чистые металлы, сплавы, а также специальные резистивные материалы (керметы). Для создания резисторов необходимы пленки с удельным поверхностным сопротивлением ρ_S от десятков до десятков тысяч Ом/□. Чем меньше толщина пленок, тем выше ρ_S, но одновременно повышается температурный коэффициент сопротивления α_R (TKR), а также ухудшается температурная и временная стабильность пленок.

Резистивные элементы гибридных микросхем получают напылением на диэлектрические основания (подложки) узких резистивных пленочных полосок различной конфигурации и контактных площадок, имеющих с ними некоторую зону перекрытия (рис. 1) [2].



а б в г

Рис. 1. Конфигурации тонкопленочных резисторов: а – полоска; б – составной из полосок; в – меандр; г – змейка [1]

Конструкции пленочных резисторов должны учитывать особенности топологической структуры пленочного функционального узла (размеры подложки, количество и расположение выводов и т.д.), величину номинала, характеристики используемых материалов, технологию производства, требуемую и возможную точность воспроизведения номиналов, условия эксплуатации микросхем [2]. В соответствии с этим основными исходными данными для проектирования резисторов являются:

- номинальное сопротивление R_i, Ом;
- погрешность номинального сопротивления γ_{Ri}, %;
- рабочий диапазон температур, $T_{\max} - T_{\min}$, ºС;
- технологические ограничения;
- шаг координатной сетки, мм;
- напряжение питания схемы E, В.

Технологические ограничения при использовании различных методов создания тонкопленочных резисторов [масочного (М), фотолитографического (Ф), комбинированного масочного и фотолитографического (МФ), электронно-ионного (ЭИ) и по танталовой технологии (ТА)] приведены в табл. 2 [1].

Таблица 1. Электрофизические характеристики материалов для плёночных резисторов и проводников [1, 2]

Материал	ρ_S, Ом/□	P_0, Вт/см^2	$\alpha_R \cdot 10^{-4}$, 1/град -60...+125, °С	Материал контактных площадок	Старение, % за 5000 ч в норм. усл.
Хром ХО, ГОСТ 5905-67	200... 500	2,0	0,6	Медь (луженая)	2,0
Нихром Х20Н80, ГОСТ12766-67	100...300	1,0	1	Медь	0,1...0,4
Сплав МЛТ-3М	300…500	2,0	2± ±(1,9...2,4)	Медь с подслоем ванадия (луженая); медь с подслоем нихрома (защищенная никелем)	±0,1
Кермет, ЕТО.021.033. ТУ	3000 5000 10000	2,0	3 -4 -5	Золото с подслоем хрома (нихрома)	±0,3
Тантал, СУО.021.041 ТУ	300...500	3,0	-2	Алюминий с подслоем ванадия; медь с подслоем нихрома; тантал	2,6-3,2
Сплавы: РС-4800 РС-3710 РС-3001 РС-1004, ЕТО.021.048ТУ	 $(0,3...1)10^3$ $(0,5...3)10^3$ $(0,8...1,5)10^3$ $(1...4)10^4$	2,0	 2,0 0,5...2 1,0 10,0	Золото с подслоем хрома (нихрома)	 2,0 2,0 1,0 2,0

Таблица 2. Конструкторско-технологические ограничения при проектировании тонкопленочных резисторов [1, 2]

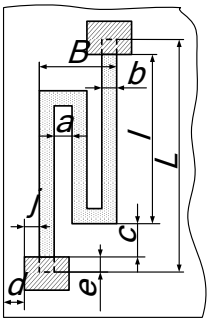
Топология резистора	Содержание ограничения		Размер ограничения, мм, при использовании метода				
			М	Ф	МФ	ЭИ	ТА
	Точность изготовления линейных размеров элемента и расстояний между ними Δl, Δb, Δa, ΔL, ΔB и других при расположении пленочных элементов в одном слое, мм		±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01
	Минимально допустимый размер резистора, мм	*b*	0,1	0,1	0,1	0,15	0,05
		l	0,3	0,1	0,3	0,3	0,1
	Минимально допустимые расстояния между пленочными элементами, расположенными в одном слое, *a*, мм		0,3	0,1	0,3	0,1	0,05
	Максимально допустимое соотношение размеров *l*/*a*		10	100	30	100	100

Таблица 2. Окончание

	Минимально допустимое расстояние между пленочными элементами, расположенными в разных слоях, *c*, мм	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1
	Перекрытия для совмещения пленочных элементов, расположенных в разных слоях, *e*, мм	≥0,2	≥0,1	≥0,2	≥0,1	≥0,1
	Минимальное расстояние от пленочных элементов до края платы *d*, мм	0,5	0,2	0,5	0,4	0,2
	Минимальная ширина пленочных проводников *i*, мм	0,1	0,05	0,1	0,1	0,05
	Минимально допустимое расстояние между краем пленочного резистора и краем его контактной площадки *j*, мм	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1

Порядок расчета тонкопленочных резисторов

1. Конструктивный расчет тонкопленочных резисторов заключается в определении формы, геометрических размеров и минимальной площади, занимаемой резисторами на подложке. При этом необходимо, чтобы резисторы обеспечивали рассеивание

заданной мощности при удовлетворении требуемой точности в условиях существующих технологических возможностей.

Проектирование конструкции тонкопленочного резистора начинается с расчета мощности P_i, выделяемой на каждом резисторе. Грубо P_i можно оценить по формуле

$$P_i = \frac{E^2}{R_i}. \quad (1)$$

Однако в этом случае рассчитанное значение мощности получается завышенным, так как считается, что все напряжение питания падает на *i*-м резисторе. В итоге размеры резистора тоже могут получиться завышенными.

Более точно мощность можно рассчитать по формуле

$$P_i = I_i^2 \cdot R_i, \quad (2)$$

где I_i – ток, протекающий через *i*-й резистор. I_i рассчитывается исходя из заданной принципиальной схемы. Например, на рис. 2 приведен участок схемы, для которого требуется рассчитать мощность, рассеиваемую резисторами.

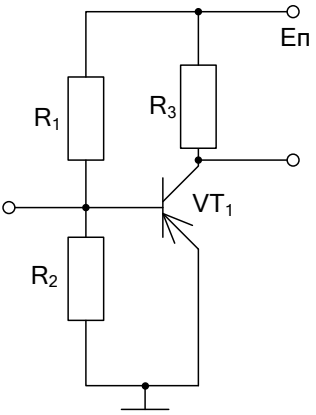


Рис. 2. Участок принципиальной схемы

Рассчитаем максимальную мощность, выделяемую на резисторе R_1. Предполагаем, что транзистор VT_1 в активном режиме (эмиттерный переход открыт, коллекторный – закрыт), тогда ток потечет от источника питания через резистор R_1 и эмиттерный переход на землю:

$$I_{R1} = E\text{п} / R_1, \quad (3)$$

следовательно, мощность будет равна

$$P_{R1} = I_{R1}^2 / R_1. \quad (4)$$

На резисторе R_2 максимальная мощность будет выделяться при открытом коллекторном и закрытом эмиттерном переходе транзистора VT_1. То есть ток, протекающий через резистор R_2, будет равен

$$I_{R2} = \frac{E_\text{п}}{R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}}, \quad (5)$$

следовательно, мощность будет равна

$$P_{R2} = I_{R2}^2 / R_2. \quad (6)$$

Аналогично рассчитывают все остальные мощности.

2. Особенностью расчета пленочных резисторов является групповое проектирование, что связано с необходимостью выбора резистивного материала. По возможности он должен быть единым для всех резисторов ИМС. Поэтому для пленочных ИМС при проектировании резисторов необходимо провести анализ номиналов резисторов, свести их в несколько групп с близкими значениями сопротивления, а затем уже выбрать для каждой группы материал.

Определяется оптимальное значение удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки с точки зрения обеспечения минимума площади под резисторами гибридной ИМС по формуле

$$\rho_s = \sqrt{\frac{\sum_1^n R_i}{\sum_1^n \frac{1}{R_i}}}, \qquad (7)$$

где n – число резисторов; R_i – номинал i-го резистора.

3. Выбирается материал резистивной пленки (табл. 1) с удельным сопротивлением, ближайший по значению к вычисленному $\rho_{s\ опт}$. Используемые материалы регламентируются соответствующими ГОСТами и ОСТами. Следует обратить внимание на то, чтобы температурный коэффициент сопротивления (ТКС) был минимальным, а допустимая удельная мощность рассеивания P_0 была максимальной.

4. Проводится проверка правильности выбранного материала резистивной пленки с точки зрения точности изготовления резисторов.

Полная относительная погрешность изготовления пленочного резистора $\gamma_R = \Delta R/R$ состоит из суммы погрешностей:

$$\gamma_R = \gamma_{K\phi} + \gamma_{\rho s} + \gamma_{Rt} + \gamma_{Rcm} + \gamma_{Rк}, \qquad (8)$$

где $\gamma_{K\phi}$ – погрешность коэффициента формы $\gamma_{К\phi} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta b}{b}$; $\gamma_{\rho s}$ – погрешность воспроизведения величины ρ_s резистивной пленки; γ_{Rt} – температурная погрешность; γ_{Rcm} – погрешность, обусловленная старением пленки; $\gamma_{Rк}$ – погрешность переходных сопротивлений контактов [1].

Погрешность воспроизведения удельного поверхностного сопротивления $\gamma_{\rho s}$ зависит от условий напыления и материала резистивной пленки. В условиях серийного производства её значение не превышает 5 %, $\gamma_{\rho s} = 5\ \%$.

Температурная погрешность зависит от *TKR* материала пленки:

$$\gamma_{Rt} = \alpha_R \cdot (T_{\max} - T_{\min}), \qquad (9)$$

где α_R – температурный коэффициент сопротивления материала пленки, $T_{\max} - T_{\min}$ – рабочий диапазон температур.

Погрешность $\gamma_{R\text{ст}}$, обусловленная старением пленки, вызвана медленным изменением структуры пленки во времени и её окислением. Она зависит от материала пленки и эффективности защиты, а также от условий хранения и эксплуатации. Обычно для ГИМС $\gamma_{Rст}$ не превышает 3 %.

Погрешность переходных сопротивлений контактов $\gamma_{Rк}$ зависит от технологических условий напыления пленок, удельного сопротивления резистивной пленки и геометрических размеров контактного перехода: длины перекрытия контактирующих пленок, ширины резистора. Обычно $\gamma_{Rк} = 1 \div 2$ %.

Из (8) определяем $\gamma_{Кф}$, которая должна быть больше нуля. Если $\gamma_{Кф} < 0$, необходимо выбрать другой материал, с меньшими значениями остальных составляющих погрешности.

5. Определяется конструкция резисторов по значению коэффициента формы $k_ф$:

$$k_{фi} = R_i / \rho_s. \qquad (10)$$

Если $1 < k_{фi} < 10$, то рекомендуется конструировать резистор прямоугольной формы; при $0{,}1 < k_{фi} < 1$ – использовать резистор прямоугольной формы, у которого длина меньше ширины; $k_{фi} > 10$ – резистор сложной формы.

6. Рассчитываются прямоугольные полосковые тонкопленочные резисторы.

Выбираем технологию. Определяем ограничения для выбранной технологии. Далее проводим расчет последовательно для каждого резистора.

Для резисторов, имеющих $1 < k_{фi} < 10$, расчетное значение ширины резистора определяется из условия

$$b_{\text{расч}} > \max \{ b_{\text{техн}};\ b_{\text{точн}};\ b_{\text{р}} \}, \qquad (11)$$

где $b_{\text{расч}}$ – минимальная ширина резистора, определяемая возможностями выбранного технологического процесса;
$b_{\text{точн}}$ – ширина резистора, определяемая точностью изготовления:

$$b_{\text{точн}} > (\Delta b + \Delta l / k_{\text{ф}}) / \gamma_{K\phi\ \text{доп}}, \quad (12)$$

где Δb, Δl – погрешности изготовления ширины и длины резистора, зависящие от выбранного метода изготовления;

$b_{\text{р}}$ – минимальная ширина резистора, при которой рассеивается заданная мощность,

$$b_p = \sqrt{\frac{P}{P_0 \cdot k_\phi}}. \quad (13)$$

За ширину b резистора принимается ближайшее к $b_{\text{расч}}$ наибольшее значение, кратное шагу координатной сетки, принятому для чертежа топологии с учетом масштаба. Для тонкопленочной технологии шаг координатной сетки обычно составляет 0,01 или 0,005 мм.

Расчетная длина резистора определяется по формуле

$$l_{расч} = b \cdot k_\phi. \quad (14)$$

Полная длина резистора с учетом перекрытия контактных площадок определяется выражением:

$$l_{полн} = l + 2e, \quad (15)$$

где e – размер перекрытия резистора и контактной площадки (e = 0,1 мм).

Площадь, занимаемая резистором на площадке, определяется по формуле

$$S = l_{полн} \cdot b. \quad (16)$$

Для проверки правильности расчета находятся действительная удельная мощность рассеивания и погрешность резистора. Резистор спроектирован удовлетворительно, если:

1) удельная мощность рассеивания

$$P^*_0 = P/S < P_0; \quad (17)$$

2) погрешность коэффициента формы $\gamma^*_{Кф}$ не превышает допустимого значения $\gamma_{Кф}$:

$$\gamma^*_{\text{Кф}} = \Delta l / l_{полн} + \Delta b / b \leq \gamma_{\text{Кф доп}}; \quad (18)$$

3) суммарная погрешность γ^*_{R} не превышает допуска γ_{R}:

$$\gamma^*_{\text{R}} = \gamma_{\text{Кф}} + \gamma_{\rho\text{s}} + \gamma_{\text{Rt}} + \gamma_{\text{Rст}} + \gamma_{\text{Rк}} \leq \gamma_{\text{R}}, \quad (19)$$

где $\gamma_{\text{Кф}} = \Delta l / l + \Delta b / b$.

Для резисторов с $0{,}1 < k_{фi} < 1$ расчет начинаем с определения длины, а затем определяем ширину.

Расчетное значение длины резисторов $l_{расч}$ выбирается из условия

$$l_{расч} > \max \{ l_{техн}; l_{точн}; l_p \}, \quad (20)$$

где $l_{расч}$ – минимальная длина резистора, определяемая разрешающей способностью выбранного технологического метода формирования конфигурации; $l_{точн}$ – минимальная длина резистора, при которой обеспечивается заданная точность:

$$l_{\text{точн}} > (\Delta l + \Delta b \cdot k_{\text{ф}}) / \gamma_{\text{Кф доп}}; \quad (21)$$

l_p – минимальная длина резистора, при которой рассеивается заданная мощность:

$$l_{pi} = \sqrt{\frac{P \cdot K_{\text{ф}i}}{P_0}}. \quad (22)$$

Для метода фотолитографии $l_{техн} = 0{,}1$ мм.

Расчетная ширина резисторов определяется по формуле

$$b_{\text{расч } i} = \frac{l}{K_{\text{ф}i}}. \quad (23)$$

Полная длина резистора с учетом перекрытия контактных площадок и площадь резистора определяются соответственно по формулам (15, 16).

Далее проведем расчет резисторов с $K_ф > 10$. Такие резисторы будем выполнять в форме меандра. Ширина резистора рассчитывается так же, как для резисторов с $1 < k_{фi} < 10$.

Длина средней линии меандра

$$l_{ср} = b_{расч} \cdot K_ф. \quad (24)$$

Задаемся расстоянием между соседними звеньями меандра a_{min}. Для метода фотолитографии a_{min} берется из технологических ограничений, для масочного метода обычно задают $a_{min} = b_{расч}$. Таким образом, шаг одного звена $t = 2 \cdot b_{расч}$ или $t = a_{min} + b_{расч}$.

Оптимальное число звеньев меандра

$$n_{опт} = \sqrt{\frac{l_{ср}}{t} \cdot \frac{B}{L}}. \quad (25)$$

При меандре квадратной формы $L=B$:

$$n_{опт} = \sqrt{K_{ф2}/_2}. \quad (26)$$

Определим длину меандра:

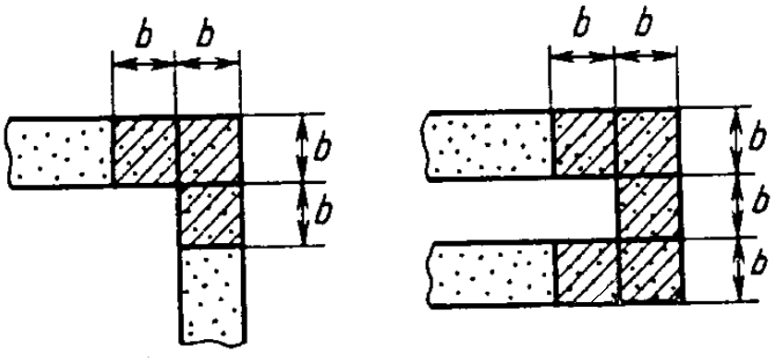
$$L = n_{опт} \cdot (a + b_{расч}). \quad (27)$$

Определим ширину меандра:

$$B = \frac{l_{ср} - a \cdot n_{опт}}{n_{опт}}. \quad (28)$$

Также необходимо учитывать, что при использовании масочного метода должно выполняться соотношение $B_{max} / a \leq 10$, обеспечивающее требуемую жесткость маски.

Приведенные расчетные соотношения не учитывают, что в резисторах типа «меандр» плотность тока в изгибах неравномерна. Неравномерное распределение плотности тока наблюдается в пределах трех квадратов области изгиба (рис. 3).



а б

Рис. 3. Конструкции изгибов резисторов типа «меандр»: а – Г-образный изгиб; б – П-образный изгиб [1]

Сопротивление П-образных изгибов $R_{\text{и}} = 4 \cdot \rho_{s_{\text{опт}}}$; Г-образных - $R_{\text{и}} = 2{,}55 \cdot \rho_{s_{\text{опт}}}$. Для уточненного расчета с учетом изгибов конструкцию резистора представляют в виде последовательно соединенных прямолинейных участков и изгибов. Общее сопротивление будет определяться как

$$R_i = R_{\text{и}} m + \frac{l_{\text{п}} n}{b} \rho_s, \tag{29}$$

где $R_{\text{и}}$ – сопротивление изгибов; m – количество изгибов; $l_{\text{п}}$ – длина прямолинейных участков; n – число звеньев меандра.

Длина прямолинейного участка одного звена меандра

$$l_{\text{п}} = \frac{R_i - m \cdot R_{\text{и}}}{\rho_s \cdot n} \cdot b. \tag{30}$$

После этого корректируют размеры L и B с целью обеспечения заданного номинала резистора и проводят проверку.

7. Рассчитывается суммарная площадь всех резисторов.

2. Последовательность выполнения работы

1. Изучите теоретическую часть работы.

2. Получите задание в виде принципиальной схемы у преподавателя.

3. Согласно принципиальной схеме проведите расчеты мощностей, выделяемых на резисторах.

4. Выберите материал резистивной пленки и контактных площадок.

5. Рассчитайте конструкции всех резисторов.

6. Сделайте проверку расчетов.

7. Определите суммарную площадь, занимаемую всеми резисторами.

3. Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Результаты расчетов.

3. Чертежи тонкопленочных резисторов в масштабе с указанием размеров.

4. Выводы по полученным результатам.

Контрольные вопросы

1. Что такое гибридная интегральная схема?

2. Назовите требования, предъявляемые к материалам резистивных пленок.

3. Назовите основные материалы резистивных пленок ГИМС.

4. Назовите требования, предъявляемые к материалам контактных площадок.

5. Назовите основные материалы контактных площадок ГИМС.

6. Какие конструкции бывают у тонкопленочных резисторов?

7. Что такое коэффициент формы тонкопленочного резистора?

8. Порядок расчета резистора с коэффициентом формы от 1 до 10.

9. Порядок расчета резистора с коэффициентом формы от 0,1 до 1.

10. Порядок расчета резистора с коэффициентом формы больше 10.

11. Расскажите о подстраиваемых резисторах.

12. Способы подгонки номинала резистора.

Библиографический список

1. Коледов Л.А. Конструирование и технология микросхем: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1984. 232 с.

2. Меркулов А.И., Меркулов В.А. Основы конструирования интегральных микросхем. Самара: Издательство СГАУ, 2013. 270 с.

4516

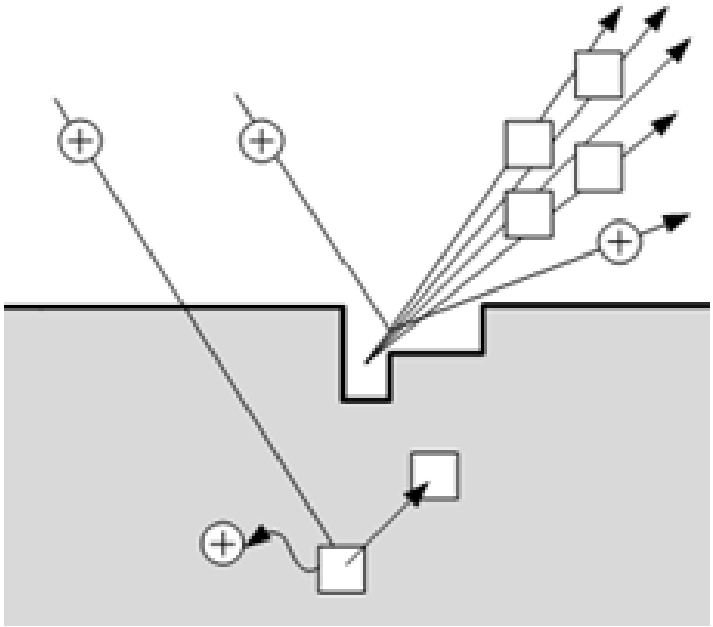
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

ЧАСТЬ 1

Методические указания к лабораторным работам



Рязань 2011

УДК 621.3

Физико-химические основы технологических процессов микро- и наноэлектроники. Часть 1: методические указания к лабораторным работам / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.П. Авачёв, Ю.В. Воробьева, В.Г. Мишустин, П.А.Фомин. Рязань, 2011. 48 с.

Содержат сведения по изучению основ физико-химических процессов в технологии микро- и наноэлектроники в части методов нанесения (эпитаксия, магнетронное напыление), модифицирования (ионная имплантация) и удаления (электрохимическое травление) вещества.

Предназначены для подготовки дипломированных специалистов по направлению 200100 – «Электроника и микроэлектроника».

Табл. 9. Ил. 27. Библиогр.: 13 назв.

Физическая химия, микроэлектроника, интегральная микросхема, эпитаксия, ионная имплантация, магнетронное распыление, сканирующая зондовая микроскопия

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники РГРТУ (зав. кафедрой проф. С.П. Вихров)

Физико-химические основы технологических процессов
микро- и наноэлектроники. Часть 1

Составители: А в а ч ё в Алексей Петрович
В о р о б ь е в а Юлия Владимировна
М и ш у с т и н Владислав Геннадьевич
Ф о м и н Павел Анатольевич

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 30.08.11. Формат бумаги 60 × 84 1/16.
Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 3,0.
Тираж 50 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Лабораторная работа №1
ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ И ТОПОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Цель работы

Изучить топологию полупроводниковой ИМС по заданному варианту, произвести измерения топологических размеров элементов и зарисовать эскизы элементов полупроводниковой ИМС.

1. Краткие теоретические сведения

Интегральная микросхема – конструктивно законченное микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функциональную обработку сигналов, содержащее совокупность электрически связанных между собой элементов и (или) компонентов, изготовленных в едином технологическом цикле.

Полупроводниковая интегральная микросхема (ПИМС) – микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объеме и на поверхности полупроводника.

Кристалл интегральной микросхемы – часть полупроводниковой пластины, в объеме и на поверхности которой сформированы элементы полупроводниковой микросхемы, межэлементные соединения и контактные площадки (рис. 1.1).

Элемент интегральной микросхемы – часть микросхемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента, которая выполнена нераздельно от кристалла и не может быть выделена как самостоятельное изделие.

Корпус интегральной микросхемы – часть конструкции ИМС, предназначенная для защиты от внешних воздействий и для соединения с внешними электрическими цепями с помощью выводов.

Контактная площадка – металлизированный участок на плате, служащий для соединения выводов элементов, а также для контроля электрических параметров и режимов функционирования.

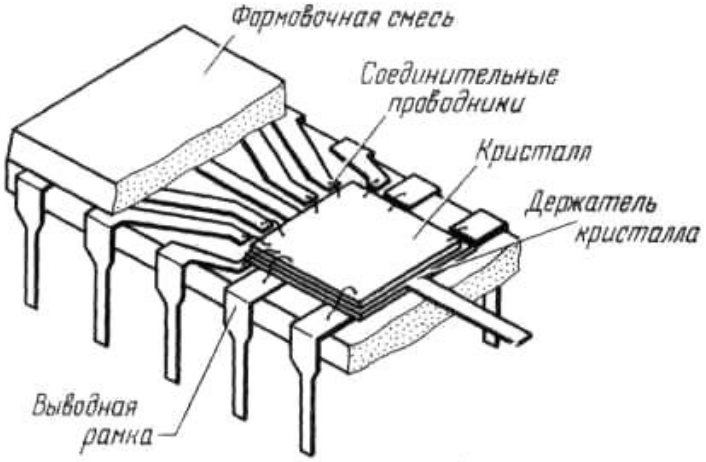


Рис. 1.1. Кристалл ИМС в пластмассовом плоском корпусе с двухрядным расположением выводов

Под топологией ИМС понимается взаимное расположение и соединение элементов микросхемы (рис. 1.2). Основными элементами полупроводниковых ИМС являются: резистор, конденсатор, диод, биполярный транзистор, полевой транзистор, МДП-транзистор и вспомогательные элементы: диффузионные перемычки, контактные площадки и фигуры совмещения.

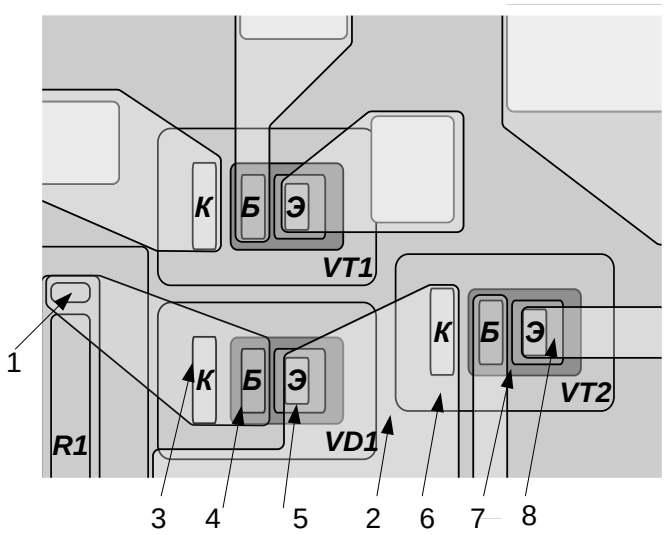
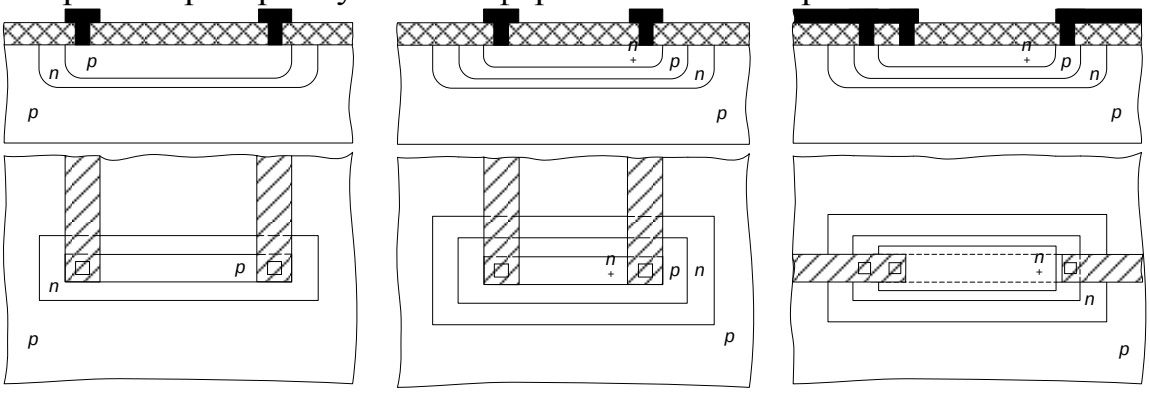


Рис. 1.2. Фрагмент топологии микросхемы с биполярными транзисторами малой мощности: *VD1* – диод (транзистор в диодном включении); *VT1*, *VT2* – транзисторы; *R1, R2* – диффузионные резисторы; *1* – контактное окно к диффузионным резисторам; *2* – р-область разделительной диффузии; *3...5* – контуры контактных окон к соответственно коллектору, базе, эмиттеру; *6 ... 8* – области коллектора, базы, эмиттера

1.1. Резисторы

На рис. 1.3 приведены типичные конструкции резисторов. Наиболее распространены резисторы прямоугольной формы как самые простые в изготовлении.



а б в

Рис. 1.3. Конструкции и топологии интегральных резисторов: а – диффузионный в базовом слое; б – диффузионный в эмиттерном слое; в – пинч-резистор в базовом слое

Резисторы полупроводниковых ИМС формируются на основе слоев: эмиттерного, базового и базового под эмиттерным (пинч-резисторы). Если базовый и

эмиттерный слои получают диффузией, то и резисторы называют *диффузионными*.

Диффузионные резисторы в ИМС формируются в едином технологическом цикле одновременно с базовыми и эмиттерными областями биполярных транзисторов. Это упрощает технологический процесс. Тело резистора размещается в кармане n-типа проводимости, который размещается в пластине p-типа. Для нормальной работы резистора p-n-переход карман – пластина должен быть закрыт (смещен в обратном направлении). Это достигается подачей на пластину самого низкого потенциала микросхемы. Подключение резистора к другим элементам схемы осуществляется через контактные окна с помощью проводников металлизации.

Диффузионные резисторы на эмиттерном n^+-слое из-за сильного легирования получаются низкоомными, их применение ограничивается низким пробивным напряжением (5-7 В) p-n-перехода эмиттер-база. Для получения высокоомных резисторов применяют *пинч-резисторы* (за счет уменьшения площади поперечного сечения). Толщина базового слоя уменьшена за счет эмиттерного слоя. Третье контактное окно на пинч-резисторе необходимо для подключения эмиттерного слоя к высокопотенциальной части для запирания $p\text{-}n^+$-перехода на резисторе.

Конструкция ионно-легированного резистора практически не отличается от конструкций, рассмотренных выше. Однако технология ионного легирования позволяет получить тонкие слои с высоким значением удельного поверхностного сопротивления.

В табл. 1.1 приведены типичные значения толщин слоев и поверхностных удельных сопротивлений резисторов полупроводниковых ИМС.

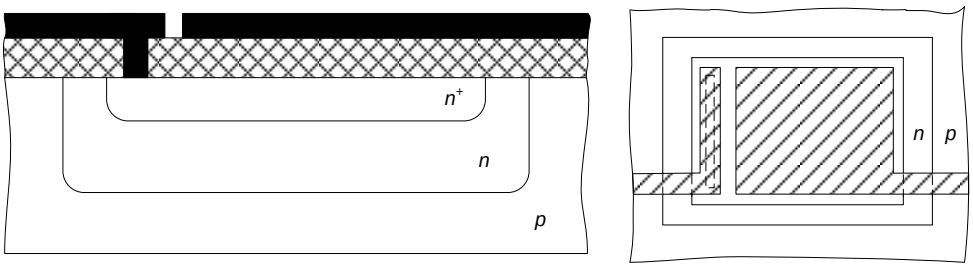
Табл. 1.1

Характеристики интегральных резисторов

Тип резистора	Толщина слоя d, мкм	Удельное поверхностное сопротивление ρ_s, Ом/□
Диффузионный на базовом слое	2,5 – 3,5	100 – 300
Диффузионный на эмиттерном слое	1,2 – 2,5	1 – 10
Пинч-резистор	0,5 – 1,0	1000 – 3000

1.2. Конденсаторы

В полупроводниковых ИМС различают две разновидности конденсаторов: МДП-конденсатор и диффузионный конденсатор. Нижняя обкладка МДП-конденсатора образована n^+-эмиттерным слоем, а верхняя обкладка металлическая (рис. 1.4).



а б

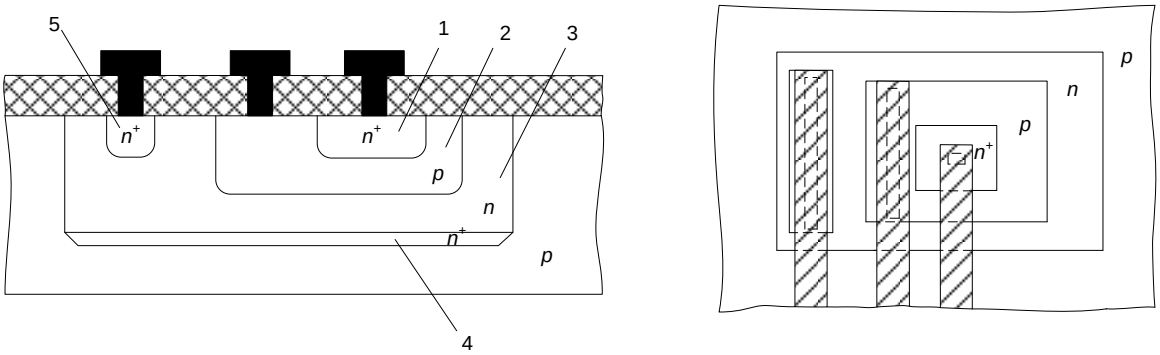
Рис. 1.4. Конструкция (а) и топология (б) МДП-конденсатора

Для формирования диффузионных конденсаторов используются барьерные емкости обратно смещенных p-n-переходов: эмиттер-база, база-коллектор и коллектор-пластина.

В настоящее время вместо реальных емкостных или индуктивных элементов (большой емкости) используют их электронные аналоги – гираторные схемы, имитирующие свойства индуктивностей и емкостей.

1.3. Биполярные транзисторы

В полупроводниковых ИМС биполярный n-p-n-транзистор является основным схемным элементом (рис. 1.5). У n-p-n-транзисторов быстродействие при прочих равных условиях лучше, чем у p-n-p-транзисторов. Это объясняется тем, что подвижность электронов выше, чем дырок.

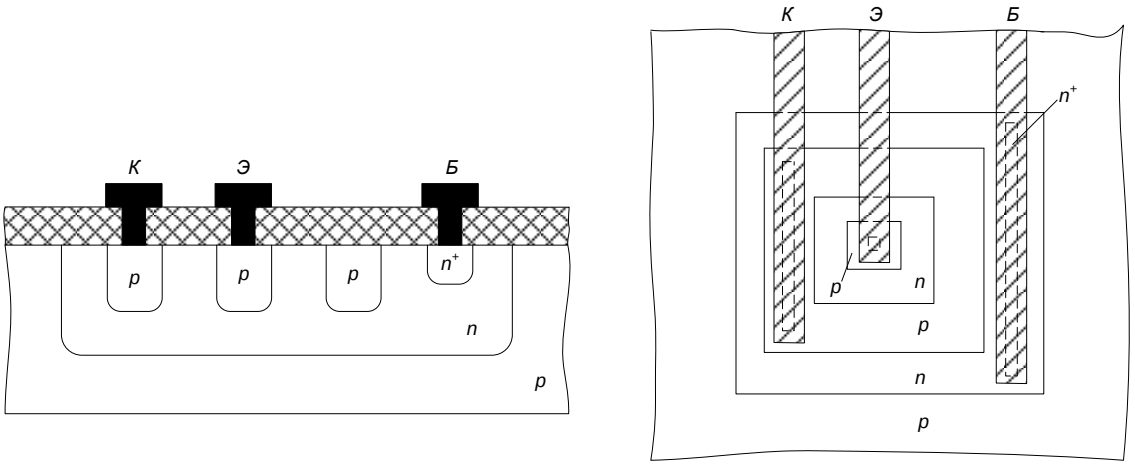


а б

Рис. 1.5. Конструкция (а) и топология (б) биполярного транзистора:
1– эмиттер; 2 – база; 3 – коллектор; 4 – скрытый слой;
5 – приконтактная область коллектора

Эмиттер транзистора сильно легируют для получения максимального коэффициента инжекции. Базу делают тонкой (намного меньше диффузионной длины инжектируемых в базу электронов) для повышения коэффициента переноса и низколегированной. Подколлекторный скрытый n^+-слой нужен для уменьшения сопротивления коллектора в режиме насыщения. Область коллекторного контакта легируют до n^+ для предотвращения образования паразитного p-слоя в случае диффузии III-валентного алюминия.

В аналоговых ИМС находят применение горизонтальные p-n-p-транзисторы, совместимые с планарно-эпитаксиальной технологией изготовления n-p-n-транзисторов (рис. 1.6).



а б

Рис. 1.6. Конструкция (а) и топология (б) биполярного горизонтального транзистора

1.4. Диоды

Диоды полупроводниковых ИМС можно сформировать на любом из p-n-переходов планарно-эпитаксиального транзистора (рис.1.7). Наиболее удобны для этих целей переходы эмиттер-база и база-коллектор. При соответствующем выборе варианта диодного включения транзистора возможно подобрать оптимальные параметры по быстродействию, пробивному напряжению, обратному току (табл. 1.2).

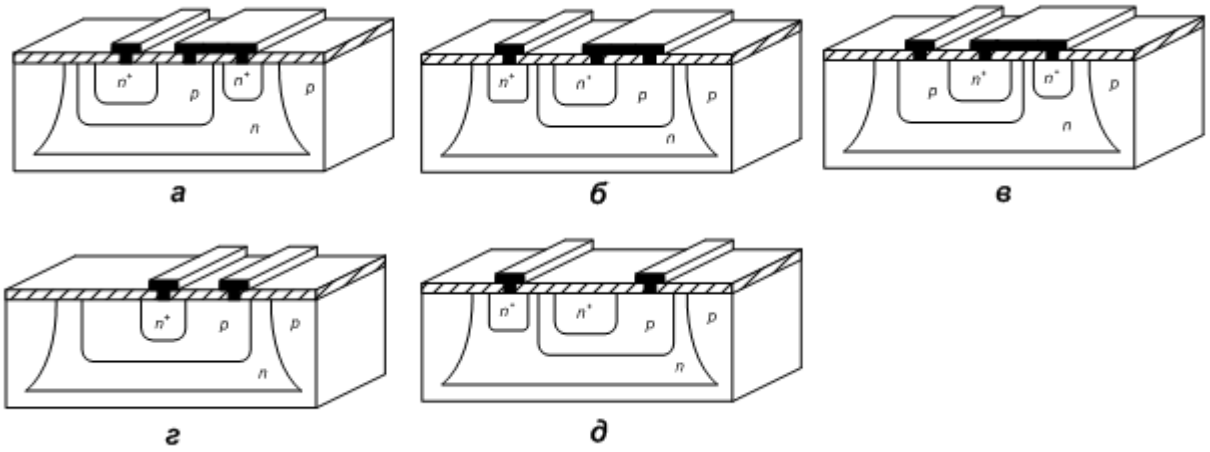


Рис. 1.7. Конструкции интегральных диодов: *а* – на основе перехода база-эмиттер с коллектором, закороченным на базу (БК–Э); *б* – на основе перехода коллектор-база с эмиттером, закороченным на базу (БЭ–К); *в* – с использованием эмиттерного и коллекторного переходов, когда эмиттерные и коллекторные области соединены (Б–ЭК); *г* – на основе перехода база-эмиттер с разомкнутой цепью коллектора (Б–Э), *д* – на основе перехода база-коллектор с разомкнутой цепью эмиттера (Б–К)

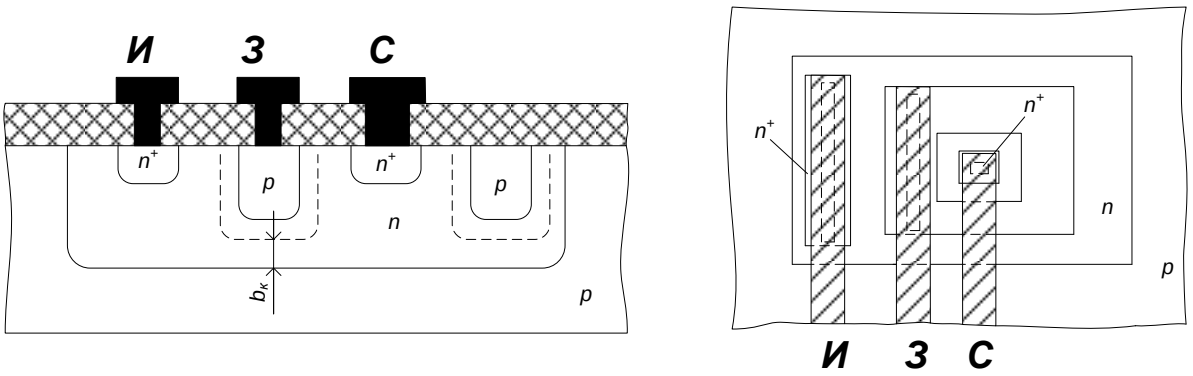
Табл. 1.2

Параметры интегральных диодов

Вариант диодного включения транзистора	Пробивное напряжение $U_{пр}$, В	Обратный ток $I_{обр}$, нА	Быстродействие, время восстановления обратного тока $\tau_{вост}$, нс
БК–Э	7 – 8	1,0	10
БЭ–К	40 – 70	30,0	50
Б–КЭ	7 – 8	40,0	100
Б–Э	7 – 8	1,0	50
Б–К	40 – 70	3,0	75

1.5. Полевые транзисторы

На рис. 1.8 приведена конструкция полевого транзистора с каналом n-типа проводимости. Канал образуется между стоком и истоком. Толщина канала регулируется двумя обратносмещенными p-n-переходами: затвор-эпитаксиальный слой и эпитаксиальный слой-подложка.



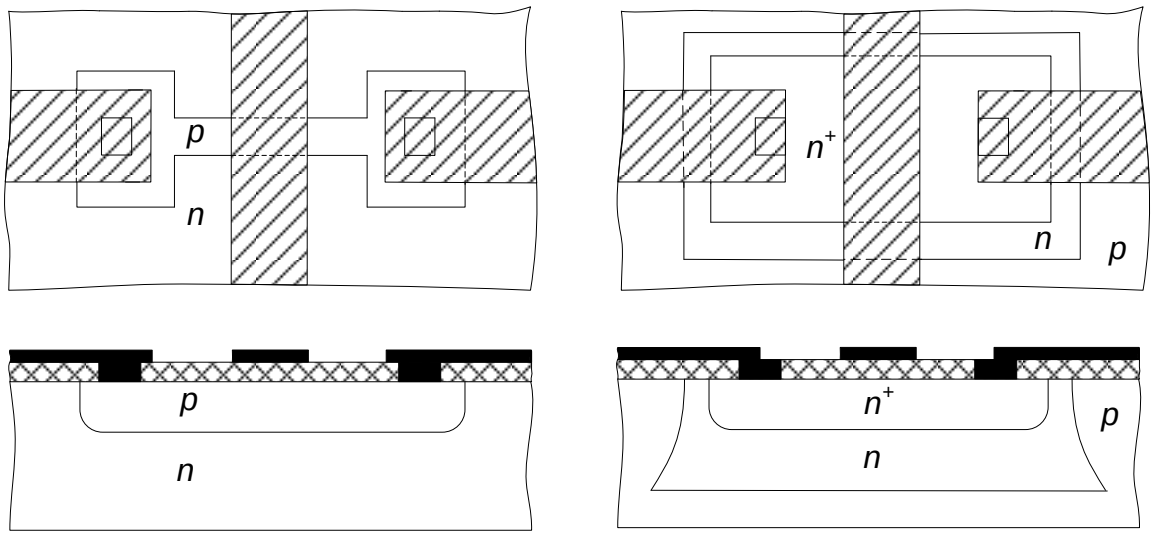
а б

Рис. 1.8. Конструкция (а) и топология (б) полевого транзистора

1.6. Вспомогательные элементы ПИМС

Элементы ПИМС электрически соединены между собой с помощью металлических пленочных проводников, расположенных на поверхности изолирующего окисла или межслойной изоляции. Контактирование проводника со всеми областями кристалла осуществляется через контактное окно в окисле, причем для получения надежного контакта окно закрывается проводником с перекрытием.

Для того чтобы обеспечить необходимую изоляцию между двумя разными трассами металлизации, в варианте топологии с однослойной металлизацией используют вспомогательный элемент – *диффузионную перемычку*. В такой перемычке один проводник расположен на поверхности изолирующего окисла, а другой пролегает под ним в виде участка p^+- или n^+-слоя (рис. 1.9). Диффузионная перемычка по существу является низкоомным диффузионным резистором, над телом которого проложен пересекающийся проводник.



а б

Рис. 1.9. Прокладка шин металлизации над каналом резистора (а) и через n^+-перемычку (б)

Вторым вспомогательным элементом ПИМС является внешняя *контактная площадка*. Она предназначена для электрического соединения кристалла с внешними выводами корпуса с помощью гибких проводников. От кристалла площадка изолируется окислом, а от внешней среды пассивирующим (защитным) слоем, в котором делают окно для приварки внешнего гибкого вывода.

Последним вспомогательным элементом ПИМС являются *фигуры совмещения*. Они имеют прямоугольную или крестообразную форму или выполняются в виде набора рисок разной толщины. Каждая фигура состоит из двух квадратов: основного (внешнего) и встроенного (внутреннего). Качество совмещения определяют по взаимному положению основного и встроенного квадратов. Совмещение будет идеальным, если все фигуры концентричны. Чаще всего фигуры совмещения располагают на периферии кристалла между внешними контактными площадками.

1.7. МДП-транзисторы

МДП-транзистор имеет 4 вывода: исток, сток, затвор и подложка. Основными конструктивными параметрами МДП-транзистора являются длина канала L_K и ширина канала $b_к$ (рис. 1.10). Для обеспечения надежного наведения канала с учетом возможного несовмещения отдельных областей затвор должен располагаться над каналом с некоторым (небольшим) перекрытием.

Особенностью МДП ИМС является то, что в качестве пассивных элементов используют МДП-транзисторы. При использовании МДП-транзистора в качестве резистора необходимо на его затвор подавать постоянное напряжение, величина которого будет определять номинал сопротивления. В качестве конденсаторов в МДП ИМС используют емкость затвор-подложка или барьерную емкость p-n-перехода сток (исток)-подложка.

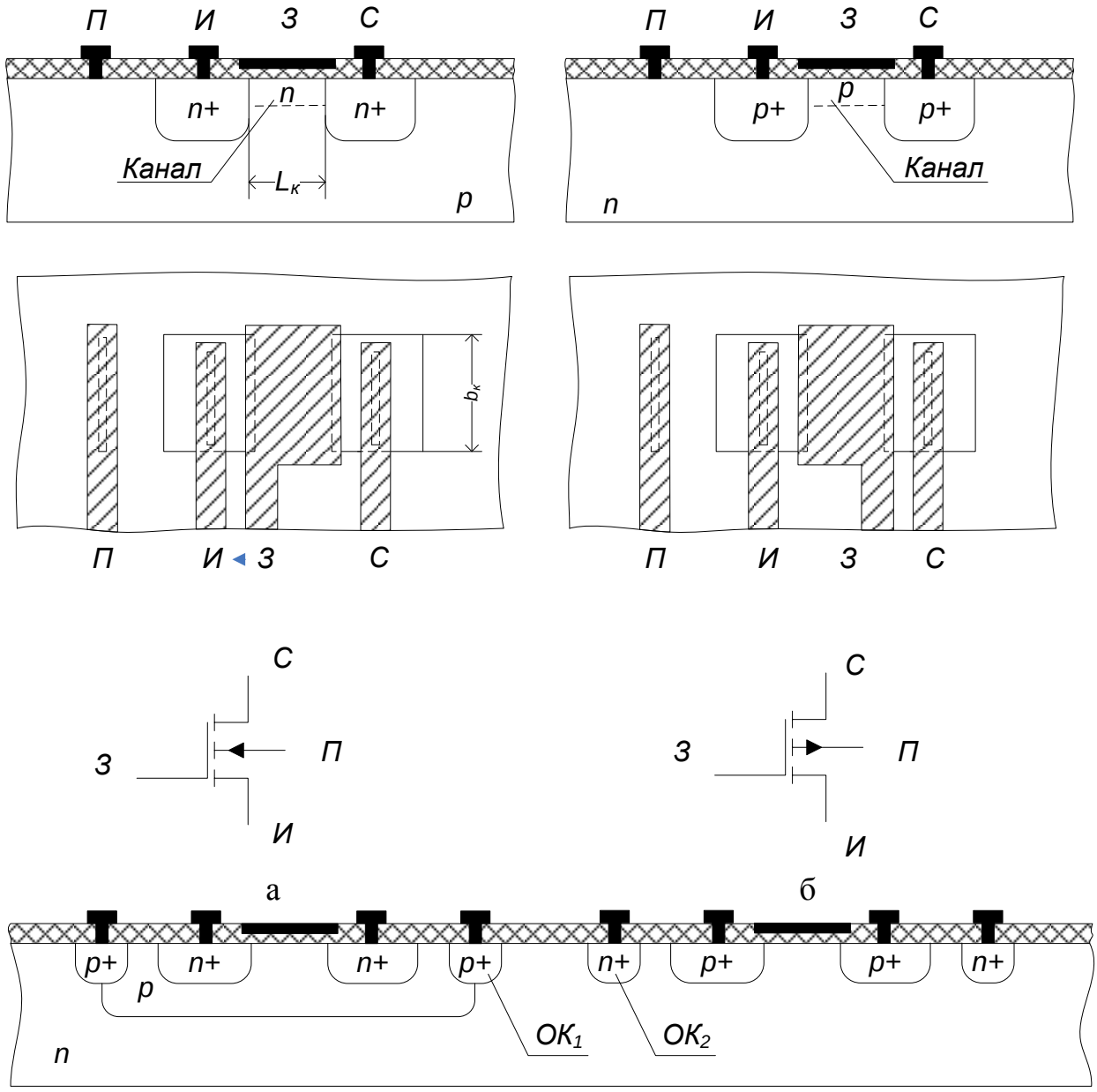


Рис. 1.10. Конструкция МДП-транзисторов: а – n-МДП-транзистор; б – p-МДП-транзистор; в – комплиментарная пара транзисторов: $ОК_1$, $ОК_2$ – охранные кольца

1.8. Способы изоляции элементов

Между активными и пассивными элементами ПИМС необходимо обеспечить надежную электрическую изоляцию.

Различают три способа изоляции:

- обратносмещенным p-n-переходом (недостаток – наличие паразитных емкостей и токов утечки);
- диэлектриком (меньшая интегральная плотность, сложность технологии);
- комбинированный.

1.9. Параметры интегральных микросхем

Степень интеграции интегральной микросхемы K – это показатель степени сложности ИМС в зависимости от числа в ней элементов и (или) компонентов

$$K = lg\ N, \quad (1.1)$$

где N – количество элементов и компонентов ИМС.

Интегральная плотность микросхемы m – число элементов и компонентов, приходящихся на единицу площади ИМС (с учетом корпуса, но без выводов)

$$m=N/S, \quad (1.2)$$

где S – площадь микросхемы с учетом корпуса.

Для бескорпусных ИМС вводится понятие интегральная плотность на подложке (кристалле):

$$m'=N/S, \quad (1.3)$$

где S – площадь подложки (кристалла) ИС.

2. Описание лабораторной установки

Для выполнения работы используется следующая аппаратура: оптическая система видеонаблюдения с видеокамерой, монитор, компьютер с платой видеозахвата, кассеты с образцами, лупа, микрометрическая линейка.

Для получения изображения топологии интегральной микросхемы используется система видеонаблюдения атомно-силового микроскопа NTEGRA. Она обеспечивает получение изображений с увеличением в 85 – 1050 раз. Основными элементами конструкции оптической системы являются: видеомикроскоп, позиционирующий штатив, блок осветителя и монитор. Элемент конструкции оптической системы приведён на рис. 1.11.

3. Порядок выполнения работы

1. Используя микрометрическую линейку, определите коэффициент оптического увеличения микроскопа и цену деления шкалы окуляра микроскопа. Для этого расположите микрометрическую линейку на предметном столике, находящемся под объективом видеомикроскопа. С помощью юстировочных винтов позиционера видеомикроскопа отрегулируйте его положение так, чтобы центр объектива находился над центральным «окошком» линейки. Вращая регулятор увеличения, добейтесь, чтобы изображение микрометрической линейки занимало весь экран монитора целиком. При необходимости проведите точную фокусировку. Запомните положения регуляторов увеличения и точной настройки. Определите горизонтальный размер изображения на экране монитора, сосчитав количество делений, перекрывающих экран. Цена деления микрометрической линейки указана на ее корпусе.

2. Рассмотрите под микроскопом образец заготовки полупроводниковой ИМС. Для этого положите исследуемую микросхему на предметный столик. Изменяя настройки увеличения, получите чёткое изображение полной топологии кристалла микросхемы. Сохраните полученное изображение, используя специальную программу видеозахвата на компьютере.



Рис. 1.11. Элементы настройки изображения: 1 – регулятор увеличения; 2 – модуль трансфокатора; 3 – ручка механизма грубой фокусировки; 4 – кольцо точной фокусировки; 5 – световодная система; 6 – юстировочные винты позиционера видеомикроскопа

Определите элементную базу ИМС. Найдите на микросхеме пассивные, активные, технологические и конструктивные элементы. Контур области изоляции диэлектриком (контур «кармана») имеет вид тёмной утолщённой линии, при этом прямые углы в контуре обязательно закруглены. Вне контура «кармана» на поверхности кристалла наблюдаются характерные крапинки. Контур области изоляции p-n-переходом имеет вид тонких тёмных линий с прямыми углами без закруглений.

3. Определите масштаб изображения топологии ИМС, для чего установите настройки микроскопа в положения, при которых определялся коэффициент увеличения. При необходимости измените положение модуля трансфокатора с помощью юстировочных винтов. Пользуясь тем, что горизонтальный размер полученного изображения на мониторе известен, определите размеры областей, указанных преподавателем.

4. Получите изображения отдельных элементов микросхемы в увеличенном масштабе. Сохраните все полученные изображения топологии, используя специальную программу видеозахвата.

5. Определите количественные параметры ИМС – степень интеграции К и интегральную плотность на кристалле m'.

6. Заполните табл. 1.3, используя сохраненные результаты визуального осмотра и результаты определения размеров элементов.

Табл. 1.3

Характеристики и параметры ПИМС

Обозначенный № элемента на микросхеме	Выполняемая функция элемента	Количество контактных площадок	Степень интеграции	Плотность упаковки K_v, $см^{-3}$

7. Произведите расчет геометрии конструктивных параметров элементов полупроводниковой микросхемы, указанных преподавателем: для диффузионного резистора – длины l и ширины b; для МДП-конденсатора – длины l_0 и ширины b_0 верхней обкладки; для биполярного транзистора – длины l и ширины b базовой области; для МДП-транзистора – длины l и ширины b затвора. Нанесите эти размеры в микрометрах на эскиз топологии.

8. По заданию преподавателя начертите эскизы конструкций указанных элементов ИМС.

9. На общей топологии ИМС задайте обозначения активных, пассивных и вспомогательных элементов. Исследуйте контактную металлизацию на поверхности кристалла. По результатам данного анализа постройте принципиальную электрическую схему, соответствующую разводке металлизации в ПИМС.

4. Содержание отчета

1. Краткое описание конструкции элементов полупроводниковых ИМС с эскизами поперечных сечений диффузионного резистора, МДП-конденсатора, планарно-эпитаксиального транзистора, n-канального и p-канального МДП-транзисторов.

2. Заполненная по результатам работы табл. 1.3.

3. Эскиз топологии ИМС в масштабе с указанием типа проводимости, названия и размеров областей в микрометрах.

4. Эскизы конструкций отдельных интегральных элементов.

5. Принципиальную электрическую схему ИМС.

5. Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуются микросхемы?

2. Какие конструкции интегральных резисторов, конденсаторов вам известны?

3. Что такое топология интегральной микросхемы?

4. Что такое активные и пассивные элементы ИМС?

5. Каким образом реализуется изоляция элементов в микросхемах?

6. Что называется контактной площадкой ИМС? Для чего она предназначена?

7. Оцените отношение сопротивлений двух интегральных резисторов, указанных преподавателем на микросхеме.

8. Как рассчитать удельное поверхностное сопротивление диффузионного резистора по известной топологии и номиналу сопротивления?

9. Как рассчитать удельную емкость конденсатора по известной топологии и номиналу емкости?

Лабораторная работа №2
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА ИСПАРИТЕЛЯ КОЛЬЦЕВОЙ ФОРМЫ

Цель работы

Изучить процессы магнетронного распыления материалов с последующим осаждением, произвести расчет толщины напыляемой пленки и ее распределения в зависимости от радиуса подложки и расстояния до испарителя.

1. Краткие теоретические сведения

Одним из наиболее эффективных методов нанесения пленок в планарной технологии является метод магнетронного распыления материалов. Этот метод является разновидностью ионно-плазменного распыления. Распыление материала в этих системах происходит за счет бомбардировки поверхности мишени ионами рабочего газа. Скорость распыления в магнетронной системе в 50 – 100 раз выше по сравнению с обычным ионно-плазменным распылением. Высокая скорость распыления материала в магнетронной системе распыления определяется высокой плотностью ионного тока на мишень. Высокая плотность ионного тока достигается за счет локализации плазмы у поверхности мишени с помощью сильного поперечного магнитного поля.

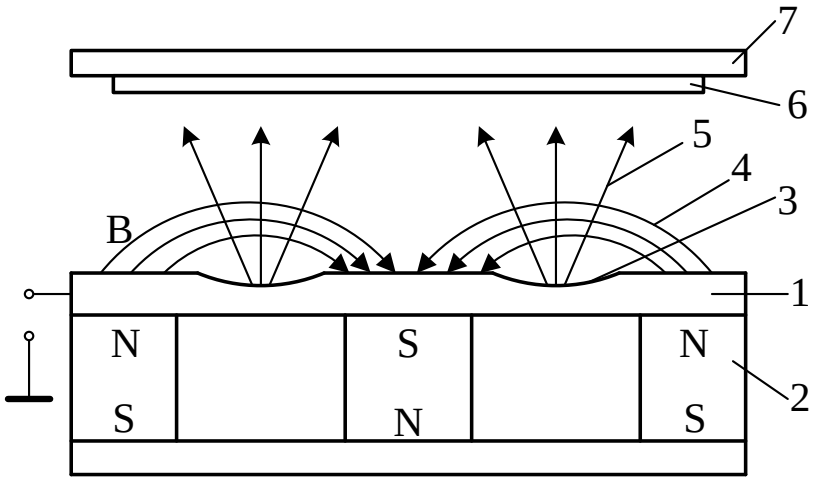


Рис. 2.1. Схема магнетронной системы распыления: 1 – мишень; 2 – магнитная система; 3 – зона распыления (эрозии); 4 – магнитные силовые линии; 5 – поток распыляемого вещества; 6 – подложка; 7 – подложкодержатель

Схема магнетронной системы распыления показана на рис. 2.1. Основными элементами системы являются мишень 1 и магнитная система 2. Магнитные силовые линии 4 замкнуты между полюсами магнитной системы. Между мишенью 1 и подложкодержателем 7 прикладывается электрическое поле и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Замкнутое магнитное поле у поверхности мишени локализует разряд вблизи этой поверхности. Положительные ионы из плазмы аномального тлеющего разряда ускоряются электрическим полем и бомбарди-

руют мишень (катод). Под действием ионной бомбардировки происходит распыление мишени. Электроны, эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки, попадают в область скрещенных электрического и магнитного полей и оказываются в ловушке. Траектории движения электронов в ловушке близки к циклоидальным. Эффективность ионизации и плотность плазмы в этой области значительно увеличиваются. Это приводит к повышению концентрации ионов у поверхности мишени, увеличению интенсивности ионной бомбардировки мишени и к значительному росту скорости распыления мишени.

При построении модели скорости осаждения пленки путем распыления материала из кольцевого испарителя сделаем следующие допущения:

- распыленные атомы распределяются в пространстве по закону косинуса;
- распыленные атомы не сталкиваются друг с другом и с атомами рабочего газа;
- распыленные атомы осаждаются в точке соударения с подложкой.

В общем случае толщина пленки в произвольной точке подложки описывается выражением:

$$h = \frac{V}{\pi r^2}\cos\varphi\cos\phi\cdot t, \qquad (2.1)$$

где V – скорость распыления по толщине; φ – угол между нормалью к поверхности распыления и направлением распыления; ϕ – угол между нормалью к поверхности подложки и направлением осаждения; r – расстояние от элемента распыления до точки осаждения; t – время распыления.

Модель процесса напыления будем строить для случая, показанного на рис. 2.1, когда мишень и подложка параллельны и соосны. В этом случае угол распыления равен углу конденсации, т.е. $\varphi = \phi$. Рассмотрим геометрическую схему модели мишень-подложка, которая представлена на рис. 2.2.

Распределение распыленного материала по подложке является центрально-симметричным и описывается одной переменной – расстоянием от центра l. Бесконечно тонкий кольцевой элемент поверхности мишени можно представить в виде $dS=R\cdot d\alpha\cdot dR$, где α – угол между l и проекцией R на плоскость подложки $X'Y'$.

Угол φ можно выразить через радиус кольца и расстояние между мишенью и подложкой – $\cos\varphi=H/r$. Подставляя эти соотношения в уравнение (2.1) и суммируя дифференциальные элементы кольца мишени путем интегрирования, получаем:

$$h = \int_t\int_{R\alpha}\int \frac{V}{\pi r^2}\frac{H^2}{r^2}Rd\alpha dRdt. \qquad (2.2)$$

Выразим расстояние r через элементы призмы l, R, d, H, α:

$$r = \sqrt{H^2 + l^2 + R^2 - 2lR\cos\alpha}, \qquad (2.3)$$

где $l^2+R^2-2lR\cos\alpha=d^2$. Подставим выражение (2.3) в уравнение (2.2):

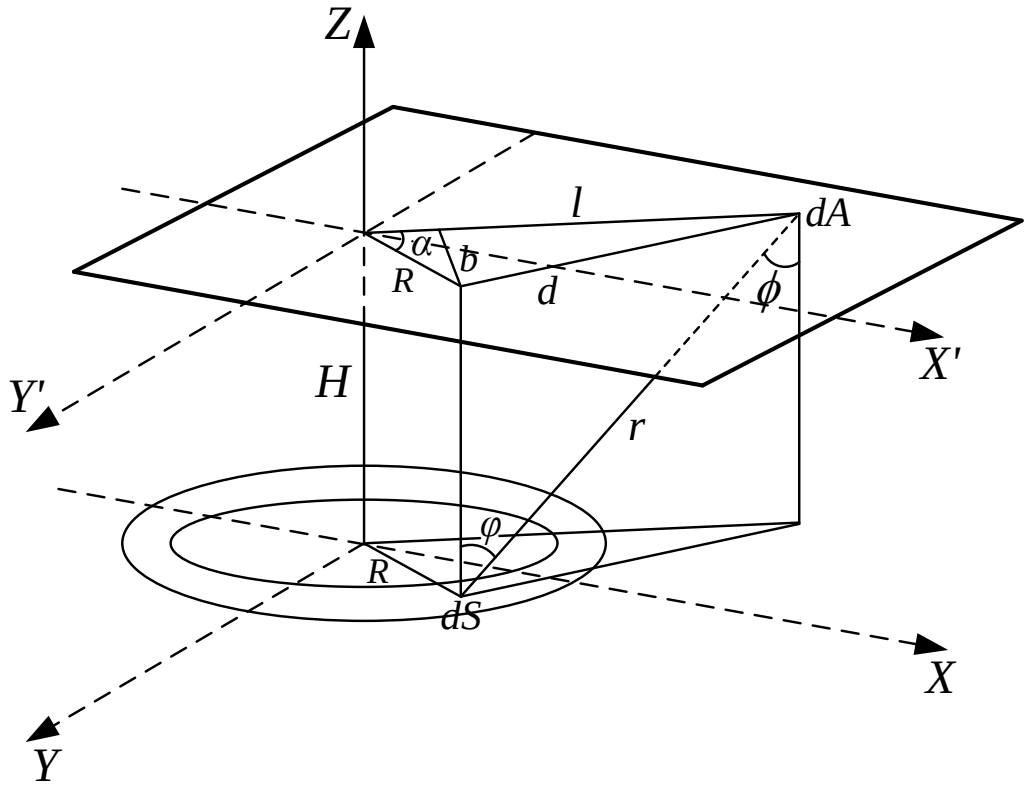


Рис. 2.2. Геометрическая схема модели мишень-подложка

$$h = \int_t \iint_{R\alpha} \frac{V}{\pi} \frac{H^2 R}{(H^2 + l^2 + R^2 - 2lR\cos\alpha)^2} d\alpha dR dt. \qquad (2.4)$$

Проинтегрировав это выражение по времени, получим полное количество распыленного вещества. В нашем случае полагаем, что скорость распыления постоянна во времени и не зависит от радиуса кольца распыления, тогда:

$$h = \frac{Vt}{\pi} \iint_{R\alpha} \frac{H^2 R}{(H^2 + l^2 + R^2 - 2lR\cos\alpha)^2} dR d\alpha. \qquad (2.5)$$

Для интегрирования выражения (2.5) по углу делаем замену $b=H^2+l^2+R^2$, $c = -2lR$, получаем:

$$h = \frac{Vt}{\pi} \iint_{R\alpha} \frac{H^2 R}{(b + c\cdot\cos\alpha)^2} dR d\alpha. \qquad (2.6)$$

Интегрирование проводим от 0 до 2π, делаем обратную подстановку, получаем:

$$h = 2Vt \int_R \frac{H^2 R}{[(H^2 + R^2 - l^2)^2 + (2lR)^2]^{3/2}} dR. \qquad (2.7)$$

Можно провести дальнейшее интегрирование, но результат будет очень громоздким. Поэтому при расчете будем использовать численное интегрирование выражения (2.7).

Количественной характеристикой процесса ионного распыления материалов является скорость распыления, которая определяется как:

$$V = \frac{h}{t}, \tag{2.8}$$

где h – толщина распыленного материала; t – время распыления.

Для расчета скорости распыления материалов при нормальном падении ионов можно пользоваться выражением:

$$V = \frac{j_1 \cdot Y \cdot M_2}{q \cdot N_A \cdot \rho}, \tag{2.9}$$

где j_1 – плотность ионного тока в сечении, перпендикулярном к направлению падения ионов, А/см^2; Y – коэффициент распыления материала, атом/ион; M_2 – атомная масса атомов мишени, г/моль; q – заряд электрона ($1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл); N_A – число Авогадро ($6{,}023 \cdot 10^{23}$ атом/моль); ρ – плотность материала, г/см^2.

Коэффициент распыления Y характеризует эффективность распыления и определяется как среднее число атомов, удаляемых с поверхности твердого тела одной падающей частицей:

$$Y = \frac{\Gamma_2}{Q_1}, \tag{2.10}$$

где Γ_2 – поток атомов, выбитых с поверхности мишени, Q_1 – поток бомбардирующих ионов. Для коэффициента распыления типичны значения 1–5, хотя он может изменяться от 0 до 100. Это зависит от энергии и массы первичных частиц и угла их падения на поверхность, массы атомов мишени, кристаллического состояния твердого тела и ориентации кристалла, от поверхностной энергии связи атомов мишени.

Для реализации распыления атомам мишени должна быть сообщена энергия, превышающая энергию их связи в твердом теле. Эта энергия обозначается как пороговая энергия распыления $E_{пор}$. Величина ее колеблется в пределах 10 – 40 эВ. При энергиях меньше пороговой распыление отсутствует. При больших энергиях коэффициент распыления растет с увеличением энергии первичных частиц, достигает максимума, а затем опять падает. Уменьшение коэффициента распыления при более высоких энергиях связано с большой глубиной проникновения частиц в твердое тело и меньшим выделением энергии в поверхностном слое.

Согласно теории Зигмунда для аморфных и поликристаллических материалов для низких энергий ионов до 1 кэВ коэффициент распыления определяется следующим выражением:

$$Y = \frac{3}{\pi^2} \alpha \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cdot \frac{E_1}{2E_c}, \tag{2.11}$$

где M_1 и M_2 – атомные массы ионов и атомов мишени, г/моль; E_1 – энергия падающих ионов, эВ; E_c – энергия сублимации атомов мишени (энергия связи атома с поверхностью), эВ; α – безразмерный параметр, зависящий от M_1/M_2.

Зависимость параметра α от отношения M_1/M_2 при нормальном падении пучка ионов показана на рис. 2.3.

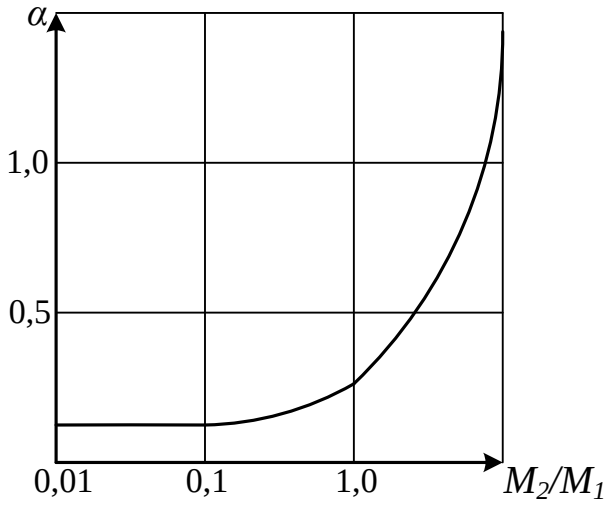


Рис. 2.3. Зависимость коэффициента α от отношения массы атома распыляемого материала M_2 к массе иона M_1

Для упрощения расчетов коэффициента распыления зависимость рис. 2.3 можно аппроксимировать. Для $\alpha(M_2/M_1)$ используется выражение Мацунами:

$$\alpha\left(M_2/M_1\right)=0.10+0.16\left(M_2/M_1\right)^{0.7}. \qquad (2.12)$$

Поскольку энергия ионов при распылении в магнетронной системе при работе на аргоне лежит в диапазоне 350 – 450 эВ, то при расчете коэффициента распыления будет использоваться выражение (2.11). Справочные данные по характеристикам распыляемых материалов приведены в табл. 2.1.

Расчеты проводятся в следующем порядке. Вначале рассчитывается коэффициент распыления и скорость распыления материала мишени. Затем проводится построение контурного изображения толщины напыляемой пленки в виде распределения по всей поверхности, ограниченной радиусом подложки и расстояния до испарителя. Контурный график такого распределения представлен на рис. 2.4. После этого рассчитывается распределение толщины напыленной пленки по подложке и неравномерность этого распределения. С учетом выданного задания проводится оптимизация положения подложкодержателя с подложкой относительно мишени.

2. Порядок выполнения работы

Оптимизировать процесс напыления материала в магнетронной системе распыления: определить расстояние от поверхности мишени, на котором можно получить заданную толщину напыляемой пленки с требуемой неравномерностью при максимально возможной скорости напыления. Варианты заданий приведены в табл. 2.2.

Табл. 2.1

Характеристики некоторых материалов, необходимые для расчета

Материал	Атомный номер Z_2	Атомная масса M_2, г/моль	Энергия сублимации E_c, эВ	Плотность ρ, г/см^3
Be	4	9	3,48	1,85
Mg	12	24,3	1,59	1,76
Al	13	27	3,26	2,7
Si	14	28	3,91	2,42
Ti	22	47,9	4,34	4,52
V	23	51	3,7	6,11
Cr	24	52	3,68	7,19
Mn	25	54,9	3,15	7,44
Fe	26	55,9	4,15	7,87
Ni	28	58,7	4,41	8,9
Cu	29	63,5	3,56	8,96
Ge	32	72,6	3,77	5,32
Nb	41	92,9	7,5	8,57
Mo	42	96	6,9	10,2
Ag	47	107,8	2,7	10,5
Ta	73	181	8,7	16,6
W	74	183	8,76	19,3
Pt	78	195	5,56	21,5
Au	79	197	3,92	19,32

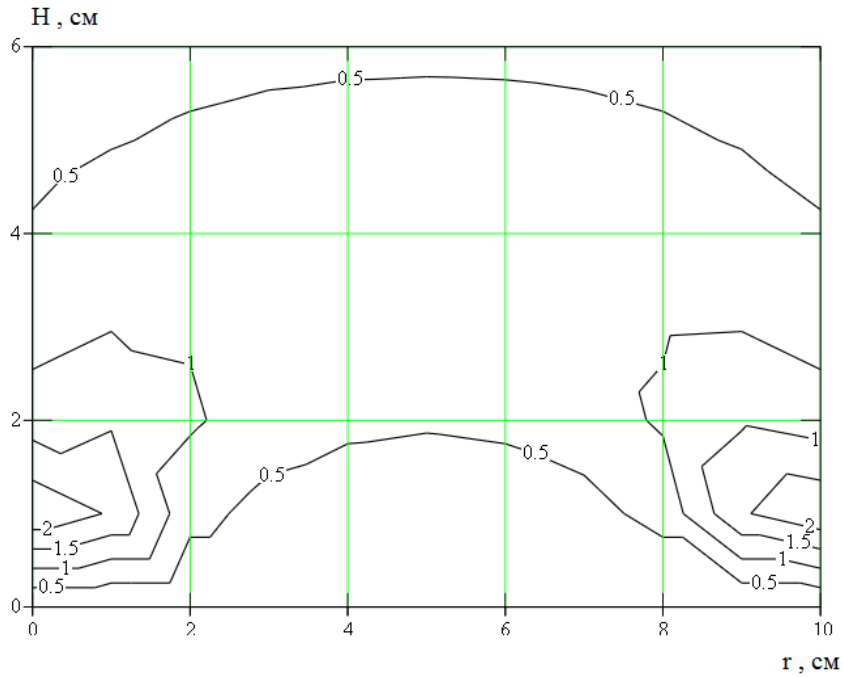


Рис. 2.4. Контурный график распределения толщины напыляемой пленки в зависимости от радиуса пластины и расстояния до испарителя

Табл. 2.2

№ варианта	Материал	Толщина пленки h, мкм	Диаметр пластины d, см	Неравно-мерность $\Delta\pm$ %	Радиус распыле-ния R_1, см
1	Al	1,0	10	5	5,5
2	Si	0,5	7,6	5	5
3	Cr	0,1	10	5	5,5
4	Cu	0,3	10	3	6,5
5	Ti	0,1	7,6	2	5
6	Mo	0,2	7,6	3	4,5

Примечание: 1. Рабочий газ – Ar.

2. Ширина кольца распыления $R_2–R_1$=0,5 см

1. Запустить программу MathCAD. Открыть файл «Лабораторная работа №2».
2. Выбрать из табл. 2.1 необходимые для расчета параметры. Ввести выбранные параметры в соответствующие ячейки входных данных.
3. Определить коэффициент α по аппроксимирующему выражению.
4. Получить контурное изображение профиля распределения напыляемой пленки в зависимости от радиуса подложки и расстояния до испарителя.
5. Задать значение расстояния подложки от испарителя H.
6. Определить среднюю, максимальную и минимальную толщину напыленной пленки по двумерному графику распределения толщины пленки графическим способом. Для этого можно использовать функцию «Трассировка» из меню «Формат».
7. Ввести полученные данные в соответствующие ячейки и получить значение неравномерности толщины пленки по пластине.
8. Добиться требуемой неравномерности толщины пленки, меняя расстояние до испарителя (H).
9. Добиться требуемой средней толщины напыленной пленки с помощью параметра «время напыления».
10. Занести в отчет все входные данные, полученные результаты и график распределения примеси.

4. Контрольные вопросы

1. Какой эффект лежит в основе магнетронного распыления материалов?
2. Из каких основных элементов состоит магнетронная система распыления?
3. От чего зависит скорость распыления материала при ионной бомбардировке?
4. От каких параметров зависит коэффициент распыления?
5. Какие допущения делаются при построении модели кольцевого испарителя?

Лабораторная работа №3
НАКЛОННАЯ ЛОКАЛЬНАЯ ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

Цель работы

Изучить процессы наклонной локальной ионной имплантации с учётом распределения примеси под края защитной маски, исследовать зависимости профиля распределения концентрации примеси от параметров ионной имплантации.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Характеристики процесса ионной имплантации

Суть процесса ионного внедрения заключается в формировании пучков ионов с одинаковой массой и зарядом, обладающих необходимой энергией, и внедрении их в подложку (мишень) в заданном количестве, называемом дозой. Таким образом, основными характеристиками процесса являются *энергия* и *доза ионов*.

Необходимая энергия E_0 приобретается ионом под действием разности потенциалов U:

$$E_0 = neU, \tag{3.1}$$

где n – кратность ионизации, n = 1, 2, 3; e – заряд электрона.

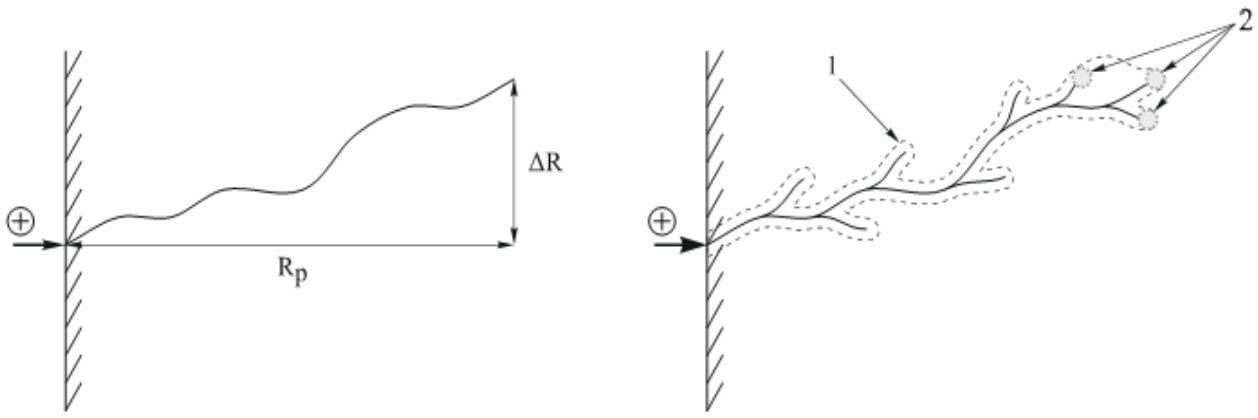
Применение ионного легирования по сравнению с диффузионным позволяет обеспечить:

- строгое задание количества примеси, определяемого током ионов в процессе внедрения;
- воспроизводимость и однородность распределения примеси;
- возможность использования в качестве маски при легировании слоев $Si0_2$ и Si_3N_4;
- внедрение через тонкие слои диэлектриков и резистивных материалов;
- более низкую по сравнению с диффузией температуру процесса.

Вместе с тем процесс ионного внедрения сопровождается рядом явлений, для устранения которых необходимо использование специальных технологических приемов. В результате взаимодействия с ионами в решетку полупроводника вносятся радиационные повреждения, которые при последующих операциях могут искажать профили распределения примеси. Дефекты способствуют также увеличению токов утечки и изменению других характеристик приборов. Устранение дефектов требует постимплантационной высокотемпературной обработки – отжига.

1.2. Пробег ионов

При движении в твердом теле быстрый ион в результате столкновений с ядрами и электронами теряет свою энергию и останавливается. Полная длина пути, пройденного ионом, и ее проекция на направление первоначального движения иона называются соответственно пробегом R и проекцией R_p пробега (рис. 3.1, а). По всей длине пробега образуются дефектные области (рис. 3.1, б).



а б

Рис. 3.1. Схема движения внедряемого иона: *a* – пробег *R*, проекция пробега R_p и рассеяние пробегов ΔR_p и ΔR; б – образование дефектных областей в подложке на пути иона: 1 – точечные дефекты; 2 – аморфные области

Вследствие того, что число столкновений и энергия, передаваемая при столкновении, являются переменными величинами, характеризующими случайный процесс, пробег ионов данного типа с одной и той же начальной энергией не будет одинаковым. Другими словами, движущиеся ионы после торможения останавливаются в точках, разбросанных по всему объему твердого тела, что приводит к распределению пробегов и их проекций, для описания которых требуются такие характеристики функции распределения, как средний пробег ионов, среднеквадратичное отклонение пробега ионов и боковое отклонение ионов под край маски (или проекций пробегов).

Боковое отклонение имплантируемых ионов обусловлено их отклонением за счет взаимодействия с краем защитной маски (дисперсия ионов под край маски). Им обычно пренебрегают, поскольку оно значительно меньше среднего пробега ионов и среднеквадратичного отклонения пробега ионов. Однако для СБИС с микронными и субмикронными размерами элементов боковое отклонение становится очень важным, поскольку двумерные эффекты вблизи края маски сильно влияют на выходные характеристики приборов. Как и разброс пробегов, боковое отклонение является результатом рассеяния ионов, и поэтому оба эти эффекта одинаковы по порядку величины. Существенной становится и геометрия края маски, которая вносит свой вклад в распределение примеси.

Распределение примеси под маску прямоугольной формы с учётом бокового рассеяния можно рассчитать по следующей формуле:

$$C(x,y)=\frac{N}{\sqrt{2\pi}\cdot R_p}\exp\left(-\frac{(y-R_p)^2}{2\Delta R_p{}^2}\right)\cdot\left(erf\,\frac{x+a}{\sqrt{2}\cdot\Delta R_x}-erf\,\frac{x-a}{\sqrt{2}\cdot\Delta R_x}\right), \qquad (3.2)$$

где N – доза имплантации, ΔR_x – отклонение пробега ионов под край маски, a – полуширина маски, y – координата вглубь образца в направлении падения ионного пучка, x – координата вдоль направления поверхности образца, R_p – нормальный пробег, ΔR_p – разброс или стандартное отклонение проективного пробега.

Также одним из основных параметров процесса ионной имплантации является *угол падения* пучка ионов относительно нормали к поверхности мишени. При этом у краев маски наблюдаются два эффекта:

1) образование теневого участка:

$$C(x,y) = \frac{C(x)}{2} erfc\left(\frac{y - a_1}{\sqrt{2}\Delta R'}\right); \tag{3.3}$$

2) имплантация под край защитной маски:

$$C(x,y) = \frac{C(x)}{2} erfc\left(\frac{a_2 - y}{\sqrt{2}\Delta R'}\right). \tag{3.4}$$

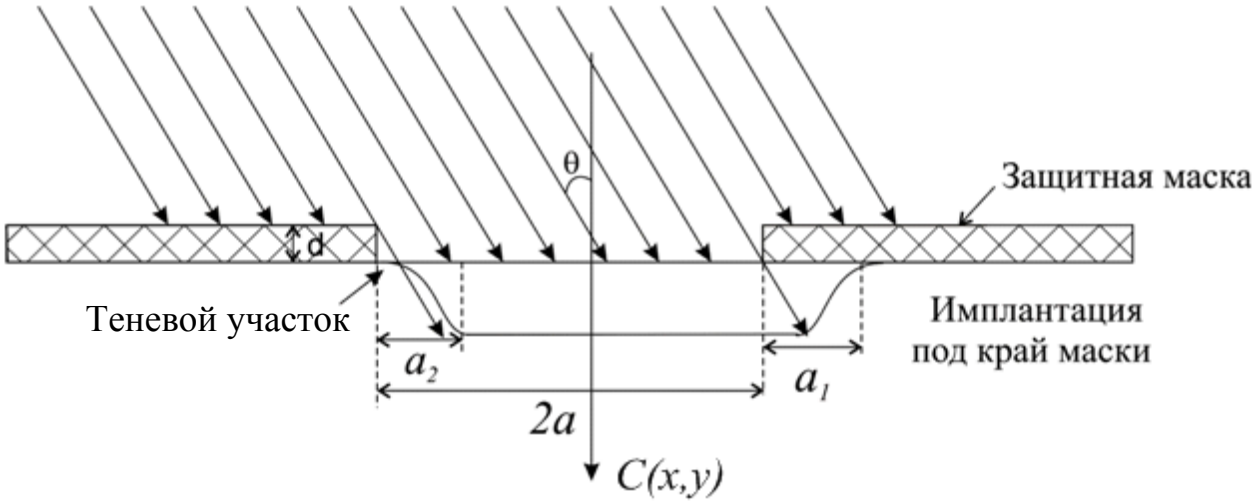


Рис. 3.2. Формирование боковых профилей распределения наклонноимплантированных примесей

Из геометрических соображений следует:

$$\begin{aligned} a_1 &= x \cdot tg\theta, \\ a_2 &= (x + d) \cdot tg\theta, \\ R' &= \Delta R \cdot \sin\theta. \end{aligned} \tag{3.5}$$

2. Порядок выполнения работы

Расчёт проводится в программе MathCad. Согласно варианту задания задайте исходные данные (табл. 3.1). Рассчитайте отклонение пробега ионов под край маски ΔR_x. Для расчёта используйте значения коэффициентов, приведённые в табл. 3.2. Далее расчет осуществляется по следующей последовательности:

$$f(E) := z + s(E) \cdot E$$

$$\Delta Rx := f(E) \cdot 10^{-7} \text{ см}$$

1. Доза имплантации, [ион/см^2]:

$$N := N0 \cdot D.$$

2. Расчёт параметров $a_1(x)$ и $a_2(x)$:

$$a1(x) := a - [d + (Rp + \Delta Rp) \cdot \cos(\theta)] \cdot \tan(\theta),$$

$$a2(x) := a + [(Rp + \Delta Rp)\cdot\cos(\theta)]\cdot\tan(\theta)$$

3. Расчет эквиконцентрационной зависимости распределения примеси в кремнии:

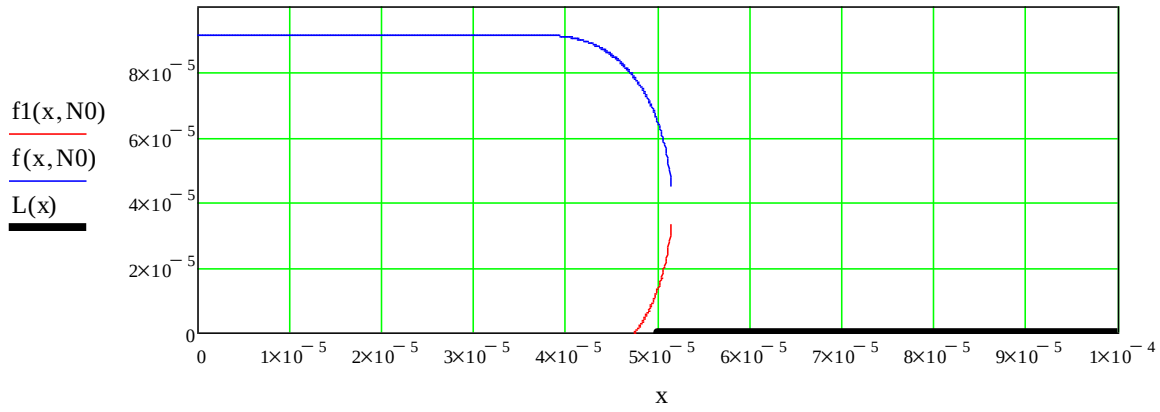
$$f(x,N0) := Rp\cdot\cos(\theta) + \sqrt{2\cdot(\Delta Rp\cdot\cos(\theta))^2\cdot\ln\left[\frac{N}{N0\cdot\Delta Rp\cdot\cos(\theta)\cdot\sqrt{2\pi}}\left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x - a1(x)}{\Delta Rx\cdot\sin(\theta)}\right)\right)\right]}$$

$$f1(x,N0) := Rp\cdot\cos(\theta) - \sqrt{2\cdot(\Delta Rp\cdot\cos(\theta))^2\cdot\ln\left[\frac{N}{N0\cdot\Delta Rp\cdot\cos(\theta)\cdot\sqrt{2\pi}}\left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x - a1(x)}{\Delta Rx\cdot\sin(\theta)}\right)\right)\right]}$$

Построение края маски:

$$L(x) := \begin{cases} 0 & \text{if } x > a \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

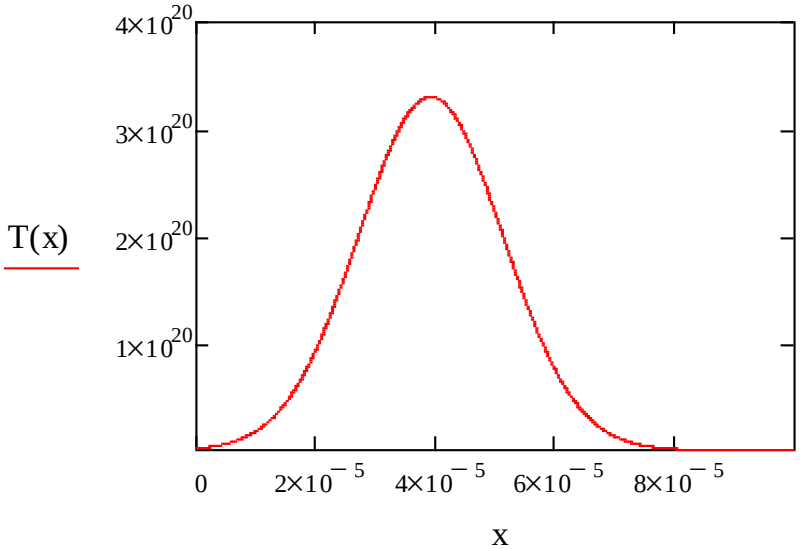
Для этого необходимо использовать сочетание клавиш «Ctrl +] », а для создания условий if и otherwise «Shift +]» и «Ctrl + Shift +]».



4. Распределение ионно-имплантированной примеси:

$$\Delta R := \Delta Rp\cdot\cos(\theta) + \Delta Rx\cdot\sin(\theta)$$

$$T(x) := \frac{N}{\sqrt{\frac{\pi}{2}}\cdot\Delta R\cdot\left(1 + \operatorname{erf}\left(Rp\cdot\frac{\cos(\theta)}{\sqrt{2}\,\Delta R}\right)\right)}\cdot\exp\left[\frac{-(x - Rp\cdot\cos(\theta))^2}{2\cdot\Delta R^2}\right]$$



5. Расчет профиля распределения примеси с учётом эффекта образования теневого участка и имплантации под край маски:

$$C(x,y) := \frac{N}{\Delta Rp\cdot\cos(\theta)\cdot\sqrt{2\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{y - Rp\cdot\cos(\theta)}{\Delta Rp\cdot\cos(\theta)}\right)^2\right]\cdot\left(1 - \operatorname{erf}\left(-\frac{x - a1(x)}{\Delta Rx\cdot\sin(\theta)}\right)\right)$$

$$x := Rp + \Delta Rp$$

$$C(x) := N0\cdot\exp\left[\left(-\frac{x - Rp\cdot\cos(\theta)}{\sqrt{2}\cdot\Delta R}\right)^2\right];$$

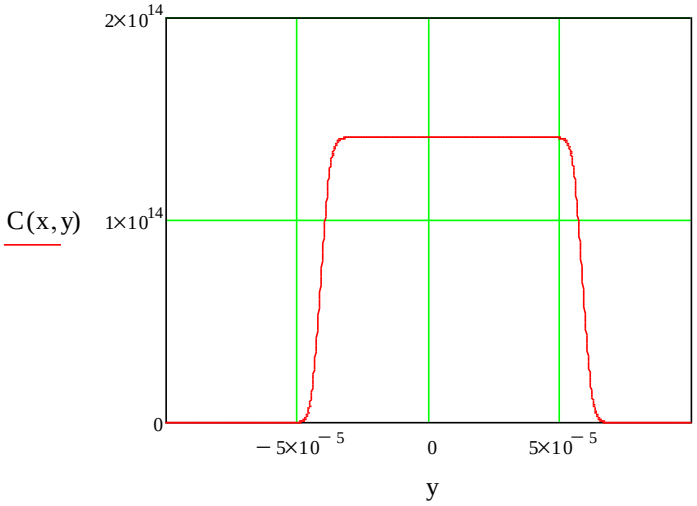
а) распределение примеси под край маски:

$$C2(x,y) := \frac{C(x)}{2}\cdot\operatorname{erfc}\left[-\frac{(y - a1(x)) + [2\cdot a - 2\cdot[d + (Rp + \Delta Rp)\cdot\cos(\theta)]\cdot\tan(\theta)]}{\sqrt{2}\cdot(\Delta Rx\cdot\sin(\theta))}\right]$$

б) распределение примеси с образованием теневого участка:

$$C3(x,y) := \frac{C(x)}{2}\cdot\operatorname{erfc}\left[-\frac{a2(x) - y}{\sqrt{2}\cdot(\Delta Rx\cdot\sin(\theta))}\right]$$

$$C(x,y) := \begin{cases} C3(x,y) & \text{if } 0 \le y \le 2a \\ C2(x,y) & \text{if } -2a \le y < 0 \end{cases}.$$



6. Расчет трёхмерного распределения примеси:

$$C(x,y) := \frac{N}{\Delta Rp\cdot\cos(\theta)\cdot\sqrt{2\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{y - Rp\cdot\cos(\theta)}{\Delta Rp\cdot\cos(\theta)}\right)^2\right]\cdot\left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x - a1(x)}{\Delta Rx\cdot\sin(\theta)}\right)\right)$$

$$xlow := 0 \qquad xhigh := 0.6\cdot10^{-4}\text{ см}$$

$$ylow := 0 \qquad yhigh := 10^{-4}\text{ см}$$

$$xn := 60 \qquad yn := 60$$

$$i := 0 .. xn - 1$$

$$xind_i := xlow + i\cdot\frac{xhigh - xlow}{xn - 1}$$

$$j := 0 .. yn - 1$$

$$yind_j := ylow + j \cdot \frac{yhigh - ylow}{yn - 1}$$

$$M_{i,j} := C(xind_i, yind_j).$$

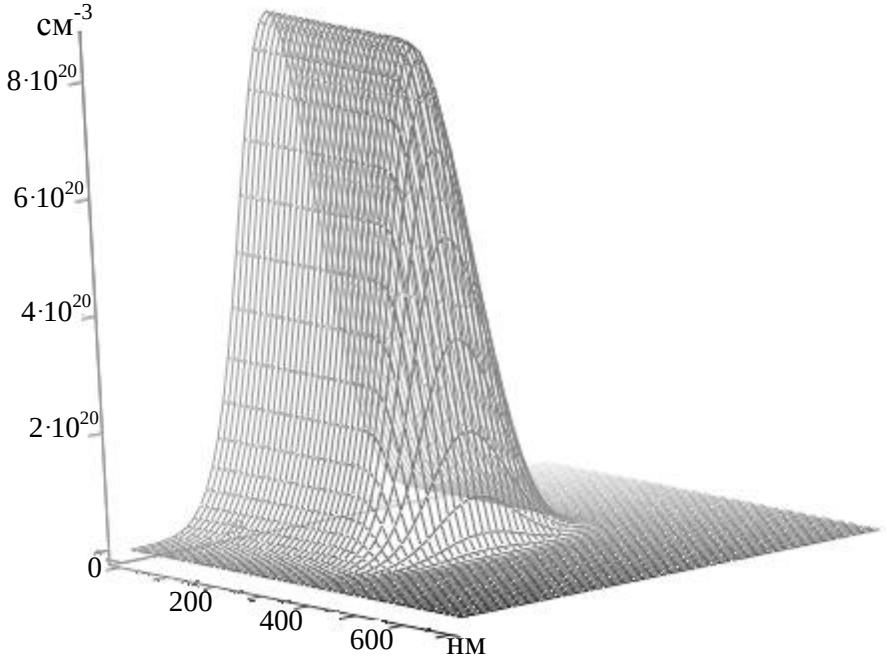


Рис 3.3. Трехмерное распределение имплантированной примеси

7. Максимальный уход p-n-перехода за край маски:

$$C1(x) := \frac{N}{N0 \cdot \Delta Rp \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x - a1(x)}{\Delta Rx \cdot \sin(\theta)}\right)\right] - 1$$

$$x := a$$

$$x1 := \operatorname{root}(C1(x), x)$$

$$\Delta x1 := x1 - a.$$

Вычислить C(x1,Rp).

8. Положение p-n-перехода под маской:

$$C2(x) := \frac{1}{N0} \cdot \left[\frac{N}{\Delta Rp \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{a2(x) - x}{\Delta Rx \cdot \sin(\theta)}\right)\right)\right] - 1$$

$$x := a$$

$$x2 := \operatorname{root}(C2(x), x)$$

$$\Delta x2 := x2 - a.$$

Вычислить C(x2,0).

9. Вывести значения глубины p-n-перехода в центре окна $f(0, N0)$, максимальную концентрацию примеси в легированной области C(0,Rp), максимальный уход p-n-перехода за край маски, уход p-n-перехода за край маски.

Табл. 3.1

№	Примесь	E_0, эВ	R_p, нм	ΔR_p, нм	a, нм	D, мкКл/см^2	d, нм	θ, °	N_0, см$^{-3}$
1	P	100	123	35	400	100	2	6	10^{15}
2	P	120	149	41	500	150	3	7	10^{16}
3	P	140	175	47	400	200	2	8	10^{17}
4	P	160	201	52	500	100	3	9	10^{15}
5	P	180	228	57	400	150	2	10	10^{16}
6	B	100	398	94	500	200	3	6	10^{17}
7	B	120	469	102	400	100	2	7	10^{15}
8	B	140	537	110	500	150	3	8	10^{16}
9	B	160	603	121	400	200	2	9	10^{17}
10	B	180	665	126	500	100	3	10	10^{15}
11	As	100	58	12.5	400	150	2	6	10^{16}
12	As	120	68	14.5	500	200	3	7	10^{17}
13	As	140	79	16	400	100	2	8	10^{15}
14	As	160	89	18	500	150	3	9	10^{16}
15	As	180	99	20	400	200	2	10	10^{17}
16	Sb	100	46	7.4	500	100	3	6	10^{15}
17	Sb	120	53	8.4	400	150	2	7	10^{16}
18	Sb	140	60	9.5	500	200	3	8	10^{17}
19	Sb	160	67	10.5	400	100	2	9	10^{15}
20	Sb	180	74	11.5	500	150	3	10	10^{16}

Табл. 3.2

Значения коэффициентов для расчёта ΔR_x

	Sb	As	P	B
z	1.07	-0.25	0	2.09
s(E)	0.124	0.186	0.48	$1.48 - 2.72 \cdot 10^{-3} \cdot E$

3. Контрольные вопросы

1. Опишите процесс проникновения ионов в вещество.
2. Что такое доза облучение, чем она определяется?
3. Как зависит длина нормального пробега и отклонение нормального пробега от энергии имплантируемых ионов, постройте графики и объясните.
4. Чем обусловлено проникновение примеси под защитную маску в процессе ионной имплантации?
5. Как изменится профиль распределения ионно-имплантируемой примеси при наличии эффекта каналирования?
6. Опишите физические явления, обусловливающие образование теневого участка в процессе наклонной локальной ионной имплантации.
7. Для чего применяется локальная наклонная ионная имплантация?
8. Опишите основные элементы установки для ионной имплантации.

Лабораторная работа №4
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ВЫХОДА КРЕМНИЯ ПРИ ХЛОРИДНОМ МЕТОДЕ ЭПИТАКСИИ

Цель работы

Изучить процесс хлоридного метода эпитаксии, провести термодинамический анализ системы «тетрахлорид кремния – водород» и определить выход кремния при заданных параметрах процесса.

1. Краткие теоретические сведения

Основополагающим элементом любой полупроводниковой биполярной структуры является p-n-переход. Технологический процесс его формирования во многом определяет его свойства. Так в процессе диффузии формирование p-n-переходов происходит только вследствие компенсации имеющихся в исходном материале примесей. В большинстве случаев это нежелательно, так как во время каждого последующего цикла диффузии число атомов примеси, необходимое для компенсации ранее введенных атомов легирующей добавки, увеличивается экспоненциально. Пределы растворимости используемых при диффузии в кремний примесей таковы, что выполнить более трех последовательных диффузионных процессов практически невозможно. Поэтому методом диффузии трудно создавать высокоомные слои (с низкой концентрацией примесей) и контролировать ход диффузии в них. Немаловажным является также и то, что подвижность носителей заряда обратнопропорциональна полному количеству примесей, содержащемуся в полупроводнике. В материале с большой концентрацией доноров и акцепторов подвижность уменьшается, что ухудшает электрические параметры приборов.

Решение различных технико-конструкторских задач, в том числе и вышеперечисленных, возможно с применением *эпитаксиальных процессов* в технологии микроэлектроники. Одним из важнейших применений эпитаксии является процесс формирования скрытого слоя в полупроводниковых интегральных микросхемах. Наличие скрытого слоя позволяет повысить быстродействие биполярных транзисторов и всей микросхемы в целом.

Под *эпитаксией* понимается процесс ориентированного выращивания монокристаллического слоя на поверхности монокристаллической подложки. В процессе эпитаксиального выращивания образующаяся фаза закономерно продолжает кристаллическую решетку подложки с образованием переходного эпитаксиального слоя. Переходный слой способствует когерентному срастанию двух решеток по плоскостям и направлениям со сходной плотностью упаковки атомов, через него передается основная информация о кристаллической структуре подложки в эпитаксиальный слой.

В современной технологии процессы эпитаксии занимают одно из ведущих мест в производстве полупроводниковых интегральных микросхем и

большинства типов дискретных полупроводниковых приборов. Эпитаксиальные слои в настоящее время могут быть получены в структурном отношении более совершенными, чем объемные монокристаллы. Они обладают практически идеальной однородностью распределения легирующих примесей. Содержание неконтролируемых примесей в них значительно ниже, чем в монокристаллах, полученных методом Чохральского или бестигельной зонной плавкой.

При эпитаксии атомы примеси внедряются из внешней среды в кристаллическую решетку эпитаксиального слоя непосредственно в процессе роста. Отношение числа атомов кремния к числу атомов примеси легко регулируется, а электрофизические параметры эпитаксиального слоя могут изменяться в очень широких пределах, причем полностью исключается необходимость компенсации примесей.

По природе взаимодействия «подложка – растущая кристаллическая фаза» различают три вида эпитаксиальных процессов: гомоэпитаксия (автоэпитаксия – АЭС), гетероэпитаксия и хемоэпитаксия. *Гомоэпитаксия* – это процесс выращивания монокристаллического слоя вещества, однотипного по структуре с подложкой и отличающегося от нее только содержанием легирующих примесей. *Гетероэпитаксия* – это процесс выращивания монокристаллического слоя вещества, отличающегося по химическому составу от вещества подложки, но близкому ему по кристаллографической структуре. *Хемоэпитаксия* – это процесс выращивания монокристаллического слоя вещества, в результате которого образование новой фазы происходит при химическом взаимодействии вещества подложки с веществом, поступающим из внешней среды. Полученный хемоэпитаксиальный слой отличается по составу как от вещества подложки, так и от вещества, поступающего на ее поверхность извне.

1.1. Газофазная эпитаксия кремния

Эпитаксиальные слои можно получить из газообразной фазы или из конденсированной фазы (жидкой и твердой). И настоящее время почти все практически важные методы получения авто- и гетероэпитаксиальных слоев относятся к первой группе.

Наиболее широкое практическое применение находят методы выращивания пленок при взаимодействии нагретой подложки с различными парогазовыми смесями в открытом процессе. Этими методами получают автоэпитаксиальные слои полупроводников (кремний, германий, арсенид галлия и др.), используя в качестве активного газа-носителя водород.

Промышленная технология изготовления автоэпитаксиальных слоев кремния в основном базируется на использовании группы химических диссоциативных газофазных методов. К ним прежде всего относятся «хлоридный метод» — восстановление кремния из парогазовой смеси [$SiCl_4 + H_2$] и «силановый» метод, основанный на пиролизе моносилана [$SiH_4 + H_2$]. В меньшей степени распространены методы восстановления кремния из $SiHCl_3$ и Si_2Cl_6

Успех технологии газофазного химического осаждения (ГХО) объясняется следующими ее достоинствами.

Во-первых, любой материал может быть получен при температуре, значительно меньшей, чем при кристаллизации из расплава. Благодаря этому, а также исключению дорогих плавильных печей и ванн, может быть обеспечена большая чистота при меньших затратах.

Во-вторых, поток осаждающегося вещества направлен в сторону нагретой поверхности, которая может иметь сколь угодно сложную конфигурацию, а не только плоскую, как при вакуумном напылении.

В-третьих, благодаря огромному выбору исходных реагентов и типов химических реакций (восстановление, пиролиз, диспропорционирование, гидролиз, окисление) метод применим для получения большого числа сплавов и химических соединений.

В ряде случаев используются методы конденсации кремния из молекулярных пучков в сверхвысоком вакууме (до 10^{-6} Па), которые находят все большее применение в связи с созданием мобильных установок и мощных безмасляных средств откачки, позволяющих снизить температуру автоэпитаксии кремния до 700 – 900 К.

При газофазной эпитаксии атомы полупроводника переносятся к подложке в составе химического соединения. Для кремния это могут быть, например, тетрахлорид кремния $SiCl_4$ или силан SiH_4. Весь процесс можно разбить на ряд стадий: перенос реагентов к поверхности подложки; адсорбция и химическая реакция реагентов на поверхности подложки; десорбция продуктов реакции; перенос продуктов реакции от поверхности подложки к основному потоку; упорядочение адсорбированных атомов в кристаллическую решетку. Результирующая скорость роста эпитаксиального слоя определяется самой медленной стадией из приведенных выше.

Если скорость реакции лимитируется массопереносом, то основным фактором, определяющим скорость осаждения, можно считать пограничный слой. Такой режим называют диффузионным, так как реагенты и продукты реакции должны преодолевать динамический пограничный слой преимущественно диффузией. Скорость реакции в диффузионном режиме можно регулировать изменением толщины пограничного слоя, существование которого обусловлено адсорбционными силами самой поверхности, а по мере удаления от нее — внутренним трением (вязкостью) газа. Чем больше его толщина, тем труднее идет доставка к поверхности реагентов из ядра потока.

В процессе выращивания эпитаксиальных слоев можно осуществлять их легирование. При этом атомы примеси внедряются в кристаллическую решетку растущей пленки. Соотношение атомов примеси и атомов кремния в газовой фазе регулируют таким образом, чтобы выращенный слой содержал заданное количество примеси. Можно получать слои с любым отличным от подложки уровнем легирования. Это позволяет получать высокоомные слои на низкоомной подложке или создавать резкие p-n-переходы, не прибегая, например, к твердофазной

диффузии. Возможно также непрерывное изменение степени легирования эпитаксиального слоя в процессе его выращивания, что приводит к постепенному изменению уровня легирования по толщине слоя. Этот метод используется, в частности, в производстве полупроводниковых солнечных батарей с улучшенными рабочими характеристиками.

1.2. Хлоридный метод эпитаксии

Хлоридный метод – исторически первый и наиболее распространенный промышленный метод получения автоэпитаксиальных слоев кремния. Его широкое применение связано с доступностью высокочистого тетрахлорида кремния и водорода в промышленных масштабах, освоением процесса восстановления кремния из тетрахлорида, сравнительно низкими затратами, относительной безопасностью процесса и возможностью управления его основными параметрами.

Процесс эпитаксии протекает в системах проточного типа. Рост АЭС из парогазовой смеси [$SiCi_4$+H_2] происходит на поверхности кремниевой подложки, разогретой до температур 1200 – 1400 К. Парогазовую смесь (ПГС) [$SiCl_4$ + H_2] получают путем насыщения водорода парами тетрахлорида кремния при пропускании водорода через испаритель с жидким $SiCl_4$.

Взаимодействие тетрахлорида кремния с водородом описывается химической реакцией:

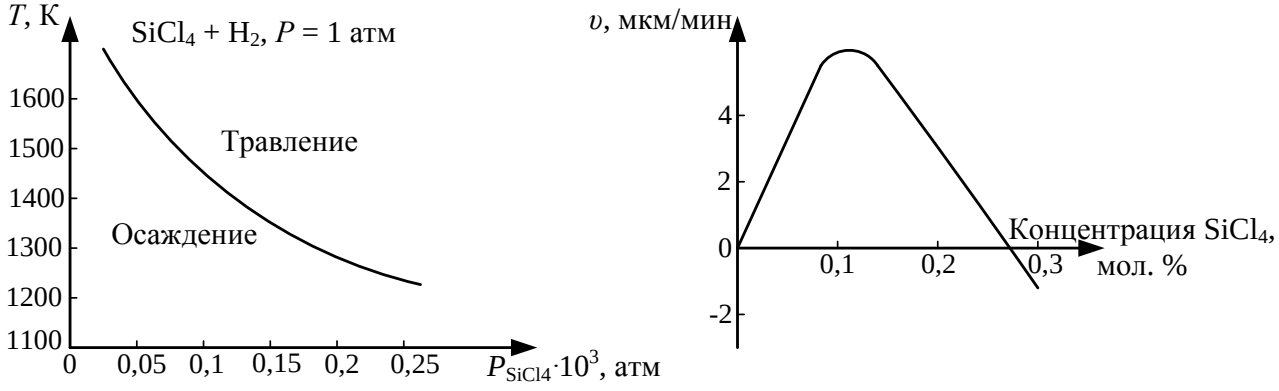
$$SiCl_4 + 2H_2 \rightarrow Si + 4HCl. \qquad (4.1)$$

Действительный ход этой реакции многостадиен и может быть представлен в виде последовательных и параллельных реакций, которые будут рассмотрены при термодинамическом анализе.

Реакцию осуществляют при температурах 1000 – 1250 °С. Реально реакция происходит в несколько стадий с образованием промежуточных продуктов $SiHCl_3$ и $SiCl_2$. Скорость роста эпитаксиального слоя зависит от температуры процесса и ряда других технологических факторов и обычно находится в диапазоне от 0,5 до 1,5 мкм/мин. Указанная выше реакция (точнее, все ее составляющие) обратима. Это означает, что при определенных условиях, например, когда температура реакции выходит за пределы некоторого рабочего интервала, скорость роста становится отрицательной, то есть вместо роста эпитаксиального слоя идет его травление парами HCl. Или если концентрация $SiCl_4$ слишком высока, травление будет происходить и в отсутствие HCl в несущем газе (рис. 4.1). Так, при температуре 1170 ^{0}С и молярной концентрации $SiCl_4$, равной 0,27 – 0,28, начинается травление Si.

Непосредственно перед процессом эпитаксии подложки подвергаются термообработке в водороде или вакууме при температурах 1150 – 1300°С и высокотемпературному травлению в ПГС [HC1 + H_2]. Предэпитаксиальная обработка подложек проводится с целью их очистки и обеспечения геометрического совершенства поверхности.

Легирование эпитаксиальных слоев осуществляется путем контролируемого введения паров легколетучих соединений элементов III и V групп периодической системы в парогазовую смесь [$SiCl_4 + H_2$]. Способы легирования могут быть различными:



а б

Рис. 4.1. Граница областей роста и травления кремния в системе $SiCl_4$–H_2 в зависимости от температуры и парциального давления P_{SiCl4} (а) и зависимость скорости роста эпитаксиального слоя $SiCl_2$ (T = 1170 ^{0}C) (б)

1)легирование из раствора (для получения пленок n-типа с $\rho \geq 0{,}1$ Ом·см). С этой целью к жидкому $SiCl_4$ добавляют летучие примеси PCl_5, BCl_3 и BBr_3, которые испаряются вместе с $SiCl_4$ и поступают в реактор. Недостатком этого метода является необходимость приготовления специального раствора для каждой степени легирования;

2)газовое легирование, являющееся более практичным. При этом примесь вводится в реактор отдельным газовым потоком. В качестве донорных примесей используется фосфин (PH_3) или арсин (AsH_3), а в качестве акцепторной примеси диборан (B_2H_6). Эти газы разбавляют водородом и вводят в реакционную камеру. Используя такой метод, удается выращивать эпитаксиальные слои n- и p-типа с концентрацией примеси $5\cdot10^{14} - 10^{21}$ см$^{-3}$.

К достоинствам хлоридного метода следует отнести возможность получения достаточно совершенных слоев и относительную простоту оборудования. Недостатки – значительная диффузия примесей из подложки в слой и довольно высокая степень автолегирования. Диффузия обусловлена высокой температурой процессов; для ее уменьшения в качестве легирующей примеси в подложке выбирают элемент с наименьшим коэффициентом диффузии (в случае подложек n-типа не фосфор, а мышьяк или сурьму). Ограничением метода в ряде случаев является трудность получения достаточно чистого $SiCl_4$.

Можно использовать восстановление трихлорсилана ($SiHCl_3$) водородом – метод, близкий к хлоридному методу. Наиболее вероятно протекание реакции по уравнению:

$$SiHCl_3(\text{газ}) + H_2(\text{газ}) \rightarrow Si\ (\text{тв})\downarrow + 3HCl(\text{газ})\uparrow. \qquad (4.2)$$

Использование трихлорсилана при водородном восстановлении имеет ряд преимуществ по сравнению с $SiCl_4$. Это легкая дистилляционная очистка из-за отсутствия азеотропов с примесями и большая скорость осаждения. Перечисленные преимущества позволяют существенно повысить производительность установок при производстве полупроводникового кремния. Хлорсиланы также предпочтительнее использовать вместо силана и дисилана при осаждении методом ГХО, так как гомогенное зародышеобразование мелких (тонкодисперсных) частиц с хлорсиланами менее вероятно.

Таким образом, трихлорсилан является практически наиболее важным веществом для производства кремния, а тетрахлорид кремния – основным побочным продуктом этого производства.

1.3. Термодинамический анализ системы $SiCl_2 + H_2$

Термодинамический анализ позволяет определить принципиальную возможность осуществления реакции, смещение равновесия в ту или иную сторону в интересующем процессе и максимально возможный выход элементарного кремния в зависимости от температуры и состава ПГС.

Система Si-Cl-H является классическим примером сложного, неоднозначного взаимодействия реагентов при повышенных температурах. Выяснилось, что простая запись основной реакции (4.1) вовсе не раскрывает ее истинный механизм, который включает множество промежуточных стадий и продуктов. Спектральный анализ показал наличие в реагирующей смеси помимо H_2, HCl, $SiCl_4$ таких соединений, как $SiHCl_3$, SiH_2Cl_2, SiH_3Cl, и еще ряда других (всего более 20 компонентов).

В общем виде ход реакции можно представить следующим образом: исходные реагенты → переходные состояния → продукты реакции. Только исходные реагенты и продукты реакции являются стабильными химическими соединениями, свойства которых можно изучить экспериментальным путем.

Хорошее экспериментальное подтверждение находит механизм процесса взаимодействия тетрахлорида кремния с водородом, который можно представить состоящим из четырех элементарных стадий:

$$SiCl_4 + H_2 \leftrightarrow SiHCl_3 + HCl; \quad (4.3)$$

$$SiHCl_3 \leftrightarrow SiCl_2 + HCl; \quad (4.4)$$

$$SiCl_2 \leftrightarrow 1/2Si + 1/2SiCl_4; \quad (4.5)$$

$$SiCl_2 + H_2 \leftrightarrow Si + 2HCl. \quad (4.6)$$

Для расчета выхода продуктов реакций используются константы равновесия реакций K_p. Значения этих констант для реакций (4.3) – (4.6) при различных температурах представлены в табл. 4.1.

Табл. 4.1

Значения константы равновесия для реакций (4.3) – (4.6)

Температура, К	(4.3)	(4.4)	(4.5)	(4.6)
1173	0,200	0,00115	71	1,74
1373	0,457	0,025	10	1,2

1473	0,63	0,12	3,8	1,0
1573	0,78	0,48	1,66	0,84
1673	1,0	1,67	0,657	0,72

Если концентрация каждого вещества в момент равновесия удовлетворяет всем уравнениям равновесия для реакций, возможных в данном процессе, то, решая составленную таким образом систему уравнений относительно всех неизвестных, получают значения равновесных концентраций продуктов данного процесса. При расчете необходимо учитывать только независимые реакции, только в этом случае число уравнений будет равно числу неизвестных.

Обозначим количество молей компонентов в момент равновесия:

$$n_{SiHCl3} - m_1;\ n_{HCl} - m_2;\ n_{SiCl4} - m_3;\ n_{SiCl2} - m_4;\ n_{H2} - m_5;\ n_{Si} - m_6.$$

Уравнения констант равновесия реакций, протекающих при взаимодействии $SiCl_4$ с H_2, можно записать следующим образом:

$$K_{p(4.3)} = \frac{m_1 m_2}{m_3 m_5};\ K_{p(4.4)} = \frac{m_2 m_4}{m_1(m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5)};$$

$$K_{p(4.5)} = \frac{(m_3(m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5))^{1/2}}{m_4};\ K_{p(4.6)} = \frac{m_2^2}{m_5 m_4}.$$

Поскольку

$$K_{p(4.3)} K_{p(4.4)} K_{p(4.5)}^2 = K_{p(4.6)},$$

то мы располагаем только тремя уравнениями с шестью неизвестными. Недостающие три уравнения получаем, составляя уравнения баланса для кремния, водорода и хлора (количества молей до достижения равновесия и в момент равновесия равны).

Для повышения процента извлечения кремния при водородном восстановлении хлоридов требуется большой избыток водорода, что можно представить молярным отношением:

$$[H_2 : SiCl_4] = N :1.$$

Уравнения баланса имеют вид:

1) по кремнию: $1 = m_1 + m_4 + m_3 + m_6$;

2) по водороду: $N = 0{,}5m_1 + 0{,}5m_2 + m_5$;

3) по хлору: $2 = 1{,}5m_1 + 0{,}5m_2 + 2m_3 + m_4$.

Таким образом, совместное решение системы из шести уравнений с шестью неизвестными позволяет определить равновесные концентрации всех продуктов процесса и выход элементарного кремния.

1.4. Влияние температуры на скорость и механизм хлоридного процесса

Характер температурной зависимости скорости процесса (рис. 4.2) свидетельствует о том, что гетерогенная реакция взаимодействия тетрахлорида кремния с водородом протекает как в кинетической, так и в диффузионной области.

В низкотемпературной области закономерности процесса эпитаксии определяются кинетической стадией процесса диссоциативной адсорбции трихлорсилана. При переходе в высокотемпературную область энергия активации резко уменьшается, и возрастает влияние диффузионных процессов реагирующих веществ на границу раздела фаз.

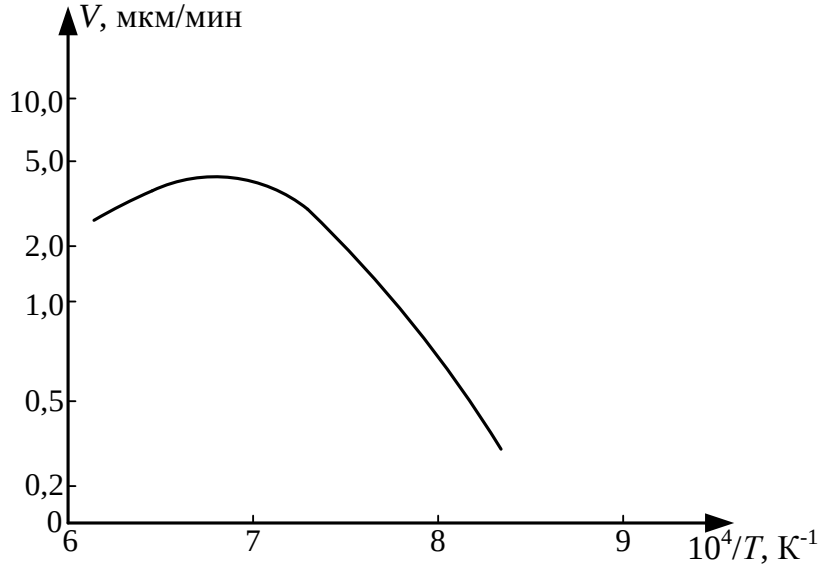


Рис. 4.2. Температурная зависимость скорости хлоридного процесса

1.5. Особенности технологии хлоридного метода эпитаксии

Преимущества ГХО достигаются ценой огромного расхода газообразных смесей, так как их плотность примерно в 1000 раз меньше, чем у твердых тел. Поэтому существенное количество осадка может быть получено только в проточной системе. Огромные объемы протекающего через реактор H_2, выполняющего функцию не только восстановителя, но и разбавителя, диктуют особые требования именно к его чистоте (прежде всего по $H_2O + O_2$), причем финишная очистка (адсорбция, диффузия через Pd) осуществляется непосредственно в цехе эпитаксии. Чистота H_2 оценивается по точке росы, которая не должна быть выше -75°С, что соответствует концентрации основного вещества 99,9999% или примеси не более 1,0 млн$^{-1}$.

Поток газа только на первый взгляд кажется простым, легко управляемым и измеряемым. На самом деле даже в прямой трубе он имеет сложную и не вполне контролируемую структуру: неравномерность распределения скорости по сечению и возможную турбулентность.

Конструкция реакционных камер и подложкодержателей определяет условия обтекания подложек газовой смесью, а вследствие этого – однородность свойств слоев и воспроизводимость результатов.

В результате поиска оптимальной конструкции опробованы и в той или иной мере используются многие типы реакторов, которые можно классифицировать по степени близости к одной из двух идеализированных моделей: вытеснения или смешения. В реакторе смешения предусматривается турбулизация смеси

кремнийсодержащего компонента с водородом и легирующими газами для достижения равномерной концентрации смеси во всем реакционном объеме. Реактор вытеснения конструктивно реализуется в виде трубы длинной гораздо превышающей ее сечение и не содержащей источника турбулизации.

В современных установках реализуются обе модели. После поступления газового потока в реакционную камеру необходимо обеспечить равномерный нагрев парогазовой смеси. Для этого организуется полузамкнутый объем с условиями максимально эффективного перемешивания кремнийсодержащего компонента. Далее используется модель вытеснения, когда ПГС проходит в узком и длинном зазоре между подложкодержателем и внутренними стенками реактора.

Основанная на термически активированном гетерогенном превращении эпитаксия должна осуществляться в реакторах с «холодными» стенками (на уровне 500 – 600°С), чтобы избежать осаждения кремния и полихлоридов на них. Основным методом нагрева графитового подложкодержателя является индукционный нагрев низкочастотным током, поле которого проникает глубже в графит и разогрев оказывается более мягким, что продлевает срок службы подложкодержателя.

Этому комплексу требований во многом соответствует вертикальный реактор нового поколения с подложкодержателем-пирамидой (рис. 4.3).

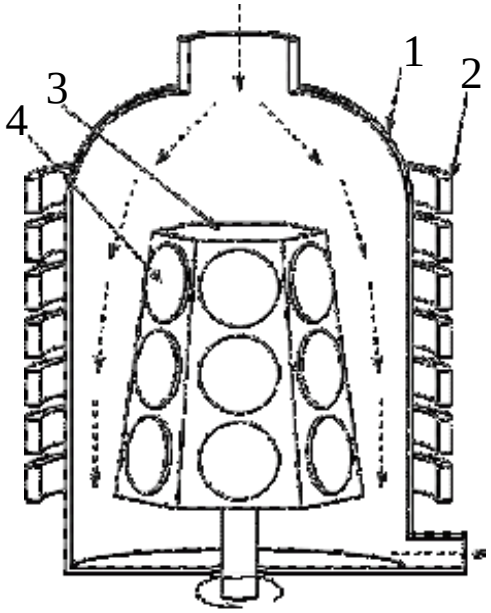


Рис. 4.3. Схема современного промышленного реактора для эпитаксиального наращивания кремния: 1 – реактор, 2 – индуктор, 3 – подложкодержатель, 4 – подложка

2. Варианты заданий

Для заданной температуры процесса эпитаксии и мольного количества водорода (варианты заданий приведены в табл. 4.2) рассчитать количество молей компонентов ПГС, определить выход кремния, построить графическую зависимость выхода компонента химического взаимодействия (по варианту задания) от соотношения [H_2 : $SiCl_4$].

Табл. 4.2

№ варианта	Температура, К	N – молярное количество H_2	Компонент ПГС
1	1173	100	HCl
2	1373	200	$SiCl_2$
3	1373	100	$SiHCl_3$
4	1473	200	HCl
5	1473	100	$SiCl_2$
6	1573	200	$SiHCl_3$
7	1573	100	$SiCl_2$
8	1673	200	HCl

3. Порядок выполнения работы

1. Получить задание у преподавателя.
2. Запустить программу MathCAD.
3. Открыть файл «Лабораторная работа №4».
4. Выбрать из табл. 4.1 и 4.2 необходимые для расчета параметры и константы равновесия реакций, соответствующие заданной температуре. Ввести выбранные параметры в соответствующие ячейки входных данных.
5. Определить мольные концентрации компонентов ПГС.
6. Определить выход кремния в относительных единицах.
7. По точкам построить зависимость выхода компонента химического взаимодействия от соотношения [N : 1].
8. Занести в отчет все входные и выходные данные, полученные результаты и график построенной зависимости.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое эпитаксия, какие виды эпитаксиальных процессов различают по природе взаимодействия «подложка – растущая кристаллическая фаза»?
2. Что такое константа равновесия реакции, как она определяется?
3. Опишите достоинства и недостатки хлоридного метода эпитаксии.
4. Опишите достоинства и недостатки эпитаксии при газофазном химическом осаждении.
5. Чем определяются диффузионный и кинетический режимы газофазной химической реакции?
6. Какими способами осуществляется легирование эпитаксиального слоя в хлоридном методе эпитаксии?

Лабораторная работа № 5
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ПРОВОЛОКИ ВОЛЬФРАМА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗОНДА СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА

Цель работы

Изучить процесс электрохимического травления вольфрама и технологию подготовки зондов для сканирующего зондового микроскопа. Исследовать влияние времени электрохимического травления на качество зонда.

1. Краткие теоретические сведения

Высокое пространственное разрешение сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) определяется экспоненциальной зависимостью туннельного тока от расстояния до поверхности. Разрешение в направлении по нормали к поверхности достигает долей ангстрема. Латеральное же разрешение зависит от качества зонда и определяется в основном не макроскопическим радиусом кривизны кончика острия, а его атомарной структурой. При правильной подготовке зонда на его кончике с большой вероятностью находится либо одиночный выступающий атом, либо небольшой кластер атомов, который локализует его на размерах, много меньших, чем характерный радиус кривизны острия (рис. 5.1).

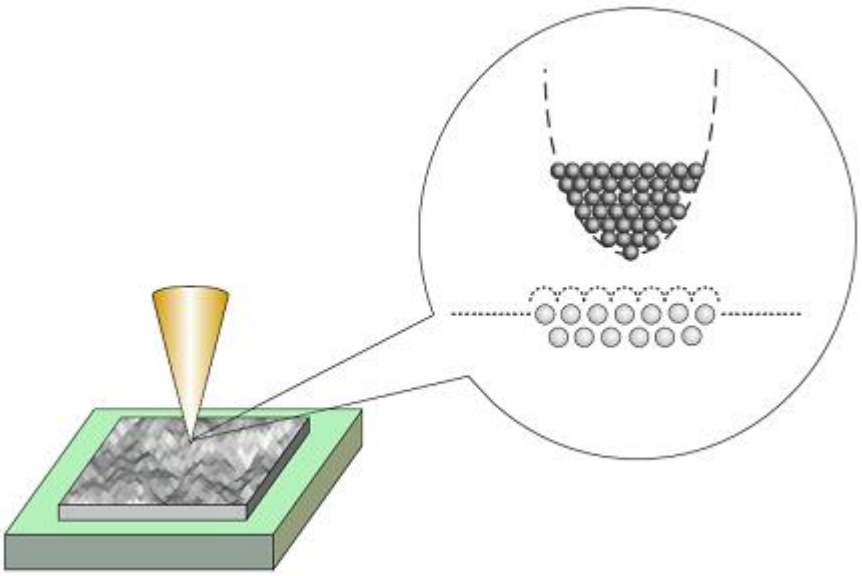


Рис. 5.1. Схематичное изображение острия зонда с одним атомом на конце

С помощью таких зондов удается получать атомарное пространственное разрешение на образцах из различных материалов.

Профиль кончика зонда является важной характеристикой, так как СЗМ изображения являются сверткой формы поверхности исследуемого образца и зонда, который используется для отображения поверхности. Форма зонда является определяющей при получении качественного изображения. Если для атомарно гладких поверхностей критичным является только радиус кончика, то для отображения ступенек, склонов, ям и прочих резких перепадов по высоте, критическим является угол заточки зонда.

1.1. Зонды для туннельных микроскопов

В сканирующих туннельных микроскопах используются зонды нескольких типов. Широкое распространение получили зонды, приготовленные из вольфрамовой проволоки методом электрохимического травления. Вольфрамовые зонды являются одними из наилучших вариантов при использовании в СЗМ.

В сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) зонд играет роль проводника и может иметь любую форму, но для исключения влияния геометрии зонда важно применять как можно более острый и тонкий зонд. В случае с атомно-силовой микроскопией (АСМ) при выборе используемого зонда приходится идти на компромисс между качеством и надежностью, поскольку для надежного захвата и отслеживания взаимодействия необходимы определенные профиль и форма зонда. Твердость исследуемого образца также оказывает влияние на величину силового взаимодействия.

1.2. Методы создания зондов

Методы создания зондов подразделяются на механические и физико-химические (электрохимическое). Механические методы, как правило, предусматривают простые механические операции, такие как срез металлической проволоки из W, Pt-Ir, Pt-Rh, MO, при котором непосредственно обеспечивается острый кончик. Теоретически на кончике образуется несколько моноатомных щетинок, самая длинная из которых и используется в качестве зонда.

Электрохимическое травление является методом, используемым для придания металлическим зондам формы конуса с острой вершиной. Этот метод продолжает широко использоваться в своей простейшей форме путем погружения металлической проволоки (W, Au, Ta, Fe, Pt, Ir, Pt-Ir) в соответствующий электролит и приложения напряжения к электродам (рис. 5.2).

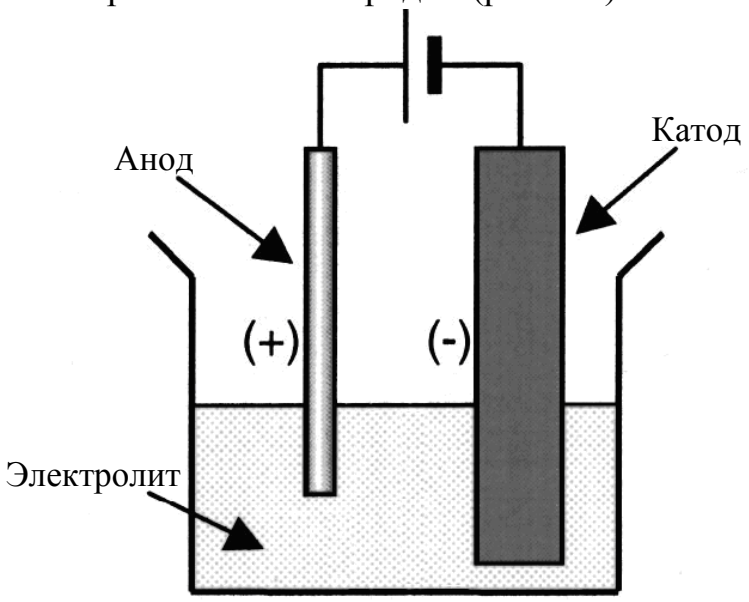


Рис. 5.2. Электрохимическая заточка зонда

Также возможно изготовление зондов с помощью ионной заточки. В этом случае созданный в вакууме поток ионов Ar^+ направлен по касательной к зонду.

В случае вольфрамового зонда эта операция удаляет изоляционный слой оксида и создает зонд с радиусом кончика несколько нм.

1.3. Особенности анодного растворения вольфрама

В щелочных растворах происходит разложение воды с образованием иона WO_4^{2-}. Процесс выделения водорода на W зависит от PH раствора, плотности тока и вида поверхности. Обычно процесс анодного растворения ведут при плотности тока i=0,1-0,5 А/см^2 и температуре 25-30^{0}С. Катодная плотность при этом составляет 0,05-0,1 А/см^2. Растворение W в щелочи связано с образованием на его поверхности оксидных пленок, при этом в пленке наблюдается объемная проводимость самого окисла и его быстрое растворение.

Уравнения электролиза:

$K^-_{P+}: 2H_2O + 2\bar{e} \rightarrow H_2 + OH^-$

$A^+: 2OH^- \rightarrow 2H_2O + O + 2\bar{e}$.

Окисление вольфрама:

$W + 2O \rightarrow WO_2$ (преимущественно)

$2W + 5O \rightarrow W_2O_5$ (возможно окисление до WO_3 с последующим растворением)

$WO_2 + 4OH \rightarrow WO_4^{2-} + 2H_2O + 2\bar{e}$

$W_2O_5 + 6OH^- \rightarrow 2WO_4^{2-} + 3H_2O + 2\bar{e}$

$W + 2KOH + 2H_2O \rightarrow K_2WO_4 + 3H_2$.

Порядок реакции растворения W по ионам OH^- равен 1. В отсутствии тока W покрыт WO_2.

В щелочной среде возможен механизм:

$WO_2 + OH^- \rightarrow WO_3 + H^+ + 2\bar{e}$

$WO_3 + OH^- \rightarrow HWO_4^{2-} + H^+$.

1.4. Технология электрохимического травления вольфрамового зонда

Технология приготовления СТМ зондов методом электрохимического травления состоит из следующих этапов. Заготовка из вольфрамовой проволоки укрепляется так, чтобы один из ее концов проходил сквозь проводящее кольцо (К) и погружался в водный раствор щелочи (рис. 5.3). Контакт между кольцом и вольфрамовой проволокой осуществляется посредством капли щелочи, расположенной в отверстии кольца. При протекании электрического тока между раствором щелочи и помещенным в нее металлом происходит электрохимический процесс травления металла, при котором атомы металла переходят в раствор.

По мере травления толщина перетравливаемой области становится настолько малой, что происходит разрыв заготовки за счет веса нижней части. При этом автоматически разрывается электрическая цепь и останавливается процесс травления.

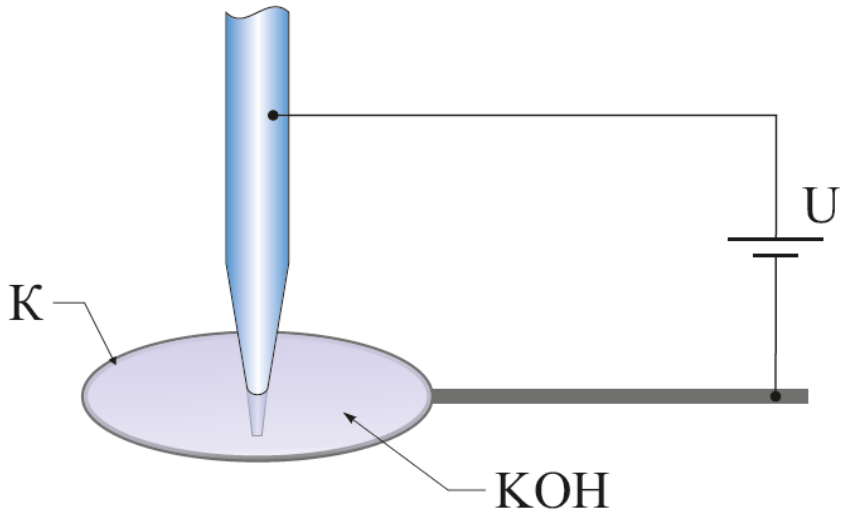


Рис. 5.3. Схема изготовления СТМ зондов из вольфрамовой проволоки с помощью электрохимического травления

1.5. Устройство для травления игл

В работе используется устройство для травления игл (УТИ). Оно предназначено для изготовления и восстановления зондов для зондовых микроскопов методом электрохимического травления. На рис. 5.4 представлена схематическая конструкция УТИ.

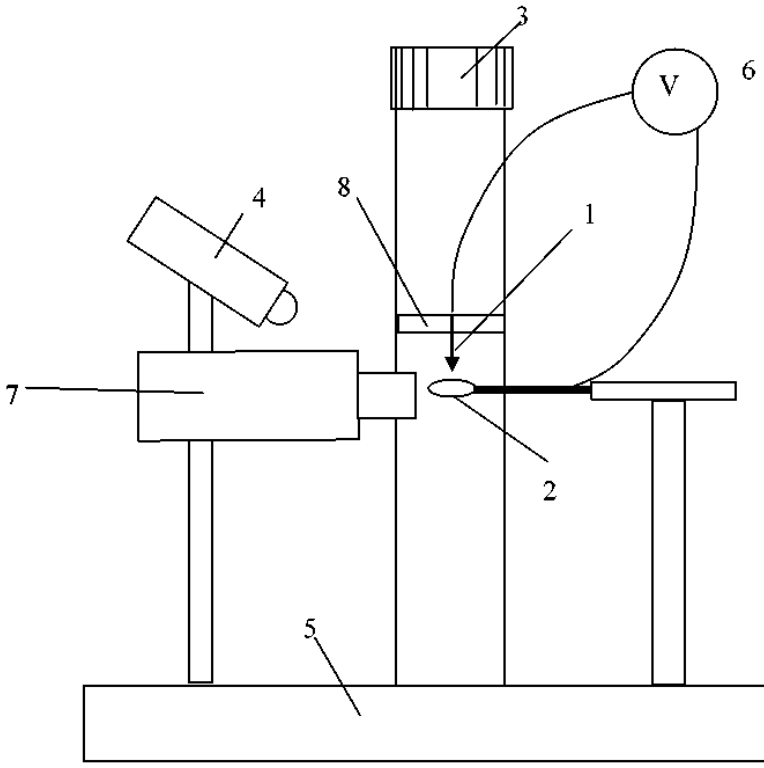


Рис. 5.4. Конструкция устройства для травления игл: 1 – отрезок вольфрамовой проволоки; 2 – кольцо; 3 – винт перемещения по вертикали; 4 – подвижный светодиодный осветитель; 5 – основание; 6 – источник переменного электрического напряжения; 7 – видеомикроскоп; 8 – держатель

УТИ работает следующим образом. Отрезок вольфрамовой проволоки 1 закреплен на держателе 8, который перемещается вверх и вниз по вертикали вручную с помощью винта 3. Освещение обеспечивается подвижным светодиодным осветителем 4. Все элементы конструкции закреплены на основании 5. Вращая винт 3, проволоку опускают в кольцо 2 до нужной глубины. Кольцо изготовлено из нихромовой проволоки. Предварительно на кольцо 2 вешается капля 5-процентного раствора KOH или NaOH. После этого включается источник переменного электрического напряжения 6 и происходит процесс перетравливания вольфрамовой проволоки с образованием острой иглы. Оператор наблюдает за процессом травления на экране компьютера посредством видеомикроскопа 7. После окончания травления иглу 1 вместе с держателем 8 поднимают в верхнее положение и вынимают.

Технические характеристики УТИ:
Типичный радиус закругления кончика иглы: 0.2 мкм;
Материал заготовки иглы вольфрамовая проволока диаметром: 0,1 мм;
Диапазон перемещения по вертикали: 25 мм;
Источник напряжения: 6- 9 В / 0,5 А переменного тока;
Увеличение видеомикроскопа: Х 200;
Время травления иглы: не более 2 мин.

2. Порядок выполнения работы

Инструменты и материалы:

- Вольфрамовая проволока диаметром 0,15 мм;
- Устройство для изготовления острия (рис. 5.5);
- Ножницы.

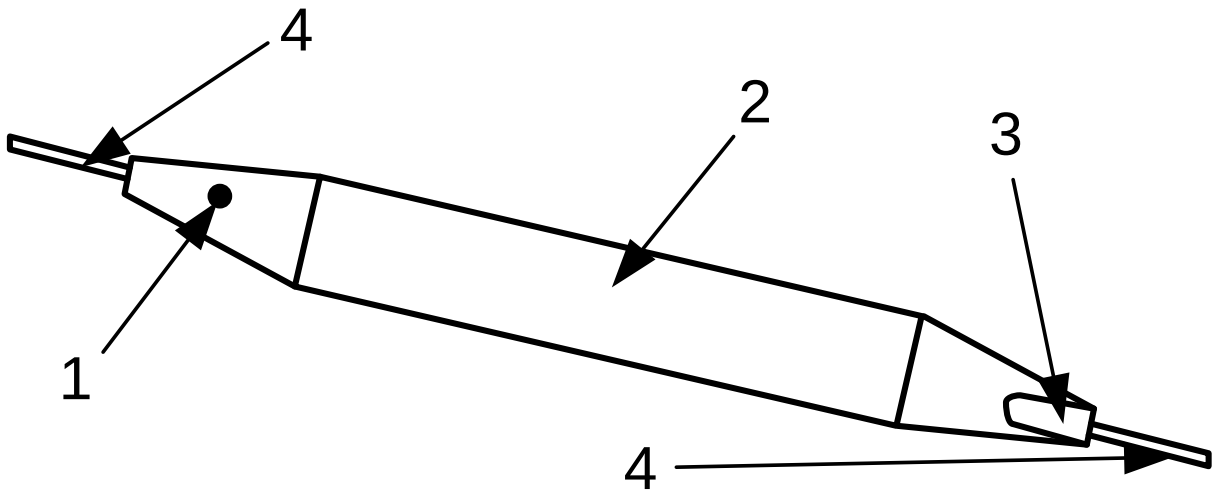
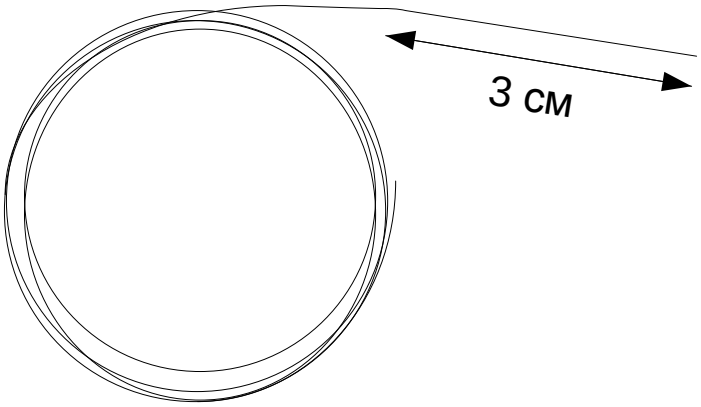
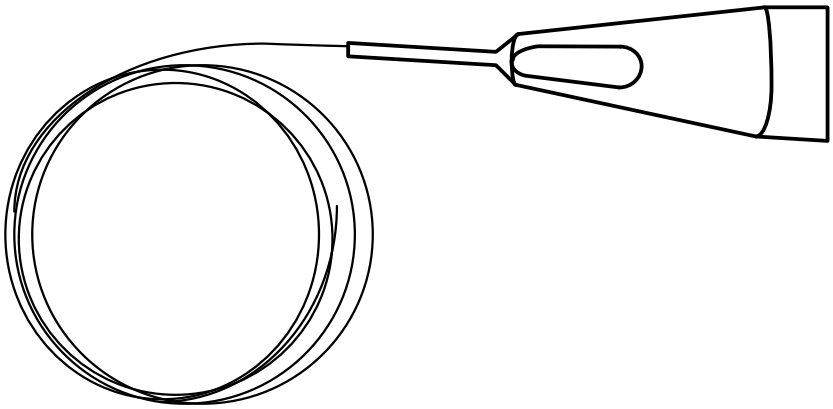


Рис. 5.5. Устройство для изготовления острия зондового датчика:
1 – маркер, 2 – отверстие, 3 – мерная канавка, 4 – капилляры

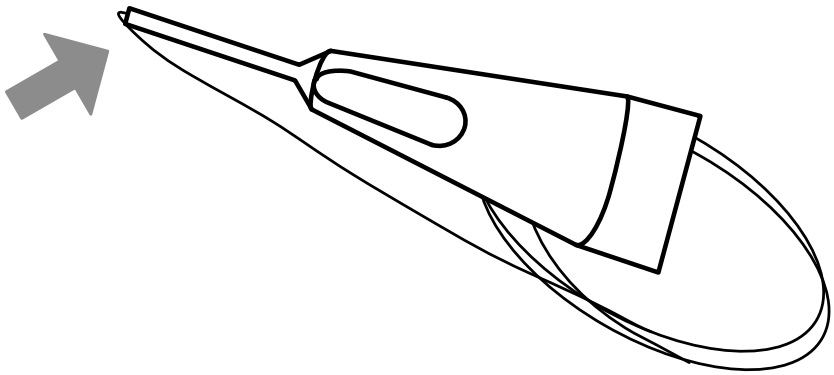
1. Выпрямите проволоку на длину приблизительно 3 сантиметра.



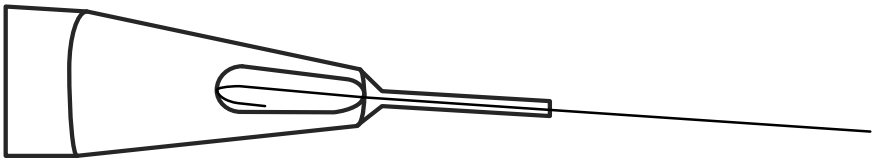
2. Вставьте проволоку до упора в металлический капилляр со стороны мерной канавки устройства.



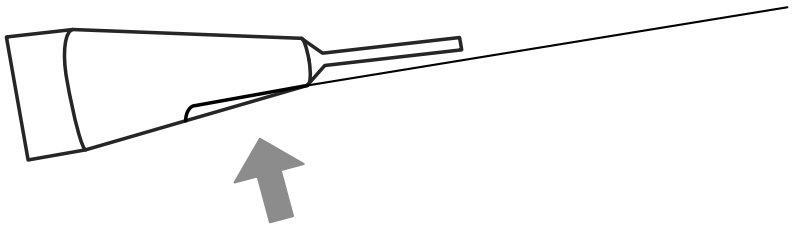
3. Загните проволоку на угол приблизительно 180 градусов, прижимая ее пальцем к металлическому капилляру.



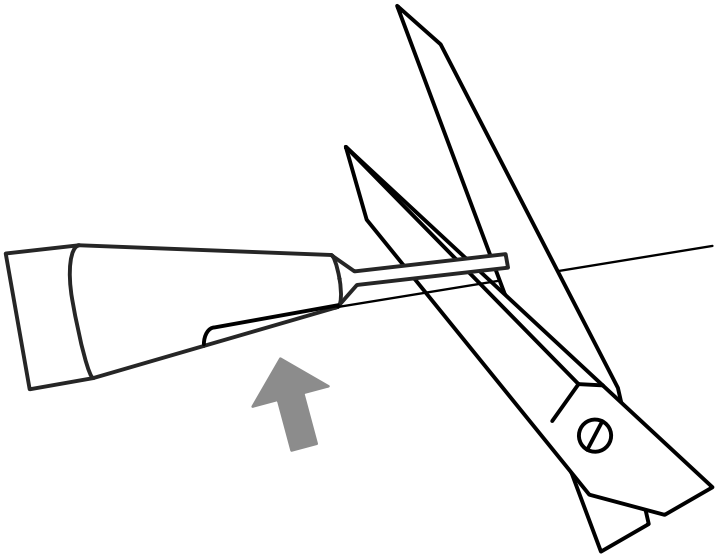
4. Вытащите проволоку из капилляра. Вложите проволоку загнутым концом в мерную канавку до упора.

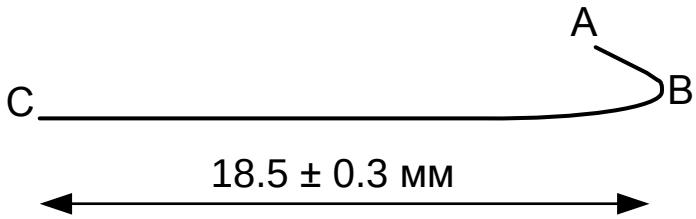


5. Прижмите проволоку пальцем к мерной канавке.

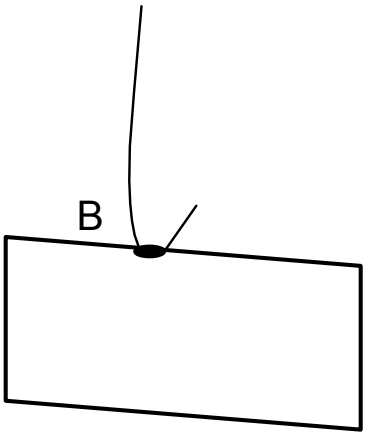


6. Отрежьте проволоку ножницами, упираясь режущей плоскостью ножниц в торец капилляра. Важно обеспечить длину BC=18,5 ± 0,3мм.

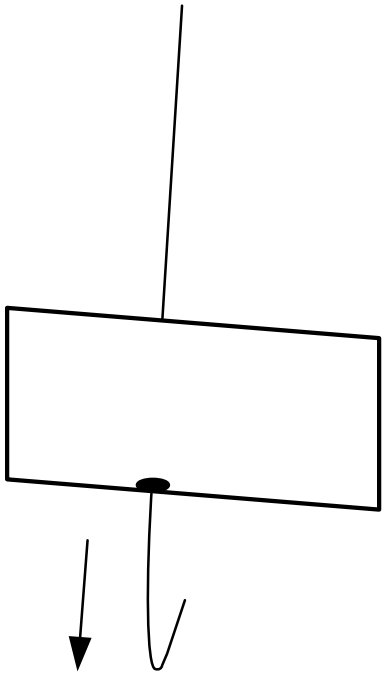




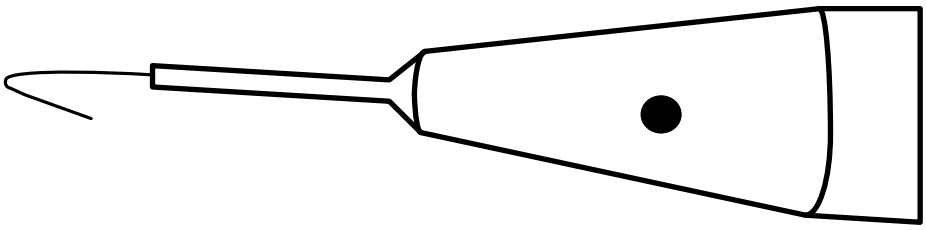
7. Для формирования угла ABC вставьте проволоку со стороны точки B в отверстие, расположенное в центре приспособления.



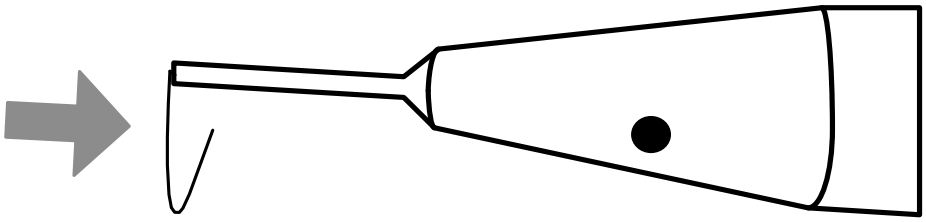
8. Протащите проволоку сквозь отверстие.



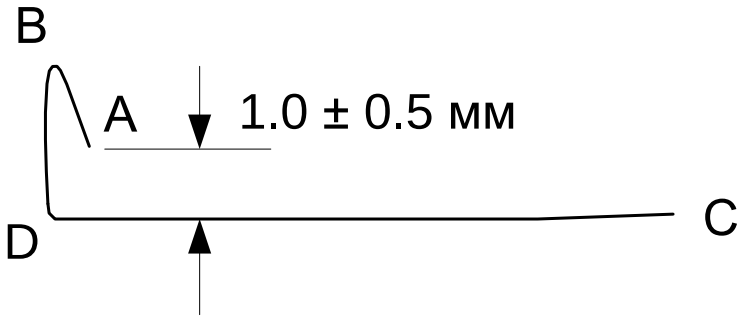
9. Со стороны точки C вставьте проволоку до упора в капилляр, отмеченный красной точкой.



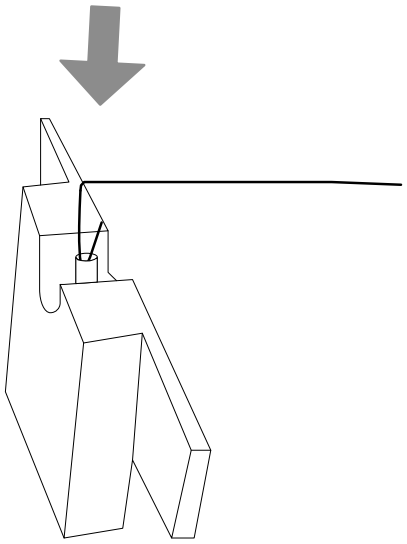
10. Загните проволоку приблизительно на 90 градусов, прижимая ее пальцем.



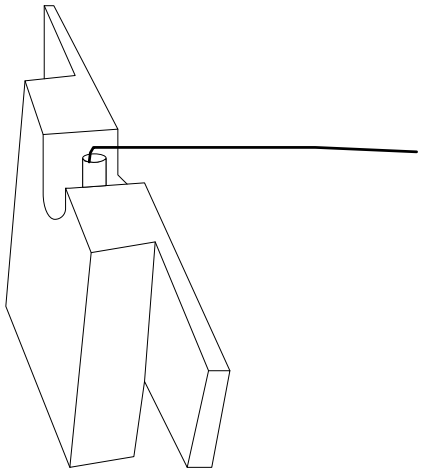
11. Выньте проволоку из капилляра. Угол BDC должен быть в пределах 90 ± 5 градусов. Ширина зазора должна быть не меньше 1,0± 0,5 мм. При слишком узком зазоре работа датчика может быть нестабильной.



12. Со стороны точки B вставьте проволоку в трубку датчика.



13. Утопите проволоку пальцем до упора.



Датчик готов для последующего изготовления острия путем электрохимического травления.

14. Поверните кольцо 2 в сторону от держателя 8 (рис. 5.4).

15. Вставьте датчик в держатель 8 (рис. 5.4).

16. Подключите УТИ к адаптеру, входящему в комплект поставки, подключите адаптер к электрической сети 220 В.

17. Убедитесь, что режим травления выключен (не горит красная лампочка на выключателе).

18. Подключите цифровой микроскоп к USB-порту компьютера согласно инструкции пользования цифровым микроскопом.

19. Установите держатель с датчиком в такое положение, чтобы проволока-заготовка 1 была вертикальна (рис. 5.4).

20. Поднимите винтом 3 держатель 8 с датчиком в верхнее положение так, чтобы конец проволоки 1 был выше кольца 2.

21. Поверните кольцо 2 так, чтобы оно оказалось под проволокой 1.

22. Отрегулируйте положение цифрового микроскопа, изгибая рукой гибкий стержень-держатель так, чтобы кольцо 2 было в фокусе видеомикроскопа.

23. Поверните кольцо 2 в прежнее положение и навесьте на него каплю 5-процентного раствора КОН (или NaOH) из чашки Петри, как показано на рис. 5.6.

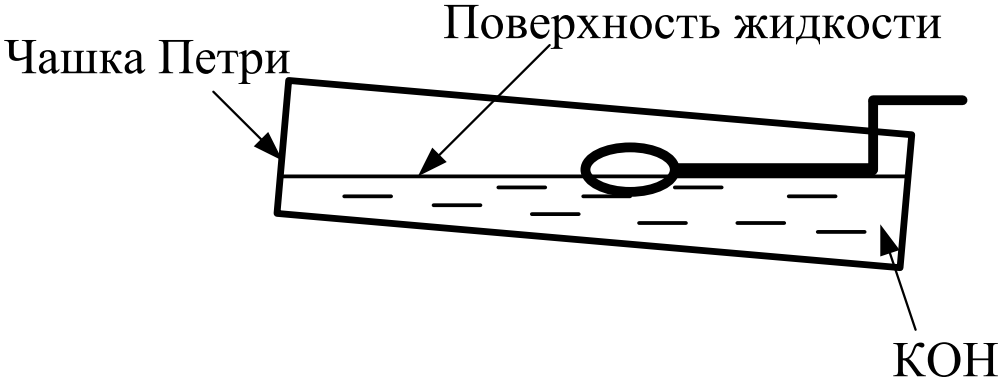


Рис. 5.6. Навешивание капли на кольцо

24. Прикоснитесь поверхностью жидкости к проволочному кольцу, после этого опустите чашку вниз. На кольце образуется капля раствора. Если капля сорвалась при перемещениях кольца, повторно прикоснитесь поверхностью жидкости к проволочному кольцу.

25. Снова поверните кольцо под проволоку 1 и опустите проволоку в каплю, вращая винт 3.

26. Установите зазор между каплей и нижней поверхностью датчика приблизительно 2 мм. При этом длина будущей иглы будет около 5 мм.

27. Включите процесс травления выключателем. При этом загорится лампочка на выключателе и жидкость начнет «кипеть».

28. Наблюдая за процессом травления в микроскоп, периодически прерывайте травление и наблюдайте за утоньшением вольфрамовой проволоки внутри капли.

29. После перетравливания проволоки нижний конец ее падает.

Внимательно следите за процессом травления и немедленно выключите УТИ после падения нижней части заготовки 1!

30. Поднимите держатель 8 с иглой в такое положение, чтобы только самый кончик иглы был погружен в жидкость.

31. Включите на короткое время (не более 1 сек.) процесс травления выключателем. Выключите травление.

32. Сохраните изображение сформированного зонда, используя средства захвата изображения экрана.

33. Поднимите держатель с датчиком с помощью винта 3.

34. Выньте датчик с готовым зондом из держателя.

35. Промойте зонд в струе проточной воды, держа его иглой вниз. Просушите зонд под теплыми струями воздуха. Для просушки зонда можно использовать фен.

3. Контрольные вопросы

1. Назовите основные методы изготовления СМТ-зондов.
2. Назовите основные материалы для СЗМ-зондов и требования к ним.
3. Каковы отличия в требованиях к зондам СТМ и АСМ?
4. Расскажите о методе электрохимического травления с анодным растворением материала**.**
5. Опишите технологию изготовления зондов методом электрохимического травления.
6. Опишите устройство для изготовления СЗМ зондов.

Библиографический список

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. 488с.
2. Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий: учеб. пособие для вузов: в 2 т. Т.1: Физико-химические основы технологии микроэлектроники / Ю.Д. Чистяков, Ю.П. Райнова. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 392 с.
3. Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий: учеб. пособие для вузов: в 2 т. Т.2: Технологические аспекты / М.В. Акуленок, В.М. Андреев, Д.Г. Гровов и др. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 252 с.
4. Никоненко В.А. Математическое моделирование технологических процессов: Моделирование в среде MathCAD. Практикум. М.: МИСиС, 2001. 48 с.
5. Коровин Н.В. Общая химия: учебник для техн. направлений и спец. вузов. М.: Высш. школа, 2002. 558 с.
6. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: учеб. пособие для вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики» и «Полупроводниковые приборы». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1986. С. 201 – 228.
7. Коледов Л.А. Технология и конструирование микросхем, микропроцессоров и микросборок. Радио и связь, 1989.
8. Комаров Ф.Ф., Новиков А. П., Буренков А.Ф. Ионная имплантация. М., изво Университетское, 1994. 415 с.
9. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии: пер. с. англ. – М.: Мир, 1985. 496 с.
10. Физическая химия. В 2 кн. / под ред. К.С.Краснова. М.: Высш. школа, 2001. 512с.
11. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Радио и связь, 1990. 496 с.
12. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. – М. Высш. школа, 1987. 376 с.
13. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород, 2004. 114 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1
Изучение элементной базы и топологии
полупроводниковых интегральных микросхем……1

Лабораторная работа №2
Моделирование процесса магнетронного распыления
материала испарителя кольцевой формы……12

Лабораторная работа № 3
Наклонная локальная ионная имплантация……19

Лабораторная работа № 4
Термодинамический анализ и определение максимального выхода
кремния при хлоридном методе эпитаксии……26

Лабораторная работа № 5
Электрохимическое травление проволоки вольфрама для
изготовления зонда сканирующего зондового микроскопа……..36

Оператор ЭДО ООО "Компания "Тензор"

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

ПОДПИСАНО **ФГБОУ ВО "РГРТУ", РГРТУ,** Литвинов Владимир Георгиевич, Заведующий кафедрой МНЭЛ **02.11.26** 16:55 (MSK) Простая подпись