

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ

по дисциплине «Микроэлектроника»
для студентов направления подготовки

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль)

Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Ставрополь 2026 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа 1.1	
Изучение элементной базы, топологии и конструкции гибридных интегральных микросхем	4
Лабораторная работа 2.2	
Изучение топологии и конструкции полупроводниковых интегральных микросхем	27
Лабораторная работа 3.1	
Изучение техпроцесса изготовления двухслойной тонкопленочной ГИС	44
Лабораторная работа 3.2	
Изучение техпроцесса изготовления ГИС на полиимидном носителе и техпроцесса изготовления титановой подложки	64
Лабораторная работа 4.1	
Изучение планарно-эпитаксиальной технологии изготовления полупроводниковых микросхем на биполярных транзисторах	72
Лабораторная работа 4.2	
Изучение технологических операций производства полупроводниковых микросхем на биполярных транзисторах	88
Лабораторная работа 4.3	
Измерение параметров слоев полупроводниковой микросхемы	103
Лабораторная работа 5.1	
Изучение техпроцесса изготовления ДМДП интегральной микросхемы	111
Лабораторная работа 5.2	
Изучение техпроцесса изготовления КМДП интегральной микросхемы	119
Рекомендуемая литература	126
Приложение 1 Указания по технике безопасности	127
Приложение 2 Порядок выполнения измерений, проводимых на цифровом микроскопе KEYENCE VHX-2000	128

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение лабораторных работ направлено на углубление теоретических знаний, полученных на лекциях, на ознакомление студентов с современными технологиями производства интегральных микросхем. Представленный лабораторный практикум предназначен для оказания студентам помощи при выполнении лабораторных работ, а также при подготовке к ним.

Каждую работу сопровождает «Теоретическая часть», где рассмотрены вопросы, необходимые для понимания процессов и явлений, изучаемых по условиям учебного эксперимента, а также для теоретической подготовки по данной дисциплине.

В каждой лабораторной работе имеются контрольные вопросы, ответы на которые позволяют не только подготовиться к защите лабораторных работ, но и оценить степень усвоения соответствующего теоретического материала.

В лабораторном практикуме приведен список рекомендуемой литературы, который окажет существенную помощь при подготовке к лабораторным работам.

При подготовке лабораторного практикума использованы лабораторные образцы и методические рекомендации ЭЗ «Протон» г. Зеленоград.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1.1

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ, ТОПОЛОГИИ И КОНСТРУКЦИИ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Цель работы: изучить подложки гибридных интегральных микросхем (ГИС); изучить конструкции и топологии ГИС

Формируемые компетенции: ПК-2 (способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения); ОПК-5 (способность использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных); ОПК-7 (способность учитывать современные тенденции развития измерительной техники в своей профессиональной деятельности).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Гибридными интегральными микросхемами называются микросхемы, содержащие наряду с пленочными пассивными элементами дискретные активные компоненты.

Элемент интегральной микросхемы – часть интегральной микросхемы, выполняющая функцию какого-либо радиоэлемента, которая выполнена нераздельно от подложки или кристалла и не может быть выделена как самостоятельное изделие (ГОСТ 17021-88).

Примечание: под электрорадиоэлементом понимают транзистор, диод, резистор, конденсатор.

Компонент интегральной микросхемы – часть интегральной микросхемы, выполняющая функцию какого-либо радиоэлемента, которая может быть выделена как самостоятельное изделие (ГОСТ 17021-88).

Кристалл – часть полупроводниковой пластины, в объеме и на поверхности которой сформированы все элементы полупроводниковой интегральной микросхемы.

По технологии изготовления гибридные микросхемы могут быть тонкопленочные и толстопленочные. Элементы тонкопленочной ГИС получают путем последовательного нанесения проводящих, резистивных и диэлектрических слоев преимущественно методами термовакuumного осаждения и катодного распыления. Толщина наносимых пленок до 10^{-6} м. Необходимая конфигурация элементов достигается с помощью трафаретов в процессе нанесения пленки, либо путем избирательного химического травления нанесенной пленки. Элементы толстопленочной ГИС наносятся на подложку методами трафаретной печати путем продавливания паст (проводящих, диэлектрических, резистивных) через специальный сетчатый трафарет. Нанесенные на подложку пасты высушиваются, а затем вжигаются в подложку. Толщина наносимых пленок составляет от единиц до десятков микрометров.

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

Подложка интегральной микросхемы – заготовка, предназначенная для нанесения на нее элементов гибридных и пленочных ИМС, межэлементных и (или) межкомпонентных соединений, а также контактных площадок.

Плата интегральной микросхемы – часть подложки (подложка) гибридной или пленочной ИМС на поверхности которой сформированы все пленочные элементы, соединения и контактные площадки.

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

Параметры интегральных микросхем

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

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

где K – параметр, определяющий степень интеграции, значение которого округляют до ближайшего большего целого числа, N – количество элементов и компонентов ИМС.

В настоящее время существуют ИМС 1, 2, 3, 4, 5 и 6 степеней интеграции. ИМС первой степени содержат до 10 элементов и компонентов, второй – до 100 и т. д.

Интегральная плотность микросхемы ω характеризуется числом элементов и компонентов, приходящихся на единицу площади ИМС:

$$\omega = \frac{N}{S}, \quad (1.2)$$

где S – площадь микросхемы.

Интегральная плотность компонентов на подложке (кристалле) ω' – величина, характеризуемая количеством элементов и компонентов, приходящихся на единицу площади подложки (кристалла)

$$\omega' = \frac{N}{S'}, \quad (1.3)$$

где S' – площадь подложки микросхемы.

Подложки ГИС

Подложка предназначена для нанесения на нее элементов гибридной микросхемы, межэлементных и межкомпонентных соединений и контактных площадок. Подложка ГИС выполняет следующие функции:

- представляет собой конструктивную основу, на которой формируются и монтируются элементы ГИС;
- обеспечивает электрическую изоляцию элементов;
- служит теплоотводом.

Требования к подложкам

1. Высокая механическая прочность при малой толщине.
2. Минимальная пористость. Пористость подложки влияет на структуру и свойства пленок. Кроме того, в процессе нагрева из подложки выделяются адсорбированные газы, которые ухудшают качество наносимых пленок.

Высокая плотность подложки позволяет исключить интенсивное газовыделение.

3. Незначительное газовыделение в вакууме.
4. Высокие объемное и поверхностное удельное электрическое сопротивление и малый тангенс угла диэлектрических потерь. Это необходимо для электрической изоляции элементов схемы.
5. Температурные коэффициенты линейного расширения подложки и пленок должны быть предельно согласованы. Это необходимо для исключения возможности появления механических напряжений в пленках, которые ведут к изменению электрических свойств пленочных элементов.
6. Химическая инертность к осаждаемым веществам и травителям. В состав подложки не должны входить вещества, которые могут вступать в химические реакции с наносимыми пленками и реагентами, применяемыми в технологическом процессе
7. Физическая и химическая стойкость при нагреве до высоких температур. В ходе технологического процесса подложка подвергается многократному воздействию высокотемпературных операций, которые могут способствовать ее растрескиванию и разрушению.
8. Хорошая адгезия с осаждаемой пленкой.
9. Высокий коэффициент теплопроводности. Это необходимо для обеспечения эффективного теплоотвода при работе микросхемы.
10. Хорошая полируемость. Высокое качество рабочей поверхности необходимо для обеспечения четкости и прочности рисунка схемы, воспроизводимости электрических параметров элементов.
11. Низкая стоимость.

В полной мере перечисленным требованиям не удовлетворяет ни одна подложка. Некоторые требования находятся в противоречии друг к другу, например, низкая стоимость и чистота обработки поверхности подложки, поэтому выбор подложки основан на компромиссном решении.

Материалы подложек ГИС.

Подложки из ситалла широко применяются при изготовлении тонкопленочных и толстопленочных гибридных ИМС. Ситалл является стеклокерамическим материалом, получаемым термообработкой стекла. Ситалл отличается от стекла наличием микрокристаллической фазы, занимающей от 50 до 95 % всего объема. Это повышает механическую прочность ситалла (примерно в 2 раза) и улучшает его электрические свойства. Ситаллы различных марок содержат оксиды кремния (30 – 90 %), а также оксиды титана, магния, бора и др. Ситалл хорошо обрабатывается, полируется, обладает высокой химической стойкостью к кислотам, имеет малую пористость, малую газоотдачу при высоких температурах и выдерживает большие перепады температур.

Подложки из керамики на основе оксида алюминия Al_2O_3 широко применяются при изготовлении различных микросхем, преимущественно толстопленочных ГИС.

Керамические подложки сравнительно дешевы, имеют низкие потери, относительно высокую диэлектрическую проницаемость, малые температурные изменения электрофизических параметров, высокую теплопроводность, что позволяет изготавливать мощные схемы. К недостаткам керамических подложек следует отнести трудности, связанные с их полировкой – поверхность керамики после спекания всегда шероховатая, и вследствие этого шумы выше, чем у ситалла или поликора, а также относительно низкую механическую прочность.

Наибольшее распространение получили две группы керамики, отличающиеся содержанием оксида алюминия. В первую группу, для которой содержание оксида алюминия составляет 98 – 99 %, входят такие керамики, как А-995, ГМ, сапфирит, и др. Керамики первой группы применяются преимущественно для подложек СВЧ микросхем.

Во вторую группу, для которой содержание оксида алюминия составляет 93 – 96 %, входят такие керамики, как 22ХС, ВВХ и др. Керамика

22ХС получается путем спекания порошка на основе монокристаллической окиси алюминия. Обладает малыми диэлектрическими потерями, высокой химической стойкостью, высокой теплопроводностью, малой пористостью, стойкостью к воздействию высоких температур. Керамики второй группы применяются преимущественно для подложек толсто пленочных микросхем. Шероховатая поверхность керамики способствует повышению адгезии при вжигании проводящих, резистивных и диэлектрических паст толсто пленочных микросхем. Увеличение содержания Al_2O_3 в керамике значительно улучшает ее свойства: увеличивается ее механическая прочность, теплопроводность.

Керамические подложки на основе окиси бериллия BeO (брокерит) используют для мощных ГИС, так как они имеют теплопроводность на порядок выше, чем обычные керамики на основе оксида алюминия. Однако при обработке и получении бериллиевой керамики выделяется токсичная пыль, поэтому необходимо принимать специальные меры предосторожности, усложняющие производство и ограничивающие применение брокерита.

Поликор – керамика на основе поликристаллической окиси алюминия Al_2O_3 (корунда) с предельно высокой плотностью. Поликор содержит около 99,8 % оксида алюминия. В поликоре сочетаются относительно высокая диэлектрическая проницаемость с малыми диэлектрическими потерями на СВЧ. Поликор проявляет особо высокую нагревостойкость и сохраняет электрические характеристики до температуры 400 °С, механические – до 1600 °С. Благодаря высокой плотности – 3,97 г/см³, практически равной плотности Al_2O_3 , можно обеспечить высокую чистоту обработки поверхности. Подложки из поликора применяются преимущественно при изготовлении тонкопленочных и тонкопленочных гибридных СВЧ ИМС.

Подложки из кварца применяются для создания в микросхемах стабильных фильтров, генераторов и других активных элементов на основе пьезоэлектрических свойств.

Металлические подложки, покрытые слоем диэлектрика толщиной 40 – 60 мкм, применяются для изготовления тонкопленочных гибридных ИМС в случаях, когда требуется обеспечить хороший теплоотвод, высокую механическую прочность и жесткость конструкции. Для этих целей используют алюминиевые пластины с анодированной поверхностью, стальные пластины, покрытые стеклом или полиимидным лаком, и др. Металлические подложки, также как и керамические, могут являться элементом корпуса ИМС.

Гибкие подложки из полимерных материалов используются для создания тонкопленочных гибридных ИМС, БИС и микросборок. Наибольшее распространение получили полиимидные пленки толщиной 40 – 50 мкм (до 100 мкм). Полиимид – класс термостойких полимеров, природа молекул которых определяет высокую прочность, химическую стойкость, тугоплавкость. Полиимидная пленка работоспособна при температуре 200 °С в течение нескольких лет. Она легко подвергается травлению в концентрированных щелочах, что позволяет создавать в ней сквозные отверстия и получать электрические переходы при формировании многослойной металлической разводки, допускает 2-х стороннюю обработку, вакуумное нанесение пленочных материалов. Имеет малую толщину и массу, высокую ударопрочность и изгибистость, способна принимать форму корпуса сложной конструкции. Недостатком является сравнительно высокое влагопоглощение (1 – 3 % за 30 суток), поэтому полиимидная пленка нуждается в технологической сушке и защите.

Подложки из сапфира являются перспективными для применения в различных типах микросхем, как тонкопленочных гибридных, так и полупроводниковых, преимущественно ВЧ и СВЧ – диапазонов. Сапфир представляет собой монокристаллический оксид алюминия. Он обладает весьма малыми диэлектрическими потерями в СВЧ диапазоне, высокой теплопроводностью, механической прочностью, химической стойкостью,

устойчивостью к воздействию высокой температуры, влаги, излучений. Сапфир хорошо полируется до 14 класса чистоты.

На сапфире возможно осаждение кремния, арсенида галлия и др. с целью создания активных элементов и формирования на подложке микросхем типа «кремний на сапфире». Широкое применение сапфировых подложек ограничивается трудностями его изготовления и высокой стоимостью.

Для тонкопленочных ИМС наиболее широкое распространение получили ситалл и поликор, а также металлические подложки с изолирующим покрытием, гибкие подложки из полимерных материалов. Для толстопленочных схем наиболее часто применяют керамические подложки.

Габаритные размеры тонкопленочных подложек стандартизированы. Подложки из стекла имеют размеры 50×50, 48×60, 60×96, 100×100, 96×120 мм, из керамики и ситалла – 48×60, 60×96, 96×120 мм, из сапфира – 24×30 мм. Обычно на стандартной подложке групповым методом изготавливают несколько плат ГИС. Толщина подложек составляет 0,6 – 1 мм. Размеры подложек толстопленочных ГИС не стандартизированы. На одной подложке изготавливают, как правило, одну схему.

Основные параметры подложек ГИС приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры подложек микросхем.

Материал подложки	Диэлектрическая проницаемость ε ($f=10^{10}$ Гц, $T=20$ °C)	Тангенс угла диэл. потери $tg\sigma \times 10^{-4}$ ($f=10^{10}$ Гц, $T=20$ °C)	Коэффициент теплопроводности λ Вт/(м·град)	Температурный коэффициент линейного расширения $\times 10^{-7}$ град ⁻¹
Ситалл СТ-38-1	7,3 – 7,8	15	3,8	38
Сапфир	9,9	1	25,1	50 – 67
Поликор (99,8%)	9,8	1	25,1	75
А-995 (99,8 %)	9,65	1	16,7	62
ГМ (99,6 %)	9,8	1	16,7 – 25,1	80
Сапфирит (98 %)	9,3 – 9,6	1	20,9 – 25,1	–
22ХС (94,4 %)	9,3	10	13,4	61

Брокерит (97 %)	6,8	6	167	75 – 92
Кварц	3,78	1	5,9 – 9,6	5,5

Элементы ГИС

Основными пассивными элементами ГИС являются пленочные резисторы, конденсаторы, индуктивности, проводники и контактные площадки.

Резисторы

Пленочные резисторы выполняются в виде пленки, нанесенной на подложку и двух контактных площадок.

На рис. 1.1 приведены типичные конструкции резисторов. Наиболее распространены резисторы прямоугольной формы как самые простые в изготовлении.

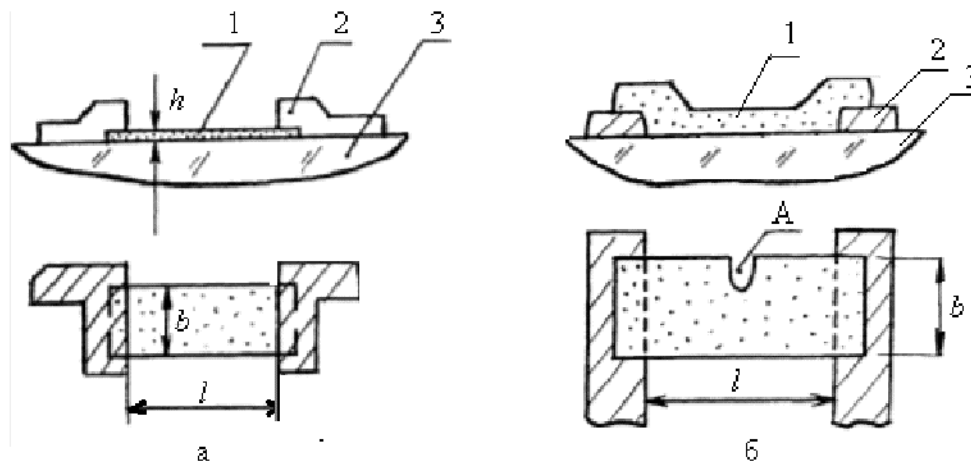


Рис. 1.1. Конструкции прямоугольных резисторов (а – тонкопленочный б – толстопленочный). 1 – резистор; 2 – контактная площадка; 3 – подложка; А – участок подгонки.

Тонкопленочные резисторы с большим номинальным сопротивлением (резисторы большой длины) изготавливают в виде меандра (рис 1.2 б) или составных полосок (рис. 1.2 а) в зависимости от метода формирования конфигураций элементов.

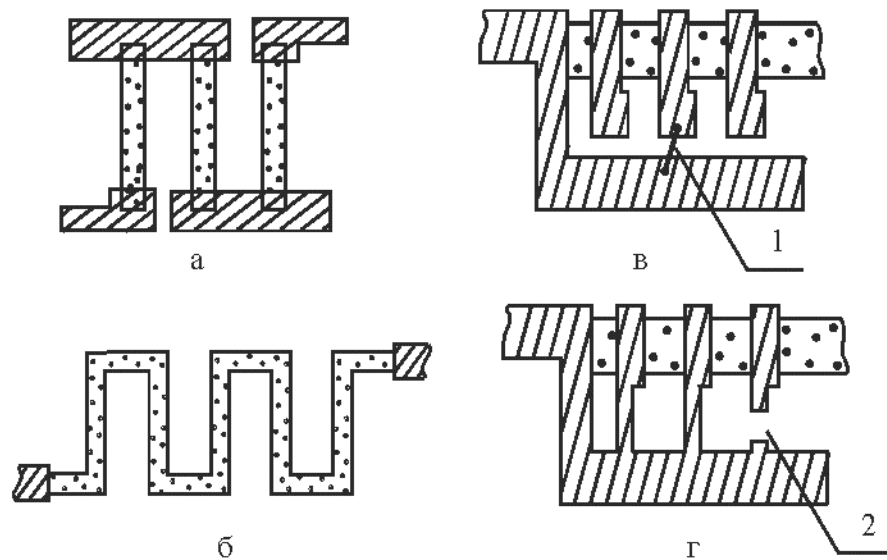


Рис. 1.2. Форма тонкопленочных резисторов: а) составные полоски; б) меандр; в, г) подстроечные. 1 – проволоочная перемычка; 2 – участок реза.

Наиболее простые по форме – толстопленочные резисторы, но они в процессе изготовления для получения заданной точности требуют лазерной подгонки. Они формируются в последнюю очередь и располагаются поверх контактных площадок в отличие от тонкопленочных резисторов (сравн. рис. 1.1 а и 1.1 б). Толщина тонкопленочных резисторов много меньше, чем проводников. Кроме того, резистивные пленки являются адгезионным подслоем для контактных площадок.

Толщина резистивной пленки одна и та же для всех одновременно изготавливаемых резисторов. Поэтому можно ввести понятие поверхностное удельное сопротивление резистивной пленки ρ_s , это величина, численно равная сопротивлению резистивной пленки квадратной формы с произвольным размером сторон. Оно связано с удельным сопротивлением материала ρ следующим образом:

$$\rho_s = \rho/h, \text{ Ом}/\square, \quad (1.4)$$

где h – толщина пленки.

Обозначим K_ϕ – коэффициент формы резистора или число квадратов.

$$K_\phi = l/b, \quad (1.5)$$

где l – длина резистора, b – его ширина. Тогда сопротивление любого пленочного резистора

$$R = \rho_s \cdot K_\phi, \text{ Ом.} \quad (1.6)$$

Действительно, для двух пленочных резисторов, изготовленных из одного материала, имеем (рис. 1.3)

$$R_1 = \rho_s \cdot K_{\phi 1}; R_2 = \rho_s \cdot K_{\phi 2};$$

$$K_{\phi 1} = K_{\phi 2} = 5;$$

Тогда

$$R_1 = R_2.$$

Т. е. сопротивление резистора определяется материалом пленки, его толщиной, коэффициентом формы и не зависит от размеров квадрата.

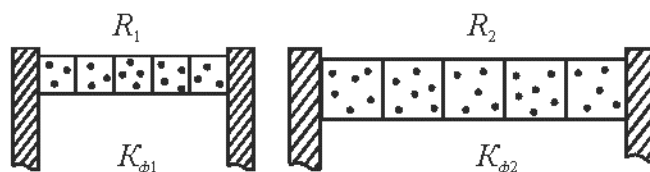


Рис. 1.3. Сопротивления пленочных резисторов не зависят от геометрических размеров при одинаковых ρ_s и K_ϕ .

Материал, используемый для резистивных пленок, должен обеспечивать возможность получения широкого диапазона номинальных значений сопротивления, обладать низким температурным коэффициентом сопротивления, высокой коррозионной стойкостью и стабильностью параметров во времени. Для формирования тонкопленочных резисторов используют хром, тантал с удельным поверхностным сопротивлением 100 – 200 Ом/□. Нихромовые пленки толщиной 20 – 50 нм имеют удельное поверхностное сопротивление от 50 до 300 Ом/□. Для получения резистивных пленок с удельным поверхностным сопротивлением более 1 кОм/□ используют керметы, которые представляют собой композицию металлов и керамики. Однако свойства керметных пленок в сильной степени зависят от технологических факторов, и резисторы имеют худшую воспроизводимость номиналов и больший температурный коэффициент сопротивления по сравнению с металлическими.

Конденсаторы

Пленочные конденсаторы представляют собой многослойную структуру, выполненную из двух металлических обкладок, разделенных слоем диэлектрика. Конструкции пленочных конденсаторов приведены на рис. 1.4.

Емкость пленочного конденсатора C определяется по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{d} S, \quad (1.7)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика, ε_0 – электрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, d – толщина диэлектрика, S – площадь перекрытия обкладок.

Удельная емкость

$$C_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{d}. \quad (1.8)$$

Тогда емкость конденсатора

$$C = C_0 S. \quad (1.9)$$

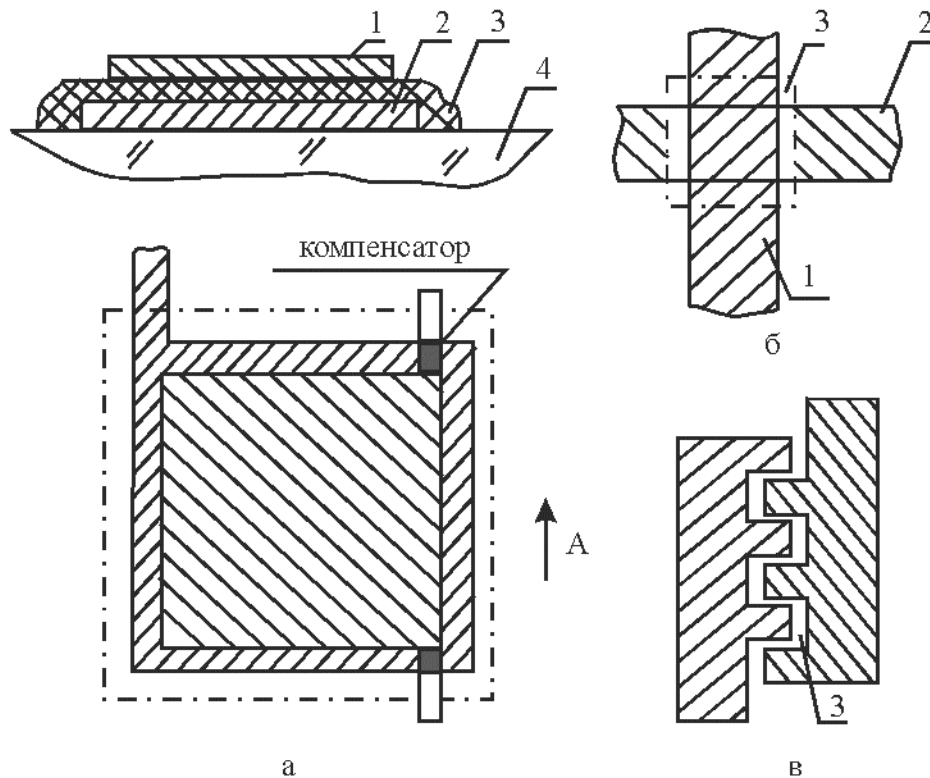


Рис. 1.4. Конструкции пленочных конденсаторов с площадью верхней обкладки более 1 мм^2 (а); с площадью верхней обкладки до 1 мм^2 (б); гребенчатый (в): 1, 2 – верхняя и нижняя обкладки; 3 – диэлектрик; 4 – подложка

Для устранения погрешности совмещения служит компенсатор, который располагают против вывода верхней обкладки. При смещении верхней обкладки в направлении стрелки А (рис. 1.4), площадь перекрытия под пленочным проводником (показана темным цветом) увеличивается, а под компенсатором – настолько же уменьшается. В результате общая площадь перекрытия, а, следовательно, и емкость конденсатора останутся без изменений. При смещении верхней обкладки в направлении, противоположном стрелке А, емкость также останется без изменений. При большой площади верхней обкладки эта погрешность мала и компенсатор не применяют.

На рис. 1.4 б приведена конструкция конденсатора с площадью обкладки менее 1 мм^2 . Емкость такого конденсатора определяется площадью перекрытия обкладок, смещение которых не влияет на его емкость.

В гребенчатых конденсаторах емкость определяется диэлектрическим зазором между зубьями гребенок (рис. 1.4 в). Гребенчатые конденсаторы имеют малую емкость.

Конструкции подстроечных конденсаторов представлены на рис. 1.5. Подстройка таких конденсаторов аналогична подстройке резисторов (см. рис. 1.2 в, г). Подгонка пленочных конденсаторов осуществляется надрезанием верхней обкладки лучом лазера.

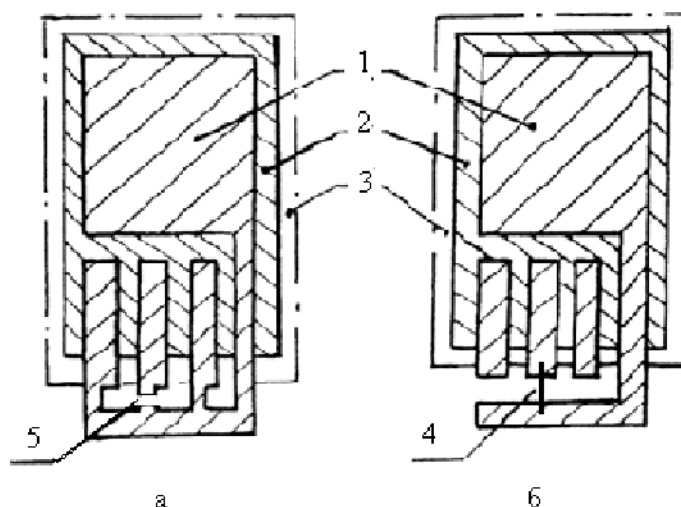


Рис. 1.5. Конструкции подстроечных конденсаторов с разрезаемыми (а) и привариваемыми (б) перемычками: 1,2 – верхняя и нижняя обкладки; 3 – диэлектрик; 4 – перемычка; 5 – область реза

Индуктивности.

Конструкции пленочных индуктивных элементов в виде круглой и прямоугольной спиралей приведены на рис. 1.6. Прямоугольная форма спирали предпочтительней как более технологичная и обеспечивающая более высокую интегральную плотность.

Пленочные индуктивные элементы характеризуются индуктивностью L и добротностью Q .

Индуктивность численно равна магнитному потоку, охватываемому контуром (пленочной спиралью) при силе тока в контуре равной 1 А:

$$L = \frac{\Phi}{I}, \quad (1.10)$$

где Φ – магнитный поток, I – сила тока.

Добротность – отношение реактивного сопротивления пленочной спирали к ее активному сопротивлению:

$$Q = \frac{\omega L}{R}, \quad (1.11)$$

где ω – круговая частота, R – активное сопротивление.

Пленочные индуктивные элементы имеют индуктивность $L = 0,1 - 10$ мкГн и добротность $Q = 50 - 200$.

Малая индуктивность объясняется плоской конструкцией пленочной спирали, в которой трудно сконцентрировать магнитный поток, а низкая добротность – относительно высоким сопротивлением пленочного проводника спирали.

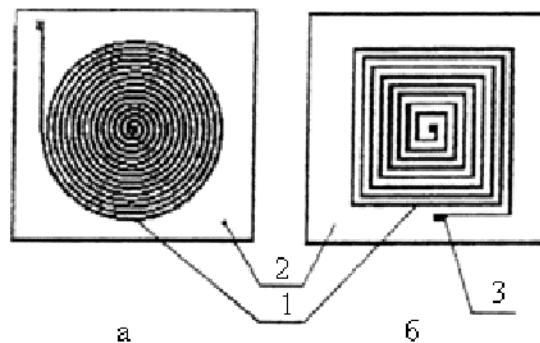


Рис. 1.6. Конструкции пленочных индуктивных элементов в виде круглой (а) и прямоугольной (б) спиралей: 1 – пленочный проводник; 2 – подложка; 3 – контактная площадка

В ГИС не всегда целесообразно, а иногда и невозможно изготовить пленочные пассивные элементы с заданными параметрами. В таких случаях применяют резисторы, конденсаторы и индуктивности в виде компонентов.

Компоненты ГИС

В качестве компонентов ГИС применяют диоды, транзисторы а так же диодные и транзисторные матрицы, полупроводниковые ИМС, конденсаторы, наборы прецизионных резисторов и конденсаторов, индуктивности, дроссели, трансформаторы. Компоненты могут иметь жесткие и гибкие выводы.

Способ монтажа компонентов на плату должен обеспечить фиксацию положения компонента и выводов, сохранение его целостности, параметров и свойств, а также отвод теплоты, сохранение целостности ГИС при термоциклировании, стойкость к вибрациям и ударам.

Монтаж компонентов с гибкими выводами наиболее прост, так как уменьшается количество пересечений пленочных проводников, ведь гибкие выводы могут идти поверх защищенной пленочной разводки. Недостатки метода – высокая трудоемкость операций монтажа, т. к. каждый вывод припаивается (приваривается) отдельно, как следствие, низкая надежность, трудность автоматизации. Монтаж компонентов с жесткими выводами, напротив, позволяет автоматизировать процесс, снизить трудоемкость монтажа, повысить надежность. Но при этом усложняется топология проводников и межсоединений, и изготовление жестких выводов технологически намного сложнее, чем гибких.

Корпусные и бескорпусные ГИС

Корпусные и бескорпусные ГИС характеризуются различной ненадежностью, помехозащищенностью, технологичностью, что определяет их стоимость и область применения. Бескорпусные ГИС проще по конструкции, более технологичны и дешевы, но имеют меньшую помехозащищенность и надежность по сравнению с корпусными ГИС. В

качестве защитных покрытий бескорпусных ГИС используют лаки, смолы, легкоплавкие стекла, эмали, компаунды и пр.

Платы корпусных ГИС крепят к основанию корпуса клеем или специальной клеевой пленкой с перфорацией для растекания клея в процессе термообработки при сушке. Платы СВЧ микросхем имеют металлизированную обратную сторону подложки. Их крепят к основанию корпуса пайкой или сваркой. Возможно механическое крепление платы к основанию корпуса, а также заливка стеклоэмалью.

Топология ГИС

Под топологией понимается взаимное размещение и соединение элементов микросхем. Примеры топологий приведены на рис. 1.7 – 1.8.

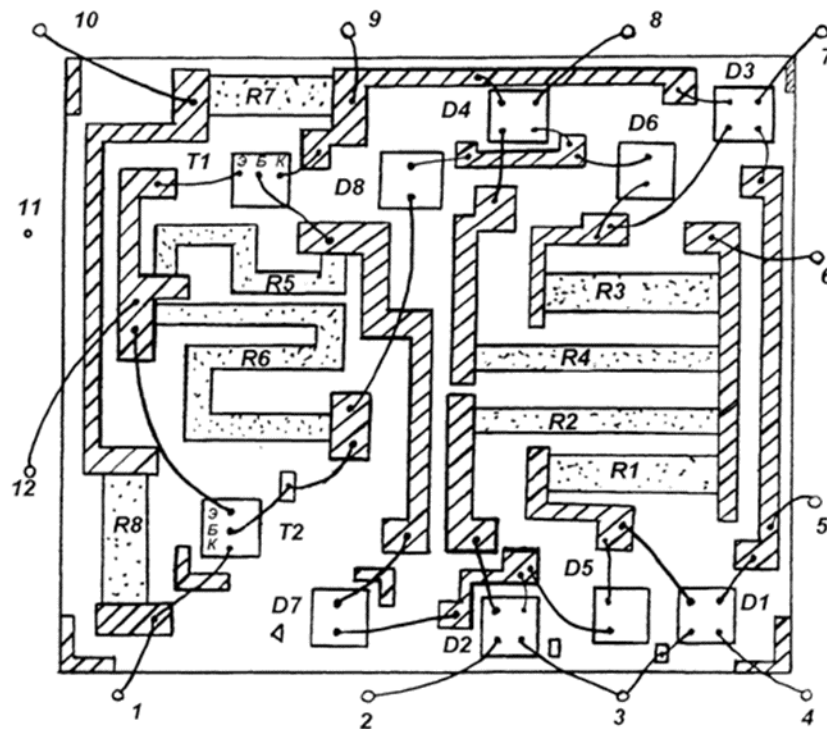


Рис. 1.7. Топология тонкопленочной ГИС

резистивный слой;

 проводящий слой.

Исходными данными для разработки топологии являются:

- технология изготовления (тонкопленочная, толстопленочная и др.), принятая для микросхем данной серии;
- принципиальная электрическая схема;

- принятый способ защиты (корпусная, бескорпусная).

При разработке топологии учитываются технологические, схемотехнические и конструктивные требования и ограничения.

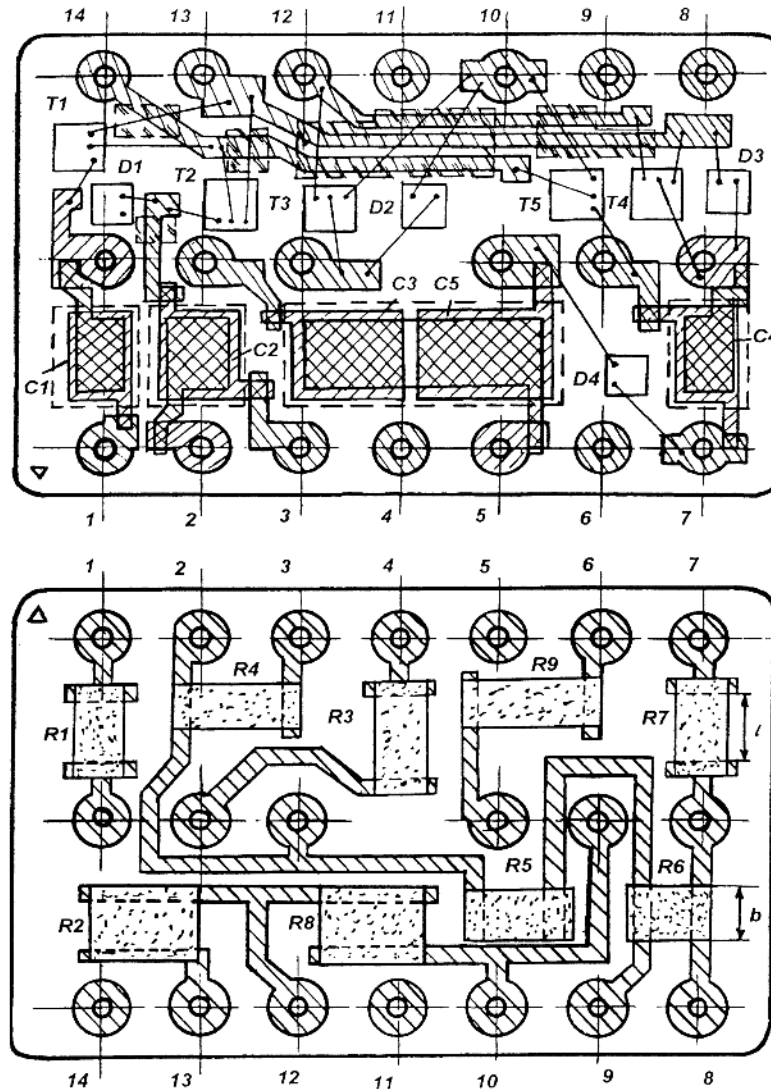


Рис. 1.8. Толсто пленочная ГИС

	резистивный слой;
	верхняя обкладка конденсатора и проводящий слой;
	нижняя обкладка конденсатора и проводящий слой;
	диэлектрик конденсатора;
	защитный слой.

Технологические требования и ограничения

1. Минимальная ширина пленочных проводников:
 - 100 мкм при масочном способе;
 - 50 мкм при фотолитографическом способе.

2. Минимально допустимое расстояние между пленочными элементами:

- 300 мкм при масочном способе;
- 100 мкм при фотолитографическом способе.

3. Не допускается установка навесных компонентов на пленочные конденсаторы, индуктивности и пересечения пленочных проводников. Допускается установка навесных компонентов на пленочные проводники и резисторы, защищенные диэлектриком.

4. Минимальные расстояния между навесными компонентами – 0,4 мкм.

5. Максимальная длина гибкого вывода без дополнительного закрепления – 3,0 мм.

Примечание. Дополнительное закрепление производится точечным приклеиванием гибкого вывода к подложке.

6. Топологические чертежи должны выполняться в прямоугольной системе координат. Применение наклонных линий не рекомендуется. Наклонные линии допускаются только в тех случаях, когда их использование приводит к существенному упрощению формы пленочного элемента.

Схемотехнические требования и ограничения

1. Входная и выходная цепи микросхемы должны быть максимально разнесены на плате для минимизации паразитных обратных связей между входом и выходом.

2. Компоненты (элементы) большой мощности необходимо располагать в центре платы для улучшения теплоотвода.

К схемотехническим относятся также ограничения по мощности, частоте, помехозащищенности и др.

Конструктивные требования и ограничения

1. Для всех микросхем данной серии необходимо использовать унифицированные (одинаковые) корпуса. Для бескорпусных микросхем следует применять унифицированное защитное покрытие.

2. Каждый корпус должен иметь ключ, обозначающий первый вывод микросхемы.

3. Каждая плата должна иметь ключ в виде нижней левой контактной площадки с вырезом или специального знака, например, в форме треугольника.

4. Контактные площадки рекомендуется располагать по периферии платы.

Приведенные технологические, схемотехнические и конструктивные требования и ограничения – это отдельные примеры, иллюстрирующие их сущность. Полное изложение требований и ограничений, учитываемых при разработке топологии, приводится в руководящих технических материалах предприятий, изготавливающих микросхемы.

Пленочная часть микросхемы состоит из нескольких слоев: резистивных, проводящих, диэлектрических.

Последовательность нанесения слоев тонкопленочной гибридной микросхемы

- 1) резисторы;
- 2) проводники и контактные площадки;
- 3) межслойная изоляция;
- 4) проводники;
- 5) нижние обкладки конденсаторов;
- 6) диэлектрик конденсаторов;
- 7) верхние обкладки конденсаторов;
- 8) защитный слой.

В зависимости от номенклатуры элементов микросхемы и от ее сложности некоторые слои могут отсутствовать. Каждый пленочный слой микросхемы изготавливается с помощью масок или фотошаблонов.

Последовательность нанесения слоев толсто пленочной микросхемы

- 1) проводники, контактные площадки и нижние обкладки конденсаторов;
- 2) диэлектрик конденсаторов;
- 3) верхние обкладки конденсаторов;
- 4) резисторы;
- 5) защитный слой.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) лабораторный макет, состоящий из кассет с образцами для изучения гибридных интегральных микросхем;
- 2) микроскоп;
- 3) лупа.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ в приложении 1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучение подложек ГИС

В кассете представлены образцы подложек: ситалл (СТ 38-1); поликор; керамика; титалан; полиимид.

Изучите характерные признаки внешнего вида подложек (матовая или зеркальная поверхность, цвет). Укажите область применения подложек, параметры и характеристики, определяющие их применение. Результаты занесите в таблицу результатов 1.1.

2. Изучение конструкций ГИС

Внимательно рассмотрите каждую микросхему. Определите тип микросхемы – пленочная или гибридная; тонкопленочная или толсто пленочная. По обозначению ИМС определите номер серии.

Найдите на микросхеме ключ, пассивные, активные, технологические и конструктивные элементы. Определите количественные параметры ИМС –

степень интеграции, интегральную плотность. Для расчета используйте данные таблицы 2. Результаты занесите в таблицу результатов 1.2.

Выполните эскиз топологии по указанию преподавателя и обозначьте на топологии элементы принципиальной электрической схемы. Топологию выполняйте на листе миллиметровой бумаги формата А4 в масштабе 10:1. Точное соблюдение размеров элементов не требуется.

Найдите на схеме ключ. На топологии он должен находиться в левом нижнем углу платы.

Для толстопленочных микросхем необходимо выполнить топологию обеих сторон платы. Заштрихуйте элементы так, как это показано на примерах, приведенных на рис. 1.7 – 1.8.

По указанию преподавателя определите отношение номиналов двух резисторов и емкостей конденсаторов.

Таблица 2. Функциональное назначение ИМС

Обозначение микросхемы	Выполняемая функция	Общее количество элементов	Размеры подложки, мм	Размер корпуса, мм
ЧИМ-1-012-С	Частотно-импульсный модулятор	49	32×20	39×29
ЧИМ-7-22910	Частотно-импульсный модулятор	66	32×20	39×29
ЧИМ-1-013-У	Частотно-импульсный модулятор	56	32×20	39×29
ЧИМ-1-009-У	Частотно-импульсный модулятор	56	32×20	39×29
230 ИК	Цифровое устройство комбинированное	30	34×23	36×24
К264ГФ1	Генератор сигналов специальной формы	6	11,4×11,4	11,8×11,8
221ЛР1	Логический элемент И-ИЛИ-НЕ	19	16×9	16,2×9,2
218ТК1	Триггер с комбинированным запуском	27	16×8	19,5×14,5
ЧД-1	Частотный детектор	69	20×16	30×20

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;

- 3) таблица результатов 1.1;
- 4) таблица результатов 1.2;
- 5) эскиз топологии с обозначениями элементов;
- 6) результаты расчетов отношений номиналов двух резисторов и конденсаторов;
- 7) выводы.

Таблица результатов 1.1. Подложки ГИС

№ п/п	Материал подложки	Характерные признаки внешнего вида	Область преимущественного применения (для каких типов ИМС)	Параметры и характеристики, определяющие область применения

Таблица результатов 1.2. Характеристики и параметры ГИС

№	Обозна чение ИМС	Тип ИМС	Выполняемая функция	Общее кол-во эл-тов	В том числе						Параметры			Способ монтажа компонентов
					Пленочные		Навесные	Транзисторы, диоды	Кристаллы	Прочее	K	$\frac{\omega}{\text{мм}^2}$	$\frac{\omega'}{\text{мм}^2}$	
					R	C								

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется гибридной микросхемой?
2. Что такое элементы и компоненты микросхемы?
3. Какими параметрами характеризуются микросхемы?
4. Что такое тонкопленочная и толстопленочная микросхемы? Каковы характерные признаки этих микросхем?

5. Какие конструкции пленочных резисторов, конденсаторов и индуктивных элементов Вам известны?
6. Какими параметрами характеризуются пленочные резисторы, конденсаторы и индуктивные элементы?
7. Что такое топология интегральной микросхемы?
8. Что такое активные и пассивные элементы ИМС?
9. Каким требованиям должны удовлетворять подложки микросхем?
10. Каково назначение различных типов подложек?
11. Каким образом реализуется изоляция элементов в микросхемах?
12. Что называется контактной площадкой и корпусом ИМС? Для чего они предназначены?
13. Приведите примеры технологических требований и ограничений.
14. Приведите примеры схемотехнических требований и ограничений.
15. Приведите примеры конструктивных требований и ограничений.
16. Оцените сопротивление пленочного резистора, указанного преподавателем, при заданном поверхностном сопротивлении ρ_s .
17. Какова последовательность нанесения слоев тонкопленочной ГИС?
18. Какова последовательность нанесения слоев толстопленочной ГИС?

ЛИТЕРАТУРА

1. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок. Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. §§ 5.1 – 5.7.
2. Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И. и др. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1984. §§ 3.1 – 3.7.
3. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники, М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. §§ 6.11, 6.12, 7.12.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2.2

ИЗУЧЕНИЕ ТОПОЛОГИИ И КОНСТРУКЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.

Цель работы:

1. Изучить конструкцию и зарисовать эскизы топологии активных и пассивных элементов полупроводниковых ИМС.
2. Произвести оптические измерения топологических размеров элементов.

Формируемые компетенции: ПК-2 (способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения); ОПК-5 (способность использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных); ОПК-7 (способность учитывать современные тенденции развития измерительной техники в своей профессиональной деятельности).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Конструкция и топология элементной базы полупроводниковых ИМС

Резисторы

Резисторы полупроводниковых ИМС формируются на основе слоев: эмиттерного, базового и базового под эмиттерным (пинч-резисторы). Реже используют слои, полученные ионным легированием. Так как базовый и эмиттерный слои получают диффузией, то и резисторы называют диффузионными.

Широкое применение диффузионных резисторов в полупроводниковых микросхемах определяется возможностью формирования их в едином технологическом цикле одновременно с базовыми и эмиттерными областями биполярных транзисторов. Это упрощает технологический процесс.

На рис. 2.1а приведена конструкция диффузионного резистора на основе базового p -слоя. Величину сопротивления резистора R определяют по

формуле:

$$R = \rho_S l / b = \rho_S K_\phi \quad (2.1)$$

где: ρ_S – удельное поверхностное сопротивление базового слоя, Ом/□; l – длина резистора; b – ширина резистора; K_ϕ – коэффициент формы резистора.

Как видно из рисунка, резистор 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 алюминиевых проводников металлизации.

На рис. 2.1б приведена конструкция диффузионного резистора в эмиттерном слое. Такие резисторы 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 так называемые пинч-резисторы. В них удастся существенно повысить удельное поверхностное сопротивление ρ_S за счет уменьшения площади поперечного сечения. На рис. 2.1в показана конструкция пинч-резистора в базовом слое, толщина которого уменьшена за счет эмиттерного слоя до величины $d - d_1$. У пинч-резистора n^+ - и p -слои закорочены металлизацией и соединены с выводом резистора, находящимся под большим положительным потенциалом, чем остальные области структуры. Такое соединение обеспечивает обратное смещение на всех переходах p - n -переходах пинч-резистора.

Конструкция ионно-легированного резистора практически не отличается от конструкции, приведенной на рис. 2.1б. Однако технология ионного легирования позволяет получить тонкие слои с высоким значением удельного поверхностного сопротивления.

Таблица 4. Характеристики интегральных резисторов

Тип резисторов	Толщина слоя, d , мкм	Удельное поверхностное сопротивление, ρ_s , Ом/□	Допуск, %
Диффузионный на базовом слое	$2,5 \div 3,5$	$100 \div 300$	$\pm(5 \div 20)$
Диффузионный на эмиттерном слое	$1,2 \div 2,5$	$1 \div 10$	± 20
Пинч – резистор	$0,5 \div 1,0$	$1000 \div 3000$	± 30

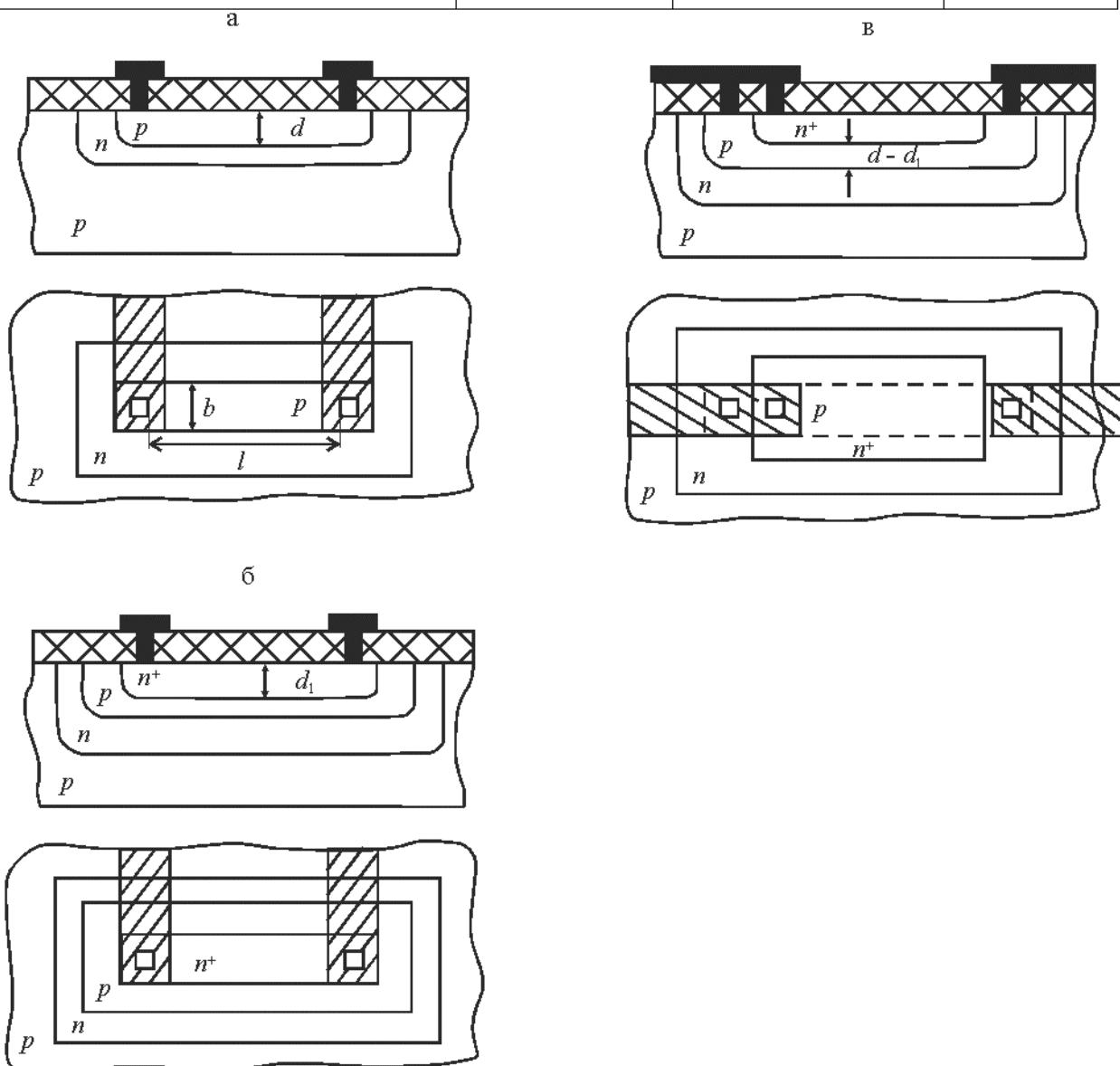


Рисунок 2.1. Конструкция резисторов: а – диффузионного в базовом слое; б – диффузионного в эмиттерном слое; в – пинч-резистора на базовом слое.

Конденсаторы

В интегральных полупроводниковых конденсаторах роль обкладок выполняют легированные полупроводниковые области или напыленные

металлические пленки, роль диэлектрика могут выполнять обедненные слои обратнo смещенных p – n переходов (диффузионный конденсатор) или пленка окисла кремния (МДП-конденсатор). На рис. 2.2. приведена конструкция МДП-конденсатора. Нижняя обкладка такого конденсатора образована n^+ -эмиттерным слоем, диэлектриком является оксид кремния, а верхняя обкладка алюминиевая. МДП-конденсатор полностью совместим с технологией производства полупроводниковых ИМС, и не требует дополнительных технологических операций.

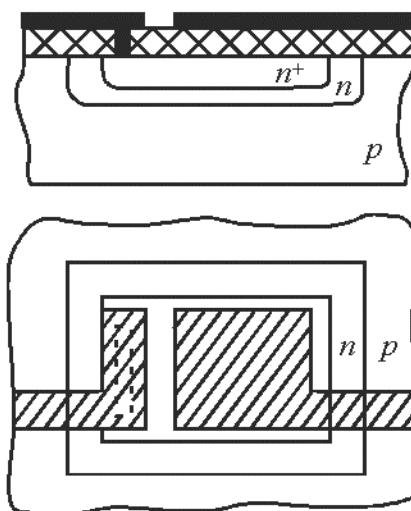


Рисунок 2.2. МДП-конденсатор.

Величина емкости конденсатора определяется по формуле:

$$C = C_0 \cdot S \quad (2.2)$$

где: $C_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{d}$ – удельная емкость проводящего слоя на пластину, пФ/мм²; S – площадь перекрытия обкладок; ε – диэлектрическая проницаемость окиси кремния; d – толщина диэлектрика.

Для получения больших удельных емкостей необходимо применять тонкий диэлектрик, однако это приводит к уменьшению пробивного напряжения конденсатора.

Для формирования диффузионных конденсаторов используются барьерные емкости обратнo-смещенных p – n -переходов: эмиттер – база, база – коллектор и коллектор – подложка. Конструкция диффузионного

конденсатора совпадает с конструкцией транзистора (рис. 2.4) и отличается числом выводов, которых по числу обкладок будет два. Использование данных конденсаторов имеет особенность: p - n -переход, используемый в качестве конденсатора, должен быть во всех режимах работы смещен в обратном направлении.

Таблица 5. Параметры интегральных конденсаторов

Тип конденсатора	Удельная емкость, C_0 , пФ/мм ²	Пробивное напряжение $U_{пр}$, В	Добротность, Q , отн.ед.	Допуск, %
МДП с диэлектриком:				
SiO_2	200 ÷ 600	30 ÷ 50	25 ÷ 80	±20
Si_3N_4	800 ÷ 1600	50	20 ÷ 1100	±20
Диффузионный на p - n -переходах				
Б-К	150		50 ÷ 100	± 15 - 20
Э-Б	600		5 ÷ 20	+20
К-П	100		—	± 15 - 20

Диоды

Диоды полупроводниковых ИМС можно сформировать на любом из p - n -переходов планарно-эпитаксиального транзистора. Наиболее удобны для этих целей переходы эмиттер – база и база – коллектор. Пять возможных вариантов диодного включения транзисторов приведены на рис. 2.3, где в качестве диода используются: переход база – эмиттер с коллектором, закороченным на базу (а); переход коллектор – база с эмиттером, закороченным на базу (б); переход эмиттер – база с разомкнутой цепью коллектора (в); параллельное включение обоих переходов (г); переход база – коллектор с разомкнутой цепью эмиттера (д).

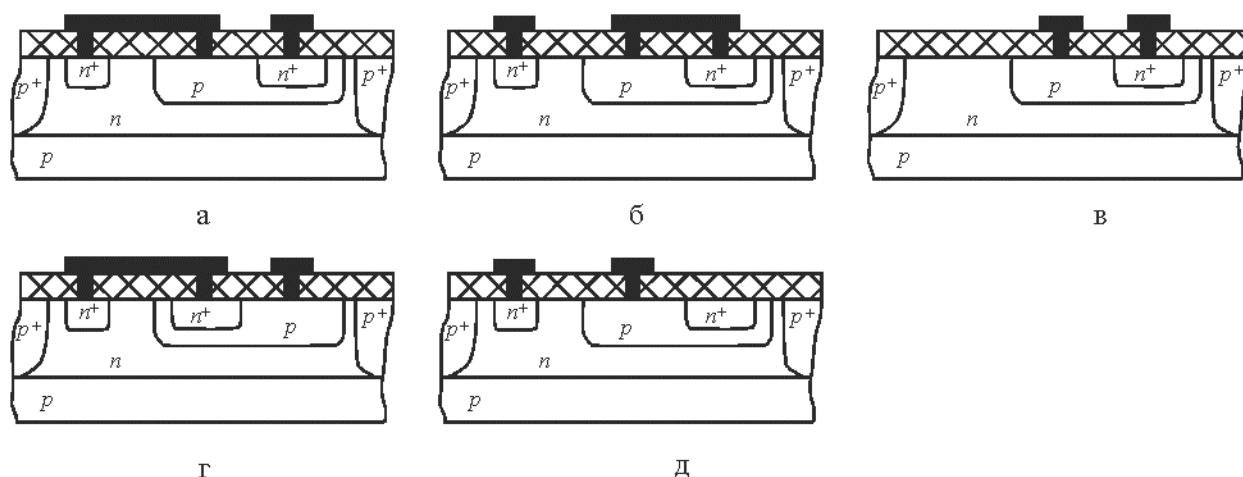


Рисунок 2.3. Диодное включение транзисторов:
а) БК – Э; б) БЭ – К; в) Б – Э; г) Б – КЭ; д) Б – К.

При соответствующем выборе варианта диодного включения транзистора возможно подобрать оптимальные параметры по быстродействию, пробивному напряжению, обратному току.

Таблица 6. Параметры диодов

Вариант диодного включения транзистора	Пробивное напряжение, $U_{пр}$, В	Обратный ток, $I_{обр}$, нА	Быстродействие, время восстановления обратного тока, τ , 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

Биполярные транзисторы

В полупроводниковых ИМС биполярный n - p - n -транзистор является основным схемным элементом. 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.

Простейшая конструкция биполярного транзистора n^+ - p - n приведена на рис. 2.4. Эмиттер транзистора сильно легируют до получения максимального коэффициента инжекции. Базу транзистора для повышения коэффициента переноса делают тонкой и низколегированной, так, чтобы толщина базы (ω_B) была намного меньше диффузионной длины инжектированных в базу

электронов. Под коллектором располагают низкоомный слой n^+ (скрытый слой). Назначение скрытого слоя – уменьшение сопротивления коллектора при работе транзистора в режиме насыщения. В тех случаях, когда транзистор не переходит в режим насыщения, скрытый слой не делают.

Область коллекторного контакта дополнительно легируют до n^+ . Необходимость этого вызвана тем, что алюминий, диффундируя в коллектор, образует области p -типа и паразитный p - n -переход, т. к. трехвалентный алюминий является акцептором.

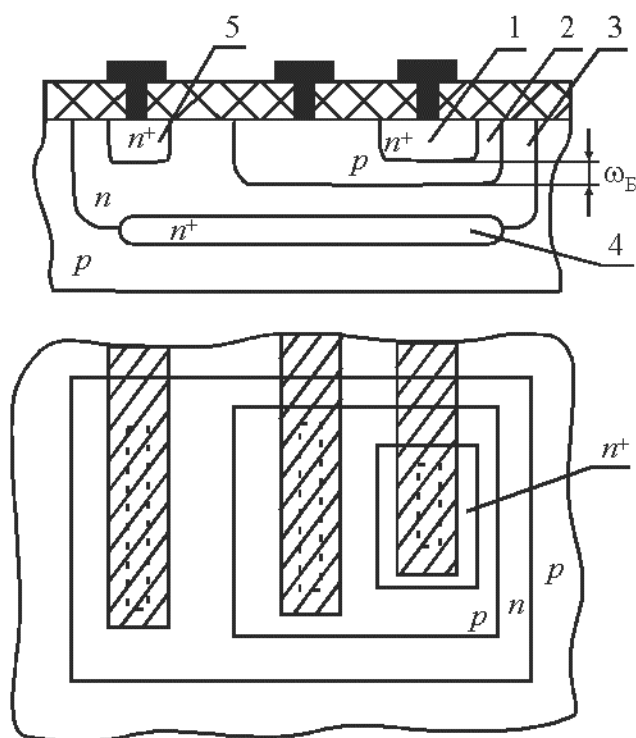


Рисунок 2.4. Конструкция биполярного транзистора: 1 – эмиттер; 2 – база; 3 – коллектор; 4 – скрытый слой; 5 – приконтактная область коллектора.

В цифровых схемах транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) используются многоэмиттерные транзисторы, которые содержат несколько эмиттеров, работающих в одной базовой области. На рис. 2.5 показан четырехэмиттерный транзистор.

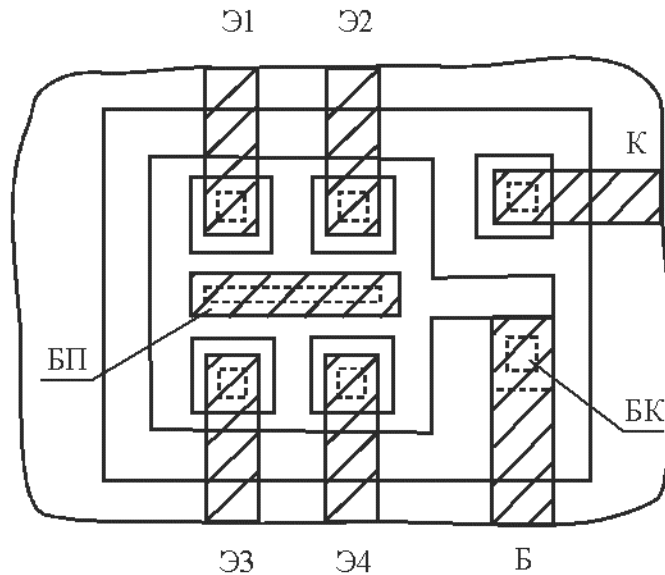


Рисунок 2.5. Конструкция многоэмиттерного транзистора: БП - базовый проводник, БК - базовый контакт.

Из рисунка видно, что эмиттеры находятся на разных расстояниях от базового контакта, что приводит к существенному различию в сопротивлениях эмиттер-базовых цепей. Для выравнивания этих сопротивлений по области базы прокладывают проводник. Для уменьшения паразитных токов через эмиттеры при инверсном включении транзистора искусственно увеличивают сопротивление пассивной области базы, удаляя базовый контакт от активной области транзистора.

В аналоговых полупроводниковых ИМС находят применение и *p-n-p*-транзисторы, совместимые с планарно-эпитаксиальной технологией. Конструкция такого транзистора приведена на рис. 2.6. Их изготавливают одновременно с n^+ -*p-n* транзисторами по обычной технологии. Эмиттерный и коллекторные слои получают на этапе базовой диффузии, причем коллекторный слой охватывает эмиттер со всех сторон. Базовая область формируется на основе эпитаксиального слоя с подлегированием контактной области во время эмиттерной диффузии.

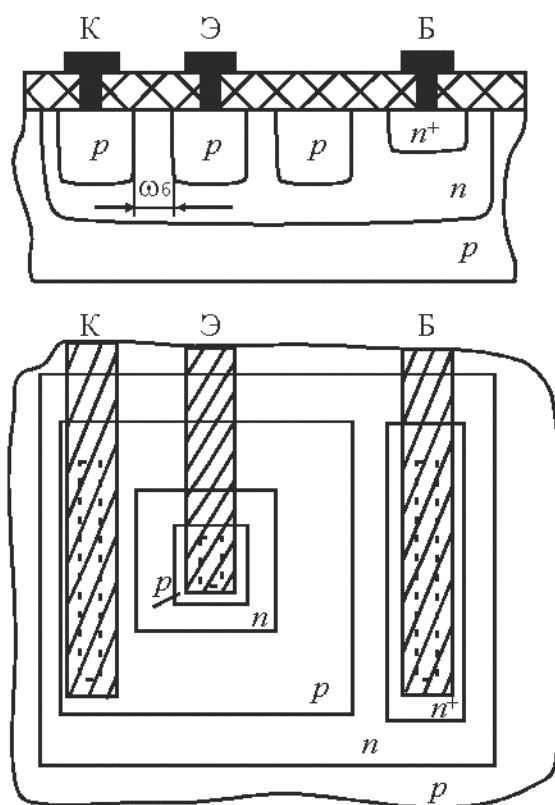


Рисунок 2.6. Конструкция горизонтального $p-n-p$ транзистора.

Перенос носителей в таком $p-n-p$ транзисторе происходит в горизонтальном направлении. Инжектированные из боковых частей эмиттера в базу дырки диффундируют к коллекторной области в приповерхностном слое. Ширина базы равна расстоянию между p -слоями $3 \div 4$ мкм. Из-за сравнительно большой ширины базы частотные свойства $p-n-p$ транзисторов хуже, а усиление меньше. Такие транзисторы применяют в аналоговых схемах, где необходимо использовать транзисторы двух типов проводимости.

МДП – транзисторы

Различают по типу проводимости канала n -канальные (рис. 2.7а) и p -канальные (рис. 2.7б) МДП – транзисторы. Отметим, что у n -МДП – транзисторов быстродействие больше, так как подвижность основных носителей – электронов больше, чем дырок.

Как видно из рисунков, МДП – транзистор имеет 4 вывода: исток, сток, затвор и подложка. При симметричной конструкции исток и сток в МДП – транзисторах обратимы и их можно поменять местами при включении

транзисторов в схему.

Основными конструктивными параметрами МДП – транзистора являются длина канала l_K и ширина канала b_K . Для обеспечения надежного наведения канала с учетом возможного несовмещения отдельных областей затвор должен располагаться над каналом с некоторым 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.

МДП ИМС, у которых в объеме кристалла сформированы одновременно n - и p -канальные МДП – транзисторы, называются комплементарными (рис. 2.7в). Цифровые схемы на комплементарных МДП транзисторах (КМДП ИМС) практически не потребляют мощность в статическом режиме и потребляют ее только в момент переключения.

Как видно из рисунка, для формирования комплементарной структуры необходимо формировать p -карман для размещения n -МДП – транзисторов. Кроме того, для устранения влияния паразитных МДП – транзисторов применяют охранные кольца p^+ и n^+ - типа, которые могут опоясывать один или несколько транзисторов с каналом одного типа проводимости. Применение охранных колец снижает степень интеграции КМДП ИМС.

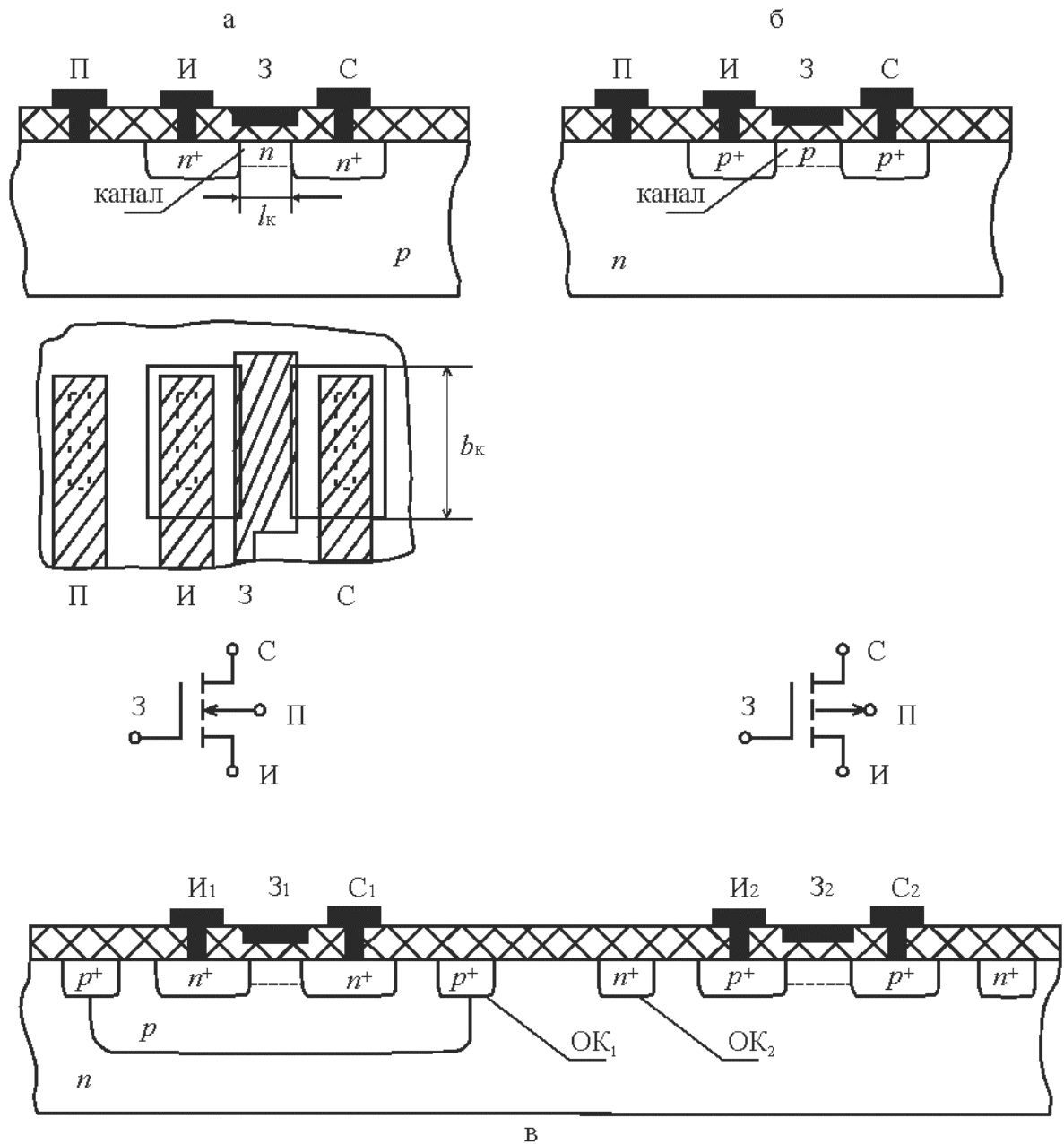


Рисунок 2.7. МДП - транзисторы: конструкция, топология обозначение
 а) p -МДП - транзистор; б) n -МДП - транзистор;
 в) комплементарная пара транзисторов; ОК₁, ОК₂ - охранные кольца.

Существенным недостатком МДП ИМС является опасность пробоя затвора на подложку статическим электричеством при монтаже или транспортировке микросхем. Для устранения этого явления все логические входы дополняют охранными диодами и резисторами.

Вспомогательные элементы полупроводниковых ИМС

Элементы полупроводниковых ИМС электрически соединены между собой с помощью алюминиевых пленочных проводников, расположенных на

поверхности изолирующего окисла или межслойной изоляции. Контактное окно в окисле, причем для получения надежного контакта окно закрывается проводником с перекрытием. Толщина проводника достигает 1,2 мкм при минимальной ширине, определяемой технологическими ограничениями.

Рассмотренная конструкция проводников не обеспечивает изоляцию пересекающихся проводников. Для этих целей 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. Диффузионная перемычка по существу является низкоомным диффузионным резистором (см. рис. 2.16), над телом которого проложен пересекающийся проводник. Для получения качественной перемычки необходимо проектировать ее с коэффициентом формы $K_f \leq 1$. Вторым вспомогательным элементом полупроводниковых ИМС является внешняя контактная площадка. Она предназначена для электрического соединения кристалла с внешними выводами корпуса с помощью гибких проводников. Конструктивно внешняя контактная площадка выполняется из пленочного алюминиевого проводника размером порядка 50×50 мкм и располагается на периферии кристалла. От кристалла площадка изолируется окислом, а от внешней среды пассивирующим (защитным) слоем, в котором делают окно для приварки внешнего гибкого вывода. Иногда контактную площадку снабжают двойной изоляцией для предотвращения замыкания на кристалл в случае нарушения целостности окисла при термокомпрессионной сварке под местом сварки. Для этого под площадкой формируют изолирующий карман с проводимостью, обратной проводимости исходной пластины. В тех случаях, когда контактная площадка формируется на толстом окисле, область изоляции в виде кармана не делают.

Последним вспомогательным элементом полупроводниковых ИМС

являются фигуры совмещения. Они имеют прямоугольную или крестообразную форму или выполняются в виде набора рисок разной толщины. Фигуры совмещения обычно располагают на периферии кристалла между внешними контактными площадками. Количество фигур совмещения на одну меньше числа фотолитографий, использованных при производстве ИМС. Наиболее простые фигуры квадратной формы. Каждая фигура состоит из двух квадратов основного (внешнего) и встроенного (внутреннего). Качество совмещения определяют по взаимному положению основного и встроенного квадратов. В идеале – все фигуры концентричны.

Способы изоляции элементов

Между активными и пассивными элементами ИМС, сформированными в объеме полупроводникового кристалла, необходимо обеспечить надежную электрическую изоляцию.

Различают три способа изоляции:

- обратно смещенным p - n -переходом (рис. 2.8а);
- диэлектриком (рис. 2.8б);
- комбинированный, представляющий сочетание изоляции p - n -переходом и диэлектриком (рис. 2.8в).

Основным недостатком изоляции p - n -переходом, является наличие значительных паразитных емкостей и токов утечки изолирующих p - n -переходов, что особенно сказывается на быстродействующих и микромощных ИМС. Изоляция элементов диэлектриком позволяет создавать ИМС с улучшенными характеристиками по сравнению с микросхемами, в которых использована изоляция p - n -переходами. Однако микросхемы с диэлектрической изоляцией имеют меньшую интегральную плотность. В комбинированном способе изоляции совмещены некоторые преимущества методов изоляции p - n -переходом и полной диэлектрической изоляции.

Примечание: 1) Контур области изоляции диэлектриком (контур "кармана") имеет вид темной утолщенной линии, при этом прямые углы в контуре обязательно закруглены. Вне контура "кармана" на поверхности

кристалла наблюдаются характерные крапинки. 2) Контур области изоляции p - n -переходом имеет вид тонких темных линий с прямыми углами без закруглений.

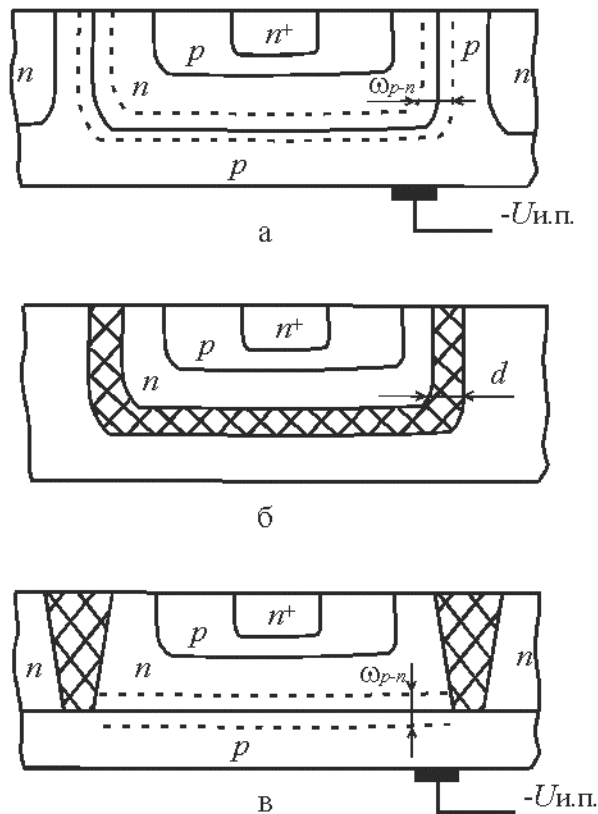


Рисунок 2.8. Способы изоляции элементов: а) обратнo-смещенным p - n -переходом; б) диэлектриком; в) комбинированный; ω_{p-n} - обедненный слой изолирующего p - n -перехода; d - толщина диэлектрика (окисла кремния).

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) лабораторный макет, состоящий из кассет с образцами 7 типов корпусированных полупроводниковых интегральных микросхем со снятыми крышками;
- 2) микроскоп.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ в приложении 1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Внимательно рассмотреть каждую микросхему под микроскопом и определить:

- а) способ изоляции элементов в микросхеме;
- б) количество внешних контактных площадок.

2. Рассчитать значение степени интеграции, плотности упаковки и занести результаты в таблицу результатов 2.2.

Характеристики изучаемых микросхем приведены в таблице 7.

Таблица 7. Характеристики и параметры изучаемых ИМС

Обозначение	Технология изготовления	Выполняемая функция	Кол-во элементов	Размеры корпуса, а×b×c, (мм)
133ЛА3 133ЛД3 133ЛА6	Планарно-эпитаксиальная	4 элемента 2И-НЕ 8-ми входовой расширитель по ИЛИ 2 элемента 4И-НЕ	56 11 32	6,5×9,8×2,3
133РУ7	<i>n</i> -МДП	Оперативное ЗУ на 1 Кбит	7485	9,4×12×2,5
132РУ2	<i>n</i> -МДП	Оперативное ЗУ на 1 Кбит	7126	9,4×12×2,5
134ЛА2 134ЛА8 134КП9 134КП10 134ТМ2	Планарно-эпитаксиальная	Элемент 8И-НЕ 4 элемента 2И-НЕ Сдвоенный коммутатор на 4 канала Коммутатор на 8 каналов Д - триггер	9 24 56 79 28	6,5×9,8×2,3
140УД6 140УД8	Планарно-эпитаксиальная	Операционный усилитель	64 43	Ø9,5×4,6 Ø9,5×4,6
142ЕН5	Планарно-эпитаксиальная	Стабилизатор напряжения 5В	39	9×25×3
564КТ3 564ЛЕ5 564ЛЕ10 564ТЛ1 564РУ2	КМДП	4 двунаправленных ключа 4 элемента 2ИЛИ-НЕ 3 элемента 3ИЛИ-НЕ 4 триггера Шмитта Оперативное ЗУ на 1 Кбит	52 48 54 88 2067	6,5×10×2 9,4×12×2,5
К590КН8 К590КН9	<i>n</i> -ДМДП КМДП	4 ключа без управления 2 ключа с управлением	8 62	9,4×12×2,5

3. Зарисовать эскизы топологии указанных преподавателем пассивных и активных элементов микросхем, без соблюдения масштаба с указанием типа проводимости и названия областей.

4. Произвести оптические измерения конструктивных параметров

указанных элементов полупроводниковых микросхем, для чего необходимо поместить в поле зрения цифрового микроскопа топологию измеряемого элемента и произвести отсчет:

- для диффузионного резистора – длины и ширины;
- для МДП-конденсатора – длины и ширины верхней обкладки;
- для биполярного транзистора – длины и ширины базовой области;
- для МДП-транзистора – длины и ширины затвора.

Нанести эти размеры в микрометрах на эскизы топологии.

Порядок выполнения измерений, проводимых на цифровом микроскопе Keyence VHX-2000 приведен в приложении 2.

5. Рассчитать значение удельного поверхностного сопротивления и удельной емкости, используя значения параметров элементов и результаты оптических измерений.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) таблица результатов 2.2;
- 4) эскиз топологии с указанием типа проводимости, названия областей и размеров элементов;
- 5) результаты расчетов удельного поверхностного сопротивления и удельной емкости;
- 6) выводы.

Таблица результатов 2.2.

Характеристики и параметры полупроводниковых ИМС

Обозначение микросхемы	Выполняемая функция	Способ изоляции элементов	Количество внешних контактных площадок	Количество элементов	Степень интеграции	Плотность упаковки, см ⁻³

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Изобразите конструкцию диффузионного резистора в базовом слое, в эмиттерном слое и в базовом слое под эмиттерным.
2. Изобразите конструкцию МДП - конденсатора.
3. Изобразите конструкцию диффузионного конденсатора на эмиттерном p - n -переходе.
4. Изобразите конструкцию интегрального диода.
5. Изобразите конструкцию биполярного транзистора.
6. Изобразите конструкцию МДП – транзистора.
7. Каково назначение скрытого n^+ -слоя в биполярном транзисторе?
8. С какой целью область коллекторного контакта n - p - n -транзистора дополнительно легируют?
9. С какой целью базовый контакт многоэмиттерного транзистора удаляют от активной области транзистора?
10. Какие существуют способы изоляции элементов полупроводниковых микросхем?
11. Как визуально распознать способ изоляции микросхемы?
12. Как определить конструктивно-технологический тип микросхемы?
13. Как рассчитать удельное поверхностное сопротивление диффузионного резистора или удельную емкость конденсатора по известной топологии и номиналу?

ЛИТЕРАТУРА

1. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок. Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. §§ 2.1 – 2.11.
2. Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И. и др. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1984. §§ 1.1 – 1.4.
3. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники, М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. §§ 7.1 – 7.12.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.1

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДВУХСЛОЙНОЙ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ГИС.

Цель работы:

1. Изучить методы формирования конфигураций элементов тонкопленочных гибридных интегральных микросхем (ГИС).
2. Изучить методы нанесения тонких пленок на подложку ГИС.
3. Изучить технологические процессы изготовления тонкопленочных ГИС.

Формируемые компетенции: ПК-2 (способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения); ОПК-5 (способность использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных); ОПК-7 (способность учитывать современные тенденции развития измерительной техники в своей профессиональной деятельности).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Совокупность технологических операций, составляющих технологический маршрут производства тонкопленочных ГИС, включает в себя подготовку поверхности подложки, нанесение пленок на подложку и формирование конфигураций тонкопленочных элементов, монтаж и сборку навесных компонентов, защиту и герметизацию ГИС от внешних воздействий.

Очистка

Непосредственно перед нанесением пленок подложки подвергаются очистке. Выбор способа очистки зависит от вида загрязнений. Возможна жидкостная и сухая очистка. Эффективная очистка достигается при сочетании нескольких способов. В составе таких процессов основными операциями являются обезжиривание, травление, промывка, сушка.

В тонкопленочных ГИС наибольшее распространение получила жидкостная очистка. Для интенсификации процесса очистки используют нагрев, кипячение, вибрацию, центрифугирование, ультразвуковую обработку, плазму. Например, типовой процесс очистки ситалловых подложек включает следующие операции:

- 1) обезжиривание кипячением в перекисно-аммиачном растворе;
- 2) промывание в проточной деионизованной или дистиллированной воде;
- 3) промывка кипячением в дистиллированной воде;
- 4) сушка в парах изопропилового спирта или в потоке нагретого до 320 °С инертного газа (аргона, азота).

Метод сухой очистки используют перед наиболее ответственными операциями. Наряду с традиционным отжигом и газовым травлением успешно используют ионное и плазмохимическое травление.

Создание пассивных тонкопленочных элементов ГИС

Резисторы. Для тонкопленочных резисторов используют чистые металлы, сплавы, а также специальные материалы – керметы, которые состоят из частиц металла и диэлектрика. Широко распространены пленки хрома и тантала. Из сплавов наиболее часто используют нихром. На основе керметов, в состав которых входят хром и монооксид кремния, получают высокоомные резисторы. В зависимости от содержания хрома можно получить резистивные пленки с удельным сопротивлением от сотен Ом/□ до десятков кОм/□. Однако в связи с тем, что свойства керметных пленок сильно зависят от технологических факторов, резисторы имеют худшую воспроизводимость номиналов и больший температурный коэффициент сопротивления по сравнению с металлическими. В настоящее время промышленностью освоена большая группа металлосилицидных сплавов системы $Si - Cr$, легированных небольшими добавками железа, никеля, кобальта, вольфрама (РС-3001, РС-3710, РС-5404К, МЛТ-3М, РС-5405Н). При сравнительно малом температурном коэффициенте сопротивления и

высокой стабильности воспроизведения удельного поверхностного сопротивления диапазон номиналов сплавов РС достаточно широк: 0,5 – 50 кОм/□. Наиболее часто используют сплавы РС - 3710 (37,9% *Cr*, 9,4% *Ni*, 52,7% *Si*), МЛТ-3М (43,6% *Si*, 17,6% *Cr*, 14,1% *Fe*, 24,7% *W*).

Конденсаторы. Для изготовления диэлектрических тонких пленок применяют монооксиды кремния *SiO* и германия *GeO*, оксиды алюминия *Al₂O₃*, тантала *Ta₂O₅*, титана *TiO₂* и редкоземельных металлов. Высокие удельные емкости имеют титанаты кальция и бария.

Для изготовления обкладок тонкопленочных конденсаторов применяют алюминий с подслоем титана или ванадия для нижней обкладки и без подслоя при напылении на диэлектрик верхней обкладки.

Элементы коммутации (проводники и контактные площадки) служат для электрического соединения компонентов и элементов ГИС между собой, а также для присоединения к выводам корпуса.

К материалам элементов коммутации предъявляются следующие требования: высокая электропроводность; хорошая адгезия к подложке; высокая коррозионная стойкость; обеспечение низкого и воспроизводимого переходного сопротивления контактов; возможность пайки или сварки выводов навесных компонентов и проволочных перемычек для электрического соединения контактных площадок платы с выводами корпуса.

Самым распространенным материалом тонкопленочных проводников и контактных площадок в ГИС повышенной надежности является золото с подслоем хрома, никрома или титана. Подслой обеспечивает высокую адгезию, а золото – нужную электропроводность, высокую коррозионную стойкость, возможность пайки и сварки. Толщина пленочного проводника обычно составляет 0,5 – 1,0 мкм.

В аппаратуре с менее жесткими требованиями к надежности в качестве проводников используют пленки меди или алюминия с подслоем хрома, никрома, ванадия и титана. Для предотвращения окисления меди и

улучшения условий пайки или сварки медные контактные площадки покрывают хромом, никелем, золотом или ванадием. Для пайки их целесообразно облуживать погружением схемы в припой, при этом остальные пленочные элементы должны быть защищены.

Алюминий обладает достаточно высокой коррозионной стойкостью и может использоваться как с защитным покрытием никеля или ванадия для обеспечения возможности пайки, так и без него, если присоединение навесных компонентов и создание внешних контактов осуществляется сваркой. Толщина медных и алюминиевых проводников – 1 мкм.

Для защиты от внешних воздействий и для предотвращения замыкания проводников и пересечений при однослойной разводке применяется защита негативным фоторезистом, как наиболее простая. Для многослойной разводки используют те же материалы, что и для диэлектрика конденсаторов, но с малым значением диэлектрической проницаемости с целью уменьшения паразитных связей между проводниками слоев.

Методы нанесения тонких пленок

1. Метод термовакuumного испарения основан на создании направленного потока пара вещества и последующей конденсацией на поверхности подложек, имеющих температуру ниже температуры источника пара.

Термическим испарением в вакууме удастся получить наиболее чистые пленки. Достоинства этого метода: простота, высокая скорость осаждения пленок, возможность напыления многих веществ. Однако этим методом трудно получать пленки из тугоплавких материалов сложного состава, имеющих различные скорости испарения отдельных компонент. Кроме того, для получения высокого вакуума ($10^{-5} - 10^{-7}$ Па) требуется сложная система.

2. Метод ионного распыления. При ионном распылении энергия, необходимая для отрыва атомов испаряемого вещества, возникает в результате бомбардировки его поверхности ионами плазмы. Источником ионов служит самостоятельный тлеющий разряд либо плазма

несамостоятельного разряда (дугового или высокочастотного) инертных газов (обычно высокой чистоты аргона). Существует большое разнообразие процессов ионного распыления, отличающихся характером напряжения питания (постоянное, переменное, высокочастотное), способом возбуждения и поддержания разряда, числом и конструкцией электродов и т. д.

2.1. Катодное распыление. Газовая среда при катодном распылении может быть инертная (например, аргон) или химически активная (например, кислород). Процесс распыления в химически активной среде называют реактивным распылением.

Метод катодного распыления позволяет получить тонкие пленки металлов (тантала, ниобия, молибдена), а также пленки различных сплавов, характеризующихся высокой адгезией и однородностью.

2.2. Ионно-плазменное распыление. Применение триодной системы распыления позволило существенно улучшить вакуумные условия формирования тонких пленок и повысить скорости распыления по сравнению с диодной системой.

Для достижения больших скоростей осаждения необходимо снизить давление в рабочей камере с тем, чтобы свободный пробег атомарных частиц был больше расстояния мишень – подложка, а также повысить плотность ионного тока на мишень. При ионно-плазменном распылении давление составляет ($10^{-1} - 10^{-3}$ Па), что в сотни раз меньше, чем при катодном распылении. Благодаря этому распыляемые атомы почти не сталкиваются с молекулами газа и ионами в пространстве между мишенью и подложкой, что уменьшает загрязнение пленки остаточными газами. Большим преимуществом метода является его универсальность. Ионно-плазменным распылением можно получать как пленки чистых металлов, так и сплавов одновременным распылением нескольких независимых мишеней. Ионно-плазменное распыление безынерционно. Распыление происходит лишь при подаче напряжения и сразу прекращается при его выключении.

Метод ионно-плазменного распыления является наиболее рас-

пространственным в производстве ИМС для получения пленок из материалов с различными свойствами.

2.3. Магнетронное распыление. Данный метод является дальнейшим развитием ионно-плазменного распыления. Он основан на распылении материала за счет бомбардировки поверхности мишени ионами рабочего газа (обычно аргона), образующимися в плазме аномального тлеющего разряда при наложении скрещенных электрического и магнитных полей. Высокая скорость распыления достигается увеличением плотности ионного тока за счет локализации плазмы у распыляемой поверхности мишени с помощью сильного поперечного магнитного поля.

Магнетронные системы обладают следующими достоинствами: высокая скорость распыления (до 35 – 40 нм/с) при сравнительно низком рабочем напряжении (500 В) и небольшом давлении рабочего газа (0,3 – 0,7 Па); низкий уровень радиационных дефектов и отсутствие перегрева подложек; малая степень загрязненности пленок посторонними газовыми включениями; разнообразие форм распыляемых мишеней; простота конструкций. К недостаткам следует отнести сложность распыления магнитных материалов и материалов с низкой теплопроводностью, а также низкий коэффициент полезного использования материала мишени.

3. Химические методы. В основу метода положены реакции, протекающие в водных растворах солей металлов при приложении электрического поля (или без него).

3.1. Электролитическое осаждение производят в ваннах с электролитом, содержащих два электрода – анод и катод. В качестве подложки, которая является катодом, используют проводящие материалы. Анод выполняют из инертного материала (по отношению к электролиту) или материала, из которого осаждается пленка. Этим методом наращивают многослойные пленки меди, никеля и других материалов.

3.2. Химическое осаждение основано на восстановлении металлов из водных растворов без приложения электрического поля. Этим методом

осаждают пленки никеля, золота, серебра, палладия и других материалов как на проводящие, так и на непроводящие подложки.

3.3. Анодирование (анодное окисление, электрохимическое оксидирование) – электролитическое нанесение оксидной пленки на поверхность металлов, сплавов. Происходит взаимодействие химически активных металлов с ионами кислорода, выделяющимися у анода с образованием оксидной пленки. Путем анодирования получают оксидные пленки тантала и алюминия. При этом сначала на подложку вакуумным методом наносится пленка исходного материала, которая затем подвергается локальному анодированию, что позволяет создать высококачественные пленочные конденсаторы и изолирующие слои при многослойной разводке.

Методы формирования конфигураций тонкопленочных элементов

Для формирования рисунков проводящего, резистивного и диэлектрического слоев используют следующие методы:

масочный – соответствующие материалы напыляют на подложку через маску;

фотолитографический – пленку наносят на всю поверхность подложки, а затем вытравливают с участков, не защищенных фоторезистом;

электронно-лучевой – определенные участки пленки удаляются с подложки по заданной программе под воздействием электронного луча;

лазерный – аналогичен электронно-лучевому, только вместо электронного луча используют луч лазера.

Наибольшее распространение получили два первых способа, а также их комбинация.

При масочном методе пленочный рисунок получают напылением материала пленки на подложку, закрытую съемной затеняющей металлической маской. Пленка из напыляемого материала осаждается на подложке в местах, соответствующих рисунку окон в маске. В качестве материала съемной металлической маски используют ленту бериллиевой бронзы толщиной 0,1 – 0,2 мм, покрытую слоем никеля толщиной

около 10 мкм.

Нанесение пленок через съемные маски осуществляют термическим испарением в вакууме либо ионно-плазменным распылением. Метод катодного распыления через съемные металлические маски не применяют, поскольку маска является экраном, искажающим электрическое поле между катодом и анодом, что может привести к прекращению процесса распыления. Использование для этих целей масок из диэлектрических материалов нецелесообразно из-за низкой точности и трудности их изготовления.

Поскольку для обеспечения необходимой жесткости маски имеют сравнительно большую толщину, их края затевают прилегающие к ним участки подложки.

В результате коробления маски в процессе напыления пленки между маской и подложкой образуется зазор, приводящий к подпылу. Кроме того, размеры окон в маске при многократном напылении уменьшаются. Все это обуславливает меньшую точность данного метода по сравнению с фотолитографическим. С помощью съемных масок нельзя получать замкнутый рисунок (например, кольцо). Чем сложнее конфигурация пленочных элементов, тем ниже точность их изготовления.

Метод фотолитографии. Этот метод позволяет получить конфигурацию элементов любой сложности и имеет большую точность по сравнению с масочным, однако он более сложен, так как включает ряд прецизионных операций.

Последовательность основных операций при фотолитографии

1. Подготовка подложки.
2. Нанесение и сушка фоторезиста.
3. Совмещение и экспонирование.
4. Проявление.
5. Отмывка.
6. Задубливание.
7. Травление.

8. Отмывка.
9. Снятие маски фоторезиста.
10. Отмывка

Поверхность подложек предварительно очищают, чтобы обеспечить их высокую смачиваемость и адгезию фоторезиста, а также удалить посторонние включения. Затем на подложку наносят тонкий слой фоторезиста (светочувствительную полимерную композицию) и сушат его для удаления растворителя. Фоторезист бывает двух типов – позитивный и негативный.

Совмещение фотошаблона с подложкой и экспонирование выполняют на одной установке. Цель операции совмещения – совпадение рисунка фотошаблона с нанесенным на предыдущей операции на подложку рисунком. Далее слой фоторезиста экспонируют – подвергают воздействию ультрафиолетового излучения через фотошаблон. В результате этого рисунок с фотошаблона переносится на слой фоторезиста.

При проявлении слоя фоторезиста отдельные его участки вымываются и на подложке при использовании позитивного фоторезиста остаются неэкспонированные (незасвеченные) участки, а если применялся негативный фоторезист, то экспонированные. Затем слой фоторезиста термообработывают при повышенной температуре, т. е. задубливают, вследствие чего происходит его частичная полимеризация и повышается стойкость к травителю.

Заканчивается процесс фотолитографии травлением незащищенных фоторезистом участков подложки, созданием рельефного рисунка и удалением остатков фоторезиста.

Существует несколько разновидностей метода фотолитографии.

При фотолитографическом методе для изготовления ГИС, содержащих резисторы и проводники, используют два технологических маршрута.

Первый вариант – напыление материалов резистивной и проводящей пленок; фотолитография проводящего слоя; фотолитография резистивного

слоя; нанесение защитного слоя (рис. 3.1).

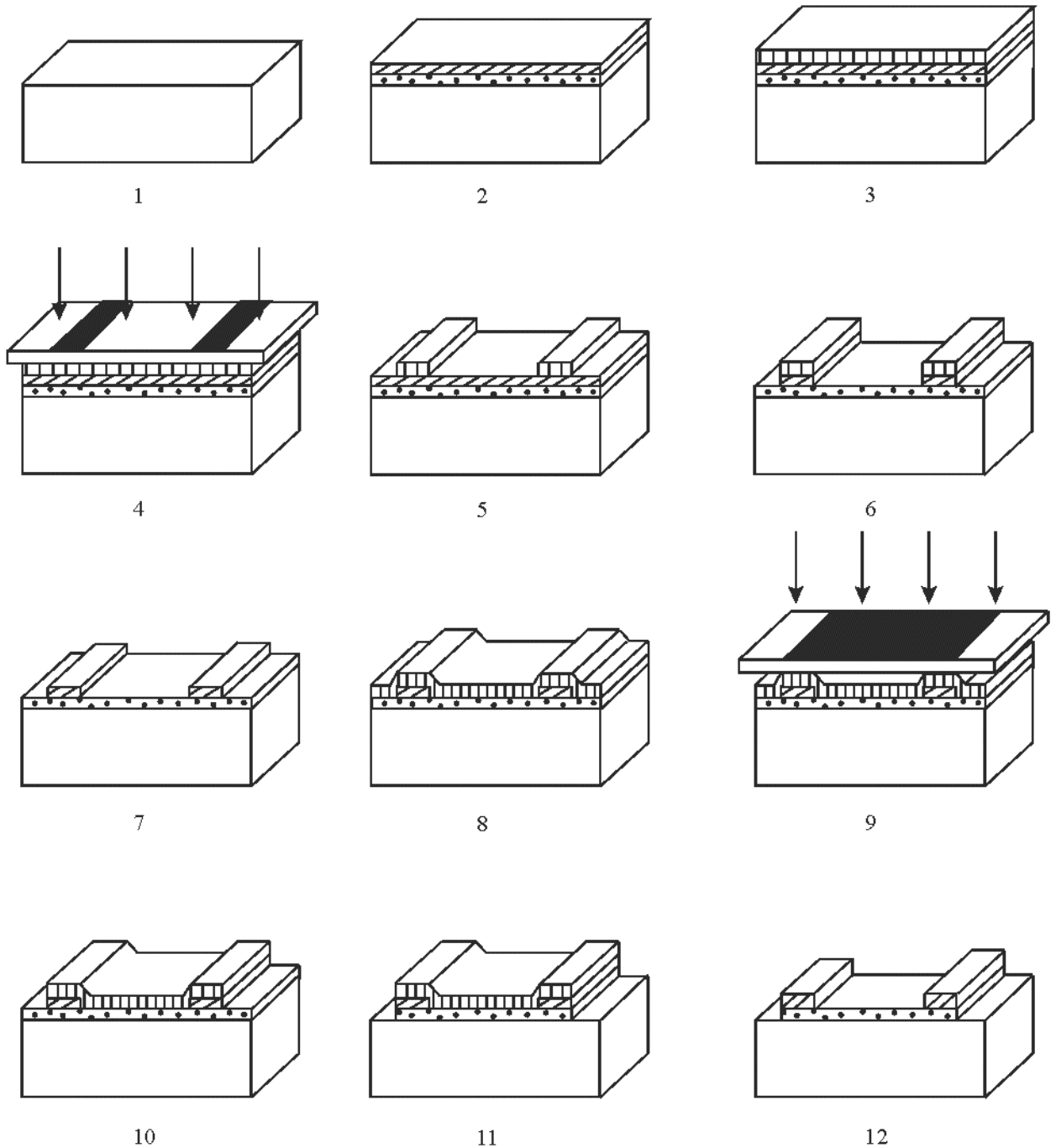


Рис. 3.1. Получение резистивного элемента методом двойной фотолитографии
 1 – подложка, 2 – напыление сплошных резистивного и проводящего слоев, 3 – нанесение фоторезиста, 4 – экспонирование, 5 – фотообработка, 6 – травление проводящего слоя, 7 – снятие фоторезиста, 8 – нанесение фоторезиста, 9 – экспонирование, 10 – фотообработка, 11 – травление резистивного слоя, 12 – снятие фоторезиста.

Второй вариант – после проведения первых двух операций, тех же, что и в предыдущем варианте, сначала осуществляют фотолитографию и травление одновременно проводящего и резистивного слоев, затем вторую литографию для стравливания проводящего слоя в местах формирования

резистивных элементов, после чего следует нанесение защитного слоя и фотолитография для вскрытия окон в нем над контактными площадками.

При производстве пленочных микросхем, содержащих проводники и резисторы из двух различных (высокоомного и низкоомного) резистивных материалов, рекомендуется такая последовательность действий: поочередное напыление пленок сначала высокоомного, затем низкоомного резистивных материалов; напыление материала проводящей пленки; фотолитография низкоомного резистивного слоя, затем высокоомного слоя; нанесение защитного слоя.

Комбинированный метод. При совмещении масочного и фотолитографического методов для микросхем, содержащих резисторы, проводники и конденсаторы, используют два варианта.

1) Напыление резисторов через маску, напыление проводящей пленки на резистивную; фотолитография проводящего слоя; поочередное напыление через маску нижних обкладок, диэлектрика и верхних обкладок конденсаторов; нанесение защитного слоя.

2) Напыление резистивной пленки; напыление проводящей пленки на резистивную; фотолитография проводящего и резистивного слоев; фотолитография проводящего слоя; напыление через маску нижних обкладок конденсаторов, диэлектрика и верхних обкладок конденсаторов; нанесение защитного слоя.

Навесные компоненты ГИС

В ГИС применяются как активные, так и пассивные навесные компоненты. В качестве активных навесных компонентов ГИС применяют бескорпусные диоды и диодные матрицы, корпусные диоды и транзисторы в миниатюрном исполнении, бескорпусные полупроводниковые микросхемы и кристаллы; в качестве пассивных навесных компонентов – конденсаторы, наборы прецизионных конденсаторов и резисторов, выполненных на отдельных платах, трансформаторы.

Способ монтажа дискретного компонента на подложку ГИС должен

обеспечивать отвод теплоты, сохранение целостности ГИС при термоциклировании, стойкость к вибрациям и ударам, отсутствие загрязнений, возможность последующей сборки и герметизации микросхемы.

Для крепления к подложке компонентов с гибкими и балочными выводами используют термостойкие клеи. Толщина клеевого соединения 0,05 – 0,1 мм. Компоненты с металлизированными основаниями можно прикрепить к подложке с помощью припоя или эвтектических сплавов.

Соединение выводов навесных компонентов с контактными площадками микросхемы, а также контактных площадок с выводами корпуса осуществляют сваркой, а также пайкой низкотемпературными припоями.

Сборка микросхемы в корпус

После резки подложки на отдельные платы, последующей приклейки платы к основанию корпуса специальной пленкой или клеем и монтажа дискретных компонентов проводится герметизация ГИС. Герметизация предусматривает окончательную защиту ГИС от климатических и механических воздействий, оговоренных техническими условиями на микросхему или аппаратуру. Этим определяется выбор конструкции корпуса и технологии его герметизации. Для тонкопленочных ГИС обычно используют металlostеклянные и металлополимерные корпуса. В первом случае герметизация проводится с помощью сварки, а во втором – заливкой компаундом.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ДВУХСЛОЙНОЙ ГИС (изделие 1)

Подготовка подложек. Подложки из ситалла марки СТ50-1-1 размером 60×48×0,6 мм поступают на отмывку. После отмывки спиртом, перекисью водорода, водным аммиаком и деионизованной водой их сушат в струе газообразного азота. Межоперационное время хранения отмытых ситалловых подложек не более 6 часов в эксикаторе с отожженным силикагелем.

Напыление резистивного слоя. На установке вакуумного напыления УВН75П-1 напыляется резистивный слой РС-3710, толщиной 300 Å с

поверхностным сопротивлением слоя $960 - 970 \text{ Ом/}\square$. Напыление происходит в вакуумной камере в атмосфере азота и аргона пониженного давления $5 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ Подложки нагреваются до 300°C и стабилизируются 10 – 20 мин. Напыление слоя РС-3710 происходит 3 – 4 мин. при контроле сопротивления по свидетелю до достижения поверхностного сопротивления $960 - 970 \text{ Ом/}\square$.

Для стабилизации резистивного слоя его отжигают в диффузионной печи при температуре 350°C в течение 240 ± 10 мин. При этом его поверхностное сопротивление увеличивается до $830 - 870 \text{ Ом/}\square$.

Контроль качества резистивной пленки РС-3710 на травление производится в вытяжном шкафу травлением подложки – спутника.

Напыление проводящего слоя. Напыление ванадий – медь – ванадий производится на установке «Оратория-5» методом магнетронного распыления материала мишени в атмосфере инертного газа.

После загрузки в карусель подложки нагреваются в рабочей камере до температуры $250 \pm 10^\circ\text{C}$ и выдерживаются 20 мин. Подслой ванадия толщиной $0,05 - 0,1 \text{ мкм}$ напыляется в течение 25 сек. Слой меди напыляется за 250 сек толщиной $1,5 - 2 \text{ мкм}$. Время между напылением $V - Cu$ и V не должно превышать 5 мин.

После напыления слоя ванадий – медь проводится контроль его внешнего вида и адгезии.

Фотолитография по $V - Cu - V$. На подложки центрифугированием наносится фоторезист ФП-383. Частота вращения центрифуги 1500 об/мин, при нанесении и 2500 об/мин при растекании по поверхности. Фоторезист сушится в продуваемой азотом камере при температуре 100°C . Вслед за экспонированием и проявлением он задубливается при температуре 130°C в продуваемой азотом камере 10 мин. Ванадий травливается в растворе $H_2O_2 : H_2O = 1 : 1$, медь – в растворе $H_2O + NH_4S_2O_8 + C_2O_3 = 6 : 1 : 3$. После снятия каждого из слоев $V - Cu - V$ подложки промываются в проточной

деионизованной воде. Оставшийся фоторезист удаляется в диметилацетамиде. Подложки отмываются в проточной деионизованной воде при барботаже 2 – 3 мин. Время между операциями экспонирования и травления не должно превышать 4-х часов.

Фотолитография резистивного слоя. Подложки поступают на фотолитографию по слою РС-3710 после контроля качества предыдущей фотолитографии. Операционный процесс тот же. Травление РС-3710 осуществляют в растворе $HF:HNO_3:H_2O = 1:4:10$.

Фотолитография по изоляционному слою. Изоляцией между нижним и верхним проводящими слоями служит фоторезист ФП-25, имеющий высокое сопротивление. Фоторезист наносится центрифугированием при частоте вращения 1500 об/мин, а сушится при температуре 100 °С в продуваемой азотом камере, затем задубливается при температуре 100 °С в течение 2-х часов, затем при температуре 200 °С в течение 1 часа. Толщина слоя ФП-25 5 мкм, при этом сопротивление его должно быть не менее 50 МОм.

В образовавшихся при травлении окнах стравливается верхний слой ванадия и производится декапирование плат в 2% растворе HCl и в растворе для травления меди, разбавленном деионизованной водой в соотношении 1:5 в течение 10 – 30 с при комнатной температуре.

Напыление второго проводящего слоя. Напыление слоя ванадий – медь происходит в установке «Оратория-5». При напылении $V-Si$ на фоторезист, подложки нагреваются до температуры 135 – 140 °С.

Нанесение защитного слоя. После фотолитографии по слою $V-Si$ наносится фоторезист ФП-383. Частота вращения центрифуги 800 об/мин. После сушки, экспонирования и проявления фоторезист задубливается в течение 40 мин при температуре 200 °С.

Лужение. Предварительно подложки декапируют в двухпроцентном растворе соляной кислоты для освежения меди, сушат, промывают в проточной воде, облуживают в припое ПОСМ-0,5, используя спиртоканифольный флюс, затем отмывают в толуоле.

Скрайбирование производится на установке скрайбирования "Алмаз".

Подгонка резисторов до номинала производится на установке лазерной подгонки УПР-1, имеющей рабочий ход столика, на который устанавливается подгоняемая плата 150×200 мм. Диаметр луча лазера 40 мкм. Щупы контактирующего устройства фиксируются на контактных площадках платы. Подгонка осуществляется перемещением стола с платой относительно головки лазера до тех пор, пока сопротивления каждого из резисторов, сравниваемые с перестраиваемым по программе сопротивлением эталонного резистора, не будут равны номинальным значениям. На рис. 3.2. показаны участки грубой и точной подгонки резисторов.

После этого следует контроль сопротивлений резисторов и межслойной изоляции.

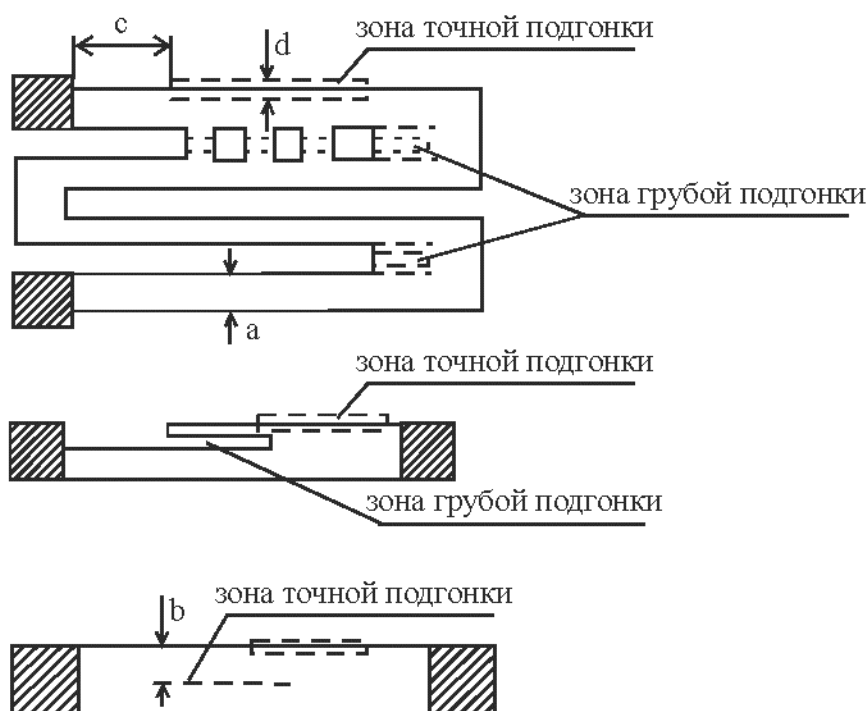


Рис. 3.2. Варианты подгонки резисторов

a – ширина резистора; b – глубина реза 150 – 200 мкм; c – расстояние между линией реза и контактной площадкой, 50 мкм; d – диаметр лазерного луча.

Монтажные операции. Платы приклеивают к корпусу клеем ВК-9. Затем наклеивают навесные компоненты к плате, после чего сушат в сушильном шкафу при температуре 60 °С в течение 2-х часов. Приваривают выводы навесных компонентов к контактным площадкам платы. Выводы корпуса

приваривают к контактными площадкам платы. Выводы корпуса приваривают к контактными площадкам платы медной луженой проволокой припоем ПОС-61.

Открытые микросхемы проверяются на функционирование и подвергаются вакуумной сушке в вакуумном сушильном шкафу.

Герметизация. Для фиксации крышки к основанию корпуса ее прихватывают в нескольких точках на установке контактно-точечной сваркой, затем приваривают на установке шовной сварки «Квант-12» в атмосфере аргона.

Герметичность готовой микросхемы проверяют погружением в этиленгликоль. После проверки и маркировки поверхность корпуса покрывают защитным лаком УР-231.

Таблица 8. Технологический маршрут изготовления тонкопленочной двухслойной ГИС (изделие 1)

№ операции	Содержание операции
1	Очистка подложки
2	Напыление резистивного слоя РС-3710
3	Стабилизация резистивного слоя РС-3710
4	Измерение удельного поверхностного сопротивления слоя РС-3710
5	Контроль качества слоя РС-3710 на травление (на дополнительной подложке)
6	Напыление первого проводящего слоя ванадий – медь – ванадий
7	Контроль адгезии слоя ванадий – медь – ванадий
8	Фотолитография 1 по проводящему слою ванадий – медь – ванадий
9	Контроль качества ФЛ1
10	ФЛ2 по резистивному слою РС-3710
11	Контроль качества ФЛ2
12	Нанесение изоляционного слоя (фоторезист ФП-25)
13	ФЛ3 по изоляционному слою
14	Контроль качества ФЛ3
15	Декапирование платы
16	Напыление второго проводящего слоя ванадий – медь

17	ФЛ4 по слою ванадий – медь
18	Контроль качества ФЛ4
19	Нанесение защитного покрытия (фоторезист ФП-383)
20	ФЛ5 по слою ФП-383. Вскрытие контактных площадок для контроля и монтажа
21	Контроль качества ФЛ5
22	Декапирование платы перед лужением
23	Лужение открытых контактных площадок
24	Отмывка плат после лужения
25	Контроль качества лужения
26	Скрайбирование
27	Контроль резисторов
28	Подгонка резисторов лазером
29	Контроль электрических параметров
30	Монтаж навесных компонентов
31	Контроль качества монтажа
32	Приклейка платы к основанию корпуса
33	Пайка выводов корпуса к внешним контактным площадкам
34	Контроль на функционирование
35	Вакуумная сушка
36	Прихватка крышки к корпусу контактно-точечной сваркой
37	Герметизация лазерной сваркой
38	Контроль герметичности
39	Маркировка
40	Защита поверхности корпуса лаком УР-231
41	Упаковка в тару

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) лабораторный макет, состоящий из кассет с образцами после различных операций техпроцесса создания двухслойной тонкопленочной ГИС;
- 2) микроскоп;
- 3) лупа.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ в приложении 1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомьтесь с описанием техпроцесса и маршрутной картой изготовления изделия 1.
2. Определите наименование операций, выполненных для изделия 1. Результаты занесите в таблицу 3.1. Укажите характерные признаки каждой операции.
3. В соответствии с вариантом задания измерьте сопротивления резисторов R_3 и R_9 до и после подгонки изделия 1, принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 3.3.

Примечание

При формировании элементов ГИС резистивные пленки всегда имеют более темный зеркальный оттенок, чем проводящие пленки.

При последовательном напылении резистивной и проводящей пленок на всю поверхность подложки на ее краях можно видеть границу напыления каждого слоя.

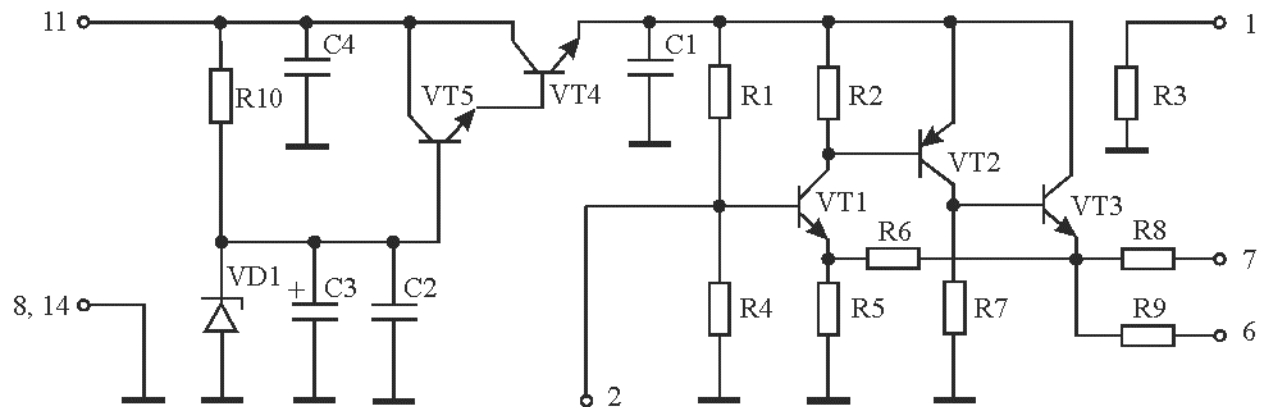


Рис. 3.3 Электрическая схема изделия 1

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) таблица результатов;
- 4) результаты измерения сопротивлений резисторов R_3 и R_9 до и после подгонки;

5) выводы.

Таблица результатов 3.1.

Номер образца	Номер операции в маршрутной карте	Наименование операции	Характерные признаки операции	Оборудование и материалы

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие методы нанесения тонких пленок Вы знаете?
2. Какие методы формирования конфигураций пленочных элементов Вы знаете?
3. Какова последовательность нанесения слоев пленочных элементов при изготовлении масочным методом гибридных интегральных схем, содержащих:
 - резисторы, проводники и конденсаторы;
 - резисторы, проводники и пересечения пленочных проводников;
 - резисторы, проводники, пересечения пленочных проводников, конденсаторы?
4. Какова последовательность нанесения слоев пленочных элементов при изготовлении фотолитографическим методом гибридных интегральных схем, содержащих:
 - резисторы и проводники;
 - проводники и контактные площадки;
 - резисторы с разными сопротивлениями пленки и проводники?
5. Какова последовательность нанесения слоев пленочных элементов при совмещении масочного и фотолитографического методов для изготовления гибридных интегральных схем, содержащих:
 - резисторы и проводники;
 - резисторы, проводники и конденсаторы?
6. Назовите методы монтажа дискретных элементов на плате тонкопленочных ГИС.

7. Какие материалы применяются для создания резистивных тонкопленочных элементов?

8. Как и с использованием каких материалов формируется металлическая разводка тонкопленочных ГИС?

9. Как осуществляется подгонка резисторов?

ЛИТЕРАТУРА

1. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок. Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. §§ 9.1 – 9.4.
2. Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И. и др. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1984. §§ 3.1 – 3.7.
3. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники, М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. §§ 6.11, 6.12, 7.12.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.2

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИС НА ПОЛИИМИДНОМ
НОСИТЕЛЕ И ТЕХПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТИТАЛАНОВОЙ
ПОДЛОЖКИЦель работы:

1. Изучить процесс изготовления гибридных микросхем на полиимидном носителе
2. Изучить технологический процесс изготовления титалановой подложки

Формируемые компетенции: ПК-2 (способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения); ОПК-5 (способность использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных); ОПК-7 (способность учитывать современные тенденции развития измерительной техники в своей профессиональной деятельности).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основой любого датчика является чувствительный элемент, преобразующий неэлектрические внешние воздействия в электрические сигналы. Одним из видов чувствительных элементов являются резистивные, в которых под действием внешнего фактора изменяется сопротивление того или иного участка электрической цепи. Примером могут служить терморезисторы, у которых электрическое сопротивление зависит от температуры. У фоторезисторов сопротивление зависит от освещенности. Тензорезисторы преобразуют механическую деформацию в малое изменение сопротивления. Разновидностью терморезисторов и тензорезисторов являются фольговые чувствительные элементы. Гибкие терморезисторы изготавливают фотолитографическим методом из двухслойного материала никель – полиимид.

Технологический процесс изготовления фольгового чувствительного элемента на полиимидном носителе

Отмывка титановых заготовок производится в смеси H_2O_2 – 225мл и NH_4OH – 9 мл при температуре 100 °С. Затем они сушатся на центрифуге при 100 °С.

Никелевую фольгу обрезают в размер рамки и приваривают на установке контактно-точечной сварки. Заготовки снова отмываются.

На полуавтомате нанесения фоторезиста ПНФ-2, на заготовки со стороны, не закрытой фольгой, наносится лак электроизоляционный полиимидный АД-9103. Полимеризация лака происходит при температуре 350 °С в течение 10 мин. Заготовки остывают на воздухе.

После отмывки и сушки заготовок производится фотолитография по никелю.

Травление происходит в растворе $FeCl_3 : H_2O : HNO_3 = 200 : 13 : 20$ при температуре 60 °С.

Припоем ПОС-61 облуживаются контактные площадки.

Измеряется сопротивление резисторов. При необходимости производится подгонка сопротивления в растворе травления, разбавленном в 10 или 100 раз в зависимости от разности номиналов резисторов расчетного и измененного.

На поверхность заготовок со стороны элементов наносится лак полиимидный АД-9103 для защиты.

Зачищаются контактные площадки, после чего производится выходной контроль фольговых элементов.

Таблица 9. Технологический маршрут изготовления тонкопленочной ИМС на полиимидном носителе

№ операции	Содержание операции
1	Подготовка рамок
2	Приварка к рамке никелевой фольги
3	Химическая обработка заготовок
4	Нанесение полиимидного (электроизоляционного) лака АД-9103

5	Полимеризация лака АД-9103
6	Отмывка заготовок
7	Нанесение фоторезиста на сторону никелевой фольги, незащищенную лаком
8	Фотолитография (создание резисторов)
9	Травление никеля
10	Лужение контактных площадок
11	Подгонка сопротивления резистора
12	Нанесение полиимидного лака АД-9103
13	Полимеризация лака АД-9103
14	Зачистка контактных площадок
15	Выходной контроль фольговых элементов на полиимидном носителе

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТИТАЛАНОВОЙ ПОДЛОЖКИ

Для изготовления тонкопленочных ГИС в тех случаях, когда требуется обеспечить хороший теплоотвод, высокую механическую прочность и жесткость конструкции, применяют металлические подложки: титановые, алюминиевые, покрытые слоем диэлектрика слоем 40 – 60 мкм, или эмалированные стальные.

Технологический процесс изготовления титановых подложек

Изготовление титановых заготовок. Нарезаются заготовки из титана на ножницах по заданному размеру с припуском по 1 мм на сторону. Снимаются заусенцы напильником. Заготовки промываются в ванночке со стиральным порошком тампоном из поролона при температуре 50 – 60 °С в течение 30 – 60 с, затем горячей водой 40 – 50 °С в течение 1 – 2 мин. Концентрация раствора стирального порошка 40 – 50 г/л. Титановые заготовки травятся в 2 % *HF* под вытяжкой в кассетах в ванне из винипласта емкостью 2 л 4 – 5 мин при температуре 18 – 25 °С. Заготовки промываются в кассетах проточной деионизированной водой 1 – 1,5 мин. Снимается шлам с травленных заготовок в винипластовой ванне под вытяжкой 1 – 2 мин при

18 – 25 °С. Заготовки промываются проточной деионизированной водой 5 – 10 мин.

Анодирование титановой заготовки. Заготовки закрепляются в приспособлении, промываются деионизированной водой в течение 30 – 35 мин и помещаются в ванну с электролитом анодирования. Электролит состоит из щавелевой кислоты (100 г/л) и борной (20 г/л). Анодирование происходит при температуре 18 – 20 °С при напряжении 5 В в течение 1,5 – 2 мин. Заготовки промываются холодной водой, затем деионизированной 5 – 10 мин. Сушатся под вентилятором.

Для химической полировки алюминиевой фольги ее наматывают на приспособление для химической полировки и опускают в бачок из кварцевого стекла с электролитом химического полирования. Электролит состоит из 5 л ортофосфорной и 1,5 кг щавелевой кислот. Полировка происходит при температуре 80 – 90 °С. Через 3 – 3,5 мин фольга вынимается из приспособления и промывается в проточной воде при температуре 30 – 40 °С 20 – 25 мин, затем в проточной деионизированной воде 15 – 20 мин. Фольгу помещают на алюминиевую подставку и ставят сушиться в муфельную печь на 3 – 5 мин при температуре 350 ± 10 °С.

Накатка алюминиевой фольги на титановую заготовку. Подложки оборачиваются в алюминиевую фольгу в один слой и фольга отрезается. Укладываются на алюминиевую фольгу и помещаются в муфельную печь с температурой 450 ± 10 °С на 10 мин. Перед прокаткой валки и станину протирают от пыли бязевой салфеткой, смоченной спиртом. Горячие заготовки по одной берутся из печи пинцетом и прокатываются на установке прокатки 4 – 6 раз в разных направлениях. Первая прокатка – со стороны, закрытой фольгой. Зазор между валками установки прокатки 0,06 – 0,08 мм для титана толщиной 0,5 мм. Прокатанные заготовки отжигаются 20 – 30 мин в печи при 450 ± 10 °С, затем остывают на воздухе. Процесс повторяется 2 – 4 раза. Накатанные заготовки отрезаются в размер. Заусенцы снимаются напильником.

Электрополировка. Подложки по одной электрополируются на подвеске из алюминиевой или титановой проволоки в течение 30 – 60 с. Электролит состоит из 5 л ортофосфорной кислоты, 1,5 кг щавелевой кислоты и 550 мл этиленгликоля. Температура раствора 90 – 100 °С. Затем подложки промываются проточной теплой водой (40 – 50 °С) 1 – 2 мин, далее деионизированной водой 5 – 10 мин.

Предварительное анодирование титановых подложек перед термориhtовкой производят в ванне для анодирования при слабом барбатаже (пропускание газа через раствор) 2 – 3 мин. Состав раствора: щавелевая кислота 100 г/л, борная кислота 20 г/л, режим 2 А/дм². Подложки промываются вместе с подвеской проточной холодной водой, затем деионизированной 1 – 2 мин. Сушатся под вентилятором.

Для термориhtовки подложки складываются в пакет, пакет помещается между двумя шлифовальными плитами. Приспособление для термориhtовки ставится в печь с температурой 520 ± 10 °С на 25 – 35 мин. Вынимается и ставится в вытяжную вентиляцию на металлическую подставку.

Электрополирование проводят на подвеске из алюминиевой или титановой проволоки, поместив подложки в сачок из кварцевого стекла с электролитом полирования на 1 – 2 мин при температуре 90 – 100 °С. Промываются подложки теплой проточной водой 40 – 50 °С 1 – 2 мин и проточной деионизированной водой 5 – 10 мин.

Глубокое анодирование титановых подложек производят на подвеске для анодирования при слабом барбатаже 100 – 200 мин при нормальной температуре. Раствор состоит из щавелевой и борной кислот, после чего подложки промываются проточной холодной водой, затем деионизированной 1 – 2 мин. Сушатся под вентилятором.

Отжиг титановых подложек происходит на алюминиевой подставке в муфельной печи при температуре 450 – 470 °С 15 – 20 мин, после чего подложки охлаждают.

Контроль толщины окисла. Выборочно из партии берутся 1 – 2

подложки. В разных местах подложки наклеиваются кусочки липкой ленты ГОСТ 20477-75 размером 10×10 мм. Травят окисел алюминия в 15 % растворе фтористоводородной кислоты 3 – 5 мин. Промывают в проточной холодной воде 1 – 2 мин. Снимают пинцетом липкую ленту и подложку промывают в холодной проточной воде 1 – 2 мин. Толщина окисла должна быть равна 35 – 50 мкм.

Контроль: при установке подложки на стеклянную пластину зазор между каждым из углов и стеклом не должен превышать 0,08 мм. Не допускаются вздутия и отслаивания окисла, трещины, темно-серые участки, сквозные поры, царапины, сыпь. Внешне подложки должны быть гладкие, блестящие светло-желтые. На нерабочей стороне допускаются дефекты.

Таблица 10. Технологический маршрут изготовления титановых подложек

№ операции	Содержание операции
1	Приготовление электролита анодирования
2	Приготовление электролита электрополировки и химической полировки
3	Приготовление 2% раствора фтороводородной кислоты для травления титановых заготовок
4	Приготовление раствора снятия шлама после травления и промывки титановой заготовки
5	Изготовление титановых заготовок
6	Анодирование титановых заготовок
7	Химическая обработка титановых заготовок
8	Химическая полировка алюминиевой фольги
9	Накатка алюминиевой фольги на титановую заготовку
10	Обрезка заготовок в размер
11	Электрополировка титановых подложек
12	Предварительное анодирование титановых подложек
13	Термориhtовка титановых подложек
14	Электрополировка титановых подложек
15	Глубокое анодирование титановых подложек
16	Отжиг титановых подложек
17	Контроль толщины окисла
18	Контроль

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) лабораторный макет, состоящий из кассет с наборами образцов изготовления ГИС на полиимидном носителе и наборами образцов после различных операций техпроцесса изготовления титановой подложки ГИС;
- 2) микроскоп;
- 3) лупа.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ в приложении 1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомьтесь с описанием техпроцесса и маршрутной картой изготовления изделий.
2. Определите наименование операций, выполненных для каждого из изделий. Результаты занесите в таблицу 3.2 (отдельно для каждого изделия). Укажите характерные признаки каждой операции.
3. Укажите явные и возможные виды и причины брака каждой операции.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) таблица результатов 3.2;
- 4) выводы.

Таблица результатов 3.2.

Номер образца	Номер операции в маршрутной карте	Наименование операции	Характерные признаки операции	Оборудование и материалы

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие требования предъявляются к подложкам ГИС? Какие материалы используются для изготовления подложек?
2. Какие методы очистки подложек Вы знаете?

3. В чем заключается процесс анодирования?
4. С какой целью производится анодирование титановых подложек?
6. С какой целью и с использованием каких материалов производится защита ГИС.
7. Назовите и охарактеризуйте методы нанесения тонких пленок на подложки ГИС.
8. Сравните методы формирования конфигураций элементов ГИС.
9. В каких случаях изготовление гибридных ИС более целесообразно, чем полупроводниковых ИС?

ЛИТЕРАТУРА

1. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок. Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. §§ 9.1 – 9.4.
2. Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И. и др. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1984. §§ 3.1 – 3.7.
3. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники, М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. §§ 6.6 – 6.9.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.1

ИЗУЧЕНИЕ ПЛАНАРНО-ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы: изучить технологические операции производства полупроводниковых микросхем, а также их последовательность при изготовлении полупроводниковых микросхем на биполярных транзисторах (на примере 133ЛА3).

Формируемые компетенции: ПК-2 (способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения); ОПК-5 (способность использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных); ОПК-7 (способность учитывать современные тенденции развития измерительной техники в своей профессиональной деятельности).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Особенностью планарно-эпитаксиальной технологии является повторение ряда однотипных групповых технологических процессов, от количества и последовательности выполнения которых зависит степень сложности интегральной схемы. Элементы микросхем, изготовленных по планарно-эпитаксиальной технологии, изолируются друг от друга обратносмещенными p - n -переходами.

Основные этапы планарно-эпитаксиальной технологии включают следующие технологические процессы: подготовка поверхности пластин, окисление пластин кремния, фотолитография, диффузия примесей и ионное легирование кремния, эпитаксиальное наращивание кремния, формирование слоев металлизации, нанесение диэлектрических покрытий.

Подготовка поверхности пластин (очистка) осуществляется с целью удаления различного вида загрязнений. От степени чистоты поверхности

зависит качество выполнения всех операций технологического цикла, параметры и выход годных изделий, а также их эксплуатационная надежность. Механизмы процессов очистки могут быть физическими (механическое удаление), химическими (с помощью химических реакций) и комбинированными (например, плазмохимическая обработка).

Окисление пластин кремния (термическое окисление) выполняется с целью создания на их поверхности пленки SiO_2 , используемой на разных стадиях изготовления элементов микросхемы в качестве маски, а так же пассивации поверхности микросхемы и электрической изоляции элементов микросхемы со стороны рабочей поверхности.

Процесс термического окисления поверхности пластин кремния проводят в диффузионной печи в атмосфере сухого кислорода, влажного кислорода или в парах воды при температуре 1000 – 1200 °С. Для получения пленки толщиной 0,5 мкм в атмосфере сухого кислорода при температуре 1000 °С требуется около 30 часов, тогда как в парах воды при той же температуре пленку получают за 0,8 часа, но такие пленки окисла более пористые. Поэтому окисление кремния проводят по комбинированной технологии. Сначала производят окисление в сухом кислороде в течение 5 – 15 мин, затем для получения необходимой толщины оксидной пленки проводят окисление в парах воды, на завершающем этапе окисление проводят в атмосфере сухого кислорода. Пленки толщиной 0,2 – 0,4 мкм в планарно-эпитаксиальной технологии используются в качестве масок при диффузии примесей на глубину не более 2 мкм. При длительной диффузии примесей (например, разделительной диффузии) или ионной имплантации требуются оксидные пленки толщиной 0,5 – 0,8 мкм. Толщина оксидной пленки, используемой на конечных операциях изготовления микросхем для электрической изоляции элементов, составляет 0,6 – 0,9 мкм.

Контроль толщины оксидных пленок, как правило, осуществляется *цветовым* методом, что позволяет осуществлять неразрушающий контроль толщины пленки.

Фотолитография – это процесс получения конфигурации элементов микросхем с применением светочувствительных покрытий – фоторезистов. Целью фотолитографии является вскрытие окон в слое маскирующего окисла кремния для формирования диффузных слоев, контактов с металлизацией, получения металлической разводки. Технологический процесс фотолитографии включает следующие операции: Очистка поверхности пластин, нанесение фоторезиста, сушку слоя фоторезиста, совмещение фотошаблона с пластиной, экспонирование и проявление рисунка фотошаблона в слое фоторезиста, задубливание фоторезиста для повышения устойчивости фоторезиста в травителе, травление окисла или металлизация в местах, не защищенных фоторезистом, удаление фоторезиста.

Диффузия примесей используется для формирования *p-n*-переходов в структурах микросхем. Диффузия может производиться в одну стадию (диффузия из неограниченного источника) и в две стадии (1 – загонка примеси, 2 – разгонка примеси – диффузия из ограниченного источника). Двухстадийная диффузия производится чаще, особенно для получения локальных диффузионных областей толщиной более 1 мкм, т. к. при этом возможно прецизионное управление параметрами диффузионных слоев, сохранение локального легирования при толщинах диффузионных слоев 6 – 12 мкм, а также снижение дефектности получаемых слоев. Во время второй стадии диффузии обычно одновременно получают маскирующую, термически выращенную пленку диоксида кремния.

Для осуществления процесса диффузии используются диффузионные печи, оборудованные кварцевыми трубами с резистивными нагревателями. Технологической средой при диффузии в открытой трубе (при атмосферном давлении) являются диффузанты (SbH_3 , PH_3 , B_2H_6), смешиваемые с азотом и кислородом, или пары жидких диффузантов (типа $POCl_3$), поставляемые в рабочую зону газом – носителем (обычно N_2) с добавлением кислорода. Диффузию в замкнутом объеме производят в кварцевой ампуле. Перед использованием ампулу тщательно очищают и прокаливают в вакууме при

температуре 1200 °С в течение двух часов. В ампулу помещают пластины, источник примеси и затем откачивают до остаточного давления $10^{-2} - 10^{-3}$ Па или заполняют инертным газом, после чего запаивают и помещают в диффузионную печь. При нагревании пары примеси осаждаются на поверхности полупроводниковых пластин и диффундируют в глубь нее. Ампульным способом можно проводить диффузию мышьяка, бора, сурьмы, фосфора. Его достоинством является минимальная токсичность, так как процесс происходит в замкнутом объеме.

После проведения процесса ампулу разрушают (вскрывают). То, что она имеет одноразовое использование, сильно удорожает процесс. В настоящее время ампульный способ применяют преимущественно при диффузии мышьяка.

Иногда диффузию проводят из твердых источников диффузانتов (легированных пленок SiO_2 , Si_3N_4 , примесно-силикатных стекол, поликристаллического кремния).

Ионное легирование представляет собой процесс введения примесных атомов в твердое тело путем бомбардировки его поверхности ускоренными ионами.

Практически метод ионной имплантации состоит в бомбардировке твердых тел пучками ускоренных ионов с энергией в пределах от 10 кэВ до 1 МэВ с целью создания в них локальных неоднородностей и *p-n*-переходов. Ускоренные ионы проникают в кристаллическую решетку, преодолевая отталкивающее противодействие положительных заряженных ядер атомов. Ионы более легких веществ проникают глубже, чем ионы тяжелых веществ, однако траектория движения последних более прямолинейна.

Глубина проникания ионов в среду характеризуется понятием пробега. При точной ориентации направления падения пучка ионов вдоль кристаллографической оси происходит *каналирование* ионов в кристалле. В этом случае пробег ионов существенно больше, чем при неориентированном облучении. Ион может вызвать в решетке зоны разупорядочения, размер

которых может составлять 3 – 10 нм. Это происходит в том случае, когда энергия, переданная ионом атому решетки, превышает энергию связи атомов в твердом теле. Разупорядоченные зоны или радиационные дефекты при облучении накапливаются, и когда число их превосходит критическое значение, происходит локальный переход кристаллической структуры в аморфный слой. Большинство внедренных ионов находится в междоузлиях и не является электрически активным. Для восстановления кристаллической структуры облученную среду отжигают, в результате чего происходит распад радиационных дефектов. В это же время ионы примеси занимают вакантные узлы, внедряются, образуя области с заданной концентрацией примеси или *p–n*-переходы.

Отличительной особенностью метода ионной имплантации является возможность создания максимальной концентрации не на поверхности, что было характерно для диффузионных процессов, а в глубине среды. Это происходит потому, что с увеличением энергии ионов максимум концентрации располагается в глубине полупроводника. Поверхностная концентрация при этом падает.

Преимущества ионного легирования заключаются в следующем:

- позволяет внедрять ионы любого элемента в любой кристалл;
- обеспечивает низкотемпературные условия легирования;
- позволяет осуществлять локальное легирование, в том числе мелкие *p–n*-переходы с точно заданными размерами и управляемым концентрационным профилем;
- обеспечивает точную дозировку примеси при высоких и низких уровнях легирования (диапазон концентраций примесей $10^{14} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$), когда процесс диффузии становится плоховоспроизводимым;
- обеспечивает высокую чистоту процесса легирования, т. к. осуществляется в вакууме (остаточное давление менее 10^{-2} Па).

Эпитаксия представляет собой процесс наращивания монокристаллических слоев вещества на подложку (кристалл), при котором

кристаллографическая ориентация наращиваемого слоя повторяет кристаллографическую ориентацию подложки.

Применение эпитаксиальных пленок в планарно-эпитаксиальной технологии позволяет получить транзисторные структуры с малой емкостью коллектор – база, малым сопротивлением коллектора и упростить операции по изоляции элементов обратносмещенными p - n -переходами.

Металлизация пластин кремния осуществляется для создания коммутационных проводников, обеспечивающих электрическое соединение элементов микросхемы с минимальным переходным сопротивлением и контактных площадок для монтажа ИС в корпусах, либо на коммутационных платах. Для получения стабильного омического контакта металл – полупроводник используют сплав алюминия с кремнием (1,2 % Si), который наносят на пленку диоксида кремния методами вакуумного осаждения (ионно-плазменным или магнетронным). Использование сплава $Al - Si$ объясняется тем, что при использовании Al в условиях повышенных температур на границах $Al - Si$, $Al - SiO_2$, $SiO_2 - Al - Si$ может происходить химическое взаимодействие Al с SiO_2 , растворение в твердом состоянии кремния в алюминии. В условиях повышенной плотности тока в токопроводящей системе может происходить электромиграция алюминия и кремния, что в свою очередь приводит к деградации мелкозалегающих p - n -переходов, к обрывам электрических цепей в местах межуровневой коммутации многоуровневой разводки БИС (вследствие окисления алюминия в системе $Al - SiO_2$). Кроме использования сплава $Al - Si$ в токопроводящих системах используются барьерные слои (Ti , Mo , Ni), а также используются новые токопроводящие системы, включающие тугоплавкие металлы и их сплавы.

Нанесение диэлектрических покрытий. В тех случаях, когда термическое окисление не приемлемо из-за существенного изменения параметров ранее полученных элементов микросхем, для получения толстых слоев SiO_2 используется химическое осаждение из газовой фазы

(пиrolитическое осаждение) или плазмохимическое осаждение.

При пиrolитическом осаждении пленок SiO_2 обычно применяют окисление моносилана: $SiH_4 + 2O_2 \rightarrow SiO_2 \downarrow + 2H_2O$. Реакция происходит при температуре 400 – 450 °C.

При осаждении фосфорно-силикатного стекла (ФСС) к газовой смеси добавляется фосфин PH_3 , разбавленный азотом до 1,5 % концентрации. Фосфин вступает в реакцию с кислородом: $4PH_3 + 5O_2 \rightarrow 2P_2O_5 + 6H_2$. Образующийся P_2O_5 легирует диоксид кремния. В пленке SiO_2 оказывается 1 – 3 % фосфора, что приводит к повышению термомеханической прочности, пластичности, снижению пористости. Такие пленки применяют для пассивации готовых структур микросхем. При содержании фосфора 8 – 9 % слои ФСС используют для планаризации поверхности пластин, имеющих рельеф.

При плазмохимическом осаждении (ПХО) пленок процесс разложения кремнийсодержащих соединений активизируется высокочастотным разрядом. Температура процесса более низкая (200 – 350 °C), чем при пиrolитическом осаждении, поэтому получаемые пленки SiO_2 можно использовать в качестве межслойного диэлектрика многоуровневой разводки.

Изучение технологических операций производства полупроводниковых микросхем производится на примере микросхемы 133ЛА3. На рисунке 4.1. приводится поэтапное формирование структуры интегральной схемы:

- а – химическая обработка поверхности исходных пластин кремния;
- б – окисление пластин кремния;
- в – фотолитография 1 для вскрытия окон в SiO_2 под диффузию сурьмы;
- г – диффузия сурьмы для формирования скрытых n -слоев;
- д – эпитаксиальное наращивание n -слоя кремния;
- е – окисление пластин;
- ж – фотолитография 2 для вскрытия окон под разделительную диффузию;
- з – диффузия бора для формирования разделительных p -областей;

- и – фотолитография 3 для вскрытия окон под базовую диффузию;
- к – диффузия бора для формирования базовых p -областей;
- л – фотолитография 4 для вскрытия окон под эмиттерную и приконтактную коллекторную диффузию;
- м – диффузия фосфора для формирования эмиттерных и приконтактных коллекторных n^+ -областей;
- н – фотолитография 5 для вскрытия окон под контакты к элементам ИС;
- о – фотолитография 6 по слою металлизации для формирования коммутации элементов ИС;
- п – фотолитография 7 для вскрытия окон к контактными площадкам.

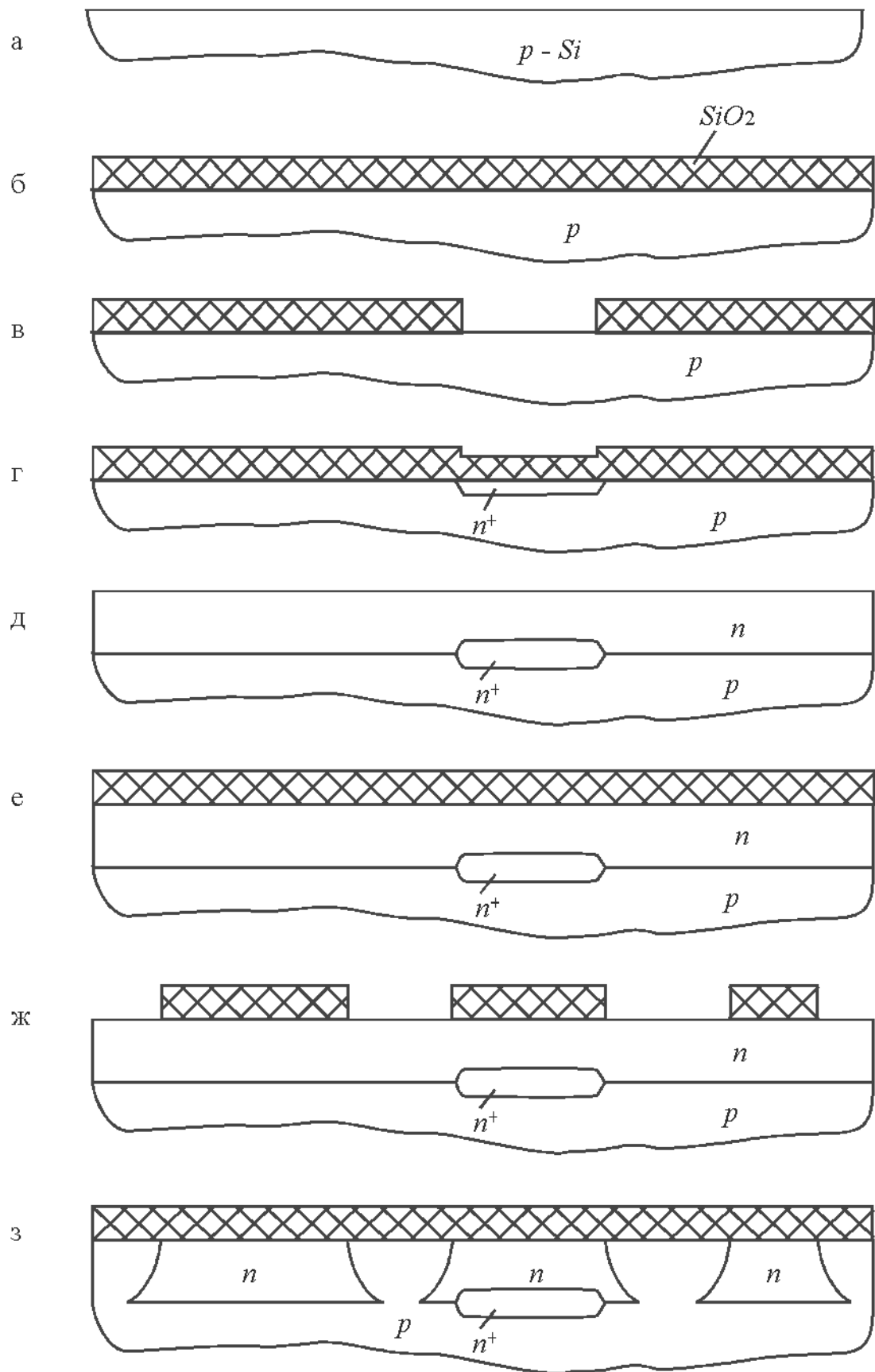


Рисунок 4.1, а – з. Фрагменты поэтапного формирования структуры ИС 133JIA3:

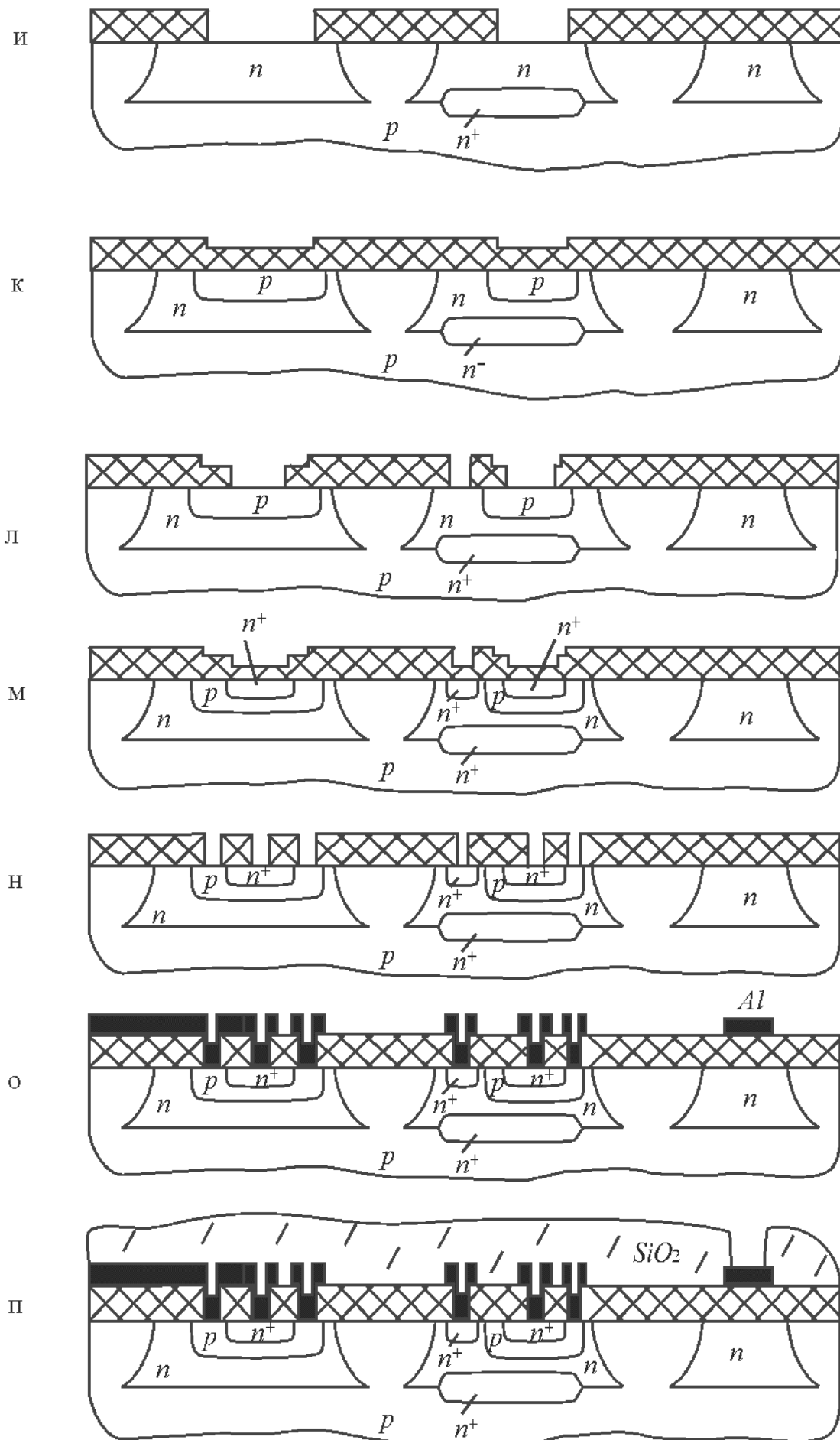


Рисунок 4.1, и – п. Фрагменты поэтапного формирования структуры ИС 133ЛА3:

Таблица 11. Основные операции технологического маршрута для изготовления структуры ИС на биполярных транзисторах (133ЛА3)

№	Наименование операции	Материалы технологических и защитных сред	Технологическое оборудование
1.	Химическая обработка пластин кремния (тип КДБ-10) .	Толуол, смесь Каро (смесь H_2SO_4 и H_2O_2), перекисноаммиачная смесь; вода деионизованная марки А, кислота фтористоводородная, спирт этиловый ректификованный, батист отбеленный мерсеризованный.	Линия "Лада-Электроника" для хим. обработки; микроскоп, например, типа НУ-2Е.
2 .	Окисление пластин кремния по системе: сухой O_2 – пары воды – сухой O_2 при $T = 1050$ °С.	Кислород газообразный, азот газообразный, вода деионизованная марки А, (при необходимости 10% HF); фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Печь диффузионная типа ДОМ; прибор для измерения толщины окисла, например, эллипсометр.
3.	Фотолитография 1 для вскрытия окон под диффузию сурьмы: а) подготовка поверхности пластин; б) нанесение фоторезиста (ФР); в) сушка слоя ФР; г) совмещение и экспонирование; д) проявление ФР; е) задубливание; ж) травление SiO_2 з) удаление ФР.	Фоторезист позитивный ФП-РН-7, диметилформамид, гексаметилдисизалан (адгезив для фоторезиста), травильный раствор (для травления SiO_2), раствор для проявления (0,6% KOH), вода деионизованная марки А, смесь Каро, спирт этиловый ректификованный; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Линия фотолитографии "Лада-Электроника"; микроскоп УИМ-25.
4.	Диффузия сурьмы для формирования скрытых n^+ -слоев: а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при $T = 1150$ °С); б) удаление сурьмяносиликатного стекла; в) 2-я стадия диффузии (разгонка примеси вглубь полупроводника при $T = 1200$ °С).	Азот газообразный (или аргон), сурьма кристаллическая (в ампулах), раствор для выявления $p-n$ -перехода, травильный раствор, спирт этиловый ректификованный, вода деионизованная марки А; батист отбеленный мерсеризованный, фильтр обеззоленный, алмазная паста (на основе тонкого микропорошка).	Печь диффузионная типа ДОМ; установка для измерения ρ_z (четырёхзондовая) типа ЦИУС; микроскоп типа МИМ-7; установка для получения шарового шлифа; модуль (для травления пластин) из линии хим. обработки "Лада-Электроника".
5.	Удаление SiO_2 с поверхности пластин после диффузии сурьмы.	Травитель (65% HF), вода деионизованная марки А; батист отбеленный мерсериз.	Модули линии фотолитографии "Лада-Электроника".

6.	Эпитаксиальное наращивание слоя кремния (n -Si) при $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$.	Тетрахлорид кремния, водород газообразный, азот газообразный, хлор газообразный, травитель для выявления дислокаций, вода деионизованная марки А, спирт этиловый ректификованный; батист отбеленный мерсеризованный.	Установка эпитаксиального наращивания типа "Эпиквар"; установка измерения удельного объемного сопротивления - ЦИУС; многолучевой интерферометр типа МИСС; микроскоп типа МИМ- 7.
7.	Окисление пластин кремния по системе: сухой O_2 – пары воды – сухой O_2 (при $T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$).	Аналогично операции 2.	
8.	Фотолитография 2 для вскрытия окон под диффузию бора (перед формированием разделительных областей).	Аналогично операции 3.	
9.	Диффузия бора для формирования разделительных p -областей: а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$); б) удаление боросиликатного стекла (БСС) и SiO_2 ; в) 2-я стадия диффузии (разгонка примеси с одновременным окислением пластин по системе: сухой O_2 – пары воды – сухой O_2 при $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$).	Трехбромистый бор, азот газообразный, кислород газообразный, раствор для выявления p - n -перехода, травильный раствор, спирт этиловый ректификованный, вода деионизованная марки А; батист отбеленный мерсеризованный.	Аналогично операции 4.
10.	Фотолитография 3 для вскрытия окон под диффузию бора (перед формированием базовых p -областей).	Аналогично операции 3.	
11.	Диффузия бора для формирования базовых p -областей: а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$); б) удаление БСС; в) 2-я стадия диффузии	Аналогично операции 9.	

	(разгонка примеси в сухом O_2 при $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$).		
12.	Фотолитография 4 для вскрытия окон под диффузию фосфора.	Аналогично операции 3.	
13.	Диффузия фосфора для формирования эмиттерных и приконтактных коллекторных n^+ -областей: а) 1-я стадия (загонка примеси при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$); б) термообработка в сухом кислороде (при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$).	Хлорокись фосфора ($POCl_3$), кислород газообразный, травильный раствор, спирт, этиловый ректификованный, вода деионизованная марки А; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Печь диффузионная типа ДОМ; установка для измерения ρ_z (четырёхзондовая) типа ЦИУС; микроскоп типа МИМ-7; модуль (для травления пластин) из линии хим. обработки "Лада-Электроника".
14.	Фотолитография 5 для вскрытия окон под контакты к элементам ИС.	Аналогично операции 3.	
15.	Нанесение в вакууме слоя металлизации.	Мишень из сплава $Al - (1,2\%)Si$, аргон газообразный, азот жидкий, сжатый воздух.	Установка вакуумного напыления "Оратория-5"; многолучевой интерферометр типа МИСС.
16.	Фотолитография 6 по слою металлизации для формирования коммутации элементов ИС.	Фоторезист позитивный ФП-РН-7, диметилформамид, гексаметилдисизалан, травильный раствор (для травления сплава $Al-Si$); раствор для проявления, вода деионизованная марки А, спирт этиловый ректификованный; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Линия фотолитографии "Лада-Электроника"; микроскоп типа УИМ-25; специальный стенд с многозондовой головкой для измерения ВАХ.
17.	Осаждение из газовой фазы (пиролитическое) пассивирующего слоя ФСС при $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$).	Фосфин (PH_3), моносилан (SiH_4), аргон газообразный, кислород газообразный, спирт этиловый ректификованный, батист отбеленный мерсеризованный.	Установка типа "Изотрон"; интерферометр типа МИИ-4.
18.	Фотолитография 7 для вскрытия окон к контактными площадкам ИС.	Аналогично операции 3.	
19.	Термообработка пластин для вжигания	Азот газообразный	Печь диффузионная типа ДОМ; микроскоп

	металлизации (при $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$).		типа НУ-2Е.
20.	Функциональный контроль и разбраковка ИС.	Краска маркировочная, спирт этиловый ректификованный, батист отбеленный мерсеризованный.	Измерительные установки для контроля и разбраковки ИС.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) лабораторный макет, состоящий из кассет с образцами после различных операций техпроцесса изготовления цифровой ИС типа 133ЛА3;
- 2) микроскоп.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ в приложении 1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Кассета с образцами содержит три образца, отобранные после резки слитка, механической шлифовки и полировки пластин кремния, а также семь образцов после выполнения операций технологического процесса изготовления микросхемы. Образцы № 11 и 12 предназначены для выполнения лабораторной работы 4.3.

1. Изучить последовательность операций при изготовлении полупроводниковых микросхем.

При выборе последовательности операций следует учитывать усложнение рисунка на примере простейшего транзистора и увеличение количества фигур совмещения.

Следует запомнить цвет чистого кремния, поместив полированный образец в поле обзора микроскопа.

Цвет окисла может быть различным в зависимости от его толщины. Однако, области, формируемые одновременно при высокой температуре (выше $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ в открытой или полукрытой системе), имеют всегда одинаковый цвет окисла.

Если на образце выполнена одна из фотолитографий по слою окисла (с травлением окисла для вскрытия в нем окон к поверхности кремния), то в поле обзора микроскопа будут видны области чистого кремния.

2. Определите наименование операций. Результаты занесите в таблицу результатов 4.1.

3. Изобразить эскиз фотошаблона (вид сверху и сбоку) для одной из фотолитографий, заданных преподавателем.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) таблица результатов 4.1;
- 4) эскиз фотошаблона (вид сверху и сбоку);
- 5) выводы.

Таблица результатов 4.1.

Номер образца	Номер операции в маршрутной карте	Наименование операции

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова последовательность операций изготовления полупроводниковой ИС?
2. Каким образом изолируются друг от друга элементы микросхем, изготовленных по планарно-эпитаксиальной технологии?
3. Изобразите сечение полупроводниковой ИС после заданной операции: разделительной диффузии, фотолитографии, пассивации и т. д.
4. Каково назначение скрытого слоя?
5. Что такое эпитаксия? С какой целью формируется эпитаксиальный слой?
6. С какой целью проводится двухстадийная диффузия?

7. Каково распределение примесей по глубине при одно- и двухстадийной диффузии?
8. С какой целью производится разделительная диффузия?
9. С какой целью приконтактные области n -Si легируют до n^+ ?
10. С какой целью термическое окисление производят по схеме: сухой O_2 – пары воды – сухой O_2 ?
11. На какой операции формируются резисторы полупроводниковой ИС?
12. Каково назначение слоя ФСС?

ЛИТЕРАТУРА

1. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок. Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. §§ 7.1 – 7.3.
2. Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И. и др. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1984. §§ 1.1 – 1.4.
3. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники, М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. §§ 6.1 – 6.10.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.2

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы:

- 1) изучить технологические операции производства полупроводниковых микросхем, а также их последовательность при изготовлении БИС на биполярных транзисторах (на примере 1051ХА3),
- 2) ознакомиться с оборудованием и материалами, применяемыми при производстве полупроводниковых микросхем.

Формируемые компетенции: ПК-2 (способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения); ОПК-5 (способность использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных); ОПК-7 (способность учитывать современные тенденции развития измерительной техники в своей профессиональной деятельности).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Общая технологическая схема процессов производства полупроводниковых микросхем включает подготовительные процессы, формирование структуры ИС, в том числе межсоединений ее элементов, и заключительные процессы.

К подготовительным процессам относится изготовление требуемого комплекта фотошаблонов и ряд заготовительных операций: подготовка полупроводниковых подложек (пластин), корпусов ИС и др.

Формирование структуры полупроводниковой ИС происходит по планарно-эпитаксиальной технологии, заключающейся в создании элементов ИС в приповерхностных слоях полупроводниковой пластины с одной (рабочей) стороны при использовании эпитаксиального наращивания тонкого

слоя кремния и групповой обработки пластин. Причем отдельные процессы групповой обработки, например фотолитография, диффузия примесей, окисление, очистка поверхности пластины, носят циклический характер, т.е. обычно многократно повторяются при создании структуры полупроводниковых ИС и каждая последовательность процессов формирует определенную часть структуры ИС. Изменение количества таких последовательностей дает возможность получать полупроводниковые ИС различной сложности. При этом физико-химическая сущность повторяющихся процессов часто остается неизменной, а меняются только технологические режимы, фотошаблоны, используемые для фотолитографии, и некоторые материалы технологических сред. Формирование структуры ИС заканчивается получением межсоединений элементов и защитой (кроме выводных контактных площадок) полупроводниковой ИС пассивирующим покрытием.

Заключительные процессы обычно представляют собой совокупность индивидуальных обработок объекта производства, включая контроль функциональных параметров ИС и разбраковку кристаллов, разделение пластин на кристаллы, сборку и монтаж кристаллов в корпусах, герметизацию, выходной контроль, механические и климатические испытания, покраску корпусов ИС (при необходимости), маркировку, лакировку (при необходимости) и упаковку готовых ИС

Изучение технологических операций производства полупроводниковых микросхем производится на примере БИС типа 1051ХА3. На рисунке 4.2. приводится поэтапное формирование структуры интегральной схемы:

- а – окисление исходной пластины;
- б – фотолитография 1 по слою SiO_2 перед диффузией сурьмы;
- в – вторая стадия диффузии сурьмы для формирования скрытых слоев;
- г – фотолитография 2 по слою фоторезиста и ионное легирование бором для формирования донной части разделительных областей;
- д – эпитаксиальное наращивание n -слоя кремния;

- е – фотолитография 3 для вскрытия окон в SiO_2 перед диффузией фосфора;
- ж – вторая стадия диффузии фосфора для формирования вертикальных n^+ -слоев;
- з – фотолитография 4 под диффузию бора (перед формированием разделительных областей);
- и – фотолитография 5 под ионное легирование бором;
- к – ионное легирование бором для формирования p^+ -областей инжекционных элементов;
- л – термообработка пластин с удаленным фоторезистом после ионного легирования бором;
- м – фотолитография 6 под диффузию бора (перед формированием базовых областей инжекционных элементов);
- н – удаление боросиликатного стекла и SiO_2 после первой стадии диффузии бора;
- о – вторая стадия диффузии бора для формирования базовых областей и p -областей инжекционных элементов с окислением пластин;
- п – фотолитография 7 под диффузию фосфора (перед формированием n^+ -областей);
- р – окисление после первой стадии диффузии фосфора (для формирования эмиттерных, коллекторных приконтактных областей);
- с – фотолитография 8 для вскрытия окон под контакты к элементам БИС;
- т – фотолитография 9 по слою металлизации для формирования первого уровня коммутации;
- у – плазмохимическое осаждение межслойной изоляции;
- ф – фотолитография 10 по межслойному диэлектрику для обеспечения межслойной коммутации;
- х – фотолитография 11 по слою металлизации для формирования второго уровня коммутации, осаждение ФСС и фотолитография 12 по слою пассивации для вскрытия окон к контактными площадкам БИС.

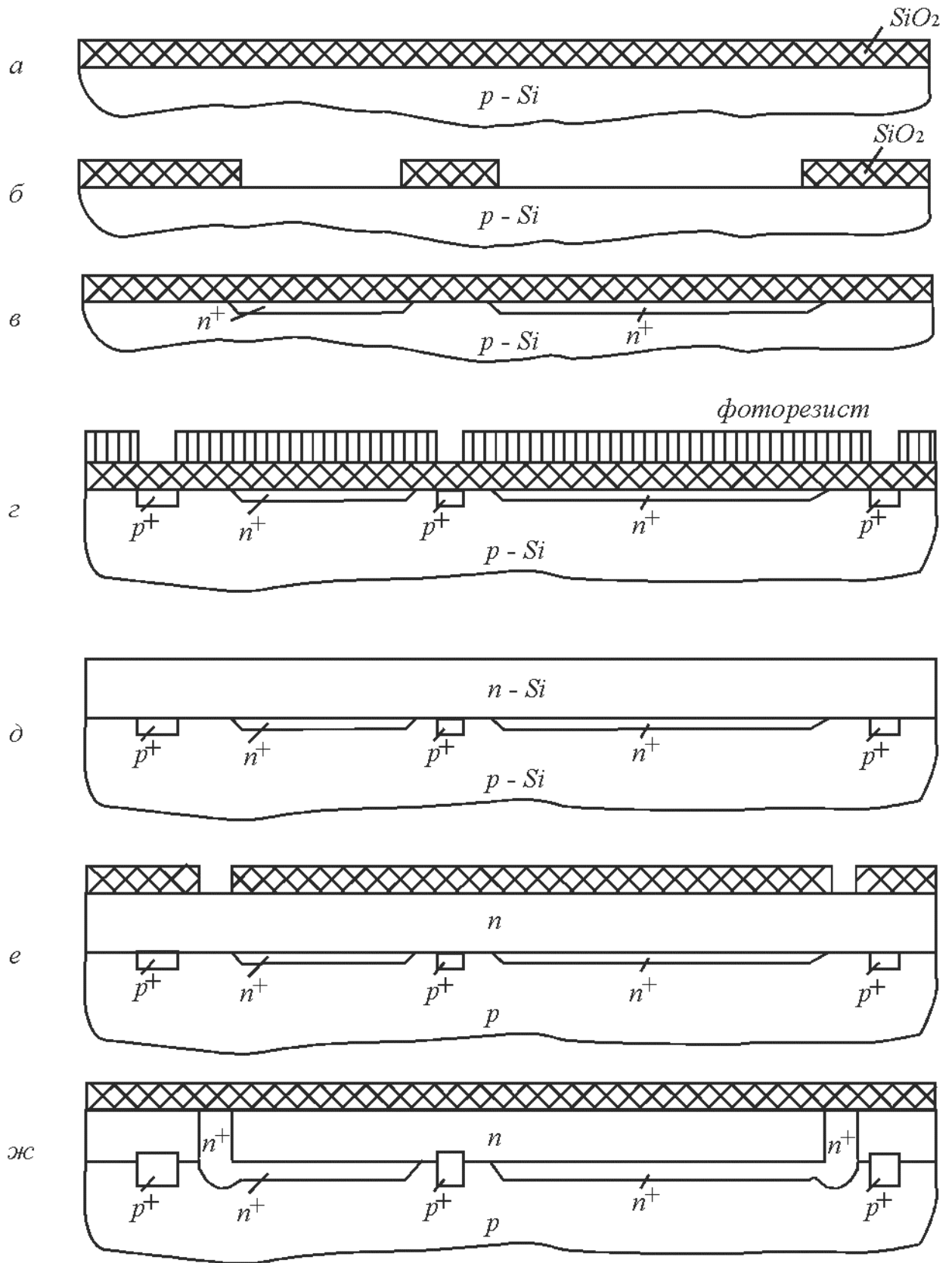


Рисунок 4.2, а – ж. Фрагменты поэтапного формирования структуры БИС 1051ХАЗ:

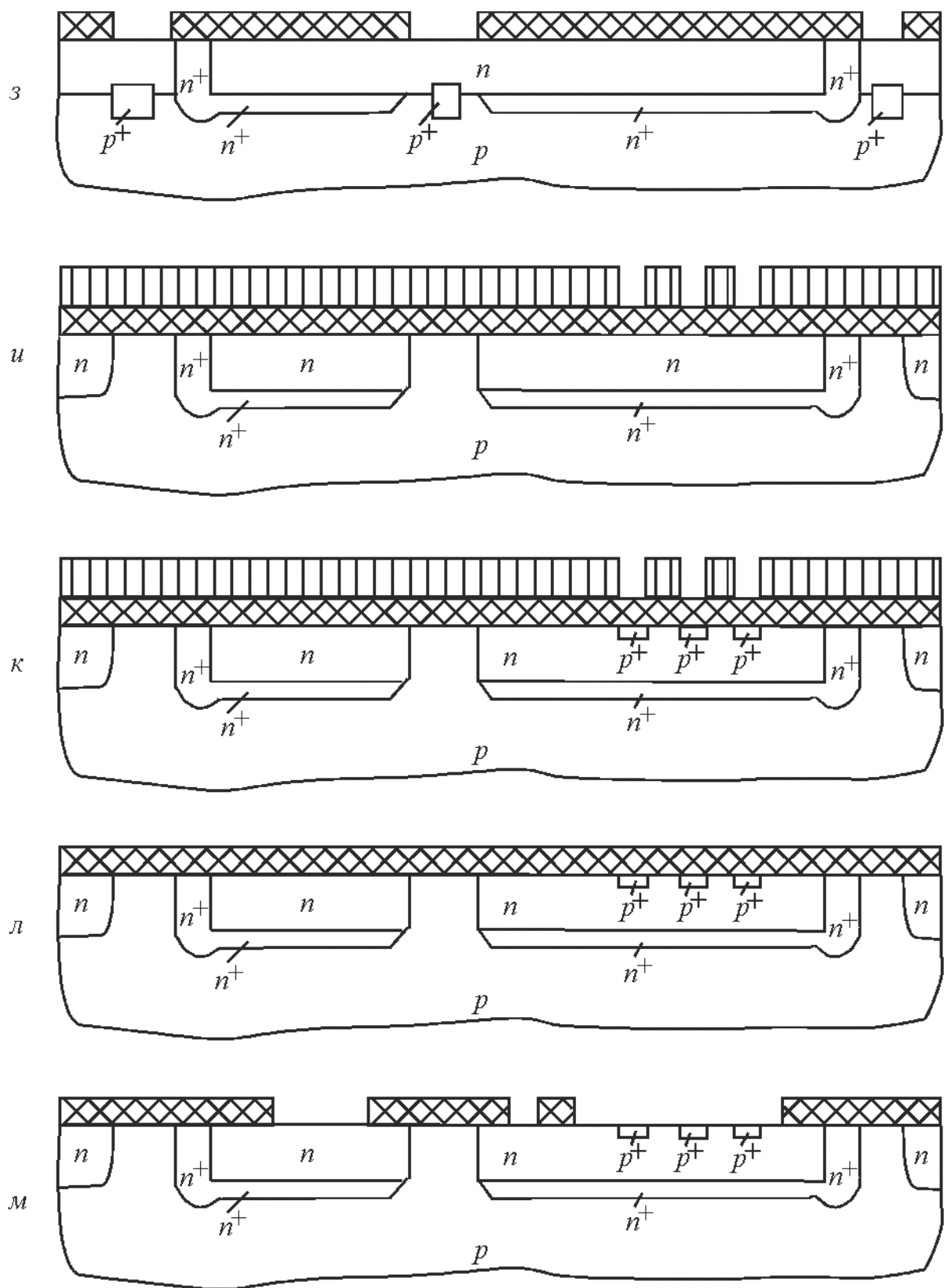


Рисунок 4.2, з – м. Фрагменты поэтапного формирования структуры БИС 1051ХА3:

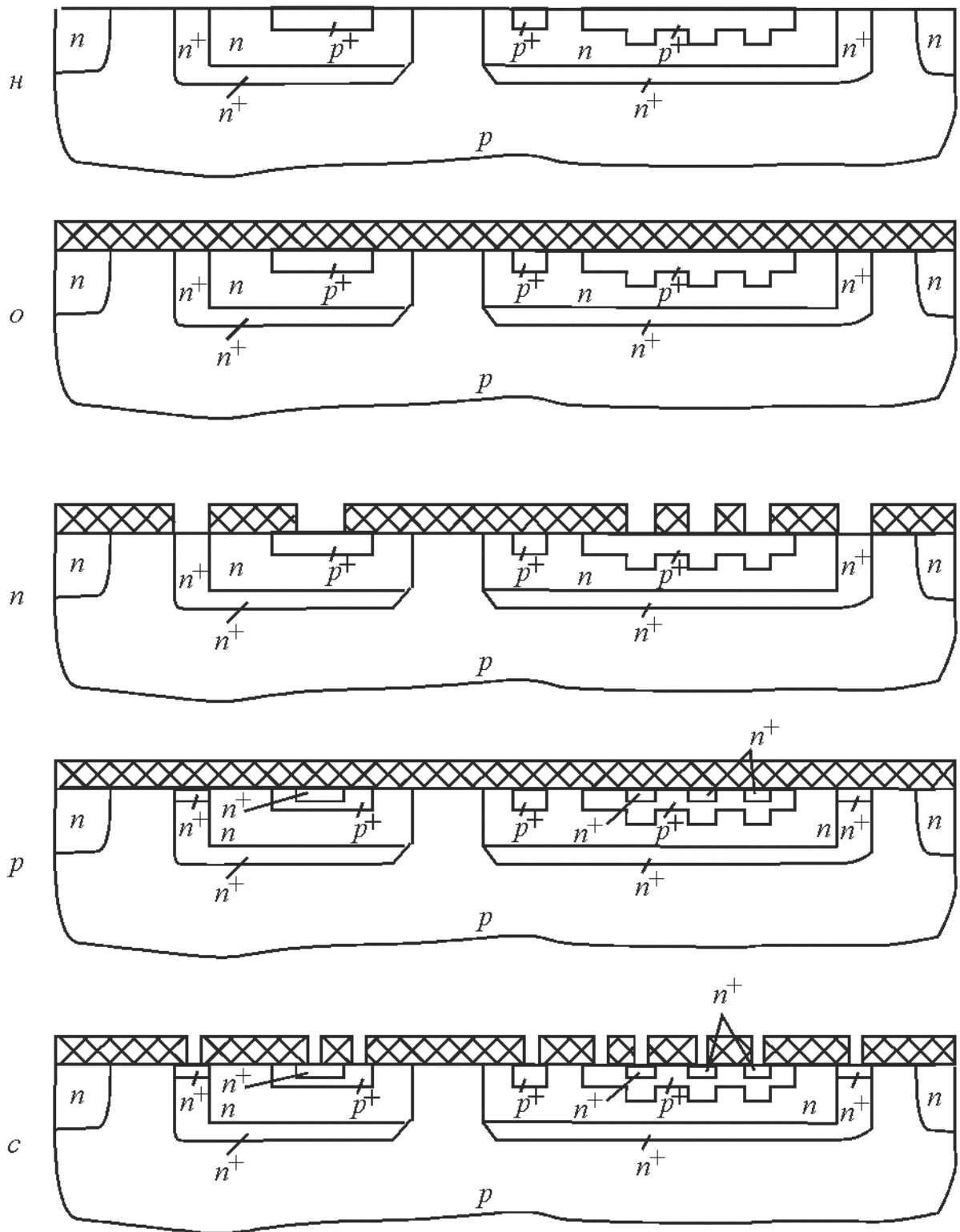


Рисунок 4.2, н – с. Фрагменты поэтапного формирования структуры БИС 1051ХАЗ:

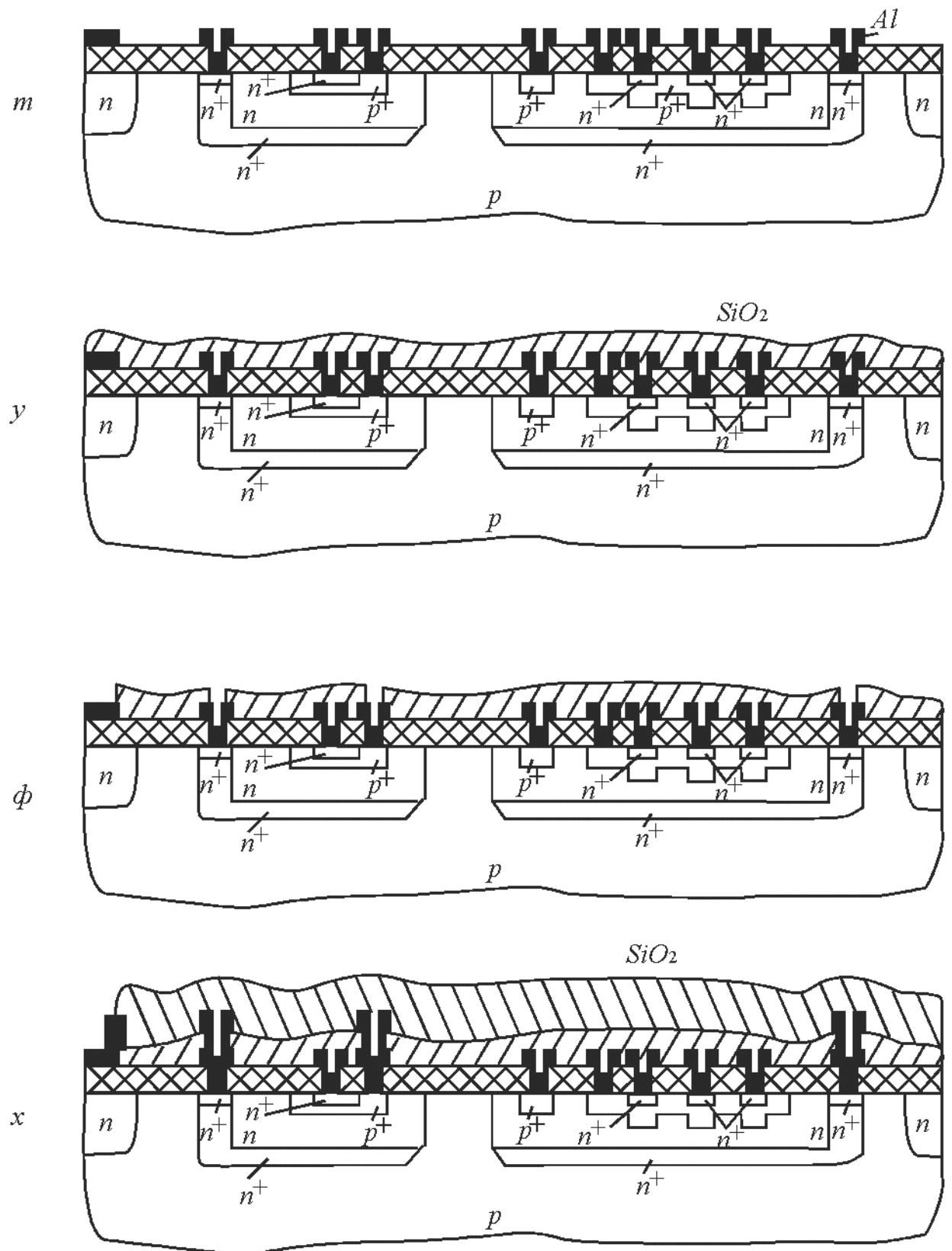


Рисунок 4.2, т – х. Фрагменты поэтапного формирования структуры БИС 1051ХАЗ:

Таблица 12. Основные операции технологического маршрута для изготовления структуры БИС на биполярных транзисторах (1051ХА3)

№	Наименование операции	Материалы технологических и защитных сред	Технологическое оборудование
1.	Химическая обработка пластин кремния (тип КДБ-10) с целью очистки их поверхности.	Толуол, смесь Каро (смесь H_2SO_4 и H_2O_2) перекисноаммиачная смесь; вода деионизованная марки А, кислота фтористоводородная, спирт этиловый ректификованный; батист отбеленный мерсеризованный.	Линия "Лада-Электроника" для хим. обработки; микроскоп, например, типа НУ-2Е.
2.	Окисление пластин (выращивание SiO_2) по системе: сухой O_2 – пары воды – сухой O_2 при $T = 1050^\circ C$.	Кислород газообразный, азот газообразный, вода деионизованная марки А, (при необходимости 10% HF); фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Печь диффузионная типа ДОМ; прибор для измерения толщины окисла, например, эллипсометр.
3.	Фотолитография 1 для вскрытия окон под диффузию сурьмы (перед формированием скрытых n^+ -слоев): а) подготовка поверхности пластин; б) нанесение фоторезиста (ФР); в) сушка слоя ФР; г) совмещение и экспонирование; д) проявление ФР; е) задубливание; ж) травление SiO_2 ; з) удаление ФР.	Фоторезист позитивный ФП-051МК, этилцеллозольвацетат, гексаметилендисизалан, травильный раствор (для травления SiO_2), раствор для проявления (0,6% KOH), вода деионизованная марки А, смесь Каро, спирт этиловый ректификованный; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Линия фотолитографии "Лада-Электроника"; микроскоп типа УИМ-25.
4.	Диффузия сурьмы для формирования скрытых n^+ -слоев: а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при $T = 1150^\circ C$); б) удаление сурьмяносиликатного стекла; в) 2-я стадия диффузии (разгонка примеси вглубь полупроводника) с выращиванием SiO_2 в сухом O_2 при $1200^\circ C$.	Кислород газообразный, азот газообразный (или аргон), сурьма кристаллическая (в ампулах), раствор для выявления $p-n$ -перехода, травильный раствор, спирт этиловый ректификованный, вода деионизованная марки А; батист отбеленный мерсеризованный, фильтр обеззоленный, алмазная паста (на основе тонкого микропорошка).	Печь диффузионная типа ДОМ; установка для измерения ρ_z (четырёхзондовая) типа ЦИУС; микроскоп типа МИМ-7; установка для получения шарового шлифа; модуль (для травления пластин) из линии хим. обработки "Лада-Электроника".

5.	Фотолитография 2 для вскрытия окон в ФР под ионное легирование бором (перед формированием донной части разделительных p^+ -областей).	Фоторезист позитивный типа ФП-051МК, этилцеллозольвацетат, гексаметилдисипазан, травильный раствор (для травления SiO_2), раствор для проявления (0,6% KOH), вода деионизованная марки А, спирт этиловый ректифицированный; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Линия фотолитографии "Лада-Электроника".
6.	Ионное легирование бором (формирование донной части разделительных p^+ -областей).	Трехбромистый бор, спирт этиловый ректифицированный; батист отбеленный мерсеризованный.	Установка для ионного легирования типа "Лада-30".
7.	Удаление ФР.	Смесь Каро, вода деионизованная марки А, батист отбеленный мерсеризованный.	Модули линии фотолитографии "Лада-Электроника".
8.	Удаление SiO_2 .	Травитель (65% HF), вода деионизованная марки А; батист, отбеленный мерсеризованный	Модули линии фотолитографии "Лада-Электроника".
9.	Эпитаксиальное наращивание слоя кремния ($n-Si$) при $T = 1200^\circ C$.	Тетрахлорид кремния, водород газообразный, азот газообразный, хлор газообразный, травитель для выявления дислокаций, вода деионизованная марки А, спирт этиловый ректифицированный; батист отбеленный мерсеризованный.	Установка эпитаксиального наращивания типа "Эпиквар"; установка измерения удельного объемного сопротивления ρ_v , – ЦИУС; многолучевой интерферометр типа МИСС; микроскоп типа МИМ-7.
10.	Окисление пластин (по системе сухой O_2 – пары воды – сухой O_2)	Аналогично операции 2.	
11.	Фотолитография 3 для вскрытия окон под диффузию фосфора (перед формированием вертикальных n^+ -областей)	Аналогично операции 3.	
12.	Диффузия фосфора для формирования вертикальных n -областей: а) 1-я стадия диффузии	Хлорокись фосфора ($POCl_3$), кислород газообразный, азот газообразный, травильный раствор, спирт этиловый ректифицированный, вода	Печь диффузионная типа ДОМ; установка для измерения (четырёхзондовая) ρ_s – типа ЦИУС; микроскоп

	(загонка примеси при $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$); б) удаление фосфорносиликатного стекла (ФСС); в) удаление SiO_2 ; г) 2-я стадия диффузии (разгонка с выращиванием SiO_2 при $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$).	деионизованная марки А; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	типа МИМ-7; модуль (для травления пластин) из линии хим. обработки "Лада-Электроника".
13.	Фотолитография 4 для вскрытия окон под диффузию бора (перед формированием разделительных p -областей)	Аналогично операции 3.	
14.	Диффузия бора для формирования разделительных p -областей: а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$); б) удаление боросиликатного стекла (БСС); в) удаление SiO_2 ; г) 2-я стадия диффузии (разгонка примеси с выращиванием SiO_2 в сухом O_2 при $T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$).	Трехбромистый бор, азот газообразный, кислород газообразный, раствор для выявления p - n -перехода, травильный раствор, спирт этиловый ректификованный, вода деионизованная марки А; батист отбеленный мерсеризованный.	Аналогично операции 4.
15.	Фотолитография 5 для вскрытия окон в ФР под ионное легирование бором (перед формированием донных выступов p^+ -областей инжекционных элементов).	Аналогично операции 5.	
16.	Ионное легирование бором для формирования донных выступов p^+ -областей инжекционных элементов.	Аналогично операции 6.	
17.	Удаление фоторезиста и химическая обработка пластин	Аналогично операции 7.	
18.	Термообработка пластин после ионного легирования (для	Травитель для SiO_2 , раствор для выявления p - n -перехода, вода деионизованная марки	Печь диффузионная типа ДОМ; модули линии для хим. обработки "Лада-

	разгонки примеси (бора) и снижения дефектности структур легированных областей после ионного легирования при $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$).	А, спирт этиловый ректификованный; фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный, алмазная паста.	Электроника"; установка для измерения ρ_{Σ} -ЦИУС; установка для получения шар - шлифа.
19.	Фотолитография 6 для вскрытия окон под диффузию бора (перед формированием базовых областей и p^+ -областей инжекционных элементов)	Аналогично операции 3.	
20.	Диффузия бора для формирования базовых областей и p^+ -областей инжекционных элементов: а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$); б) снятие БСС; в) снятие SiO_2 ; г) 2-я стадия диффузии (разгонка примеси при $T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выращиванием SiO_2 по системе: сухой O_2 – пары воды – сухой O_2).	Аналогично операции 14.	
21.	Фотолитография 7 для вскрытия окон под диффузию фосфора (перед формированием n^+ -областей)	Аналогично операции 3.	
22.	Диффузия фосфора для формирования n^+ -областей (эмиттерных, коллекторных приконтактных областей и n^+ -областей инжекционных элементов): а) 1-я стадия диффузии (загонка примеси при $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$); б) окисление в сухом O_2 (при повышении температуры в рабочей зоне до $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$).	Хлорокись фосфора ($POCl_3$), кислород газообразный, азот газообразный (или аргон), раствор для выявления $p - n$ перехода, травильный раствор, спирт этиловый ректификованный, вода деионизованная марки А; батист отбеленный мерсеризованный, фильтр обеззоленный, алмазная паста (на основе тонкого микропорошка).	Аналогично операции 4.
23.	Фотолитография 8 для вскрытия окон под контакты к элементам.	Аналогично операции 3.	

24.	Нанесение (в вакууме) 1-го слоя металлизации.	Мишень из сплава $Al-(1,2\%) Si$; аргон газообразный, азот жидкий, сжатый воздух.	Установка вакуумного напыления типа "Оратория-5"; многолучевой интерферометр типа МИСС.
25.	Фотолитография 9 по слою металлизации для формирования 1-го уровня коммутации элементов БИС.	Фоторезист ФП-051МК, этилцеллозольвацетат, гексаметилдисилазан, травильный раствор (для травления сплава $Al-Si$); раствор для появления, вода деионизованная марки А, спирт этиловый ректификованный, фильтр обеззоленный, батист отбеленный мерсеризованный.	Линия фотолитографии "Лада-Электроника"; микроскоп типа УИМ-25; специальный стенд (с многозондовой головкой) для измерения ВАХ.
26.	Плазмохимическое осаждение (ПХО) межслойной изоляции (межслойного диэлектрика SiO_2) при $T = 400^\circ C$.	Тетраоксисилан (этилтриэтоксисилан), аргон газообразный, кислород газообразный.	Установка типа УВП-2М; интерферометр типа МИИ-4.
27.	Фотолитография 10 по слою ПХО SiO_2 (вскрытие окон для межслойной коммутации).	Аналогично операции 3.	
28.	Нанесение (в вакууме) 2-го слоя металлизации (с одновременным формированием межслойной коммутации).	Аналогично операции 24.	
29.	Фотолитография 11 по слою металлизации для формирования 2-го уровня коммутации элементов БИС.	Аналогично операции 25.	
30.	Осаждение из газовой фазы (или пиролитическое) пассивирующего слоя ФСС при $T = 450^\circ C$.	Фосфин (PH_3), моносилан (SiH_4), аргон газообразный, кислород газообразный, спирт этиловый ректификованный; батист отбеленный мерсеризованный.	Установка типа "Изотрон" интерферометр типа МИИ-4.
31.	Фотолитография 12 по слою пассивации для вскрытия окон к контактным площадкам БИС.	Аналогично операции 3.	
32.	Термоотжиг (для вжигания металлизации	Азот газообразный.	Печь диффузионная типа ДОМ; микроскоп типа

	при $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$)		<i>HV-2E.</i>
33.	Функциональный контроль и разбраковка БИС.	Краска маркировочная, спирт этиловый ректификованный; батист отбеленный мерсеризованный.	Измерительные установки для контроля и разбраковки БИС.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) лабораторный макет, состоящий из кассет с образцами после различных операций техпроцесса изготовления цифро-аналоговой БИС типа 1051ХАЗ;
- 2) микроскоп.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ в приложении 1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить последовательность операций при изготовлении полупроводниковых микросхем. Рассмотреть образцы в микроскоп и расположить их в последовательности выполнения операций.

При выборе последовательности операций следует учитывать усложнение рисунка на примере простейшего транзистора и увеличение количества фигур совмещения.

Следует запомнить цвет чистого кремния, поместив полированный образец в поле обзора микроскопа.

Цвет окисла может быть различным в зависимости от его толщины. Однако, области, формируемые одновременно при высокой температуре (выше $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ в открытой или полукоткрытой системе), имеют всегда одинаковый цвет окисла.

Если на образце выполнена одна из фотолитографий по слою окисла (с травлением окисла для вскрытия в нем окон к поверхности кремния), то в поле обзора микроскопа будут видны области чистого кремния.

2. Определите наименование операций. Результаты занесите в таблицу результатов 4.2.

3. Изобразить фрагмент эскиза фотошаблона (вид сверху и сбоку) для

одной из фотолитографий, заданных преподавателем, с сохранением геометрических пропорций.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) таблица результатов 4.2;
- 4) эскиз фотошаблона (вид сверху и сбоку);
- 5) выводы.

Таблица результатов 4.2.

Номер образца	Номер операции в маршрутной карте	Наименование операции

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите последовательность основных операций изготовления данной БИС.
2. Почему изолирующие слои SiO_2 на поверхности полупроводниковой БИС получают с применением разных технологий?
3. Каково назначение фоторезиста и почему в данной работе для БИС использовались разные фоторезисты?
4. Почему коллекторный слой не формируют просто диффузией, а наращивают эпитаксиальный слой?
5. Из каких соображений выбирается толщина подложки и эпитаксиального слоя?
6. С какой целью в данном изделии используется ионное легирование?
7. Каково назначение в вертикальных n^+ -слоев?
8. Почему межслойная изоляция формируется методом плазмохимического осаждения?
9. С какой целью производится двухстадийная диффузия примесей?

ЛИТЕРАТУРА

1. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок. Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. §§ 7.1 – 7.3.
2. Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И. и др. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1984. §§ 1.1 – 1.4.
3. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники, М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. §§ 6.1 – 6.10.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.3

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЛОЕВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ МИКРОСХЕМЫ

Цель работы:

1. ознакомление с методами измерения параметров слоев полупроводниковых микросхем;
2. научиться определять толщину пленок двуокиси кремния, эпитаксиальных и диффузионных слоев.

Формируемые компетенции: ПК-2 (способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения); ОПК-5 (способность использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных); ОПК-7 (способность учитывать современные тенденции развития измерительной техники в своей профессиональной деятельности).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Определение толщины пленок двуокиси кремния

Толщину диэлектрических пленок определяют цветовым, интерференционным и эллипсометрическим методами.

Цветовой метод используют для экспресс-контроля толщины пленок SiO_2 от 0,05 до 1,5 мкм. Он основан на явлении интерференции света в тонких пленках. Свет с определенной длиной волны, для которой выполняется условие максимума интерференции, усиливается и наблюдается цветовая окраска пленки. Т. к. оптическая разность хода световых волн, отраженных от верхней и нижней границ пленки, зависит от толщины пленки, то пленки разной толщины имеют разные цвета за счет интерференции в них одной из составляющих белого света, при этом толщина пленки кратна длине волны усиливающегося света. Через некоторый диапазон толщин цвета повторяются. Порядковый номер каждого

диапазона соответствует порядку интерференции. Если номинальное значение толщины пленки неизвестно, то ее травят «на клин» и определяют порядок отражения по числу повторений цвета первой полосы (обычно самой яркой), начиная со стороны чистого кремния и заканчивая цветом нетравленного SiO_2 . По цветовой шкале можно определить толщину пленки с точностью до 0,02 мкм.

Интерференционный метод определения толщины диэлектрических пленок основан на интерференции лучей, отраженных от поверхности пластины и пленки. Разность хода этих двух лучей определяется толщиной пленки, показателем преломления и углом падения света. Измерения могут быть проведены с разрушением и без разрушения пленки. В первом случае часть пленки стравливают и получают ступеньку. В поле зрения микроинтерферометра (например, типа МИИ-4) наблюдают интерференционную картину в виде смещенных полос в месте ступеньки. Если целостность пленки не нарушать, то интерференционная картина будет в виде прямых полос. Когда спектр интерференционных полос от пучка, отраженного поверхностью пленки, имеет слабую интенсивность, на ступеньку напыляют тонкий (0,02 – 0,03 мкм) слой алюминия, который усиливает интенсивность картины и, кроме того, делает пленку непрозрачной. Методика определения толщины пленок, как правило, приводится в описании, прилагаемом к интерферометру. Погрешность интерференционного метода зависит от типа микроинтерферометра и обычно не превышает 10 %.

Для более точного определения толщины диэлектрических и поликремниевых пленок используют интерференционный метод, основанный на спектральной зависимости коэффициента отражения от поверхности раздела пленка – пластина в видимой области спектра (диапазон длин волн составляет 0,33 – 0,8 мкм). Положение минимальных и максимальных значений коэффициента отражения зависит от показателей преломления и поглощения, а также от толщины пленки. Интерференционный спектр

отражения контролируемого образца получают с помощью спектрофотометра, после чего результаты идентифицируют по имеющимся, например, номограммам и определяют толщину пленки. Погрешность измерения составляет в этом случае $< 2 \%$.

Эллипсометрический метод измерения толщины диэлектрических пленок основан на отражении линейно-поляризованного лазерного луча от покрытой пленкой пластины. В результате образуется эллиптически-поляризованная отраженная волна. Измерив ее параметры (фазу и амплитуду), определяют, например по номограммам, толщину пленки и ее коэффициент преломления. Методом эллипсометрии можно выполнять контроль многослойных структур, например $Si_3N_4 - SiO_2 - Si$ и др, но для этого нужно знать показатели преломления всех слоев и пластины.

Определение толщины эпитаксиальных и диффузионных слоев

Толщину эпитаксиальных и диффузионных слоев определяют по глубине залегания p - n -перехода, который выявляется в простейшем случае методами окрашивания сферического шлифа (химического декорирования). Для этого изготавливают на контрольной пластине (свидетеле) шлиф с помощью вращающегося стального шара диаметром 35 – 100 мм, смазанного алмазной пастой зернистостью < 1 мкм. Глубина сферической лунки должна превышать глубину p - n -перехода (рис. 4.3). Границу p - n -перехода выявляют химическим окрашиванием p -области в концентрированной фтористоводородной кислоте (HF) при интенсивном освещении. Для окрашивания n -области используют водный раствор медного купороса с добавлением 0,1 % концентрированной фтористоводородной кислоты. Легированные области кремния p -типа после окрашивания будут выглядеть темнее окружающего материала, а области n -типа окажутся покрытыми осажденной медью и будут выглядеть красноватыми.

Для определения глубины залегания p - n -перехода на окрашенных шлифах под микроскопом измеряют длину хорды H . Глубина залегания p - n -перехода (толщина диффузионного слоя) x определяется по формуле:

$$x=H^2/(8R) \quad (4.1)$$

где H – длина хорды, R – радиус шара.

Погрешность метода составляет около 10 % в диапазоне глубин от 2 до 10 мкм. Метод не пригоден для контроля глубины мелких p - n -переходов (менее 1 мкм) из-за большой погрешности. В этом случае используют фотоэлектрический метод сканирования поверхности цилиндрического шлифа сфокусированным лазерным пучком с регистрацией кривых фототока (фотоответа) и интерференции.

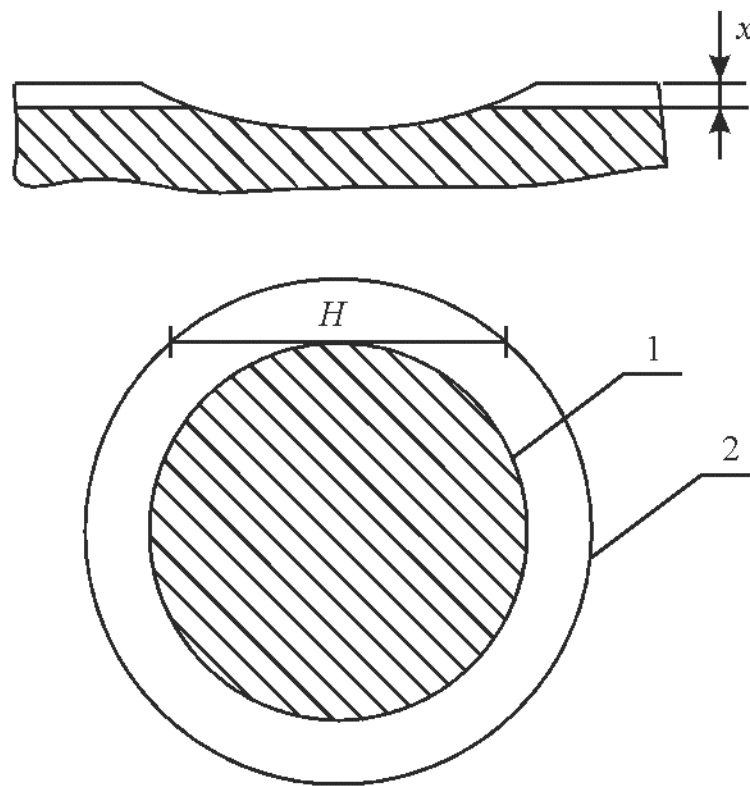


Рисунок 4.3. Определение толщины эпитаксиальных и диффузионных слоев с помощью шарового шлифа.

- 1 – граница раздела двух областей, отличающихся типом проводимости,
2 – контур шарового шлифа.

Таблица 13. Основные сведения об элементах структур полупроводниковых ИС

Элементы структуры	Тип проводимости	Используемые технологические материалы	Толщина элементов структуры, мкм	Удельное поверхностное сопротивление Ом/□	Примечания
Подложка из монокристаллического кремния	p	Очищенный поликремний, легирующая примесь – бор	525 ± 25	-	Направленная кристаллизация на затравку из объема расплава поликремния и легирующей примеси
Скрытый слой	n^+	Сурьма кристаллическая	$3,5 \pm 0,2$	25 ± 5	Получают диффузией
Эпитаксиальный слой	n	$SiCl_4$ и H_2	$7,9 \pm 0,2$	-	Осаждение из газовой фазы
Разделительная область	p	BBr_3	$10,0 \pm 0,2$	90 ± 8	Получают диффузией для ИС и сочетанием диффузии и ионного легирования для БИС
Базовая область	p (p^+ для БИС)	BBr_3	$1,65 \pm 0,10$	180 ± 10 (110 ± 10 для БИС)	Получают диффузией для ИС и сочетанием диффузии и ионного легирования для БИС
Эмиттерная область	n^+	$POCl_3$	$1,2 \pm 0,1$	9 ± 1	Получают диффузией
Слой металлизации	-	$Al + 1,2\% Si$	$0,6 \pm 0,1$ ($1,0 \pm 0,1$ 2-й слой металлиз.)	-	Наносят в вакууме, например, методом ионно-плазменного распыления
Изолирующий SiO_2	-	Кислород сухой, пары воды	$0,80 \pm 0,05$ ($0,6 \pm 0,05$ для БИС)	-	Термическое окисление кремния
Пассивирующая	-	SiH_4, PH	$0,70 \pm 0,05$	-	Осаждение из

щий слой ФСС					газовой фазы (пиролиз)
Вертикальный слой	n^+	$POCl_3$	$6,8 \pm 0,2$	45 ± 5	Диффузия
SiO_2 межслойная изоляция	-	$O_2, Si(OC_2H_5)_4$	$1,0 \pm 0,1$	-	Плазмохимическое осаждение

Таблица 14. Зависимость цвета термически выращенной пленки двуокиси кремния от ее толщины

Порядок интерфе- ренции	Толщина пленки, мкм	Цвет пленки	Порядок интерфе- ренции	Толщина пленки. мкм	Цвет пленки
1	0,05	Бежевый	3	0,47	Фиолетовый
	0,07	Коричневый		0,48	Голубовато-фиолетовый
	0,10	Темно-фиолетовый		0,49	Голубой
	0,12	Голубой		0,50	Голубовато-зеленый
	0,15	Светло-голубой		0,52	Зеленый
	0,17	Металлический		0,54	Темновато-зеленый
	0,20	Светло-золотистый		0,56	Зеленовато-желтый
	0,22	Золотистый		0,57	Желтый
	0,25	Оранжевый		0,58	Светло-оранжевый
	0,27	Красно-фиолетовый		0,60	Телесно-розовый
				0,63	Фиолетово-красный
2	0,30	Фиолетово-голубой	4	0,68	Голубоватый
	0,31	Голубой		0,72	Голубовато-зеленый
	0,32	Зелено-голубой		0,77	Желтоватый
	0,34	Светло-зеленый		0,80	Оранжевый
	0,35	Зеленый		0,83	Желтовато-розовый
	0,36	Темно-зеленый		0,85	Светло-красновато-фиолетовый
	0,37	Зеленовато-желтый			
	0,39	Желтый			
	0,41	Светло-оранжевый			
	0,42	Телесно-розовый			
	0,44	Фиолетово-красный			
	0,46	Красно-фиолетовый			

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) лабораторный макет, состоящий из кассеты с образцами 11 и 12;
- 2) микроскоп.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ в приложении 1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1) Определить толщину диффузионного слоя по глубине залегания р-п перехода в кремнии, для этого;

- разместить образец 11 так, чтобы в поле зрения микроскопа была видна лунка шарового шлифа;

- трижды измерить для лунки шарового шлифа значения H (размер хорды) так, как показано на рисунке 4.3.

- рассчитать среднее значение H ;

- рассчитать толщину диффузионного слоя по формуле $X=H^2/8R$, R – радиус шара приспособления для изготовления шарового шлифа в мкм;

2) По цвету пластины 12 с учетом порядка интерференции определить толщину слоя окисла.

3) Результаты измерений занести в таблицы 4.3 и 4.4.

Порядок выполнения измерений, проводимых на цифровом микроскопе Keyence VHX-2000 приведен в приложении 2.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) таблица результатов 4.3;
- 4) таблица результатов 4.4;
- 5) выводы.

Таблица результатов 4.3. Определение толщины диффузионного слоя

№	H_i	$\langle H \rangle$	x , мкм

Таблица результатов 4.4. Определение толщины окисла

Цвет	Порядок интерференции	Толщина окисла, мкм	Назначение данного окисла в ИС

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими способами определяют толщину диэлектрических пленок?
2. На чем основан цветовой метод измерения толщины слоя?
3. Какой из методов определения толщины диэлектрических пленок является наиболее точным?
4. Какой метод можно использовать для определения толщины многослойных диэлектрических покрытий?
5. Каким методом определяется глубина залегания p - n -перехода?

ЛИТЕРАТУРА

1. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1986. §§ 6.5, 7.12, 11.6.
2. Марголин, В. И. Физические основы микроэлектроники : учебник / В. И. Марголин, В. А. Жабрев, В. А. Тупик. - Москва : Академия, 2008. § 7.10.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5.1
ИЗУЧЕНИЕ ТЕХПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ДМДП ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ.

Цель работы:

1. Изучить последовательность операций изготовления интегральных микросхем на МДП транзисторах.
2. Ознакомиться с технологией ДМДП ИМС.
3. Произвести оптические измерения конструктивных параметров МДП структур.

Формируемые компетенции: ПК-2 (способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения); ОПК-5 (способность использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных); ОПК-7 (способность учитывать современные тенденции развития измерительной техники в своей профессиональной деятельности).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Конструкция ДМДП транзистора получается методом двойной диффузии. Данная конструкция была разработана для обеспечения высокого быстродействия за счёт уменьшения длины канала транзистора до субмикронных размеров (~ 1 мкм). В этом транзисторе (рис. 5.1.) области канала p -типа и истока n^+ -типа формируются в процессе двух ионных легирований в одно и то же окно в окисной маске. Второй особенностью ДМДП транзистора является то, что не требуется высокой точности совмещения затвора с областью стока, как в обычном МДП транзисторе. В связи с этим длина канала $0,5 - 1$ мкм реализуется даже при ограниченных возможностях фотолитографического процесса по разрешающей способности. Короткий канал n -типа формируется в приповерхностной области кремния p -типа электропроводности в промежутке между двумя p - n

переходами. Число носителей в этом индуцированном канале определяется величиной положительного напряжения на затворе, превышающем пороговое значение, а скорость их перемещения – величиной положительного напряжения на стоке относительно истока. В отличие от обычных МДП транзисторов в *n*-ДМДП транзисторах существует область дрейфа электронов в обеднённой области пространственного заряда (область l'_k на рис. 5.1.) между каналами и стоком. Поле в этой области является ускоряющим.

Перекрытие электродом затвора обеднённой области объёмного заряда даёт лишь незначительный вклад в паразитную ёмкость затвор – сток, но наличие этой области позволяет повысить допустимое напряжение сток – исток до нескольких сотен вольт.

К достоинствам *n*-ДМДП транзисторов относят высокое быстродействие (время включения ~ 3 нс) и высокое рабочее напряжение сток – исток. К недостаткам относят малую плотность размещения элементов на кристалле из-за замкнутой формы канала, охватывающей область истока и необратимость областей стока и истока при включении в схему.

Особенности технологического процесса изготовления *n*-ДМДП структур с поликремниевыми затворами.

Для изготовления этих структур используют кремниевые пластины, легированные бором с ориентацией рабочей поверхности по плоскости (100), поскольку при такой ориентации плотность поверхностных состояний примерно на порядок ниже, чем при других ориентациях. Концентрация легирующей примеси и удельное объёмное сопротивление пластины определяется рабочим напряжением сток – исток.

В данной технологии возможно использование пластин *n*-типа электропроводности, но вывод подложки ДМДП транзистора на отдельный электрод в этом случае невозможен.

Первой особенностью технологии *n*-ДМДП структур является использование трёх ионных легирований с последующей термообработкой.

Второе ионное легирование служит для формирования областей n^+ -стоков и истоков. Особое значение имеет термообработка после ионного легирования фосфором, так как её режим и длительность определяет важнейший конструктивный параметр ДМДП транзистора – длину канала. Причём, последнее ионное легирование служит для формирования p^+ охранных колец для исключения паразитных связей между соседними элементами на пластине. Эти кольца уменьшают плотность элементов на пластине и их размеры выбирают минимально возможными.

Второй особенностью технологии n -ДМДП структур является применение поликремниевых затворов. Применение поликремния позволяет снизить пороговые напряжения ДМДП транзистора на величину разности потенциалов металл – полупроводник (~ 1 В) при металлическом затворе. Поликремний используют в качестве межэлементных соединений. Но для обеспечения сравнительно-низкого поверхностного сопротивления ($40 \text{ Ом}/\square$) поликремния вводят операцию диффузионного легирования фосфором.

Третьей особенностью технологии n -ДМДП структур является выращивание тонкого подзатворного окисла термическим окислением при температуре 1150°C в атмосфере сухого кислорода для получения однородности толщины и снижения встроенного в окисел заряда. В данной технологии использован ряд приёмов, стабилизирующих свойства подзатворного окисла и связывающих встроенные в окисел заряды. Во-первых, применение поликремниевых затворов защищает подзатворный окисел от проникновения в него примесей. Во-вторых, использование в качестве межслойной изоляции и пассивирующего слоя фосфоросиликатного стекла (ФСС), способного связывать встроенные заряды в окисле ионами фосфора. В-третьих, применение двух фотолитографий (8 и 9) при формировании контактных окон по тонкому окислу и межслойной изоляции исключает непосредственный контакт алюминиевой плёнки с подзатворным окислом в областях стока и истока. Это достигается тем, что размер

контактного окна в тонком окисле к этим областям будет больше, чем в слое ФСС.

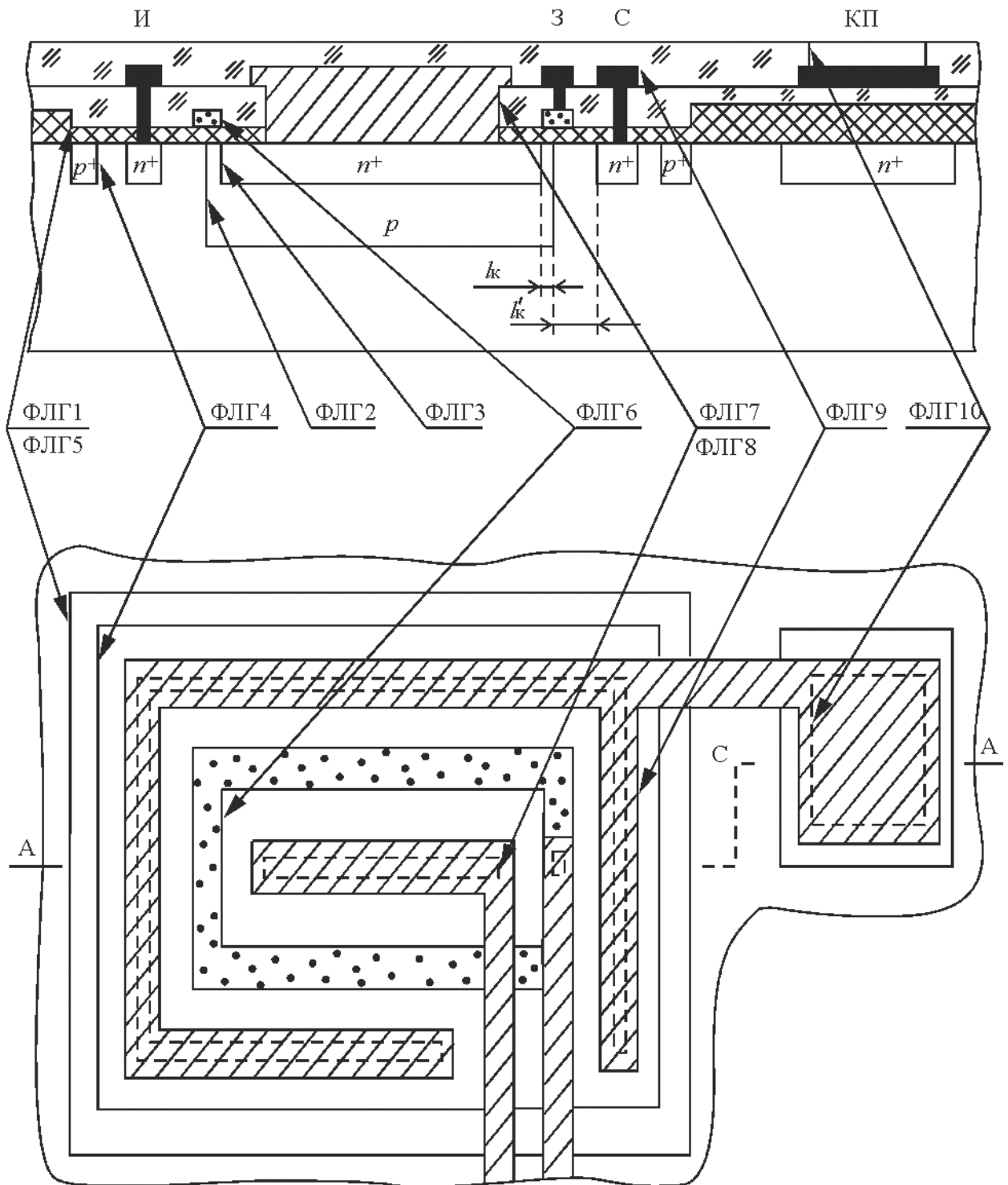


Рисунок 5.1. Структура *n*-ДМДП

ФЛГ1 – ФЛГ10 – фотолитографии 1 – 10 в соответствии с маршрутной картой тех.процесса; l_k – длина канала, l'_k – обедненная область пространственного заряда (область дрейфа электронов, прошедших канал).

Таблица 15. Маршрутная карта технологического процесса *n*-ДМДП ИМС с поликремниевыми затворами.

№	Наименование операции	Режимы, реактивы	Параметры слоёв и пластин
1	Составление и маркировка партии пластин.		КДБ-20 (100)
2	Химическая обработка.		
3	Окисление.	1150 °С в атмосфере O_2+H_2O	$h = 0,55$ мкм
4	Фотолитография 1. Вскрытие окон под активные области.		
5	Фотолитография 2. Создание маски для ионного легирования <i>p</i> -областей каналов.		
6	Ионное легирование бором. Формирование <i>p</i> -областей каналов.	$E = 100$ кэВ $D = 8$ мкКл	
7	Термообработка <i>p</i> -канала (разгонка бора).	1150 °С	$h = 6 - 8$ мкм
8	Фотолитография 3. Создание маски для ионного легирования n^+ -областей стока, истока.		
9	Ионное легирование фосфора. Формирование областей n^+ -стоков, истоков.	$E = 100$ кэВ $D = 7$ мкКл	
10	Термообработка n^+ -стоков, истоков (формирование короткого канала).	1150 °С	$h = 1,5 - 2$ мкм
11	Фотолитография 4. Создание маски для ионного легирования p^+ -охранных колец.		
12	Ионное легирование бором. Формирование p^+ -областей охранных колец.	$E = 100$ кэВ $D = 450$ мкКл	
13	Термообработка p^+ охранных колец (стабилизация структуры после ионного легирования).	1100 °С	$h = 1,3$ мкм
14	Фотолитография 5. Вскрытие окон для выращивания тонкого подзатворного окисла.		
15	Химическая обработка.		
16	Окисление (формирование подзатворного окисла).	1150 °С в атмосфере O_2	$h = 0,15$ мкм
17	Осаждение поликремния.		$h = 0,5$ мкм
18	Диффузионное легирование фосфором. Легирование областей поликремниевых затворов.	900 °С	40 Ом/□
19	Химическая обработка.		
20	Фотолитография 6. Формирование поликремниевых затворов.		
21	Химическая обработка.		

22	Фотолитография 7. Формирование контактных окон к истоку, стоку в тонком окисле.		
23	Осаждение ФСС (2%) для межслойной изоляции.		$h = 0,8$ мкм
24	Термообработка.		
25	Фотолитография 8. Формирование контактных окон к стокам, истокам, затворам в слое ФСС.		
26	Плазмохимическая очистка.		
27	Напыление алюминия.		$h = 1,2$ мкм 0,02 – 0,05 Ом/□
28	Фотолитография 9. Формирование межэлементных соединений и контактных площадок.		
29	Адгезионный отжиг алюминия.	500 °C	
30	Осаждение защитного (пассивирующего) ФСС (1%).		$h = 0,8$ мкм
31	Фотолитография 10. Вскрытие окон в защитном слое к алюминиевым контактным площадкам.		
32	100% контроль параметров.		
33	Скрайбирование пластин.		
34	Ломка пластин на кристаллы.		
35	Посадка кристалла на основание корпуса.		
36	Термокомпрессионная приварка выводов.		
37	Герметизация корпуса.		
38	Маркировка микросхемы.		
39	Приёмосдаточные испытания.		
40	Упаковка микросхем.		

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) лабораторный макет, состоящий из кассет с образцами после различных операций техпроцесса изготовления ДМДП ИМС типа K590KN8;
- 2) микроскоп.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ в приложении 1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Рассмотреть под микроскопом образцы изделия, определить, в какой последовательности они изготовлены. Для правильного определения

названия технологической операции и их последовательности необходимо учесть следующие рекомендации:

а) найдите пластину с наименьшим количеством сформированных областей и определите операцию, выполненную на этой пластине.

б) затем найдите пластину, на которой выполнена следующая операция и определите ее наименование и т. д.

в) помните, что поверхность чистого кремния в окнах маскирующего окисла белая или светло-серая; поверхность чистого поликремния – желтого цвета; окисел на поверхности кремния может быть разного цвета, но области, которые сформированы одновременно, имеют одинаковый цвет.

2. Определите характерные признаки выбранных технологических операций Результаты занесите в таблицу результатов 5.1.

3. Произвести оптические измерения конструктивных параметров элементов МДП ИМС, для чего необходимо:

а) найти по топологии измеряемый элемент;

в) для каждой области элемента МДП ИМС определить длину и ширину.

Порядок выполнения измерений, проводимых на цифровом микроскопе Keyence VHX-2000 приведен в приложении 2.

4. Нарисовать эскиз измеряемых элементов без соблюдения масштаба, но с указанием областей и выводов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) таблица результатов 5.1;
- 4) эскизы топологий с обозначениями элементов, указанием областей и выводов, результатами измерения параметров элементов;
- 5) выводы.

Таблица результатов 5.1.

Номер образца	Номер операции в маршрутной карте	Наименование операции

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите последовательность основных технологических операций ДМДП структур с поликремниевыми затворами.
2. Для чего в МДП структурах нужен толстый окисел? Как его выращивают?
3. Почему для межслойной изоляции и пассивации используют фосфоросиликатное стекло?
4. Почему при изготовлении контактных окон к областям стока и истока используют две фотолитографии?
5. Почему производят легирование поликремниевого затвора?
6. Количество и назначение операций окисления при производстве ДМДП структур.
7. Количество и назначение операций ионного легирования и диффузии при производстве *n*-канальных ДМДП структур с поликремниевым затвором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок. Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. §§ 8.1 – 8.3.
2. Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И. и др. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1984. §§ 2.1 – 2.7.
3. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники, М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. §§ 7.7 – 7.8.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5.2
ИЗУЧЕНИЕ ТЕХПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ
КМДП ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ.

Цель работы:

1. Ознакомиться с технологией КМДП ИМС.
2. Произвести оптические измерения конструктивных параметров.

Формируемые компетенции: ПК-2 (способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения); ОПК-5 (способность использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных); ОПК-7 (способность учитывать современные тенденции развития измерительной техники в своей профессиональной деятельности).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Комплементарные МДП структуры содержат одновременно n -канальные и p -канальные МДП транзисторы. Конструкцию p -МДП транзисторов получают путём локального легирования бором исходной пластины, а для n -МДП транзисторов формируют p -карманы. В этих карманах формируют n -канальные МДП транзисторы путём локального легирования фосфором областей стока и истока. Область канала будет индуцироваться под областью затвора в p -МДП транзисторах при отрицательном напряжении на затворе относительно истока, а в n -МДП транзисторах при положительном напряжении относительно истока, превышающем пороговое напряжение. Длина наведённого канала ограничивается отрезком между областями стока и истока. В силу того, что основные носители (дырки) в p -МДП транзисторах имеют меньшую подвижность по сравнению с электронами, то для обеспечения равного быстродействия ширину p -канала необходимо увеличивать в 1,5 – 2 раза по сравнению с шириной n -каналов, если длина каналов обоих типов выполнена минимальной.

Достоинства КМДП структур: минимальное энергопотребление (особенно в статическом режиме), широкий диапазон питающих напряжений (3 – 15 В). Недостатки КМДП структур: разные конструктивные параметры n -МДП и p -МДП транзисторов при равном быстродействии, а так же наличие паразитных МДП транзисторов и тиристоров, которые приводят к наличию нежелательных связей и «защёлкиванию» схемы.

Особенности изготовления КМДП структур с поликремниевыми затворами и диэлектрической изоляцией. Для изготовления этих структур используют кремниевые пластины, легированные фосфором с ориентацией рабочей поверхности по плоскости (100). В поверхностном слое пластины сформированы диэлектрические карманы из двуокиси кремния для размещения элементов схемы. Диэлектрическая изоляция разделяет все активные элементы, исключает взаимодействие p и n переходов, которые создают паразитные тиристорные структуры. Диэлектрическая изоляция исключает «защёлкивание» (эффект сохранения открытого состояния паразитного тиристора до выключения питания) путём создания изоляционного барьера из SiO_2 между транзисторами n -МДП и p -МДП. Наряду с диэлектрической изоляцией применяют и охранные кольца n^+ и p^+ , опоясывающие один или группу однотипных МДП транзисторов. Кроме ослабления паразитных связей, охранные кольца имеют контактные окна, что обеспечивает объединение отдельных островков кремния в единый кристалл (подложку).

Технология КМДП структур использует 5 ионных легирований с последующей термообработкой. Область стока и истока n -МДП транзисторов формируется вторым и четвёртым ионным легированием (операции 10 и 18), а области стока и истока p -МДП транзисторов формирует третьим и пятым ионным легированием (операции 14 и 21). Размер длины канала будет определяться режимом и длительностью стабилизирующей термообработки (операции 19, 22). Применение двойного легирования областей стока и истока обеспечивает хорошую воспроизводимость конструктивных

параметров КМДП структур и повышение напряжения пробоя p - n -переходов сток-подложка, исток-подложка до 35 – 40 В.

Второй особенностью технологии является применение поликремниевых затворов. Кроме снижения порогового напряжения МДП транзисторов, этот материал после диффузионного легирования фосфором (операция 27) используют в качестве межэлементных соединений, что повышает плотность размещения элементов на пластине.

КМДП технология включает выращивание качественного тонкого подзатворного окисла и ряд приёмов, стабилизирующих его параметры во времени.

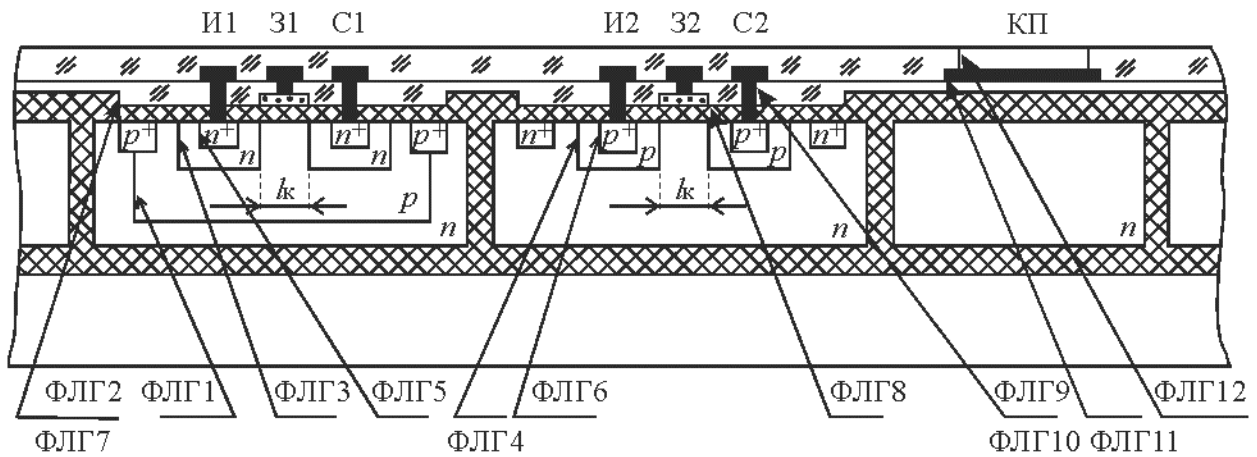


Рисунок 5.2. Структура n -ДМДП

ФЛГ1 – ФЛГ12 – фотолинтографии 1 – 12 в соответствии с маршрутной картой технологического процесса; l_k – длина канала.

Таблица 16. Маршрутная карта технологического процесса КМДП ИМС с поликремниевыми затворами.

№	Наименование операции	Режимы, реактивы	Параметры слоёв и пластин
1	Составление и маркировка партии пластин.		КЭФ 7,5 (100)
2	Химическая обработка.		
3	Окисление.	в атмосфере $O_2 + H_2O$, 1150 °C	$h = 0,35$ мкм
4	Фотолинтография 1. Вскрытие окон под p -карманы.		
5	Ионное легирование бором. Формирование p -карманов.	$E = 100$ кэВ $D = 8$ мкКл	
6	Термообработка p -карманов (разгонка бора).	1200 °C	$h = 15$ мкм 800 Ом/□
7	Фотолинтография 2. Вскрытие окон в		

	окисле для создания активных областей.		
8	Химическая обработка.		
9	Фотолитография 3. Создание маски для ионного легирования n^+ -областей стока, истока 1.		
10	Ионное легирование фосфора. Формирование областей n^+ -стоков, истоков 1	$E = 100$ кэВ $D = 7$ мкКл	
11	Химическая обработка		
12	Термообработка n^+ -стоков, истоков 1 (разгонка фосфора)	1150 °C	$h = 4$ мкм
13	Фотолитография 4. Создание маски для ионного легирования областей p^+ -стоков, истоков 1.		
14	Ионное легирование бором. Формирование p^+ -стоков, истоков 1.	$E = 100$ кэВ $D = 2,5$ мкКл	
15	Химическая обработка.		
16	Термообработка p^+ стоков, истоков 1 (разгонка бора).	1150 °C	$h = 3,3$ мкм
17	Фотолитография 5. Создание маски для ионного легирования областей n^+ -стоков, истоков 2.		
18	Ионное легирование фосфора. Формирование областей n^+ -стоков, истоков 1	$E = 100$ кэВ $D = 1000$ мкКл	
19	Термообработка n^+ -стоков, истоков 2 (стабилизация структуры после ионного легирования).	1100 °C	$h = 1,5$ мкм
20	Фотолитография 6. Создание маски для ионного легирования областей p^+ -стоков, истоков 2.		
21	Ионное легирование бором. Формирование p^+ -стоков, истоков 2.	$E = 100$ кэВ $D = 450$ мкКл	
22	Термообработка p^+ стоков, истоков 2 (стабилизация структуры после ионного легирования).	1100 °C	$h = 1,3$ мкм
23	Фотолитография 7. Вскрытие окон для выращивания тонкого подзатворного окисла.		
24	Химическая обработка.		
25	Окисление (формирование тонкого подзатворного окисла).	1150 °C в атмосфере O_2	$h = 0,12$ мкм
26	Осаждение поликремния.		$h = 0,5$ мкм
27	Диффузионное легирование фосфором. Легирование областей поликремниевых затворов.	900 °C	40 Ом/□
28	Фотолитография 8. Формирование поликремниевых затворов и поликремниевых межэлементных		

	соединений.		
29	Химическая обработка.		
30	Фотолитография 9. Формирование контактных окон к истоку, стоку в тонком окисле, охранным кольцам.		
31	Осаждение ФСС (2%) для межслойной изоляции.		$h = 0,8$ мкм
32	Термообработка.		
33	Фотолитография 10. Формирование контактных окон к стокам, истокам, охранным кольцам, затворам в слое ФСС.		
34	Плазмохимическая очистка.		
35	Напыление алюминия.		$h = 1,2$ мкм $0,02 - 0,05$ Ом/□
36	Фотолитография 11. Формирование межэлементных соединений к контактными площадкам.		
37	Адгезионный отжиг алюминия.	500 °C	
38	Осаждение защитного (пассивирующего) ФСС (1%)		$h = 0,8$ мкм
39	Фотолитография 12. Вскрытие окон в защитном слое к алюминиевым контактными площадкам.		
40	100% контроль параметров.		
41	Скрайбирование пластин.		
42	Ломка пластин на кристаллы.		
43	Посадка кристалла на основание корпуса.		
44	Термокомпрессионная приварка выводов.		
45	Герметизация корпуса.		
46	Маркировка микросхемы.		
47	Приёмосдаточные испытания		
48	Упаковка микросхем.		

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) лабораторный макет, состоящий из кассет с образцами после различных операций техпроцесса изготовления КМДП ИМС типа К590КНЗ;
- 2) микроскоп.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ в приложении 1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Рассмотреть под микроскопом образцы изделия, определить, в какой последовательности они изготовлены. Для правильного определения названия технологической операции и их последовательности необходимо учесть следующие рекомендации:

а) найдите пластину с наименьшим количеством сформированных областей и определите операцию, выполненную на этой пластине.

б) затем найдите пластину, на которой выполнена следующая операция и определите ее наименование и т. д.

в) помните, что поверхность чистого кремния в окнах маскирующего окисла белая или светло-серая; поверхность чистого поликремния – желтого цвета; окисел на поверхности кремния может быть разного цвета, но области, которые сформированы одновременно, имеют одинаковый цвет;

2. Определите характерные признаки выбранных технологических операций. Результаты занесите в таблицу 5.2.

3. Произвести оптические измерения конструктивных параметров элементов МДП ИМС, для чего необходимо:

а) найти по топологии измеряемый элемент;

б) для каждой области элемента МДП ИМС определить длину и ширину.

Порядок выполнения измерений, проводимых на цифровом микроскопе Keyence VHX-2000 приведен в приложении 2.

4. Нарисовать эскиз измеряемых элементов без соблюдения масштаба, но с указанием областей и выводов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1) титульный лист;

2) цель работы;

3) таблица результатов 5.2;

4) эскизы топологий с обозначениями элементов, указанием областей и выводов, результатами измерения параметров элементов;

5) выводы.

Таблица результатов 5.2.

Номер образца	Номер операции в маршрутной карте	Наименование операции

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите последовательность основных технологических операций КМДП структур с поликремниевыми затворами.
2. Нарисуйте сечение комплементарной пары МДП транзисторов с диэлектрической изоляцией и поликремниевыми затворами и укажите области стока, истока, затвора, канала.
3. Какие материалы используют для получения затворов МДП транзисторов?
4. Почему в *p*-карманах КМДП структур необходима низкая концентрация легирующей примеси?
5. Является ли изученная технология КМДП структур с поликремниевыми затворами самосовмещенной?
6. Количество и назначение операций фотолитографий при производстве КМДП структур с поликремниевыми затворами.
7. Количество и назначение операций ионного легирования и диффузии при производстве КМДП структур с поликремниевыми затворами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок. Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. §§ 8.1 – 8.3.
2. Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И. и др. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1984. §§ 2.1 – 2.7.
3. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники, М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. §§ 7.7 – 7.8.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. Смирнов, Ю. А. Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники : учеб. пособие для вузов / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2013. – 495 с.
2. Щука, А. А. Электроника : учеб. пособие для вузов / А.А. Щука. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2012. – 739 с. : ил. ; 24. – (Учебная литература для вузов). – Гриф: Рек. УМО.

Дополнительная литература

1. Коледов, Л. А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок микроэлектроники : учеб. пособие для вузов / Л. А. Коледов. - СПб. : Лань, 2007. – 400 с.
2. Барыбин, А. А. Электроника и микроэлектроника: физико-технологические основы : учеб. пособие / А. А. Барыбин. - М. : Физматлит, 2008. – 424 с.
3. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Основы микроэлектроники, СПб. – М. – Краснодар, Лань, 2008. – 384 с.
4. Коваленко А.А., Петропавловский М.Д. Основы микроэлектроники. Учебное пособие – М.: Академия, 2006. – 240 с.
5. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники : учеб. пособие / И. П. Степаненко. - Изд. 2-ое. - М. ; СПб. : Лаборатория Базовых Знаний ; Невский диалект, 2001. – 488 с.
6. Джонс, М. Х. Электроника – практический курс / М. Джонс ; пер. с англ. Е. В. Воронова, А. Л. Ларина. – 2-е изд., испр. – М. : Техносфера, 2013. – 512 с.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ необходимо выполнять основные правила внутреннего распорядка и техники безопасности при работе в лабораториях.

К работе на приборах допускаются студенты только после изучения настоящих методических указаний и получения допуска у преподавателя.

Обслуживание приборов возможно только после отключения от питающей сети и производится техническим персоналом кафедры.

Запрещается сгибать кабель питания цифрового микроскопа VHX-2000E и ставить на него тяжелые предметы, т. к. это может привести к повреждению кабеля и стать причиной пожара. Запрещается использовать прибор, если кабель поврежден.

Запрещается снимать крышку корпуса цифрового микроскопа.

Следите, чтобы вентиляционные отверстия цифрового микроскопа не оказались перекрытыми.

Не кладите никаких предметов на цифровой микроскоп.

Не протирайте ЖК-монитор или VHX-2000E с помощью растворителей или других органических растворяющих веществ.

Для обеспечения правильной и безопасной работы VHX-2000E необходимо исключить воздействие вибраций, сотрясений, сильных магнитных и электрических полей, воды, масла, химикатов.

Во время работы осветительная лампа оптического микроскопа сильно нагревается и прикосновение к корпусу лампы может стать причиной ожога.

Не оставляйте без присмотра приборы, включенные в сеть.

ВНИМАНИЕ!

Пластины с образцами микросхем очень хрупки. После рассмотрения пластин сразу же вставьте их в кассету. При выполнении лабораторной работы недопустимо касаться поверхности микросхем.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРОВОДИМЫХ НА
ЦИФРОВОМ МИКРОСКОПЕ KEYENCE VHX-2000

1. Для измерений нажмите кнопку [MEASUREMENT] на пульте управления или нажмите [Measr/Text] в меню VHX.

Появится меню [Measure/Comment].

2. Нажмите [Measure/Comment].

Иконки для каждого инструмента измерения появляются в операционной области.

3. Нажмите на вкладку [Main] и нажмите на иконку [2 Points] для определения расстояния между двумя заданными точками.

Значок станет синим, означая, что он был выбран.

4. В окне наблюдения нажмите начальную и конечную точку.

Появятся линия, соединяющая две заданные точки, и результаты измерений появятся на экране и в окне [Measure Result].

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по выполнению практических работ
по дисциплине «МИКРОЭЛЕКТРОНИКА»
для студентов направления подготовки
11.03.04 Электроника и наноэлектроника

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Диффузия примесей	4
2. Ионное легирование	10
3. Термическое оксидирование	13
4. Аудиторная контрольная работа	17
5. Расчет пленочных резисторов	20
6. Расчет пленочных конденсаторов	28
7. p-n-переход. Диоды	33
8. Биполярный транзистор	38
9. Диффузионные резисторы и конденсаторы	41
10. Структура «металл – диэлектрик – полупроводник»	45
11. Аудиторная контрольная работа	51
12. Транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ)	54
13. ТТЛ с диодом Шоттки (ТТЛШ)	59
14. КМДП-логика	61
15. Усилительные каскады	65
16. Дифференциальный усилитель	69
17. Операционный усилитель	72
18. Аудиторная контрольная работа	77
Рекомендуемая литература	81
Приложение 1 Физические постоянные	82
Приложение 2 Дополнительная функция ошибок	83
Приложение 3 Параметры ионного легирования кремния	84
Приложение 4 Константы скорости окисления кремния	85
Приложение 5 Свойства материалов для тонкопленочных резисторов	86
Приложение 6 Свойства диэлектрических материалов для пленочных конденсаторов	87
Приложение 7 Свойства некоторых полупроводников	88

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность практических занятий по дисциплине «Микроэлектроника» определяется тем, что в процессе анализа и решения задач студенты расширяют и углубляют знания, полученные из лекционного курса и учебников, учатся глубже понимать законы и формулы, разбираться в их особенностях, границах применения, приобретают умение применять общие закономерности к конкретным случаям. В процессе решения задач вырабатываются навыки вычислений, работы со справочной литературой, таблицами. Решение задач не только способствует закреплению знаний и тренировке в применении изучаемых законов, но и формирует особый стиль умственной деятельности.

Целями практических занятий являются:

- закрепление знаний, полученных во время лекций и самостоятельной работы с учебной литературой;
- расширение и углубление представлений студентов по наиболее актуальным теоретическим и практическим проблемам;
- формирование и развитие практических навыков и умений, необходимых для будущей профессиональной деятельности;
- осуществление контроля за качеством усвоения студентами учебной программы.

Представленные Методические указания по выполнению практических работ предназначены для оказания студентам помощи при подготовке к практическим занятиям. Каждую тему сопровождает «Теоретическая часть», где рассмотрены вопросы, необходимые для понимания изучаемых процессов и явлений, а также для теоретической подготовки по данной дисциплине.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 1

ДИФФУЗИЯ ПРИМЕСЕЙ

Цель: Научиться проводить расчет технологического процесса диффузии примесей.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание физических законов процесса диффузии, характеристики параметров процесса диффузии; умение строить физическую модель процесса диффузии; производить расчет параметров процесса.

Теоретическая часть

Диффузией называется неравновесный процесс, вызываемый тепловым движением атомов, возникающий при наличии градиента концентрации вещества и направленный в сторону убывания этой концентрации. Ввиду конечной скорости диффузии концентрация введенной примеси убывает в направлении от поверхности, через которую происходит диффузия, вглубь.

Для создания областей дырочного типа проводимости в качестве легирующей примеси используют элементы III группы периодической таблицы: бор, индий, алюминий. Для создания областей электронного типа проводимости в качестве легирующей примеси применяют элементы V группы: фосфор, мышьяк, сурьму. На глубине, где концентрация введенной примеси оказывается равной концентрации исходной примеси, образуется р-n-переход.

Скорость процесса диффузии определяется коэффициентом диффузии, который в свою очередь зависит от температуры:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (1.1)$$

где D_0 – фактор диффузии, E – энергия активации.

Полупроводник	Диффундирующее вещество	D_0 , см ² /с	E , кДж/моль	Диапазон температур, К
Si	Бор (B)	$6 \cdot 10^{-7}$	163	1000 – 1400
	Фосфор (P)	20	364	1300 – 1600
	Мышьяк (As)	34	376	1300 – 1600
	Сурьма (Sb)	9,2	380	1300 – 1600
Ge	Бор (B)	0,084	444	1000 – 1200
	Фосфор (P)	1,3	240	1000 – 1200
	Мышьяк (As)	4,5	232	900 – 1200
	Сурьма (Sb)	3,6	232	1000 – 1200

Математическое описание диффузионных процессов предложено Фиком в виде двух законов, основанных на уравнениях теплопроводности. Первый закон Фика характеризует скорость проникновения атомов одного вещества в другое при постоянном во времени потоке этих атомов и неизменном градиенте их концентраций:

$$J = -D \frac{dN}{dx}, \quad (1.2)$$

где J – плотность потока вещества, переносимого в единицу времени через единицу площади, $\frac{dN}{dx}$ – градиент концентрации примеси.

Второй закон Фика описывает нестационарный случай, он следует из первого закона Фика при учёте изменения концентрации диффундирующих частиц со временем t . Если при этом коэффициент диффузии не изменяется, то второй закон Фика представляет собой уравнение диффузии:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}. \quad (1.3)$$

Решение уравнений Фика при различных граничных и начальных условиях позволяет определить профиль распределения примеси при конкретных параметрах процесса диффузии. При создании диффузионных профилей в элементах интегральных схем осуществляют диффузию из неограниченного источника примеси и из ограниченного источника.

Диффузия из неограниченного источника предполагает, что концентрация примеси источника заметно не изменяется в процессе диффузии. Распределение концентрации $N(x, t)$ по расстоянию от поверхности x в момент времени t при диффузии из неограниченного источника примеси описывается уравнением:

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (1.4)$$

где N_0 – концентрация примесей на поверхности, D – коэффициент диффузии, $\operatorname{erfc}(z)$ – дополнительная функция ошибок, $\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} e^{-z^2} dz$.

Диффузия из неограниченного источника представляет первый этап диффузии в производстве ИС, задачей которого является введение в кристалл определенного количества примеси. В результате образуется тонкий приповерхностный слой, насыщенный примесью. В производстве этот этап называется загонкой примеси.

Дозу легирования Q , т. е. число атомов примеси, осажденное на единицу площади полупроводника на этапе загонки за время диффузии, можно получить из первого закона Фика, подставив выражение (1.4) в уравнение (1.2) при $x = 0$, и интегрируя полученное выражение по времени:

$$Q = \int_0^t J|_{x=0} dt, \\ Q = 2N_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}. \quad (1.5)$$

Диффузия из ограниченного источника примесей представляет собой второй этап диффузии – этап разгонки. На этапе разгонки примесь, введенная

при загонке, распределяется вглубь полупроводника. При этом поверхностная концентрация примеси с течением времени убывает.

Распределение концентрации $N(x, t)$ по расстоянию от поверхности x в момент времени t при диффузии из ограниченного источника примеси описывается уравнением:

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (1.6)$$

где Q – доза легирования.

Задачи

1. В кремниевую пластину, легированную атомами бора с концентрацией $9 \cdot 10^{13}$ атомов/см³, диффундирует мышьяк. Процесс ведут при температуре 1100 °С в течение 3 ч.

Коэффициент диффузии $D = 5 \cdot 10^{-14}$ см²·с⁻¹.

а) Получите выражение, которое описывает конечное распределение концентрации атомов мышьяка, если концентрация примесей на поверхности постоянна $N_0 = 4 \cdot 10^{18}$ см⁻³.

б) Определите глубину, на которой возникает p - n -переход.

2. Рассчитайте количество донорной примеси фосфора, внедряемое в кремний из бесконечного источника при температуре 1000 °С за 40 мин.

3. Проводится диффузионная обработка участка кремния, на котором предполагается разместить интегральную схему. Для этого на поверхность эпитаксиального слоя n -типа, имеющего концентрацию доноров $N_d = 4 \cdot 10^{16}$ см⁻³, наносится акцепторная примесь с поверхностной плотностью $Q = 5 \cdot 10^{15}$ см⁻². Образец помещают в диффузионную печь на 1 ч. Коэффициент диффузии при температуре в этой печи $D = 3 \cdot 10^{-12}$ см²·с⁻¹. Найдите глубину, на которой возникает p - n -переход.

4. Проводится диффузия через эпитаксиальный слой толщиной 10 мкм, в результате которой должна быть обеспечена концентрация доноров n -типа,

равная $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Концентрация диффундирующего вещества на поверхности поддерживается постоянной, равной $N_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Вычислить продолжительность операции при температуре в печи 1200°C . Коэффициент диффузии $D = 3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

5. Кремниевая подложка легирована атомами бора с концентрацией $N = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. На поверхность подложки нанесен мышьяк с концентрацией $N_d = 1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Процесс ведут в течение 20 мин при температуре 1200°C . Коэффициент диффузии $D = 2,46 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Определите глубину перехода.

6. Сравните коэффициенты диффузии бора и фосфора в кремнии при температуре 1130°C .

7. В результате диффузии фосфора в кремниевую подложку через эпитаксиальный слой толщиной 10 мкм должна быть обеспечена концентрация примеси, равная $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Концентрация диффундирующего вещества на поверхности поддерживается постоянной, равной $N_0 = 4,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Вычислить продолжительность операции при температуре в печи 1130°C .

8. На кремниевой подложке p -типа создан эпитаксиальный слой n -типа толщиной 10 мкм с концентрацией $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для изоляции n -слоя проводят диффузию бора при температуре 1200°C . Коэффициент диффузии $D = 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, концентрация бора на поверхности постоянна и равна 10^{20} см^{-3} . Какова должна быть продолжительность данного процесса?

9. На поверхность эпитаксиального слоя кремния n -типа, имеющего концентрацию доноров $N_d = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, наносится акцепторная примесь с поверхностной плотностью $Q = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Образец помещают в диффузионную печь на 1 ч. Коэффициент диффузии при температуре в этой печи $D = 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Найдите глубину, на которой возникает p - n -переход.

10. Определите глубину перехода, образующегося при легировании кремниевой подложки атомами бора с концентрацией $N = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. На поверхность подложки нанесен мышьяк с концентрацией $N_d = 1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Процесс ведут в течение 15 мин при температуре 1200°C . Коэффициент диффузии $D = 2,6 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

11. При формировании базовой области транзистора проводят двухстадийную диффузию бора в кремний, обеспечивая поверхностную концентрацию $N_0 = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Определить концентрацию примеси на глубине 2 мкм, если на глубине 1,2 мкм она составляет $1,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

12. При формировании диффузионного резистора проводили диффузию бора в кремний, обеспечивая поверхностную концентрацию $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Определить концентрацию примеси на глубине 1,5 мкм, если на глубине 0,7 мкм она составляет $3,6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

13. При проведении двухстадийной диффузии фосфора в кремний получена поверхностная концентрация 10^{19} см^{-3} . Определить концентрацию примеси на глубине 2 мкм, если на глубине 0,5 мкм она составляет $7,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

14. Рассчитать количество донорной примеси мышьяка, внедряемое в кремний из бесконечного источника при температуре 900°C за 40 мин.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 2

ИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ

Цель: Научиться проводить расчет технологического процесса ионного легирования.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание физических законов процесса ионного легирования, характеристики параметров процесса; умение строить физическую модель процесса; производить расчет параметров процесса.

Теоретическая часть

Ионное легирование (ИЛ) – это процесс бомбардировки твердых тел пучками ускоренных ионов с целью изменения их свойств и структуры.

С помощью ИЛ решаются те же технические задачи, что и при термической диффузии, однако данный метод имеет свои особенности.

Для аморфных тел распределение внедренной примеси по глубине приблизительно гауссово и поэтому может быть охарактеризовано средним проецированным пробегом $\bar{R}_p$ и среднеквадратичным отклонением $\Delta \bar{R}_p^2$. Распределение внедренной примеси по глубине определяется с помощью уравнения

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi \cdot \Delta \bar{R}_p^2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(x - \bar{R}_p)^2}{\Delta \bar{R}_p^2} \right], \quad (2.1)$$

где x – расстояние от поверхности вглубь полупроводника в направлении падения ионов, Q – поверхностная плотность внедренных ионов (см^{-2}). Максимальная концентрация внедренной примеси равна

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi \cdot \Delta \bar{R}_p^2}} \quad (2.2)$$

и располагается на глубине $\bar{R}_p$

Глубина залегания p - n -перехода определяется из уравнения (2.1) для $N(x)$ при $x = x_{p-n}$ и концентрации $N(x)$, равной исходной концентрации $N_{\text{исх}}$ в той области полупроводника, куда ведется имплантация. Решая это уравнение, получим

$$x_{p-n} = \bar{R}_p \pm \Delta \bar{R}_p \sqrt{2 \ln \frac{Q}{\sqrt{2\pi \cdot \Delta \bar{R}_p^2} N_{\text{исх}}}}. \quad (2.3)$$

Глубиной залегания p - n -перехода можно управлять, изменяя энергию ионов E_0 (изменение $\bar{R}_p$ и $\Delta \bar{R}_p^2$), дозу облучения и исходную концентрацию примеси в той области полупроводника, куда ведется имплантация.

Энергия облучения определяется разностью потенциалов, под действием которой ионы ускоряются, она равна

$$E_0 = qU, \quad (2.4)$$

где q – заряд иона, U – ускоряющее напряжение.

Доза облучения – это заряд частиц, бомбардирующих единицу поверхности за данное время. На практике определяется параметрами процесса ИЛ:

$$A = qQ = jt \left[\text{мкКл/см}^2 \right] \quad (2.5)$$

где t – время облучения; j – плотность ионного тока.

Параметры $\bar{R}_p$ и $\Delta \bar{R}_p$ для некоторых ионов при легировании кремния приведены в прил. 3.

В процессе имплантации идет накопление радиационных дефектов, которые приводят к разупорядочению кристаллической решетки полупроводника. Для того, чтобы отжечь вносимые имплантацией радиационные нарушения, необходима последующая термообработка. Отжиг необходим для активации внедренной примеси и восстановления

кристаллической структуры полупроводника. Необходимая для этого температура, например, для кремния может достигать до 1000 °С. Следует различать низкотемпературный и высокотемпературный отжики. Низкотемпературный отжиг – это отжиг при таких температурах, когда процессом термической диффузии можно пренебречь. При высокотемпературном отжиге (обычно длительность отжига составляет от 10 мин до 1 часа) может происходить термическая диффузия. Влияние отжига на распределение внедренной примеси описывается уравнением

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi \cdot (\Delta \bar{R}_p^2 + 2Dt)}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \bar{R}_p)^2}{2\Delta \bar{R}_p^2 + 4Dt} \right]. \quad (2.6)$$

Задачи

1. Требуется внедрить атомы В в канал МОП-транзистора. Максимальную концентрацию $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ желательно иметь на глубине около 160 нм. Найти ускоряющее напряжение и дозу облучения.
2. Необходимо внедрить ионы As^+ в Si-подложку. Максимальная концентрация $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ должна быть получена на глубине около 100 нм. Найти ускоряющее напряжение и дозу облучения.
3. Построить график распределения концентрации ионов Р для легирования Si при поверхностной плотности ионов 10^{15} см^{-2} и ускоряющих напряжениях 40 и 80 кэВ.
4. Найти положение электронно – дырочного перехода при легировании p-Si фосфором при поверхностной плотности ионов 10^{15} см^{-2} и энергии ионов 100 кэВ, если исходная концентрация примеси в полупроводнике $9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.
5. Определить глубину p-n-перехода и среднее удельное сопротивление в p-слое на подложке n-кремния, ионно-легированной бором. Энергия ионного пучка 40 кэВ, поверхностная плотность ионов 10^{13} см^{-2} . Удельное сопротивление исходного n-кремния 4,5 Ом·см.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3

ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ

Цель: Научиться проводить расчет технологического процесса оксидирования.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание физических моделей процесса оксидирования, параметров процесса; умение производить расчет параметров процесса оксидирования.

Теоретическая часть

Кинетика процесса окисления описывается моделью Дила и Гроува. Она применима для температурного диапазона 700 – 1300 °С, парциальных давлений кислорода $(0,2-1,0) \times 10^5$ Па и толщины окисных пленок 0,03–2 мкм в атмосфере, состоящей из кислорода и (или) паров воды. Процесс окисления состоит из двух этапов – массопереноса окислителя в растущем окисле и протекания химической реакции кремния с окислителем (кислородом или парами воды).

В соответствии с моделью Дила и Гроува процесс окисления описывается параболическим или линейным законом. При большом времени окисления имеет место следующий закон:

$$x \approx (B(t + \tau))^{0.5} \quad (3.1)$$

где x – толщина окисла; B – параболическая константа скорости окисления; t – время окисления, τ – величина, учитывающая наличие первоначального окисла толщиной x_0 .

При коротком времени окисления справедлив линейный закон

$$x \approx (B/A) \cdot (t + \tau) \quad (3.2)$$

где B/A – линейная константа скорости окисления

В общем случае толщина оксидного слоя $x_{\text{окс}}$ описывается формулой:

$$x_{\text{окс}} = \frac{A}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{t + \tau}{A^2/(4B)}} - 1 \right), \quad (3.3)$$

$$\tau = (x_i^2 + Ax_i)/B,$$

где τ – это время, которое требуется для создания оксидного слоя, имеющего толщину x_i в начальный момент времени $t = 0$.

При окислении во влажном кислороде $\tau = 0$.

Линейная (B/A) и параболическая (B) константы окисления зависят от температуры по закону Аррениуса, т.е. описываются выражением:

$$C = A_0 \exp(-E_A/kT), \quad (3.4)$$

где C - линейная или параболическая константа;

A_0 - коэффициент;

E_A - энергия активации.

Параметры для расчета линейной и параболической констант окисления

	B , мкм ² /мин			B/A , мкм/мин		
	O ₂	H ₂ O		O ₂	H ₂ O	
T , °C	-	T ≤ 950°C	T > 950°C	-	T ≤ 950°C	T > 950°C
A_0	12,9	280	7	$1,04 \cdot 10^5$	$3,45 \cdot 10^4$	$2,96 \cdot 10^6$
E_A , эВ	1,23	1,17	0,78	2,0	1,6	2,05

Параболическая константа окисления B слабо зависит от ориентации подложки кремния. Линейная же константа B/A уменьшается в 1,68 раза при изменении ориентации $\langle 111 \rangle$ на $\langle 100 \rangle$.

При окислении в парах воды обе константы прямо пропорциональны давлению окислителя. При окислении в сухом кислороде $B/A \sim P^{0,75}$.

Задачи

1. Подсчитайте время, которое потребуется для создания на кремниевой пластине оксидного слоя толщиной 200 нм при оксидировании в атмосфере водяного пара при температуре 900 °С.

Константы оксидирования: $A = 5,7 \cdot 10^{-1}$ мкм, $B = 1,9 \cdot 10^{-1}$ мкм²/ч. Начальное время оксидирования $\tau = 0$.

2. На поверхности кремниевой пластины создан оксидный слой толщиной 200 нм, в котором вытравлено окно для диффузии бора. Затем пластина на 1,5 ч помещена в атмосферу сухого кислорода при температуре 1200 °С. Определите толщину оксидного слоя на окне, если $x_i = 20$ нм, а также толщину оксидного слоя на поверхности исходной пластины.

Константы оксидирования: $A = 5 \cdot 10^{-2}$ мкм, $B = 4,2 \cdot 10^{-2}$ мкм²/ч.

3. На поверхности кремниевой пластины создан оксидный слой с начальной толщиной 100 нм. Вычислите время, которое потребуется для создания добавочного слоя оксида в атмосфере сухого кислорода при температуре 1200 °С. Конечная толщина слоя 0,18 мкм. Константы оксидирования: $A = 5 \cdot 10^{-2}$ мкм, $B = 4,2 \cdot 10^{-2}$ мкм²/ч.

4. а) Сколько времени потребуется для выращивания 1 мкм двуокиси кремния в атмосфере водяного пара при 1000°С и давлении 1 атм? (для пунктов а-г считать, что кремний ориентирован по плоскости <111>.)

б) Сколько времени потребуется для выращивания 1 мкм двуокиси кремния в атмосфере водяного пара при 1000°С и 10 атм?

в) Сколько времени потребуется для выращивания 1 мкм двуокиси кремния в атмосфере водяного пара при 800°С и 1 атм?

г) Сколько времени потребуется для выращивания 1 мкм двуокиси кремния в атмосфере водяного пара при 800°С и 10 атм?

5. Найдите время, которое потребуется для нанесения оксидного слоя толщиной 450 нм при температуре 1050 °С на поверхность кремниевой

пластины. Процесс оксидирования является влажным и характеризуется параметрами $A = 0,31$ мкм, $B = 0,47$ мкм²/ч.

6. Определить время получения пленки двуокиси кремния толщиной 1,0 мкм во влажном кислороде при температуре 1200°C. Считать, что окисление происходит по параболическому закону.

7. Определить время получения пленки двуокиси кремния толщиной 1,5 мкм по комбинированной технологии при температуре 1200 °C. По комбинированной технологии пленка SiO₂ наращивается сначала в сухом кислороде в течение 15 мин., затем – во влажном до необходимой толщины.

8. Определить время роста пленки двуокиси кремния толщиной 1,3 мкм во влажном кислороде при температуре 1000 °C и давлении 2,5 МПа. Считать, что окисление происходит по параболическому закону.

9. Определить время выращивания пленки двуокиси кремния для подзатворного диэлектрика МДП-транзистора толщиной 0,12 мкм при температуре 1000°C.

10. Определить время, необходимое для создания изопланарной изоляции. Эпитаксиальная пленка имеет толщину 3 мкм. Процесс окисления проходит во влажном кислороде при температуре 1200 °C и давлении кислорода 2 МПа.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 4

Аудиторная контрольная работа

Цель: Контроль знаний.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

Примерные варианты заданий на контрольную работу

Вариант 1

1. Концентрация доноров в эпитаксиальном слое $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. На поверхность этого слоя наносится акцепторная примесь с поверхностной плотностью $Q_A = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Найдите глубину образовавшегося в результате диффузии p - n -перехода, если диффузия проводилась в течение 0,5 ч. Коэффициент диффузии $D = 3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.
2. Эпитаксиальный слой кремния n -типа с концентрацией примесей 10^{17} см^{-3} легирован бором. После перераспределения примесей концентрация акцепторов $N_a = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, глубина p - n -перехода 10 мкм. Вычислите поверхностное сопротивление этого резистора.
3. Найти положение электронно – дырочного перехода при легировании n -Si бором при поверхностной плотности ионов 10^{15} см^{-2} и энергии ионов 80 кэВ, если исходная концентрация примеси в полупроводнике 10^{13} см^{-3} .

Вариант 2

1. Определите толщину оксидного слоя, полученного в результате окисления пластины кремния в течение 1,5 ч. Константы оксидирования: $A = 0,5 \text{ мкм}$, $B = 4 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}^2/\text{ч}$. Начальное время оксидирования $\tau = 0$.
2. Германиевый p - n -переход имеет $S = 1 \text{ мм}^2$, $C_6 = 300 \text{ пФ}$, если подводится $U_{обр} = -10 \text{ В}$. Концентрация акцепторов значительно меньше

концентрации доноров. Контактная разность потенциалов $\varphi = 0,35$ В. Найти концентрацию акцепторов.

3. Требуется внедрить атомы фосфора в канал МОП-транзистора. Максимальную концентрацию 10^{16} см^{-3} желательно иметь на глубине около 100 нм. Найти ускоряющее напряжение.

Вариант 3

1. Вычислите продолжительность операции диффузии, необходимой для создания слоя с концентрацией примеси $0,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ на глубине 5 мкм. Концентрация диффундирующего вещества на поверхности поддерживается постоянной, равной $N_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Коэффициент диффузии $D = 3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

2. Эпитаксиальный слой кремния *n*-типа с концентрацией примесей 10^{17} см^{-3} легирован бором. После перераспределения примесей концентрация акцепторов $N_a = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, глубина *p-n*-перехода 10 мкм. Найдите длину резистора сопротивлением 10 кОм, если его минимальная ширина составляет 5 мкм.

3. Требуется внедрить атомы фосфора в канал МОП-транзистора. Максимальную концентрацию 10^{16} см^{-3} желательно иметь на глубине около 100 нм. Найти дозу облучения.

Вариант 4

1. На поверхности кремниевой пластины имеется оксидный слой толщиной 20 нм. Определите толщину оксидного слоя, полученного в результате окисления этой пластины в течение 1 ч. Константы оксидирования: $A = 0,5$ мкм, $B = 0,4 \text{ мкм}^2/\text{ч}$.

2. Определить удельную барьерную емкость резкого *p-n*-перехода в арсениде галлия, если концентрация доноров в *n*-области $N_d = 2,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, а концентрация акцепторов в *p*-области, $N_a = 1,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Обратное смещение $U_{\text{обр}} = -2,5$ В.

3. Найти положение электронно – дырочного перехода при легировании кремния мышьяком при поверхностной плотности ионов 10^{16} см^{-2} и энергии ионов 180 кэВ, если исходная концентрация примеси в полупроводнике $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Вариант 5

1. Для создания изолированного кармана на основе эпитаксиального слоя проводят диффузию акцепторной примеси на глубину эпитаксиального слоя. Коэффициент диффузии $D = 3,2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, концентрация акцептора на поверхности постоянна и равна 10^{20} см^{-3} . Толщина эпитаксиального слоя 10 мкм, концентрацией доноров $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Какова должна быть продолжительность данного процесса?

2. Резистор создан диффузией атомов фосфора в эпитаксиальный слой кремния p -типа, легированный с концентрацией $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Оказалось, что после перераспределения примесей концентрация доноров $N_d = 0,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, глубина p - n -перехода 2,5 мкм. Найдите длину резистора сопротивлением 2 кОм, если его минимальная ширина составляет 6,1 мкм.

3. Требуется внедрить атомы фосфора в канал МОП-транзистора. Максимальную концентрацию 10^{16} см^{-3} желательно иметь на глубине около 100 нм. Найти ионный ток.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 5

РАСЧЕТ ПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Цель: Научиться проводить расчет параметров пленочных элементов микросхем.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание характеристик параметров пленочных резисторов; умение производить расчет параметров пленочных резисторов.

Теоретическая часть

Основной характеристикой резистора является его номинальное сопротивление R_H

$$R_H = (\rho \cdot l) / S = (\rho \cdot l) / (b \cdot d) = (\rho / d) \cdot (l / b) = R_{\square} (l / b) = R_{\square} \cdot K_{\Phi}, \quad (5.1)$$

где ρ – удельное объемное сопротивление резистивного материала;

l, b, d – длина, ширина и толщина резистивной пленки ($S = d \cdot b$);

$R_{\square} = \rho / d$ – сопротивление квадрата резистивной пленки, не зависящие от его размеров и выражающиеся в Ом/□;

K_{Φ} – коэффициент формы резистора ($K_{\Phi} = l / b$).

Общее сопротивление пленочного резистора прямоугольной формы

$$R_H = R_{\square} \cdot K_{\Phi} + 2R_K, \quad (5.2)$$

где R_K – переходное сопротивление контакта резистивной и проводящей пленок.

Следует учитывать, что величина контактного сопротивления в сильной степени зависит от выбора контактных материалов, а также технологических условий их получения. Поэтому в каждой лаборатории значения R_K

определяют экспериментально. При расчете высокоомных резисторов обычно величиной R_K пренебрегают.

При расчете резистора, выполненного в форме меандра, следует учитывать, что в местах изгиба потенциальное поле становится неоднородным, и у внутреннего угла выделяется энергия, существенно большая, чем у внешнего. Сопротивление углового квадрата оказывается равным $0,55 R_{\square}$ ($K_{\Phi} = 0,55$). Поэтому сопротивление трех квадратов, составляющих прямой угол, равно $2,55 R_{\square}$.

Полная относительная погрешность резистора $\gamma_R = \Delta R/R$ определяется суммой всех погрешностей изготовления и погрешностей, возникающих при его эксплуатации

$$\gamma_R = \gamma_{R_{\square}} + \gamma_{K_{\Phi}} + \gamma_{R_K} + \gamma_{R_T} + \gamma_{R_{ct}}, \quad (5.3)$$

где $\gamma_{R_{\square}}$ – относительная погрешность воспроизведения $R_{\square}$,

$$\gamma_{R_{\square}} = (\Delta \rho / \rho) + (\Delta d / d),$$

$\gamma_{K_{\Phi}}$ – относительная погрешность K_{Φ} , $\gamma_{K_{\Phi}} = (\Delta l / l) + (\Delta b / b)$,

γ_{R_K} – погрешность переходных контактных сопротивлений,

γ_{R_T} – температурная погрешность сопротивления определяется как

$$\gamma_{R_T} = \alpha_R \cdot \Delta T = \alpha_R \cdot (T_{\text{макс}} - T_{\text{комн}}) = \alpha_R \cdot (T_{\text{макс}} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}),$$

α_R – температурный коэффициент сопротивления (ТКС) материала.

Погрешность $\gamma_{R_{ct}}$, обусловленная старением пленки, определяет временную нестабильность сопротивления пленочного резистора. Она зависит от материала пленок, эффективности их защиты, а также от условий хранения и эксплуатации. Коэффициент старения пленочного резистора практически равен коэффициенту старения удельного поверхностного сопротивления, обусловленному изменением структуры пленки и ее окислением

$$\gamma_{R_{ct}} = (\Delta R/R)_{ct} = K_{ct} \cdot t,$$

где t – время эксплуатации, в течение которого сопротивление резистора изменилось на ΔR . Для ГИМС обычно $\gamma_{R_{ct}}$ не превышает 3 %.

Погрешность γ_{Rk} зависит от технологических условий напыления металлических пленок, удельного сопротивления резистивных пленок и геометрических размеров перекрытия контактных площадок. При правильном выборе материалов и геометрии контактных площадок величиной γ_{Rk} можно пренебречь.

Допустимая мощность рассеяния $P_{\text{доп}}$ определяется удельной мощностью рассеяния P_0 материала пленки и площадью резистора

$$P_{\text{доп}} = P_0 \cdot S_R = P_0 \cdot l \cdot b. \quad (5.4)$$

Удельная мощность рассеяния P_0 определяет нагрузочную способность пленочных резисторов и является энергетической характеристикой данного материала.

Расчет и проектирование топологии тонкопленочных резисторов

Конструктивный расчет тонкопленочных резисторов заключается в определении формы геометрических размеров и минимальной площади, занимаемой на подложке. При этом необходимо, чтобы резисторы обеспечивали рассеяние заданной мощности при удовлетворении требуемой точности изготовления в условиях существующих технологических возможностей.

Исходными данными для расчета являются:

- номинальное сопротивление R_H , Ом;
- допуск на номинал γ_R , %;
- мощность рассеяния P_H , мВт;
- допустимая мощность рассеяния $P_{\text{доп}}$, мВт;
- относительные погрешности $\gamma_{R\Box}$, $\gamma_{K\Phi}$, γ_{Rk} , $\gamma_{R\Gamma}$, γ_{Rct} ;
- Δl , Δb – абсолютные погрешности изготовления l и b , мкм.

Порядок расчета пленочного резистора

1. Определяют с точки зрения минимума занимаемой площади сопротивление квадрата резистивной пленки:

$$R_{\square} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n 1/R_i}}. \quad (5.5)$$

По данным таблицы приложения 4 выбирают материал резистивной пленки с удельным сопротивлением, ближайшим к вычисленному по (5.5). При этом необходимо, чтобы ТКР был минимальным, а удельная рассеиваемая мощность P_0 максимальна

2. Проводят проверку правильности выбора материала с точки зрения обеспечения заданной точности изготовления и стабильности резисторов.

Для этого из выражения (5.3) определяют допустимую погрешность коэффициента формы $\gamma_{K\Phi\text{доп}}$.

$$\gamma_{K\Phi\text{доп}} = \gamma_R - \gamma_{R_{\square}} - \gamma_{RT} - \gamma_{R_{\text{ст}}} - \gamma_{RK}.$$

Если значение $\gamma_{K\Phi\text{доп}}$ получится отрицательным, то это означает, что изготовление резистора заданной точности из выбранного материала невозможно. В этом случае необходимо выбрать другой материал с другим $\gamma_{R_{\square}}$, $\gamma_{R_{\text{ст}}}$ и γ_{RT} .

3. Используя соотношение (5.1), определяют коэффициент формы резистора K_{Φ} . Если $1 \leq K_{\Phi} \leq 10$, то рекомендуется конструировать полосковую конфигурацию резистора; при значениях $K_{\Phi} > 10$ резистор сложной формы; при $0,3 \leq K_{\Phi} \leq 1$ резистор прямоугольной формы, у которого длина меньше ширины. Резистор с $K_{\Phi} < 0,3$ конструировать не рекомендуется. В этом случае возможно использование конструкции резистора с внутренней контактной площадкой.

4. Дальнейший расчет проводят в зависимости от формы резисторов.

Расчет прямоугольных полосковых резисторов

Для резисторов прямоугольной формы с $K_{\Phi} \geq 1$ сначала определяют ширину, а затем длину резистора. Ширину резистора определяют из условия

$$b_{\text{расч}} \geq \max \{ b_{\text{техн}}, b_{\text{точн}}, b_p \}, \quad (5.6)$$

где $b_{\text{техн}}$, $b_{\text{точн}}$, b_p – минимальное значение ширины резистора, обусловленное технологическими возможностями изготовления, точностью воспроизведения и мощностью рассеяния соответственно:

а) значение $b_{\text{техн}}$ определяется возможностями технологического процесса.

б) ширина резистора, определяется точностными характеристиками

$$b_{\text{точн}} \geq (\Delta b + \Delta l / K_{\Phi}) / \gamma_{K\Phi \text{доп}}, \quad (5.7)$$

где Δb и Δl – абсолютные погрешности изготовления ширины и длины резистора.

Если $\Delta b = \Delta l$, то

$$b_{\text{точн}} \geq \Delta b (K_{\Phi} + 1) / (K_{\Phi} \cdot \gamma_{K\Phi \text{доп}});$$

в) минимальное значение b_p определяют по формуле

$$b_p = \sqrt{\frac{P}{P_0 K_{\Phi}}}. \quad (5.8)$$

Для $b_{\text{расч}}$ выбирают наибольшее значение из полученных $b_{\text{техн}}$, $b_{\text{точн}}$, b_p . Затем находят *топологическую ширину резистора* $b_{\text{топ}}$ (ширину на чертеже топологии). За $b_{\text{топ}}$ принимают большее, чем $b_{\text{расч}}$ значение, кратное шагу координатной сетки, принятого для чертежа топологии. Шаг координатной сетки выбирают равным половине клетки координатной сетки. Например, если чертеж выполняют на миллиметровке, то за шаг координатной сетки принимают 0,5 мм. Тогда, если масштаб составляет 10 : 1, округление $b_{\text{топ}}$ проводят до величины, кратной 50 мкм.

Длину резистора $l_{\text{расч}}$ (без учета контактных площадок) определяют из выражения (5.2)

$$l_{\text{расч}} = b_{\text{топ}} (R_{\text{н}} - 2R_{\text{к}}) / R_{\square} = b_{\text{топ}} (R_{\text{н}} - 2k_1 \cdot R_{\square}) / R_{\square},$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий сопротивление контактов резистора.

Этот коэффициент зависит от уровня технологии, материалов контактирующей пары и величины перекрытия контактных площадок $l_{\text{к}}$. В случаях, когда $l_{\text{к}} = b$, для упрощения расчета значение k_1 принимается равным 0,1.

За $l_{\text{топ}}$ принимают ближайшее к $l_{\text{расч}}$ число, кратное шагу координатной сетки. Если $l_{\text{топ}} > 300$ мкм, то l_K можно выбирать из таблицы конструктивно технологических ограничений, оставляя (для упрощения расчета) значения $k_1 = 0,1$. Для фотолитографических методов создания топологии $l_K \geq 100$ мкм, для масочных $l_K \geq 200$ мкм.

Полная длина резистора с учетом перекрытия контактных площадок

$$l_{\text{полн}} = l_{\text{топ}} + 2 \cdot l_K. \quad (5.9)$$

Площадь, занимаемая резистором на подложке,

$$S = l_{\text{полн}} \cdot b. \quad (5.10)$$

После расчета рисуют топологию резистора.

Для резисторов, имеющих $K_\Phi < 1$, сначала определяют длину, а затем ширину. Расчетное значение длины резистора выбирают из условия

$$l_{\text{расч}} \geq \max \{l_{\text{техн}}, l_{\text{точн}}, l_p\}, \quad (5.11)$$

где

$$l_{\text{точн}} \geq (\Delta l + \Delta b \cdot K_\Phi) / \gamma_{K\Phi \text{доп}}, \quad (5.12)$$

$$l_p = \sqrt{\frac{P}{P_0 K_\Phi}}.$$

и они имеют тот же смысл, что в (5.7).

За $l_{\text{топ}}$ принимают **большее**, чем $l_{\text{расч}}$ значение, кратное шагу координатной сетки. Полную длину резистора с учетом перекрытия контактных площадок определяют по формуле (5.9).

Ширину $b_{\text{расч}}$ определяют из формулы для R_H

$$b_{\text{расч}} = R_{\square} \cdot l_{\text{топ}} / (R_H - 2k_1 R_{\square}).$$

За $b_{\text{топ}}$ принимают ближайшее к $b_{\text{расч}}$ число, кратное шагу координатной сетки.

После расчета резистора рисуют его топологию.

Расчет тонкопленочных резисторов сложной формы

Наибольшее применение для высокоомных резисторов с $K_\Phi > 10$ находит форма меандра. Расчет меандра проводят из условия минимальной габаритной площади, занимаемой резистором, в такой последовательности:

сначала по формулам (5.6 – 5.8) определяют ширину резистивной полосы. Затем проводят оптимизацию формы и размеров резистора. Для этого определяют число звеньев меандра N из условия, чтобы площадь, занимаемая резистором, была минимальной. Очевидно, это будет в случае, когда меандр впишется в квадрат. Это условие будет выполняться при $L_x = L_y + 2b$. При конструировании резисторов в форме меандра обычно выбирают a и b равными. Для такого резистора

$$L_x = (2N - 1) \cdot b,$$

$$L_y = (n_0 \cdot b - (N - 1) \cdot 3b) / N,$$

где n_0 – полное число квадратов (без учета контактных).

Тогда, если $L_x = L_y + 2b$,

$$[n_0 \cdot b - (N - 1) \cdot 3b] / N + 2b = (2N - 1)b.$$

Отсюда $N = \pm ((n_0 + 3) / 2)^{1/2}$.

Для определения N можно принять $n_0 \approx l / b = K_\Phi$, тогда

$$N \approx \sqrt{\frac{K_\Phi + 3}{2}}.$$

Значение N округляют до ближайшего целого.

После этого по формуле (5.3) определяют число «чистых квадратов». В формуле (5.3) m – число угловых квадратов = $(2N - 1)$, а коэффициент k_1 , учитывающий контактное сопротивление, принимают равным 0,1.

Тогда

$$n' = [R_H - 2(N - 1) \cdot 0,55 R_\square - 2 \cdot 0,1 R_\square] / R_\square.$$

Полученные значения b , L_x , L_y , N , n' позволяют составить топологический чертеж.

Квадратная или близкая к ней форма резистора типа «меандр» часто оказывается неудобной при компоновке элементов на подложке микросхемы.

В этих случаях, задавшись одним из размеров, например, L_x определяют другой размер и число звеньев меандра N' . Для случая, когда расстояние между звеньями резистора $a = b$,

$$N' = (L_x + b) / 2b.$$

Задание

Рассчитать группу тонкопленочных резисторов при следующих исходных данных:

номиналы резисторов $R_1 = 10 \text{ кОм}$; $R_2 = 1 \text{ кОм}$; $R_3 = 100 \text{ кОм}$;

допуск на номинал $\gamma_{R1} = 5 \%$; $\gamma_{R2} = 15 \%$; $\gamma_{R3} = 15 \%$;

мощность рассеяния $P_{H1} = 8 \text{ мВт}$; $P_{H2} = 10 \text{ мВт}$; $P_{H3} = 15 \text{ мВт}$;

диапазон температур $(-50 \div +100) ^\circ\text{C}$; $\gamma_{R\Box} = 2,5 \%$; $\gamma_{R\text{ст}} = 0,3 \%$.

Масштаб чертежа – 20 : 1 на миллиметровке.

Технология позволяет получить $\Delta l = \Delta b = 5 \text{ мкм}$, а $b_{\text{техн}} = 125 \text{ мкм}$.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 6

РАСЧЕТ ПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Цель: Научиться проводить расчет параметров пленочных элементов микросхем.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание характеристик параметров пленочных конденсаторов; умение производить расчет параметров пленочных конденсаторов.

Теоретическая часть

Номинальная емкость C_H

$$C_H = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} = C_0 S = C_0 AB \quad (6.1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; C_0 – удельная емкость; ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; S – площадь взаимного перекрытия обкладок.

При определении C_H пленочных конденсаторов малой площади необходимо учитывать увеличение емкости, обусловленное влиянием краевого эффекта.

В общем случае

$$C_H = KC_0 S \quad (6.2)$$

где K – коэффициент, учитывающий влияние краевого эффекта

$$K = \begin{cases} 1,3 - 0,6 \frac{C_H}{C_0}, & \text{если } 1 \leq \frac{C_H}{C_0} \leq 5 \text{ мм}^2; \\ 1, & \text{если } \frac{C_H}{C_0} > 5 \text{ мм}^2. \end{cases} \quad (6.3)$$

Рабочее напряжение U_p обеспечивается подбором материала диэлектрической пленки с необходимыми значениями $E_{пр}$ и толщины пленки d . Толщина пленки d , выбираемая из условия обеспечения заданного U_p , определяется из выражения

$$d = \eta U_p / E_{пр}, \quad (6.4)$$

где η – коэффициент запаса, обеспечивающий надежные характеристики. Для пленочных конденсаторов коэффициент запаса выбирается равным $2 \div 10$. Коэффициент запаса $\eta = 5 \div 10$ выбирается для расчета конденсаторов повышенной надежности.

Добротность пленочного конденсатора Q зависит от его конструкции используемых материалов. Она определяется потерями в диэлектрике и в обкладках конденсатора

$$Q = (tg \delta)^{-1} = (tg \delta_{д} + tg \delta_{обкл})^{-1}, \quad (6.5)$$

где $tg \delta_{обкл}$ – тангенс угла потерь в обкладках и выводах конденсатора;

$$tg \delta_{обкл} = 2\pi f_{раб} (r_{обкл} + r_{в}) C, \quad (6.6)$$

$r_{обкл}$ – последовательное сопротивление обкладок;

$r_{в}$ – сопротивление выводов.

Сопротивление $r_{обкл}$ зависит от конструкции конденсатора, проводимости материалов обкладок, их геометрических размеров, а также картины распределения линий тока в обкладках. Для конденсаторов с 2-сторонним расположением выводов

$$r_{обкл} \approx (r_{он} + r_{ов})/3, \quad (6.7)$$

где $r_{он}$ и $r_{ов}$ – сопротивление нижней и верхней обкладок. Добротность пленочного конденсатора $Q = 10 \div 100$. В практических расчетах $tg \delta$ – справочная величина.

Тангенс угла диэлектрических потерь существенно зависит от частоты сигнала и температуры окружающей среды.

Порядок расчета тонкопленочного конденсатора

Расчет тонкопленочных конденсаторов производится в следующей последовательности:

1. Из табличных данных (прил. 5) выбирают диэлектрик с определенными значениями ε и $E_{ПР}$ малыми значениями ТКЕ, $\operatorname{tg} \delta$ и $K_{ст}$ (если они не заданы).
2. Из условия $d_{\min} \geq \eta U_p / E_{ПР}$ определяют минимальную толщину диэлектрика, обеспечивающего необходимое значение U_p .

Обычно выбирается η равным 2 – 3.

3. Определяют удельную емкость конденсатора исходя из условия электрической прочности:

$$C_{0U} = 0,0885 \cdot (\varepsilon / d).$$

4. Оценивают относительную температурную погрешность $\aleph_{ст}$ исходя из условия

$$\aleph_{ст} = (1/C_H) \cdot (dC/dT) \cdot (T_{\max} - T_{\text{комн}}) = \alpha_C \cdot (T_{\max} - 20^\circ \text{C}), \quad (6.8)$$

и допустимую погрешность активной площади конденсатора $\gamma_{S\text{доп}}$ из условия

$$\gamma_{S\text{доп}} = \gamma_C - \gamma_{C0} - \gamma_{ст} - \gamma_{Cст}. \quad (6.9)$$

Если получится, что $\gamma_{S\text{доп}} \leq 0$, то изготовление конденсатора с заданной точностью невозможно. Нужно выбрать другой диэлектрик с меньшим ТКЕ и $\gamma_{Cст}$.

5. Определяют удельную емкость $C_{0\text{точн}}$ с учетом точности его изготовления из выражения

$$C_{0\text{точн}} = \frac{C}{S} = C \left(\frac{N_{S\text{доп}}}{\Delta A} \right) \cdot \frac{K_\Phi}{(K_\Phi + 1)^2}. \quad (6.10)$$

6. Выбирают минимальное значение удельной емкости из условия

$$C_0 \leq \min \{ C_{0U}, C_{0\text{точн}} \}. \quad (6.11)$$

которое обеспечивает заданное U_p и требуемое γ_C .

7. По заданному значению C_H и полученному значению C_0 определяют коэффициент K , учитывающий краевой эффект.

8. С учетом коэффициента K по (6.2) определяют площадь перекрытия обкладок конденсатора. При этом, если окажется $S < 1 \text{ мм}^2$, то выбирают диэлектрик с меньшим ε или большей толщиной. Если это не дает желаемых результатов, то изменяют конструкцию конденсатора.

9. Определяют толщину d , соответствующую выбранному значению C_0 .

10. Рассчитывают размеры обкладок и диэлектрика конденсатора. Для этого выбирают форму и определяют коэффициент K_Φ . Если выбрана прямоугольная форма, то геометрические размеры верхней обкладки

$$A_B = \sqrt{S \cdot K_\Phi}; \quad B_B = \frac{A_B}{K_\Phi}.$$

Полученные размеры A_B и B_B округляют до значений, кратных шагу координатной сетки с учетом масштаба топологического чертежа. После этого, с учетом допусков на перекрытие, определяют размеры нижней обкладки:

$$A_H = A_B + 2(q + \beta); \quad B_H = B_B + 2(q + \beta),$$

где q – коэффициент перекрытия, β – погрешность совмещения обкладок.

Размеры диэлектрика:

$$A_d = A_H + 2(f + \beta); \quad B_d = B_H + 2(f + \beta),$$

где f – коэффициент перекрытия нижней обкладки и диэлектрика.

11. Определяют занимаемую площадь $S = A_d \cdot B_d$.

12. Если заданы $\text{tg } \delta$ и Q , то по (6.5 и 6.6) определяют их значения для рассчитанного конденсатора. Полученные диэлектрические потери не должны превышать заданных значений.

13. Вычерчивают топологический чертеж.

При проектировании группы конденсаторов расчет начинают, как правило, с конденсатора, имеющего *наименьшее* значение C_H .

Задание

Рассчитать тонкопленочный конденсатор при следующих исходных данных:

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C_1 , пФ	2000	3800	2000	4700	2400	3000	4300	5600	3300
C_2 , пФ	4000	7800	4400	9400	4800	6000	8600	11200	6600
Рабочее напряж. В	9	12	3,9	16	18	9	11	10	8
диэлектрик	GeO	SiO	Sb ₂ S ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅	БСС	АСС	ИБС

$\gamma_C = 10 \%$; $T = (-30 \div +30)^\circ\text{C}$; длительность эксплуатации ИМС 1000 часов.

Технологические погрешности $\gamma_{C0} = \pm 2 \%$; $\Delta A = \Delta B = \beta = 20$ мкм;

$q = f = 100$ мкм.

Принять $\eta = 3$. Масштаб чертежа топологии 20 : 1.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 7

p-n-ПЕРЕХОД. ДИОДЫ

Цель: Научиться проводить расчет параметров интегральных диодов.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание характеристик параметров p-n-перехода; умение производить расчет параметров интегральных диодов.

Теоретическая часть

Вольтамперная характеристика (ВАХ) *p-n* перехода описывается уравнением

$$I = I_0 \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right), \quad (7.1)$$

где e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; U – приложенное напряжение; T – абсолютная температура; I_0 – тепловой ток.

Тепловой ток зависит от температуры и определяется свойствами полупроводникового материала, из которого изготовлен *p-n* переход:

$$I_0 = S \left(\frac{eD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \right), \quad (7.2)$$

где S – площадь перехода; $D_{p,n}$ – коэффициенты диффузии неосновных носителей заряда – соответственно дырок в *n*-области перехода и электронов в *p*-области перехода; p_{n0} и n_{p0} – концентрации неосновных носителей заряда; $L_{p,n}$ – диффузионные длины неосновных носителей заряда.

Диффузионная длина и коэффициент диффузии связаны соотношением:

$$L_{p,n} = \sqrt{D_{p,n} \tau_{p,n}}, \quad (7.3)$$

где $\tau_{p,n}$ – время жизни соответственно дырок и электронов.

Коэффициенты диффузии связаны с подвижностью носителей заряда

$$D_{p,n} = \frac{kT}{e} \mu_{p,n}, \quad (7.4)$$

где $\mu_{p,n}$ – подвижность дырок и электронов соответственно.

Для диапазона температур, в котором обычно эксплуатируются полупроводниковые приборы, концентрация неосновных носителей заряда определяется соотношениями:

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}, \quad n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A}, \quad (7.5)$$

где n_i – концентрация собственных носителей в полупроводнике; $N_{D,A}$ – концентрации примесей соответственно в n и p -областях перехода.

$$n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right), \quad (7.6)$$

где ΔE_g – ширина запрещенной зоны полупроводника; $N_{c,v}$ – эффективные плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне полупроводника соответственно. Для $N_{c,v}$ температурная зависимость может быть описана соотношением

$$N_{c,v} = N_{c,v}|_{T=T_0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.5}, \quad (7.7)$$

где T_0 – температура, для которой в справочных данных указано значение эффективной плотности состояний (обычно $T_0 = 300$ K).

Поскольку величины $D_{p,n}$ и $L_{p,n}$ слабо зависят от температуры, то температурная зависимость теплового тока I_0 определяется в основном соотношением (7.6).

Реальный p - n переход, используемый при изготовлении диодов, всегда является несимметричным, т.е. концентрация примесей в одной из областей всегда намного выше, чем в другой. Область с наиболее высокой концентрацией примеси называют эмиттером, область с наименьшей

концентрацией примеси – базой. Для несимметричного перехода можно записать:

$$I = I_0 \left(\exp \frac{e(U - IR_\delta)}{kT} - 1 \right). \quad (7.8)$$

Обычно находят напряжение при заданном токе:

$$U = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) + IR_\delta, \quad (7.9)$$

причем первое слагаемое соответствует напряжению на p - n переходе, а второе – падению напряжения на сопротивлении базы.

К числу важнейших параметров диода, используемых при схемотехнических расчетах, относятся дифференциальные или малосигнальные параметры, определяющие связь малых изменений электрических величин в цепи диода. Одним из таких параметров является дифференциальное сопротивление $r_{\text{диф}}$ или обратная ему величина – дифференциальная проводимость (крутизна):

$$r_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (7.10)$$

Поскольку диод является нелинейным элементом, определение $r_{\text{диф}}$ имеет смысл только в том случае, если оно соответствует известному постоянному напряжению или постоянному току, определяющим режим работы диода (т.е. рабочей точке).

К числу дифференциальных параметров относится емкость p - n перехода

$$C = \frac{dQ}{dU}, \quad (7.12)$$

где Q – заряд, который может быть связанным или накопленным.

Связанный заряд обусловлен ионизированными атомами примеси, расположенными по обе стороны от металлургической границы перехода, причем $|Q_{\text{связ}}^+| = |Q_{\text{связ}}^-| = Q_{\text{связ}}$. Изменение приложенного к переходу напряжения влечет за собой изменение ширины перехода l_{p-n} , что приводит к изменению $Q_{\text{связ}}$, в результате чего возникает емкость, называемая барьерной:

$$l_{p-n} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{eN_D}(\varphi_{\text{крп}} - U)}, \quad (7.13)$$

$$\varphi_{\text{крп}} = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}, \quad (7.14)$$

$$C_{\text{бар}} = S \sqrt{\frac{e\varepsilon\varepsilon_0 N_{\delta}}{2(\varphi_{\text{крп}} - U)}}, \quad (7.15)$$

где ε_0 – энергетическая постоянная; ε – относительная диэлектрическая постоянная полупроводникового материала; $\varphi_{\text{крп}}$ – контактная разность потенциалов; N_{δ} – концентрация примесей в базе. Соотношения (7.13) и (7.15) соответствуют несимметричному p - n переходу.

Увеличение прямого напряжения приводит к возрастанию числа инжектированных носителей, и появлению емкости, называемой диффузионной. Для несимметричного перехода

$$C_{\text{диф}} \approx \frac{e}{kT} I \tau_{\delta}. \quad (7.16)$$

Задачи

1. Рассчитать напряжения на кремниевом p - n переходе при температурах 25 и 75 °С и при токе 10 мА. Принять, что тепловой ток при температуре 25 °С составляет 10^{-12} А.

2. Рассчитать дифференциальные сопротивления кремниевое p - n перехода при температурах 0 и 50 °С и при нулевом приложенном напряжении. Принять, что тепловой ток при температуре 25 °С составляет 10^{-11} А.

3. Рассчитать контактную разность потенциалов для кремниевое p - n -перехода при температуре 20 °С. Принять концентрации легирующих примесей в p и n – областях равными соответственно $3 \cdot 10^{16}$ и 10^{15} см $^{-3}$.

4. Рассчитать емкость кремниевое p - n перехода при нулевом приложенном напряжении и температуре 20 °С. Принять, что концентрация

примесей в p - и n - областях составляет 10^{16} и 10^{15} см^{-3} соответственно. Площадь перехода равна $0,1 \text{ см}^2$.

5. Рассчитать, насколько изменится емкость кремниевого p - n перехода при уменьшении приложенного напряжения от минус $0,5$ до минус $0,9$ В. Концентрация примесей в p - и n - областях равна 10^{15} и $2 \cdot 10^{16}$ см^{-3} соответственно. Температуру принять равной 300 К .

6. Определить, насколько изменится емкость кремниевого p - n перехода, если температура увеличится от 30 до 50 $^{\circ}\text{C}$ при постоянном приложенном напряжении минус $0,5$ В. Концентрация примесей в p - и n - областях составляет соответственно $4 \cdot 10^{16}$ и $2 \cdot 10^{15}$ см^{-3} .

7. К кремниевому p - n переходу приложено обратное напряжение $0,2$ В. Рассчитать, насколько необходимо изменить напряжение для того, чтобы уменьшить ширину перехода в 2 раза. Концентрация примесей в p - и n - областях равна соответственно 10^{15} и $3 \cdot 10^{16}$ см^{-3} .

8. Определить сопротивление базы кремниевого диода на основе p - n перехода, если при приложении обратного напряжения 2 В ток равен 10^{-12} А, а при приложении прямого напряжения $0,8$ В ток равен 20 мА. Температуру принять равной 20 $^{\circ}\text{C}$.

9. p - n переход, зашунтированный резистором номиналом 50 Ом, включен в цепь, содержащую последовательно включенный резистор 100 Ом и источник напряжения 5 В. Определить ток, потребляемый от источника, если переход смещен в прямом направлении, а тепловой ток равен 10^{-8} А. Температура равна 300 К .

10. Диод на основе p - n перехода имеет сопротивление базы 30 Ом, тепловой ток 10^{-10} А, сопротивление утечки 10^8 Ом. Рассчитать токи через диод при приложении напряжения 1 В и минус 1 В. Температуру принять равной 20 $^{\circ}\text{C}$, сопротивление утечки считать не зависящим от приложенного напряжения.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 8

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

Цель: Научиться проводить расчет параметров биполярных транзисторов.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание физических принципов работы биполярных транзисторов; умение строить физические и математические модели процессов, лежащих в основе работы биполярных транзисторов.

Теоретическая часть

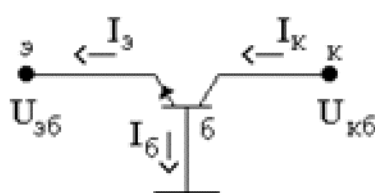


Рис. 1

При включении транзистора со структурой *n-p-n* по схеме ОБ (рис. 1), ВАХ входной цепи или входная характеристика определяется уравнением

$$I_{\text{э}} = I_{\text{э}0} \left(\exp \frac{eU_{\text{бэ}}}{kT} - 1 \right), \quad (8.1)$$

где $I_{\text{э}0}$ – тепловой ток эмиттерного перехода.

Ток в цепи коллектора определяется, во-первых, током инжектированных в базу и дошедших до коллектора электронов $\alpha I_{\text{э}}$, где α – коэффициент передачи тока эмиттера, учитывающий потери инжектированных электронов на рекомбинацию в базе ($\alpha < 1$). Во-вторых, в цепи коллектора, как и в цепи любого *p-n* перехода, протекает ток, аналогичный (8.1). В результате суммарный ток коллектора с учетом направления его компонент равен

$$I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}} - I_{\text{к}0} \left(\exp \frac{eU_{\text{бк}}}{kT} - 1 \right), \quad (8.2)$$

где $I_{\text{к}0}$ – тепловой ток коллекторного перехода.

Пренебрегая обратной связью между коллекторной и эмиттерной цепями

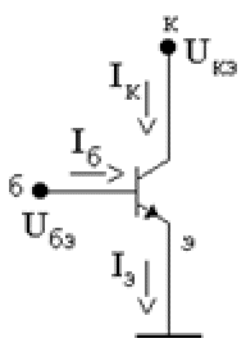


Рис. 2

(эффектом Эрли), а также зависимостью α от I_3 , в первом приближении можно считать, что уравнения (8.1) и (8.2) описывают статические характеристики транзистора при включении ОБ. Так, например, связь между током коллектора и напряжением коллектор – база, а также связь между коллекторным и эмиттерным токами может

быть установлена при помощи (8.2). Если принять, что эмиттерный переход смещен в прямом направлении (условно $U_{бэ} > 0$ или $U_{эб} < 0$), а коллекторный –

в обратном направлении (условно $U_{бк} < 0$ или $U_{кб} > 0$ и $U_{кб} \gg \frac{kT}{e}$), то

$$I_k = \alpha I_э + I_{к0}, \quad (8.3)$$

т.е. транзистор работает в активном режиме, при котором обеспечивается выполнение основной его функции – усиление электрических сигналов.

На рис. 2 показан *n-p-n* транзистор, включенный по схеме ОЭ. Отмеченные направления токов соответствуют таким приложенным к электродам напряжениям, при которых транзистор работает в активном режиме. После ряда преобразований с использованием закона Кирхгофа для токов

$$I_э = I_k + I_б \quad (8.4)$$

и соотношений (8.1) и (8.2) можно получить выражения для входного и выходного токов схемы на рис. 2:

$$I_б = I_э (1 - \alpha); \quad (8.5)$$

$$I_k = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_б - \frac{I_{к0}}{1 - \alpha} (\exp \frac{eU_{бк}}{kT} - 1) = \beta I_б - I_{к0} (1 + \beta) (\exp \frac{eU_{бк}}{kT} - 1), \quad (8.6)$$

где β - коэффициент передачи тока базы.

В активном режиме (8.6) преобразуется к виду

$$I_k = \beta I_б + I_{к0} (1 + \beta). \quad (8.7)$$

Соотношения (8.4) – (8.6) в сочетании с законом Кирхгофа для напряжений

$$U_{кэ} = U_{кб} + U_{бэ} \quad (8.8)$$

позволяют установить связи между токами и напряжениями в цепях транзистора при включении ОЭ с учетом упрощений, указанных для включения ОБ.

В случаях, когда точное напряжение на открытом p - n переходе транзистора определить невозможно из-за отсутствия необходимых данных, в первом приближении его можно принять равным 0,7 В.

Задачи

1. Для некоторого транзистора типа p - n - p задано $I_{рз} = 1$ мА, $I_{пз} = 0,01$ мА, $I_{рк} = 0,98$ мА, $I_{пк} = 0,001$ мА. Вычислить:

- а) статический коэффициент передачи тока базы – α_T ;
- б) эффективность эмиттера (коэффициент инжекции – γ);
- в) ток базы и коэффициент передачи тока в схемах с ОБ – α и ОЭ – β .

2. Показать, что при экспоненциальном распределении примеси в базе n - p - n биполярного транзистора поле E_x постоянно. Найти в этом случае концентрацию неосновных носителей вблизи коллектора, если уровень легирования около эмиттера $N_A = 10^{17}$ см⁻³, толщина базы транзистора $x_б = 0,3$ мкм, а $E_x = 4000$ В/см.

3. Кремниевый транзистор типа n^+ - p - n имеет эффективность эмиттера $\gamma = 0,999$, коэффициент переноса через базу $\alpha_T = 0,99$, толщину нейтральной области базы $W_б = 0,5$ мкм, концентрацию примеси в эмиттере $N_D = 10^{19}$ см⁻³, базе $N_A = 10^{16}$ см⁻³ и коллекторе $N_D = 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Определить предельное напряжение на эмиттере, при котором прибор перестает быть управляемым и наступает пробой и вычислить время пролета базы и частоту отсечки.

4. Имеется кремниевый транзистор типа p^+ - n - p с параметрами: $N_{Aэ} = 5 \cdot 10^{18}$ см⁻³, $N_{Dб} = 1 \cdot 10^{16}$ см⁻³, $N_{Ак} = 1 \cdot 10^{15}$ см⁻³, ширина области базы $W = 1$ мкм, площадь $S = 3$ мм², $U_{эк} = +0,5$ В, $U_{бк} = -5$ В. Вычислить:

- а) толщину нейтральной области $W_б$ в базе,
- б) концентрацию неосновных носителей около перехода эмиттер – база $p_n(0)$,
- в) заряд неосновных носителей в области базы $Q_б$.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 9

ДИФФУЗИОННЫЕ РЕЗИСТОРЫ И КОНДЕНСАТОРЫ

Цель: Научиться проводить расчет параметров диффузионных резисторов и конденсаторов.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание физических принципов работы диффузионных элементов микросхем; умение строить физические и математические модели процессов, лежащих в основе работы диффузионных элементов.

Теоретическая часть

Электропроводность полупроводников, обусловленная основными носителями зарядов

$$\sigma_p = qN_A\mu_p, \quad \sigma_n = qN_D\mu_n, \quad (9.1)$$

где σ_p , σ_n – электропроводность полупроводников p- и n-типов.

Удельное сопротивление полупроводника

$$\rho_p = (qN_A\mu_p)^{-1}, \quad \rho_n = (qN_D\mu_n)^{-1} \quad (9.2)$$

Контактная разность потенциалов

$$\varphi_0 = \varphi_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}, \quad (9.3)$$

где φ_T – температурный потенциал, n_i – концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике.

$$\varphi_T = kT/q, \quad (9.4)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура (при температуре $T = 300$ К температурный потенциал имеет значение $\varphi_T = 26$ мВ), q – элементарный заряд.

Удельная барьерная емкость резкого р–n-перехода

$$C = \left[\frac{q\epsilon\epsilon_0 N_A N_D}{2(N_A + N_D)(\varphi_0 - U)} \right]^{1/2} \left[\frac{\Phi}{\text{м}^2} \right]. \quad (9.5)$$

Ширина обедненного слоя (ширина р–n-перехода)

$$W = \left[\frac{2\epsilon\epsilon_0(\varphi_0 - U)}{qN_j} \right]^{1/2}, \quad (9.6)$$

где $\frac{1}{N_j} = \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}$.

Удельная барьерная емкость плавного р–n-перехода

$$C = \left[\frac{qa(\epsilon\epsilon_0)^2}{12(\varphi_0 - U)} \right]^{1/3} \left[\frac{\Phi}{\text{м}^2} \right], \quad (9.7)$$

где a – градиент концентрации примесей, $[\text{м}^{-4}]$.

Ширина р–n-перехода

$$W = \left[\frac{12\epsilon\epsilon_0(\varphi_0 - U)}{qa} \right]^{1/3}. \quad (9.8)$$

Задачи

1. Пластина кремния длиной 100 мкм, шириной 10 мкм и толщиной 1 мкм легирована мышьяком 10^{16} см^{-3} . Вычислить удельное сопротивление кремния, удельное поверхностное сопротивление пластины, полное сопротивление пластины.

2. Найти удельное сопротивление ρ электронного и дырочного кремния Si с легирующей примесью $N_{d,a} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при комнатной температуре.

3. Рассчитать собственное удельное сопротивление ρ_i монокристаллов кремния Si, германия Ge и арсенида галлия GaAs при комнатной температуре.

4. Резистор представляет собой кремниевую пластину толщиной 25,4 мкм, равномерно легированную фосфором с концентрацией 10^{17} см^{-3} и бором с концентрацией $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Вычислите сопротивление этого резистора.

5. Пленочный резистор интегральной микросхемы создан путем диффузии атомов фосфора в эпитаксиальный слой p -типа, легированный с концентрацией $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Оказалось, что после перераспределения примесей при температуре 1000°C глубина p - n -перехода 2,5 мкм.

а) Вычислите поверхностное сопротивление слоя пленки, полученное в процессе диффузии, если соответствующая удельная проводимость равна $\sigma = 1,5 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

б) Найдите длину резистора сопротивлением 2 кОм, если его минимальная ширина составляет 6,1 мкм.

6. Фосфор внедряется в кремний, создавая область n -типа с поверхностным сопротивлением $4 \text{ Ом}/\square$ и глубиной залегания p - n -перехода 1,5 мкм. Определить концентрацию примеси на глубине 1 мкм, если температура диффузии 1100°C .

7. Вычислить барьерную емкость германиевого полупроводникового p - n -перехода с площадью поперечного сечения $S = 1 \text{ мм}^2$ и шириной запирающего слоя $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$; $\varepsilon = 16$.

8. Найти барьерную емкость германиевого p - n -перехода, если удельное сопротивление p -области $3,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Концентрация акцепторов значительно меньше концентрации доноров. Контактная разность потенциалов $\varphi_0 = 0,35 \text{ В}$. Приложенное обратное напряжение $U_{\text{обр}} = -5 \text{ В}$, площадь поперечного сечения 1 мм^2 , $\varepsilon = 16$.

9. Удельная проводимость p -области кремния с резким p - n -переходом $\sigma_p = 10 \text{ См/см}$, а удельная проводимость n -области $\sigma_n = 1 \text{ См/см}$, относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 16$. Найти барьерную емкость перехода, имеющего площадь поперечного сечения $S = 0,05 \text{ мм}^2$, $U_{\text{обр}} = -10 \text{ В}$.

10. Определить барьерную емкость p - n -перехода в германии, кремнии и арсениде галлия, если концентрация доноров в n -области равна концентрации акцепторов в p -области $N_{\text{Ge}} = 2,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $N_{\text{Si}} = 1,5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $N_{\text{GaAs}} = 4,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$.

11. В равновесном состоянии высота потенциального барьера p - n -перехода равна $0,2 \text{ В}$, концентрация акцепторных примесей $N_a = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Найти барьерную емкость, соответствующую обратным напряжениям, равным $0,1$ и 10 В , если площадь перехода 1 мм^2 .

12. Кремниевый p - n -переход имеет $S = 1 \text{ мм}^2$, $C_\delta = 300 \text{ пФ}$, если подводится $U_{\text{обр}} = -10 \text{ В}$. Найти изменение емкости, если обратное напряжение становится $U_{\text{обр}} = -20 \text{ В}$.

13. Определить, насколько изменится емкость кремниевого p - n -перехода, если температура увеличится от 30°C до 50°C при постоянном приложенном напряжении $-0,5 \text{ В}$. Концентрация примесей в p - и n -областях составляет соответственно $4 \cdot 10^{16}$ и $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

14. В параллельном колебательном контуре в качестве конденсатора используется обратно смещенный кремниевый p - n переход. Рассчитать, как изменится резонансная частота колебательного контура, если обратное смещение снизить от минус $0,2 \text{ В}$ до минус $0,7 \text{ В}$, а индуктивность составляет 2 мкГн . Концентрация примесей в p - и n -областях перехода равна соответственно 10^{15} и 10^{16} см^{-3} , площадь перехода – $0,1 \text{ см}^2$, температура – 300 К .

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 10

СТРУКТУРА "МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК"

Цель: Научиться проводить расчет параметров МДП-структур.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание физических принципов работы структур МДП-микросхем; умение строить физические и математические модели процессов, лежащих в основе работы элементов МДП-микросхем.

Теоретическая часть

Вольт-амперная стоковая характеристика МДП-транзистора с индуцированным каналом описывается формулой

$$I_c = \mu \frac{Z}{L} C_D \left[(U_z - U_{z\text{отп}}) U_c - \frac{U_c^2}{2} \right], \quad (10.1)$$

где Z и L – соответственно ширина и длина канала; μ – подвижность носителей заряда в канале; C_D – удельная емкость МДП-структуры, определяемая соотношением $C_D = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_D}{d}$, в котором ε_D – диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика, d – его толщина; U_c – напряжение между истоком и стоком; U_z – напряжение на затворе; $U_{z\text{отп}}$ – напряжение отпирания, при котором формируется (индуцируется) проводящий канал между истоком и стоком.

Из выражения (10.1) видно, что напряжение отпирания, называемое также пороговым напряжением $U_{\text{пор}}$ МДП-транзистора, является его важным параметром.

При этом напряжении в приповерхностной области полупроводника формируется пространственный заряд, соответствующий режиму сильной инверсии.

Упрощенное выражение для порогового напряжения для n-канального МДП-транзистора имеет вид

$$U_{nop} = U_{nz} + 2|\varphi_{об}| + \frac{|Q_s|}{C_D}. \quad (10.2)$$

Соответствующее выражение для p-канального МДП-транзистора

$$U_{nop} = U_{nz} - 2|\varphi_{об}| - \frac{|Q_s|}{C_D}. \quad (10.3)$$

В (10.2) и (10.3) U_{nz} – напряжение плоских зон; $\varphi_{об}$ – объемный потенциал; Q_s – полная поверхностная плотность заряда в полупроводнике.

Для МДП-структуры в предположении, что разность работ выхода электрона из металла и полупроводника не равна нулю, а в диэлектрике МДП-структуры и на границе раздела диэлектрик-полупроводник отсутствует заряд поверхностных состояний, напряжение плоских зон будет определяться разностью потенциалов φ_{MS} соответствующей разности работ выхода $U_{nz} = \varphi_{MS}$.

Величину φ_{MS} можно определить из соотношения

$$\varphi_{MS} = \varphi_M - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \varphi_{об} \right)$$

для полупроводника n-типа и

$$\varphi_{MS} = \varphi_M - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \varphi_{об} \right)$$

для полупроводника p-типа.

Второе слагаемое в выражениях (10.2) и (10.3) определяет величину поверхностного потенциала φ_s , при котором начинается сильная инверсия

$$\varphi_{Sinv} = 2|\varphi_{об}|.$$

Третье слагаемое в (10.2) и (10.3) определяет величину падения напряжения на слое диэлектрика, которое, используя закон Гаусса, можно определить как

$$U_D = E_D d = \frac{|Q_S|}{\varepsilon_D} d = \frac{|Q_S|}{C_D},$$

где E_D – напряженность электрического поля на диэлектрике.

Таким образом, для идеальной МДП-структуры величина порогового напряжения определяется выражением

$$U_{пор} = U_{пз} \pm 2\varphi_{об} \pm \frac{2\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_s q N \varphi_b}}{C_d}, \quad (10.4)$$

где $N = N_A$ или N_D , в зависимости от типа проводимости полупроводниковой подложки МДП-транзистора. Знаки (+) и (–) определяются типом проводимости индуцированного канала между истоком и стоком. Величина объемного потенциала определяется соотношением $\varphi_{об} = \varphi_T \ln\left(\frac{N}{n_i}\right)$.

Максимальная толщина обедненного слоя в приповерхностной области полупроводника формируется в режиме сильной инверсии и находится из выражения

$$W_m = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_s \varphi_{sinv}}{qN}} = \sqrt{\frac{4\varepsilon_0 \varepsilon_s \varphi_T \ln(N/n_i)}{qN}}. \quad (10.5)$$

При изготовлении интегральных микросхем, а также силовых полупроводниковых приборов в качестве затворного электрода широко применяются слои сильнолегированного поликремния. Для поликремниевых затворов n^+ -типа, где уровень Ферми практически совпадает с положением дна зоны проводимости, эффективная работа выхода φ_m равна величине сродства к электрону в кремнии ($\chi_{Si} = 4,15$ В). В поликремниевых затворах p^+ -типа, где уровень Ферми совпадает с потолком валентной зоны, эффективная работа выхода $\varphi_m = \chi_{Si} + \frac{E_g}{q} = 5,25$ В.

Полная удельная емкость МДП-структуры определяется соотношением

$$C = \frac{C_D C_{\Pi}}{C_D + C_{\Pi}} \left[\Phi / \text{м}^2 \right], \quad (10.6)$$

которое соответствует последовательному соединению емкости ОПЗ полупроводника и емкости диэлектрика

$$C_D = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_D}{d} \left[\Phi / \text{м}^2 \right]. \quad (10.7)$$

Величина емкости C_D определяется толщиной диэлектрика и представляет собой максимально возможную емкость всей структуры $C_D = C_{\max}$.

Емкость ОПЗ полупроводника не является постоянной и ее величина определяется изменением поверхностной плотности заряда Q_S при изменении приложенного к МДП-структуре напряжения:

$$C_{\Pi} = \frac{dQ_S}{d\varphi_S}.$$

В отсутствие разности работ выхода приложенное напряжение делится между полупроводником и диэлектриком:

$$U = U_D + \varphi_S.$$

Таким образом, можно определить зависимость полной емкости МДП-структуры от приложенного напряжения.

Особый интерес представляет величина полной емкости МДП-структуры в режиме сильной инверсии $C_{\min}$, т.е. при $U = U_{\text{пор}}$. Соответствующее $U_{\text{пор}}$ значение удельной дифференциальной емкости идеальной МДП-структуры равно

$$C_{\min} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_D}{d + (\varepsilon_D / \varepsilon_S) W_m} \left[\frac{\Phi}{\text{м}^2} \right]. \quad (10.8)$$

Задачи

1. Идеальный МДП-конденсатор сформирован на основе кремниевой подложки р-типа с концентрацией $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Диэлектрический слой имеет толщину 100 нм. Разность работ выхода электрона из металла и

полупроводника составляет $\phi_{MS} = -0,9$ В. Плотность заряда на границе раздела $Q_{ss} = 8 \cdot 10^{-8}$ Кл/см². Вычислите:

- а) максимальную толщину обедненной области W_{max} ,
- б) емкость диэлектрического слоя,
- в) заряд в обедненной области (Q_s),
- г) пороговое напряжение,
- д) минимальную емкость МДП-конденсатора,
- е) пороговое напряжение с учетом влияния напряжения плоских зон.

2. МДП-транзистор с каналом p -типа имеет следующие параметры: $N_d = 10^{17}$ см⁻³, $Q_{ss} = 8 \cdot 10^{-8}$ Кл/см²; $\phi_{MS} = -0,95$ эВ. Толщина слоя окисла $d = 100$ нм. Вычислите пороговое напряжение.

3. МДП-конденсатор имеет подложку с концентрацией примеси $N_a = 10^{14}$ см⁻³. Вычислите

- а) максимальную толщину области пространственного заряда;
- б) пороговые напряжения, полагая, что
 $\phi_{MS} = -1,0$ В; $C_{min} = 3,35 \cdot 10^{-8}$ Ф/см²; $d = 100$ нм; $Q_{ss} = 1,6 \cdot 10^{-8}$ Кл/см².

4. МДП-структура создана на кремниевой подложке p -типа. Концентрация акцепторной примеси $N_a = 10^{15}$ см⁻³, толщина оксидного слоя d составляет 120 нм, затвор выполнен из алюминия. Вычислите пороговое напряжение, если известно, что поверхностная плотность заряда составляет $4,8 \cdot 10^{-8}$ Кл/см².

5. Сравнить максимальную возможную емкость конденсатора размерами 100×100 мкм, выполненного в виде МДП-конденсатора (C_1), с емкостью конденсатора таких же размеров на обратно смещенном p - n -переходе (C_2). Принять поле пробоя окисла равным $8 \cdot 10^6$ В/см, рабочее напряжение - равным 10 В. p - n -переход изготавливается путем диффузии бора в кремний n -типа проводимости с примесной концентрацией 10^{16} см⁻³.

6. МДП-транзистор с плавающим затвором имеет два слоя диэлектрика: нижний слой (диоксид кремния) имеет толщину $d_1 = 10$ нм и

диэлектрическую проницаемость $\epsilon_1 = 4$; параметры верхнего слоя: $d_2 = 100$ нм и $\epsilon_2 = 10$. Плотность тока в нижнем слое определяется законом Ома $j = \sigma E_1$, где $\sigma = 10^{-7} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, током в верхнем слое можно пренебречь. Вычислить изменение порогового напряжения $\Delta U_{\text{п}}$, считая, что к затвору приложено напряжение 10 В в течение очень длительного времени.

7. МДП-транзистор с плавающим затвором имеет два слоя диэлектрика: нижний слой (диоксид кремния) имеет толщину $d_1 = 10$ нм и диэлектрическую проницаемость $\epsilon_1 = 4$; параметры верхнего слоя: $d_2 = 100$ нм и $\epsilon_2 = 10$. Плотность тока в нижнем слое определяется законом Ома $j = \sigma E_1$, где $\sigma = 10^{-7} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, током в верхнем слое можно пренебречь. Вычислить изменение порогового напряжения $\Delta U_{\text{п}}$, считая, что к затвору приложено напряжение 10 В в течение времени $t = 0,25$ мкс.

8. Сравнить максимально возможную емкость конденсатора размером 100×100 мкм, выполненную в виде МОП конденсатора с емкостью конденсатора, такого же размера на обратно смещенном р-п переходе в n-Si с $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Принять, что поле пробоя окисла $E = 8 \times 10^6 \text{ В/см}$, рабочее напряжение конденсатора $U = 5 \text{ В}$ (с учетом коэффициента запаса "2": $U = 10 \text{ В}$).

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 11

Аудиторная контрольная работа

Цель: Контроль знаний.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

Примерные варианты заданий на контрольную работу

Вариант 1

1. На диэлектрическую подложку нанесена металлическая пленка толщиной 0,8 мкм, имеющая форму прямоугольника размерами 3×8 мм. Сопротивление пленки при напряжении, приложенном в продольном направлении, составляет 95 Ом. Определить сопротивление квадрата пленки, а также сопротивление пленки в поперечном направлении.
2. Удельная проводимость p -области кремния с резким p - n -переходом $\sigma_p = 10$ См/см, а удельная проводимость n -области $\sigma_n = 2$ См/см, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 12$. Найти барьерную емкость перехода, имеющего площадь поперечного сечения $S = 0,1$ мм², $U_{обр} = -5$ В.
3. МДП-структура создана на кремниевой подложке p -типа. Концентрация акцепторной примеси $N_a = 10^{16}$ см⁻³, толщина оксидного слоя d составляет 100 нм, затвор выполнен из алюминия. Вычислите пороговое напряжение, если известно, что поверхностная плотность заряда составляет $5 \cdot 10^{-8}$ Кл/см².

Вариант 2

1. Рассчитать коэффициент формы резистора сопротивлением 1,5 кОм, изготовленного из материала с сопротивлением пленки $2 \cdot 10^3$ Ом/□.

2. Пленочный резистор интегральной микросхемы создан путем диффузии атомов фосфора в эпитаксиальный слой p -типа, легированный с концентрацией $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Оказалось, что после перераспределения примесей глубина p - n -перехода 2 мкм, соответствующая удельная проводимость равна $\sigma = 2 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Найдите длину резистора сопротивлением 2,5 кОм, если его минимальная ширина составляет 5 мкм.
3. МДП-транзистор с каналом p -типа имеет следующие параметры: $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $Q_{ss} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$; $\phi_{MS} = -0,95 \text{ эВ}$. Толщина слоя окисла $d = 200 \text{ нм}$. Вычислите пороговое напряжение.

Вариант 3

1. Рассчитать минимальную ширину резистора, если резистор сопротивлением 4 кОм должен рассеивать мощность 10 мВт. Резистор изготовлен из материала с сопротивлением пленки $2 \cdot 10^3 \text{ Ом/}\square$, максимально допустимая удельная мощность рассеяния резистивной пленки 2 Вт/см^2 .
2. Найти барьерную емкость кремниевого p - n -перехода, если удельное сопротивление p -области $2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Концентрация акцепторов значительно меньше концентрации доноров. Контактная разность потенциалов $\phi_0 = 0,35 \text{ В}$. Приложенное обратное напряжение $U_{обр} = -5 \text{ В}$, площадь поперечного сечения $0,5 \text{ мм}^2$, $\varepsilon = 12$.
3. Идеальный МДП-конденсатор сформирован на основе кремниевой подложки p -типа с концентрацией $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Диэлектрический слой имеет толщину 200 нм. Разность работ выхода электрона из металла и полупроводника составляет $\phi_{MS} = -0,9 \text{ В}$. Плотность заряда на границе раздела $Q_{ss} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$. Вычислите минимальную емкость МДП-конденсатора.

Вариант 4

1. Рассчитать длину полоскового резистора, если резистор сопротивлением 4 кОм должен рассеивать мощность 10 мВт. Резистор

изготовлен из материала с сопротивлением пленки $2 \cdot 10^3 \text{ Ом}/\square$, максимально допустимая удельная мощность рассеяния резистивной пленки $2 \text{ Вт}/\text{см}^2$.

2. Вычислить барьерную емкость кремниевого полупроводникового *p-n*-перехода с площадью поперечного сечения $S = 1,5 \text{ мм}^2$ и шириной запирающего слоя $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$; $\varepsilon = 12$.

3. Идеальный МДП-конденсатор сформирован на основе кремниевой подложки *p*-типа с концентрацией $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Диэлектрический слой имеет толщину 200 нм. Разность работ выхода электрона из металла и полупроводника составляет $\phi_{MS} = -0,9 \text{ В}$. Плотность заряда на границе раздела $Q_{ss} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}/\text{см}^2$. Вычислите пороговое напряжение.

Вариант 5

1. На диэлектрическую подложку нанесена металлическая плёнка толщиной 0,1 мкм, имеющая форму прямоугольника размерами $1 \times 5 \text{ мм}$. Сопротивление плёнки при напряжении, приложенном в продольном направлении, составляет 100 Ом. Определите сопротивление квадрата плёнки, а также сопротивление плёнки в поперечном направлении (параллельно меньшей стороне прямоугольника).

2. Резистор представляет собой кремниевую пластину толщиной 25,4 мкм, равномерно легированную фосфором с концентрацией 10^{17} см^{-3} и бором с концентрацией $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Вычислите сопротивление этого резистора.

3. Идеальный МДП-конденсатор сформирован на основе кремниевой подложки *p*-типа с концентрацией $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Диэлектрический слой имеет толщину 200 нм. Разность работ выхода электрона из металла и полупроводника составляет $\phi_{MS} = -0,9 \text{ В}$. Плотность заряда на границе раздела $Q_{ss} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}/\text{см}^2$. Вычислите заряд в обедненной области (Q_s).

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 12

ТРАНЗИСТОРНО-ТРАНЗИСТОРНАЯ ЛОГИКА

Цель: Научиться проводить расчет параметров схем транзисторно-транзисторной логики.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание физических принципов работы микросхем ТТЛ; умение строить физические и математические модели процессов, лежащих в основе работы микросхем ТТЛ.

Теоретическая часть

На рисунке 3 изображена схема элемента 2И-НЕ ТТЛ со сложным инвертором.

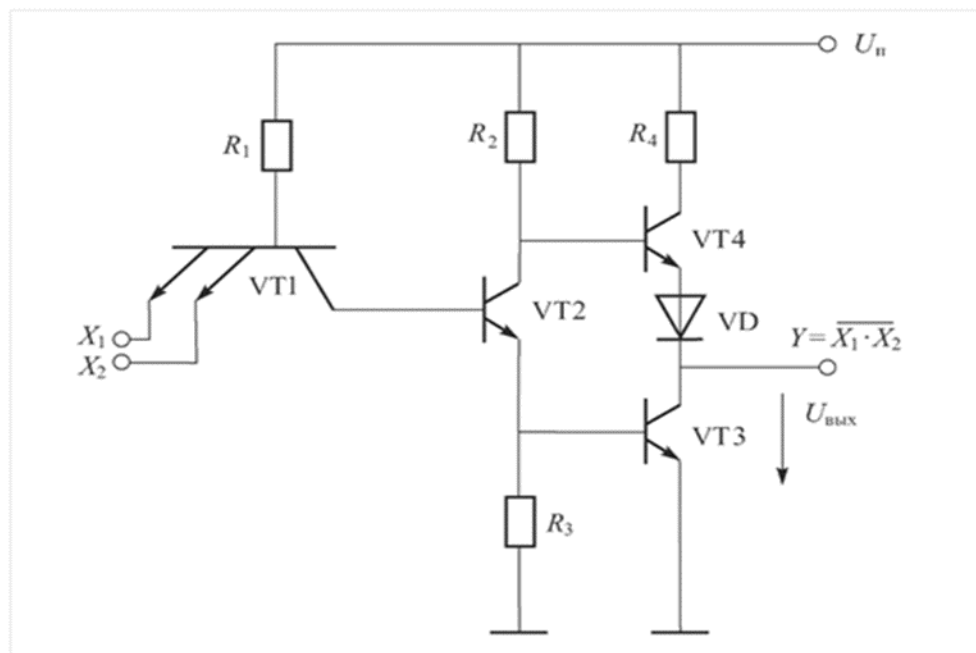


Рисунок 3. Логический элемент 2И-НЕ ТТЛ со сложным инвертором

Если на входы подать сигналы логической 1, т. е. $U_{вх1} = U_{вх2} \geq 2,4 \text{ В}$, то эмиттерные переходы транзистора VT1 будут закрыты. Ток протекает через коллекторный переход транзистора VT1 в базу транзистора VT2. Транзистор VT2 переходит в насыщение, в насыщение переходит и транзистор VT3. В стандартном для интегральных микросхем открытом транзисторе $U_{бэ} = 0,7 \text{ В}$, а напряжение между коллектором и эмиттером насыщенного транзистора $U_{кэ \text{ нас}} = 0,2 \text{ В}$, тогда получим

$$U_{вых} = U_{кэ \text{ VT3}} = 0,2 \text{ В}, U_{к2} = U_{б4} = 0,9 \text{ В}.$$

Разность напряжений в $0,7 \text{ В}$ не позволяет открыть два $p-n$ -перехода: база – эмиттер VT4 и диод VD. То есть при насыщении транзистора VT3 транзистор VT4 и диод VD будут закрыты.

Выходное сопротивление логического элемента определяется по формуле

$$R_{вых} = - \left. \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вых}} \right|_{U_{вх} = \text{const}} \quad (12.1)$$

Выходное сопротивление показывает, как напряжение на выходе элемента зависит от тока нагрузки, а значит, от сопротивления нагрузки. Если выходное сопротивление мало ($R_{н} \gg R_{вых}$), то даже существенное изменение выходного тока не повлияет на величину выходного напряжения, т. е. замена одной нагрузки на другую не приведет к изменению $U_{вых}$.

Выходное сопротивление элемента 2И-НЕ со сложным инвертором (рис. 3) зависит от того, какие напряжения поданы на входы. Если напряжения на всех входах логического элемента соответствуют логической единице, то выходное сопротивление равно выходному сопротивлению насыщенного транзистора VT3. Это сопротивление обычно невелико и составляет десятки Ом.

Если напряжение хотя бы на одном из входов соответствует напряжению логического нуля, то выходной транзистор VT3 закрыт, ток в

нагрузку идет через нагрузочный транзистор VT4 и диод VD. Запишем 2-й закон Кирхгофа для цепи $U_{\text{п}} \rightarrow R_2 \rightarrow \text{бэ}_{\text{VT4}} \rightarrow \text{VD} \rightarrow U_{\text{вых}}$:

$$U_{\text{п}} = I_2 R_2 + U_{\text{бэ4}} + U_{\text{D}} + U_{\text{вых}}. \quad (12.2)$$

При закрытом транзисторе VT2 ток через сопротивление R_2 равен базовому току транзистора VT4, $I_2 = I_{\text{б4}}$. Учитывая это, запишем уравнение (12.2) для приращений напряжений и тока:

$$\Delta U_{\text{п}} = \Delta I_{\text{б4}} R_2 + \Delta U_{\text{бэ4}} + \Delta U_{\text{D}} + \Delta U_{\text{вых}}. \quad (12.3)$$

При постоянном напряжении питания $\Delta U_{\text{п}} = 0$. Считая, что транзистор VT4 не входит в насыщение, перепишем (12.3) в виде

$$0 = \Delta I_{\text{б4}} (R_2 + h_{1134}) + R_{\text{D}} \Delta I_{\text{вых}} + \Delta U_{\text{вых}}. \quad (12.4)$$

Здесь R_{D} – дифференциальное сопротивление диода. В (12.4) учтено, что выходной ток элемента совпадает с током через диод. Действительно, транзистор VT3 закрыт и весь эмиттерный ток VT4 идет через диод в нагрузку. Эмиттерный ток VT4 и, следовательно, выходной ток элемента связаны с базовым током через параметр h_{213} . Таким образом

$$\Delta I_{\text{б4}} = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{1 + h_{213}}. \quad (12.5)$$

Подставляя последнее равенство в (12.4), получим, согласно (12.1)

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{D}} + \frac{R_2 + h_{1134}}{1 + h_{213}}. \quad (12.6)$$

Задачи

1. В схеме ТТЛ 2И-НЕ со сложным инвертором $R_1 = 4 \text{ кОм}$; $R_2 = 1,5 \text{ кОм}$; $R_3 = 1 \text{ кОм}$; $R_4 = 100 \text{ Ом}$; коэффициент передачи тока транзисторов $h_{213} = 40$. Входные сигналы отвечают высокому уровню напряжения $U_{\text{вх1}} = U_{\text{вх2}} = 3 \text{ В}$. Напряжение питания $U_{\text{п}} = 5 \text{ В}$. Нагрузкой схемы служат 8 таких же элементов, соединенных параллельно. Определить коэффициент насыщения выходного транзистора VT3. Считать, что для открытого транзистора $U_{\text{бэ}} = 0,7 \text{ В}$, $U_{\text{кэ нас}} = 0,2 \text{ В}$.

2. Определить коэффициент насыщения транзистора VT2 в схеме ТТЛ 2И-НЕ со сложным инвертором, если $R_1 = 3 \text{ кОм}$; $R_2 = 2 \text{ кОм}$; $R_3 = 1,35 \text{ кОм}$; $R_4 = 100 \text{ Ом}$; коэффициент передачи тока транзисторов $h_{21э} = 20$. Входные сигналы отвечают высокому уровню напряжения $U_{вх1} = U_{вх2} = 2,5 \text{ В}$. Напряжение питания $U_{п} = 5 \text{ В}$. Нагрузкой схемы служат три таких же элемента, соединенных параллельно. Считать, что для открытого транзистора $U_{бэ} = 0,7 \text{ В}$, $U_{кэ \text{ нас}} = 0,2 \text{ В}$.

3. Определить выходное сопротивление логического элемента ТТЛ (рис.3) при $U_{вх1} = U_{вх2} = 0,1 \text{ В}$. Принять, что сопротивление диода $R_D = 100 \text{ Ом}$; $R_1 = 4 \text{ кОм}$; $R_2 = 1,5 \text{ кОм}$; $R_3 = 1 \text{ кОм}$; $R_4 = 100 \text{ Ом}$; коэффициент передачи тока транзистора VT4 $h_{21э} = 40$. Ток, текущий из схемы в нагрузки, равен $0,8 \text{ мА}$. Входная характеристика транзистора VT4 изображена на рис. 4.

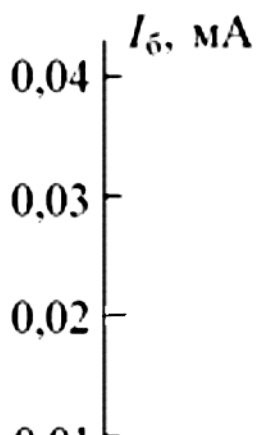


Рисунок 4. Входная характеристика транзистора

4. Определить выходное сопротивление логического элемента ТТЛ при $U_{вх1} = U_{вх2} = 0,2 \text{ В}$. Принять, что сопротивление диода $R_D = 30 \text{ Ом}$; $R_1 = 3 \text{ кОм}$; $R_2 = 1,1 \text{ кОм}$; $R_3 = 1 \text{ кОм}$; $R_4 = 120 \text{ Ом}$; коэффициент передачи тока транзистора VT4 $h_{21э} = 50$. Ток, текущий из схемы в нагрузки, равен $0,6 \text{ мА}$. Входная характеристика транзистора VT4 изображена на рис. 5.

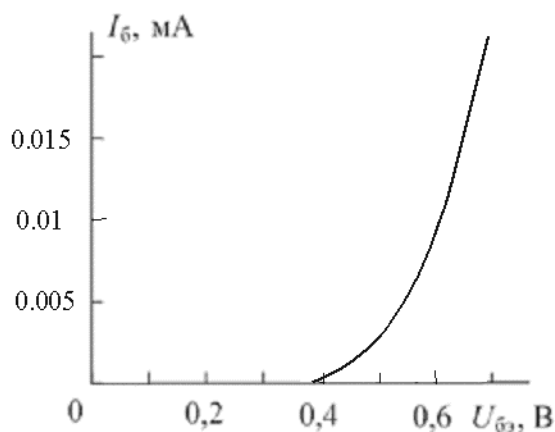


Рисунок 5. Входная характеристика транзистора

5. В условиях предыдущей задачи определить токи, текущие через все резисторы в схеме (рис.3).

6. Дан элемент 2И-НЕ ТТЛ с составным нагрузочным транзистором (рис. 6). $U_{вх1} = U_{вх2} = 2,8$ В; $R_1 = 3,5$ кОм; $R_2 = 1,2$ кОм; $R_3 = 0,3$ кОм; $R_4 = 400$ Ом; $R_5 = 4$ кОм; $R_6 = 50$ Ом; коэффициент передачи тока транзисторов $h_{21э} = 50$. Определить токи через резисторы R_1, R_2, R_3, R_4 . Считать, что для открытого транзистора $U_{бэ} = 0,7$ В, $U_{кэ\text{ нас}} = 0,2$ В.

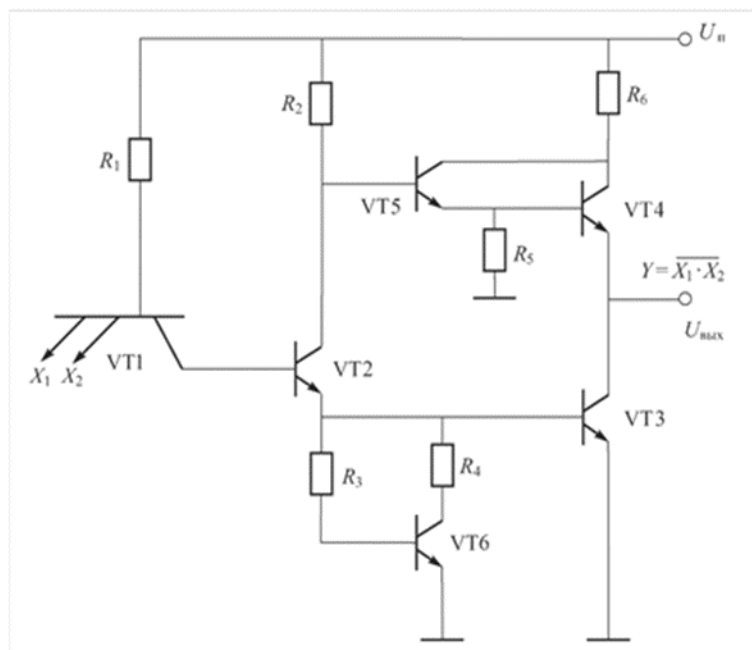


Рисунок 6. Логический элемент 2И-НЕ ТТЛ
с составным нагрузочным транзистором

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 13

ТРАНЗИСТОРНО-ТРАНЗИСТОРНАЯ ЛОГИКА С ДИОДОМ ШОТТКИ

Цель: Научиться проводить расчет параметров схем транзисторно-транзисторной логики.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание физических принципов работы микросхем ТТЛШ; умение строить физические и математические модели процессов, лежащих в основе работы микросхем ТТЛШ.

Задачи

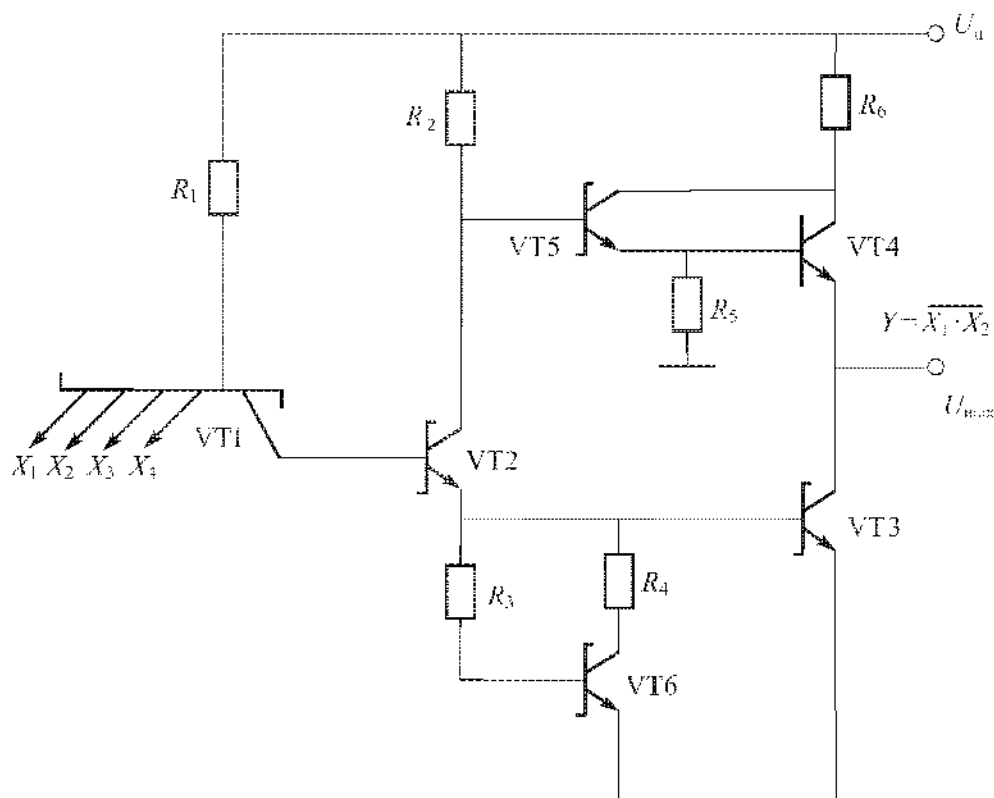


Рисунок 7. Логический элемент ТТЛШ

1. Дан элемент 2И-НЕ ТТЛШ. $X_1 = X_2 = 1$. Определить токи через сопротивления R_3 и R_4 , базовый ток I_{b6} и ток через диод Шоттки транзистора

VT6. Известно, что $R_1 = 3 \text{ кОм}$, $R_2 = 1 \text{ кОм}$, $R_3 = 1 \text{ кОм}$, $R_4 = 0,5 \text{ кОм}$, $R_5 = 2,5 \text{ кОм}$, $R_6 = 50 \text{ Ом}$. Коэффициент передачи тока транзисторов $h_{21э} = 50$. Входная характеристика транзисторов представлена на рис. 4.

2. Дан логический элемент 2И-НЕ ТТЛШ. $X_1 = X_2 = 1$. Определить токи через сопротивления R_1 , R_2 , R_5 и R_6 . Известно, что $R_1 = 3 \text{ кОм}$, $R_2 = 1 \text{ кОм}$, $R_3 = 0,5 \text{ кОм}$, $R_4 = 0,5 \text{ кОм}$, $R_5 = 2 \text{ кОм}$, $R_6 = 60 \text{ Ом}$. Коэффициент передачи тока транзисторов $h_{21э} = 20$. Входная характеристика транзисторов представлена на рис. 4.

3. Дан логический элемент 2И-НЕ ТТЛШ. Напряжения входных сигналов $U_{вх1} = U_{вх2} = 0,4 \text{ В}$. Определить токи через все сопротивления, если известно, что $R_1 = 2,8 \text{ кОм}$, $R_2 = 0,9 \text{ кОм}$, $R_3 = 0,5 \text{ кОм}$, $R_4 = 0,25 \text{ кОм}$, $R_5 = 3,5 \text{ кОм}$, $R_6 = 50 \text{ Ом}$. Коэффициент передачи тока транзисторов $h_{21э} = 50$. Ток, текущий из элемента в нагрузку, равен $0,5 \text{ мА}$. Входная характеристика транзисторов представлена на рис. 8.

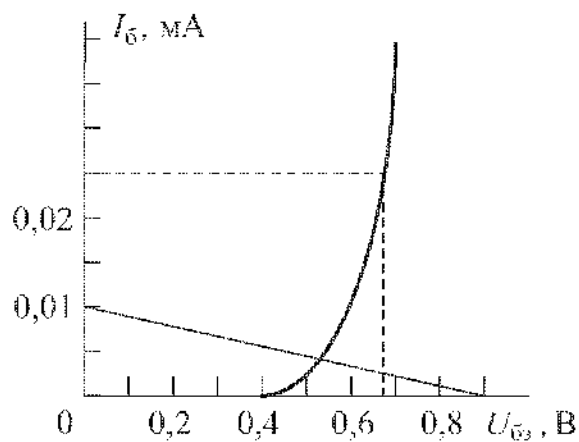


Рис. 8 Входная характеристика транзистора

4. Дан логический элемент 2И-НЕ ТТЛШ. Напряжения входных сигналов $U_{вх1} = 3,6 \text{ В}$, $U_{вх2} = 0,4 \text{ В}$. Определить базовые токи транзисторов VT4 и VT5 и величину выходного напряжения. Известно, что $R_1 = 2,9 \text{ кОм}$, $R_2 = 0,9 \text{ кОм}$, $R_3 = 0,5 \text{ кОм}$, $R_4 = 0,3 \text{ кОм}$, $R_5 = 3,2 \text{ кОм}$, $R_6 = 60 \text{ Ом}$. Коэффициент передачи тока транзисторов $h_{21э} = 40$. Ток, текущий из элемента в нагрузку, равен $0,4 \text{ мА}$. Входная характеристика транзисторов представлена на рис. 8.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 14

КМДП – ЛОГИКА

Цель: Научиться проводить расчет параметров схем КМДП-логики.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание физических принципов работы МДП-микросхем; умение строить физические и математические модели процессов, лежащих в основе работы МДП-микросхем.

Теоретическая часть

Основу КМДП-логических элементов составляет пара комплементарных МДП транзисторов с индуцированными каналами, т. е. транзисторов с идентичными параметрами, но с разным типом проводимости каналов. Схема инвертора на КМОП транзисторах представлена на рис. 9.

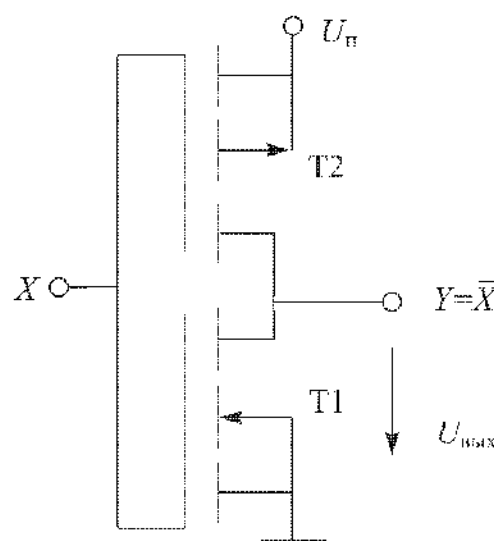


Рисунок 9. Инвертор на КМОП-транзисторах

Сток выходного n -канального транзистора T1 соединен с выходом элемента, его исток – с корпусом. В нагрузочном p -канальном транзисторе T2 сток также соединен с выходом, а исток – с питанием. Вход инвертора соединен с затворами обоих транзисторов. При высоком напряжении на входе (соответствующем логической единице) n -канальный транзистор открыт и имеет малое сопротивление. Нагрузочный транзистор T2, наоборот, закрыт и имеет высокое сопротивление. Напряжение питания перераспределяется в соответствии с сопротивлениями, поэтому на выходе устанавливается низкий уровень напряжения.

При низком напряжении на входе (соответствующем логическому нулю) закрыт транзистор T1 и открыт транзистор T2. Поэтому выходное напряжение равно напряжению на закрытом транзисторе, т. е. соответствует логической единице.

Поскольку в статических режимах всегда один из транзисторов закрыт, то ток через элемент крайне мал (в современных схемах это доли нА). Это, разумеется, относится к случаю, когда нагрузка также потребляет малые токи, т. е. тоже представляет собой элемент серий КМОП. Мощность, потребляемая таким элементом от источника питания, ничтожно мала (меньше 1 мкВт).

Задачи

1. Сопротивление транзисторов (рис. 10) в открытом состоянии составляет 200 Ом, в закрытом – 40 кОм. Определить потенциал на выходе инвертора и ток через нагрузку, если нагрузка сопротивлением 400 Ом подключена между выходом элемента и клеммой U_n ; $U_n = 5$ В. Напряжение на входе соответствует уровню логического нуля, т. е. $X = 0$.

2. Сопротивление транзисторов (рис. 10) в открытом состоянии составляет 200 Ом, в закрытом – 40 кОм. Определить потенциал на выходе инвертора и ток через нагрузку, если нагрузка сопротивлением 400 Ом

подключена между выходом элемента и клеммой U_{Π} ; $U_{\Pi} = 5$ В. Напряжение на входе соответствует уровню логической единицы, т. е. $X = 1$.

3. В инверторе на КМОП транзисторах (рис. 11) сопротивление n -канала в открытом состоянии составляет 200 Ом, в закрытом – 40 кОм. Сопротивление p -канала равно соответственно 400 Ом и 100 кОм для открытого и закрытого транзистора. Определить выходное напряжение логической единицы $U_{\text{ВЫХ}}^1$ в режиме холостого хода, т. е. при токе нагрузки равном нулю. $U_{\Pi} = 5$ В.

4. В инверторе на КМОП транзисторах (рис. 11) сопротивление n -канала в открытом состоянии составляет 200 Ом, в закрытом – 40 кОм. Сопротивление p -канала равно соответственно 400 Ом и 100 кОм для открытого и закрытого транзистора. Определить выходное напряжение логического нуля $U_{\text{ВЫХ}}^0$ в режиме холостого хода, т. е. при токе нагрузки равном нулю. $U_{\Pi} = 5$ В.

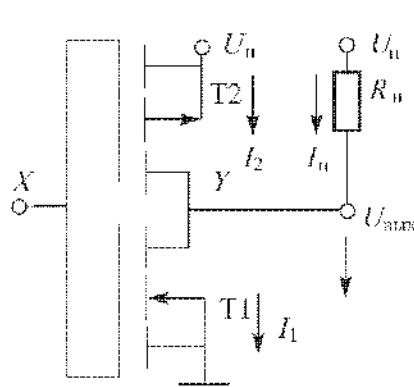


Рисунок 10

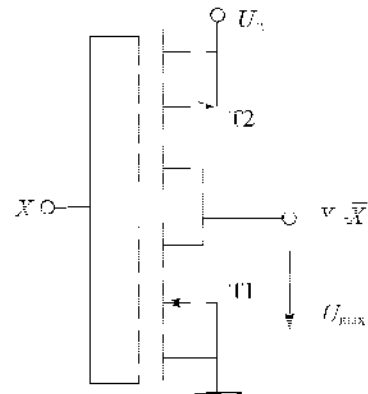


Рисунок 11

5. В инверторе на КМОП транзисторах (рис. 11) Сопротивление n -канала в открытом состоянии составляет 200 Ом, в закрытом – 40 кОм. Сопротивление p -канала равно соответственно 400 Ом и 100 кОм для открытого и закрытого транзистора. Определить выходное напряжение логической единицы $U_{\text{ВЫХ}}^1$, если нагрузка сопротивлением 2 кОм подключена между выходом инвертора и землей.

6. В инверторе на КМОП транзисторах (рис. 11) Сопротивление n -канала в открытом состоянии составляет 150 Ом, в закрытом – 35 кОм. Сопротивление p -канала равно соответственно 300 Ом и 100 кОм для открытого и закрытого транзистора. Определить выходное напряжение логического нуля $U_{\text{вых}}^0$, если нагрузка сопротивлением 2 кОм подключена между выходом инвертора и землей.

7. Светодиод подключен к выходу логического элемента 2И-НЕ на КМОП-транзисторах, как показано на рис. 12. Определить сопротивление R , необходимое для обеспечения рабочего тока диода 30 мА, если $U_{\text{п1}} = U_{\text{п2}} = 5 \text{ В}$, $R_6 = 0$, $h_{21\beta}$ транзистора VT равно 50. Рабочее напряжение диода 1,6 В, $U_{\text{бэ}}$ открытого транзистора равно 0,7 В. Сопротивления открытых каналов МОП-транзисторов 100 Ом, сопротивления закрытых каналов считать бесконечно большими.

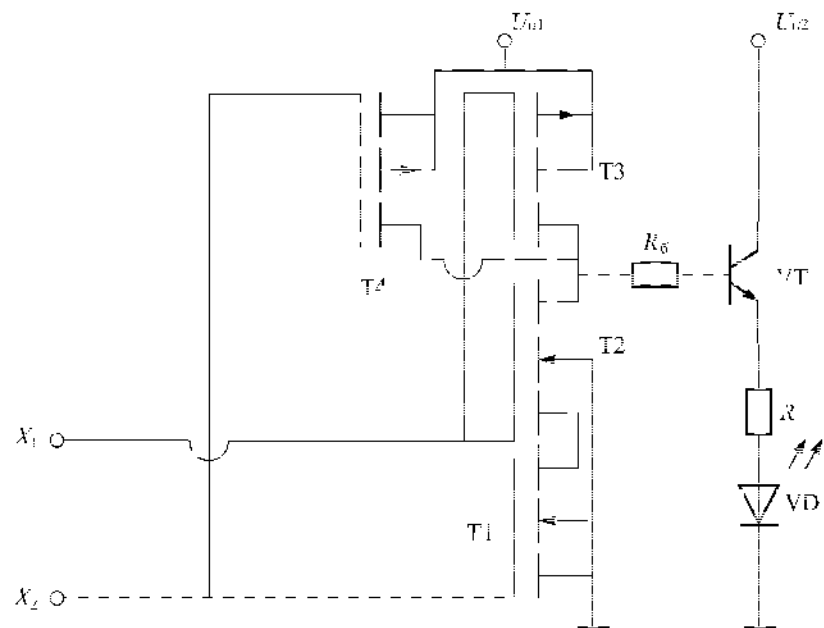


Рисунок 12

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 15

УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ

Цель: Научиться проводить расчет усилительного каскада.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание физических принципов работы усилителя на биполярном транзисторе; умение строить физические и математические модели процессов, лежащих в основе работы усилителя.

Теоретическая часть

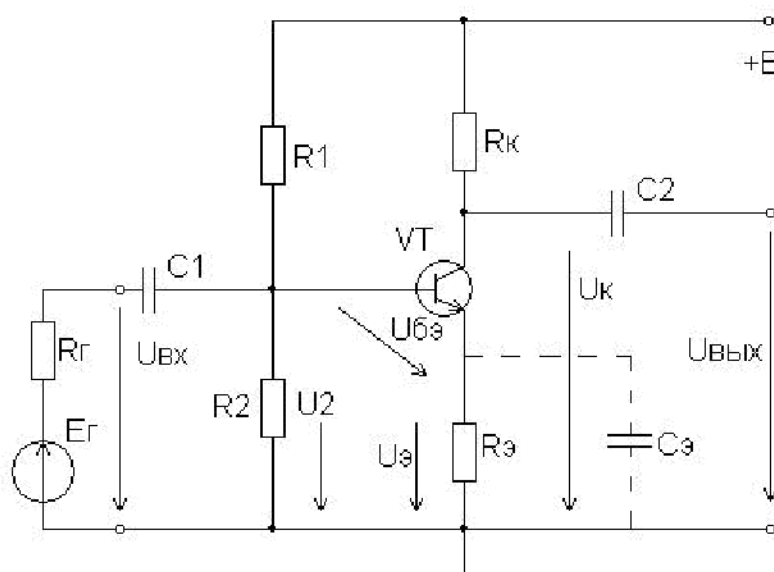


Рис. 13 – Схема усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером

Пример расчета

Задан транзистор ГТ-109Б.

Для этого транзистора $h_{11э} = 300 \text{ Ом}$; $h_{12э} = 12 \cdot 10^{-3}$; $h_{21э} = 50$; $h_{22э} = 75 \cdot 10^{-6} \text{ СМ}$; $R_k = 3,0 \text{ кОм}$; $U_{э0} = 2,8 \text{ В}$; $f_H = 40 \text{ Гц}$; $P_{Kmax} = 0,030 \text{ Вт}$.

Общие данные: $I_{K0} = 1 \text{ мА}$; $U_{KЭ0} = 5 \text{ В}$; $R_H = R_{ВХ}$.

Решение

1. Падение напряжения на резисторе в состоянии покоя

$$U_{K0} = I_{K0} R_K = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 3,0 \cdot 10^3 = 3 \text{ В.}$$

2. Ток базы в состоянии покоя

$$I_{B0} = I_{K0} / h_{21Э} = 10^{-3} / 50 = 0,02 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 0,02 \text{ мА.}$$

3. Ток делителя напряжения

$$I_D = 7 \cdot 0,02 = 0,14 \text{ мА.}$$

Ток делителя принимается равным $(5 - 10)I_{B0}$.

4. Напряжение питания усилителя

$$E_K = U_{KЭ0} + U_{K0} + U_{Э0} \text{ (по второму закону Кирхгофа).}$$

$$E_K = 5 + 3 + 2,8 = 10,8 \text{ В.}$$

5. Падение напряжения на резисторе R_2

$$U_2 = U_{Э0} + U_{БЭ0}.$$

$U_{БЭ0}$ для германиевых транзисторов принимают равным $(0,2 - 0,3) \text{ В}$.

$$U_2 = 2,2 + 0,2 = 2,4 \text{ В.}$$

6. Падение напряжения на резисторе R_1

$$U_1 = E_K - U_2 = 10,8 - 2,4 = 8,4 \text{ В.}$$

7. Сопротивление R_2

$$R_2 = U_2 / I_D = 2,4 / (0,14 \cdot 10^{-3}) = 17,14 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 17,14 \text{ кОм.}$$

Принимаем номинальное сопротивление резистора 18 кОм.

8. Сопротивление R_1

$$R_1 = U_1 / (I_D + I_{B0}) = 8,4 / (0,14 + 0,02) \cdot 10^{-3} = 52,5 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 52,5 \text{ кОм.}$$

Принимаем номинальное сопротивление резистора 56 кОм.

9. Входное сопротивление $R_{ВХ}$ усилителя определяется параллельным включением сопротивлений R_1 , R_2 и входным сопротивлением транзистора $h_{11Э}$

Тогда $1/R_{ВХ} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/h_{11Э}$.

$$1/R_{ВХ} = 1/56000 + 1/18000 + 1/300 = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ См;}$$

$$R_{\text{вх}} = 293 \text{ Ом.}$$

10. Сопротивление нагрузки усилителя $R_{\text{н}}$ по условию задачи принимаем равным входному сопротивлению, поскольку нагрузкой усилительного каскада служит другой такой же каскад

$$R_{\text{н}} = R_{\text{вх}} = 293 \text{ Ом.}$$

11. Сопротивление $R_{\text{э}}$

$$R_{\text{э}} = U_{\text{э0}} / (I_{\text{к0}} + I_{\text{б0}}) = 2,2 / (1 + 0,02) \cdot 10^{-3} = 2,16 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 2,16 \text{ кОм.}$$

Принимаем номинальное сопротивление резистора 2,2 кОм.

12. Емкость шунтирующего конденсатора в эмиттерной цепи $C_{\text{э}}$ выбирается по нижней границе частоты с учетом эмиттерного дифференциального сопротивления транзистора $r_{\text{э}}$

$$C_{\text{э}} > 1 / 2\pi f_{\text{н}} r_{\text{э}}, \quad \text{где } r_{\text{э}} = 2h_{12\text{э}} / h_{22\text{э}}.$$

$$r_{\text{э}} = 2 \cdot 12 \cdot 10^{-3} / 75 \cdot 10^{-6} = 0,32 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 320 \text{ Ом};$$

$$C_{\text{э}} = 1 / 2\pi \cdot 40 \cdot 320 = 0,0000124 \text{ Ф} = 12,4 \text{ мкФ.}$$

Принимаем емкость конденсатора $C_{\text{э}} = 13 \text{ мкФ.}$

13. Емкость разделительного конденсатора $C_{\text{р1}}$ на входе усилителя

$$C_1 > 1 / 2\pi f_{\text{н}} R_{\text{вх}} = 1 / 2\pi \cdot 40 \cdot 293 = 0,0000136 \text{ Ф} = 13,6 \text{ мкФ.}$$

Принимаем емкость конденсатора $C_1 = 15 \text{ мкФ.}$

14. Емкость разделительного конденсатора на выходе усилителя C_2

$$C_2 = C_1 = 15 \text{ мкФ.}$$

15. Коэффициент усиления по напряжению

$$K_{\text{У}} = h_{21\text{э}} R_{\text{кн}} / h_{11\text{э}}.$$

$R_{\text{кн}}$ – сопротивление нагрузки усилителя, которое принимается равным сопротивлению параллельного соединения $R_{\text{к}}$, $R_{\text{н}}$ и $R_{\text{вых}}$.

$$1 / R_{\text{кн}} = 1 / R_{\text{к}} + 1 / R_{\text{н}} + 1 / R_{\text{вых}}, \quad \text{где } R_{\text{вых}} = 1 / h_{22\text{э}};$$

$$1 / R_{\text{кн}} = 1 / 3400 + 1 / 293 + 75 \cdot 10^{-6} = 3,78 \cdot 10^{-3} \text{ См};$$

$$R_{\text{кн}} = 264,8 \text{ Ом.}$$

Коэффициент усиления

$$K_{\text{У}} = 50 \cdot 264,8 / 300 = 44.$$

16. Мощность, рассеиваемая на коллекторе

$$P_K = U_{KЭ0} I_{K0} = 5 \cdot 10^{-3} = 0,005 \text{ Вт.}$$

По условию $P_{K\max} = 0,03 \text{ Вт.}$

Таким образом, $P_K < P_{K\max}$.

Ответы:

$$R_1 = 56 \text{ кОм; } R_2 = 18 \text{ кОм; } R_Э = 2,2 \text{ кОм; } R_H = 293 \text{ Ом;}$$

$$C_2 = C_1 = 15 \text{ мкФ; } C_Э = 13 \text{ мкФ; } K_U = 44.$$

Задание

1. Рассчитать параметры элементов схемы (Рис. 13).
2. Рассчитать напряжение на этих элементах и протекающие через них токи.
3. Рассчитать коэффициент усиления по напряжению в области средних частот.

Тип	$h_{11Э}$	$h_{12Э}$	$h_{21Э}$	$h_{22Э}$	R_K	$U_{Э0}$	f_H	$P_{K \max}$
транзис- тора	Ом	-	-	Ом ⁻¹	кОм	В	Гц	Вт
МП40	900	$8 \cdot 10^{-3}$	30	$60 \cdot 10^{-6}$	3,0	2,2	30	0,15
П416	650	$32 \cdot 10^{-3}$	40	$150 \cdot 10^{-6}$	5,6	2,2	20	0,15
МП15	1300	$8 \cdot 10^{-3}$	45	$150 \cdot 10^{-6}$	1,5	0,8	70	0,15
ГТ322	330	$16 \cdot 10^{-3}$	56	$62,5 \cdot 10^{-6}$	2,7	1,8	65	0,075

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 16

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Цель: Научиться проводить расчет параметров дифференциального усилителя.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание физических принципов работы дифференциального усилителя; умение строить физические и математические модели процессов, лежащих в основе работы дифференциального усилителя.

Теоретическая часть

Схема ДУ состоит из двух симметричных плеч, каждое из которых содержит транзистор и резистор (рис. 14). В общей эмиттерной цепи действует источник тока I_0 .

Выходным сигналом дифференциального усилителя является напряжение между коллекторами транзисторов. Разность напряжений, формируемых на входах (базах транзисторов $T1$ и $T2$), называют *дифференциальным входным сигналом*, а полусумму этих напряжений – *синфазным входным сигналом*:

$$U_{\text{вх}} = (U_1 - U_2),$$

$$U_{\text{сх.сф}} = 0,5(U_1 + U_2).$$

В основе ДУ лежит идеальная симметрия его плеч, т. е. идентичность параметров транзисторов и равенство сопротивлений. При этом в отсутствии сигнала токи и коллекторные потенциалы будут одинаковы, $U_{\text{вых}} = 0$. В силу симметрии $U_{\text{вых}} = 0$ и при одновременном и одинаковом изменении токов в обоих плечах, какими бы причинами такое изменение не вызывалось.

Симметрия не меняется при синфазном изменении U_1 и U_2 – дифференциальный усилитель нечувствителен к синфазному сигналу. Действительно, если подать на базы одинаковые напряжения $\Delta U_{б1} = \Delta U_{б2}$, то потенциал эмиттеров изменится на такую же величину, как и потенциал баз, т.к. напряжение на эмиттерных переходах можно считать неизменным. Если источник тока I_0 идеальный, то приращение $\Delta U_э$ не вызовет изменения токов в ветвях ДУ. Коллекторные потенциалы не изменятся, и выходное напряжение останется равным нулю. Если источник тока не идеальный, то приращение эмиттерных потенциалов вызовет приращение тока, но оно поровну распределится между обеими ветвями ДУ и коллекторные потенциалы изменятся одинаково. Т.е. в этом случае так же $U_{вых} = 0$. Т.е. синфазные сигналы не влияют на выходное напряжение.

Появление на входе дифференциального сигнала приводит к нарушению симметричного режима работы усилителя.

Если подать на базы напряжения равной величины, но противоположных знаков $\Delta U_{б1} = - \Delta U_{б2}$, такие сигналы называются дифференциальными, их разность является входным сигналом ДУ. В силу симметрии входной сигнал поделится поровну между обоими эмиттерными переходами: на одном из них напряжение увеличится на $1/2 U_{вх}$, а на другом уменьшится на такую же величину. Приращения токов и коллекторных потенциалов в плечах ДУ будут одинаковыми по величине, но разного знака. В результате появится выходное напряжение $U_{вых} = \Delta U_{к1} - \Delta U_{к2}$.

Задачи

1. Рассчитать токи и напряжения в схеме дифференциального усилителя на рис. 14 для двух случаев:

- 1) $U_{вх1} = U_{вх2} = 1 \text{ В}$;
- 2) $U_{вх1} = 1 \text{ В}$, $U_{вх2} = 0$.

Характеристики транзисторов идентичны. Коэффициент $\alpha \approx 1$. Напряжение эмиттерного перехода открытого транзистора равно 0.7 В. Сопротивления резисторов в схеме $R_{K1} = R_{K2} = 1 \text{ кОм}$, $R_{Э1} = R_{Э2} = 100 \text{ Ом}$. Ток источника 2 мА.

2. Рассчитать параметры дифференциального усилителя на рис. 14, если $R_K = 10 \text{ кОм}$, $R_{Э2} = 200 \text{ Ом}$, Ток источника 1 мА, напряжение источников питания 15 В. Коэффициент усиления тока базы $\beta = 100$. Внутреннее сопротивление источника тока $R_J = 200 \text{ кОм}$.

3. Определить в схеме дифференциального усилителя на рис. 15 выходные напряжения $U_{ВЫХ1}$, $U_{ВЫХ2}$, $U_{ВЫХ}$

1) при отсутствии входных сигналов,

2) при увеличении тока базы транзистора VT1 на $\Delta I_{Б1} = 0,02 \text{ мА}$.

Влиянием резисторов $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$ пренебречь. Характеристики транзисторов идентичны. $h_{21} = 50$, $R_K = 1,2 \text{ кОм}$. $E_K = 12 \text{ В}$, Ток источника 10 мА.

4. Решить задачу с учетом того что $h^1_{21} = 50$, $h^2_{21} = 40$.

5. На рисунке 15 приведена схема каскада на идентичных транзисторах с $h_{21} = 50$. При отключенном входе $I_{Б1} = I_{Б2} = 0,02 \text{ мА}$, $U_{БЭ1} = U_{БЭ2} = 0.5 \text{ В}$, $U_{КЭ1} = U_{КЭ2} = 5 \text{ В}$. Определить сопротивления $R_{Б1}$, $R_{Б2}$, R_{K1} , R_{K2} и $U_{ВЫХ}$, если $E_K = 12 \text{ В}$ и $R_3 = 500 \text{ Ом}$. Изменится ли $U_{ВЫХ}$, если E_K уменьшится до 10 В?

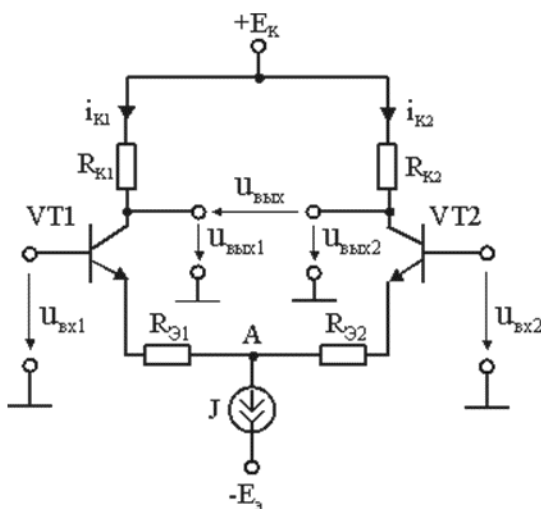


Рисунок 14

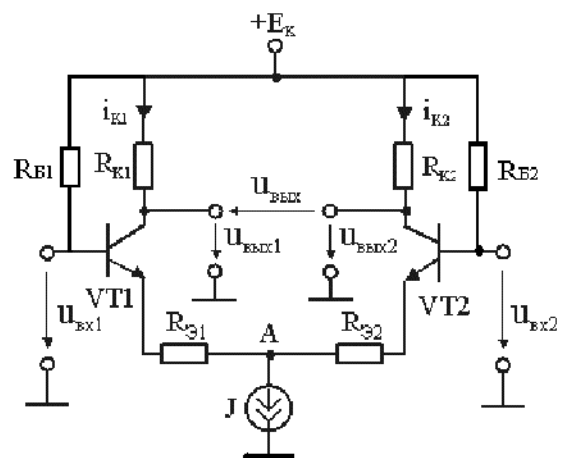


Рисунок 15

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 17

ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Цель: Научиться проводить расчет параметров операционного усилителя.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

В результате освоения темы студент приобретает следующие знания и умения: знание физических принципов работы операционного усилителя; умение строить физические и математические модели процессов, лежащих в основе работы операционного усилителя.

Теоретическая часть

Одним из базовых устройств в интегральной схемотехнике является операционный усилитель (ОУ). Коэффициент усиления ОУ без отрицательной обратной связи (ООС) называют собственным коэффициентом усиления K_0 . Анализ устройств, содержащих операционный усилитель, значительно упрощается, если операционный усилитель считать идеальным. Под идеальным понимают ОУ со следующими параметрами:

- коэффициент усиления $K_0 = \infty$,
- входное сопротивление $R_{вх} = \infty$,
- выходное сопротивление $R_{вых} = 0$,
- входной ток $I_{вх} = 0$,
- ОУ сбалансирован, т.е. $U_{вых} = 0$, при $U = U^+ - U^- = 0$, где U^+ – напряжение на неинвертирующем входе, U^- – напряжение на инвертирующем входе.

Коэффициент усиления ОУ без отрицательной обратной связи (ООС) называют собственным коэффициентом усиления (K_0).

Коэффициент усиления дифференциального сигнала K_0 определяется:

$$K_0 = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U^+ - U^-} = \begin{cases} U_{\text{ВЫХ}}/U^+, & \text{при } U^- = \text{const} \\ -U_{\text{ВЫХ}}/U^-, & \text{при } U^+ = \text{const} \end{cases} \quad (17.1)$$

Операционный усилитель с обратной связью

Для того чтобы повысить динамический диапазон по входу и выходу, а также расширить диапазон рабочих частот ОУ охватывает отрицательной обратной связью (ООС), для этого часть выходного напряжения подают на инвертирующий вход. Коэффициент обратной связи β определяется выражением:

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_{\text{ос}}} = \frac{U_{\text{ос}}}{U_{\text{ВЫХ}}}, \quad (17.2)$$

где $U_{\text{ос}}$ поступающая на инвертирующий вход часть выходного напряжения.

Коэффициент усиления с ООС

$$K_{\text{ос}} = \frac{K_0}{(1 + K_0\beta)} \quad (17.3)$$

Обычно $K_0\beta \gg 1$.

$$K_{\text{ос}} \approx \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_{\text{ос}}}{R_1}. \quad (17.4)$$

Неинвертирующий усилитель.

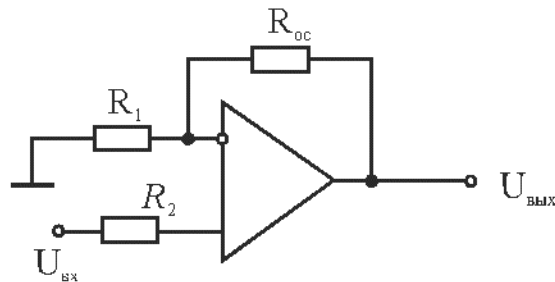


Рисунок 16. Неинвертирующий ОУ

Для неинвертирующего ОУ при $U^- = 0$, тогда входной сигнал U^+ передается на выход с усилением

$$K_{\text{ос.н}} = 1 + \frac{R_{\text{ос}}}{R_1}. \quad (17.5)$$

Сопротивление R_2 выбирают из условия уменьшения влияния токов смещения на выходное напряжение. Для этого $R_2 \approx R_1 \parallel R_{oc}$. При этом падения напряжения от токов смещения приблизительно одинаковые и напряжение смещения, вызываемое ими минимально.

В неинвертирующей схеме имеет место последовательная отрицательная обратная связь по напряжению, которая уменьшает выходное и увеличивает входное сопротивление всего усилителя. Выходное сопротивление неинвертирующего усилителя:

$$R_{\text{вых}} \approx \frac{R_{0\text{вых}}}{1 + K_0 \beta} \quad (17.6)$$

Входное сопротивление неинвертирующего усилителя определяется двумя параллельно включенными сопротивлениями: входным сопротивлением ОУ для синфазного сигнала $r_{\text{вх.сф}}$ и эквивалентным сопротивлением $r_{\text{экв}}$:

$$R_{\text{вх.н}} = r_{\text{вх.сф}} \parallel r_{\text{экв}}, \quad (17.7)$$

$$r_{\text{экв}} = r_{\text{вх.диф}} \cdot \frac{1 + K_0 \beta}{1 - K_0 \beta / M_{\text{сф}}}. \quad (17.8)$$

Здесь $M_{\text{сф}}$ – коэффициент ослабления синфазного сигнала. В зависимости от его величины (он изменяется от 10^3 до 10^5) входное сопротивление неинвертирующего усилителя $R_{\text{вх.н}}$ изменяется. Оно значительно больше входного сопротивления инвертирующего усилителя вследствие применения различной отрицательной обратной связи (ООС) по напряжению.

Инвертирующий усилитель

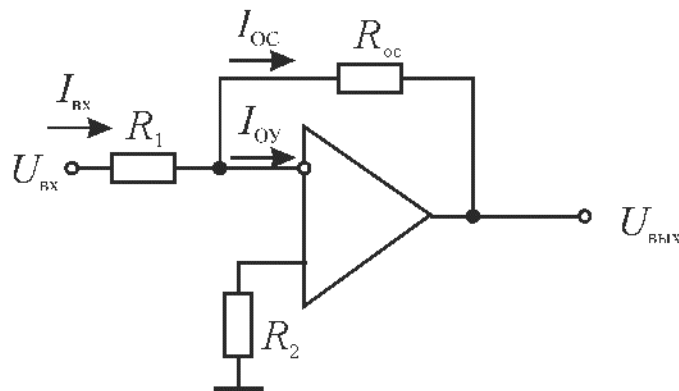


Рис.17. Инвертирующий усилитель.

Коэффициент усиления определяется выражением:

$$K_{\text{ос.инв}} = -\frac{R_{\text{ос}}}{R_1}. \quad (17.9)$$

При этом выходное напряжение усилителя равно:

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{инв}} \cdot U_{\text{вх}}. \quad (17.10)$$

Сопротивление R_2 выбирают из условия уменьшения влияния токов смещения на выходное напряжение. Для этого R_2 выбирают из условия

$$R_2 = R_{\text{ос}} R_1 / (R_{\text{ос}} + R_1).$$

При этом падения напряжения от токов смещения минимально. Из принципа, что инвертирующий вход ОУ виртуально замкнут, входное сопротивление схемы равно $R_{\text{вх}} \approx R_1$, а выходное сопротивление уменьшается в $(1 + K_0 \beta)$ раз и равно

$$R_{\text{вых}} \approx \frac{R_{0\text{вых}}}{1 + K_0 \beta} \quad (17.11)$$

Входное сопротивление инвертирующего усилителя определяется в виде

$$R_{\text{вх инв.}} = R_1 + r_{\text{вх.диф.}} \parallel [R_{\text{ос}} / (K_{\text{инв}} + 1)], \quad (17.12)$$

где второе слагаемое - сопротивление параллельно включенных входного сопротивления ОУ и уменьшенного в $(K_{\text{инв}} + 1)$ раз сопротивления резистора обратной связи $R_{\text{ос}}$. Приближенно $R_{\text{вх инв.}} \approx R_1$.

Задачи

1. Схема ОУ приведена на рис. 18 – 21. Параметры элементов приведены на схемах. Определить коэффициент усиления ОУ по напряжению на средних частотах. Определить входное и выходное сопротивления. Входное сопротивление для синфазного сигнала $r_{\text{сф}} = 100$ МОм. Входное сопротивление каскада $r_{\text{вх}} = 100$ кОм, выходное сопротивление $r_{\text{вых}} = 100$ Ом. Собственный коэффициент усиления K_0 считать равным 10^5 .

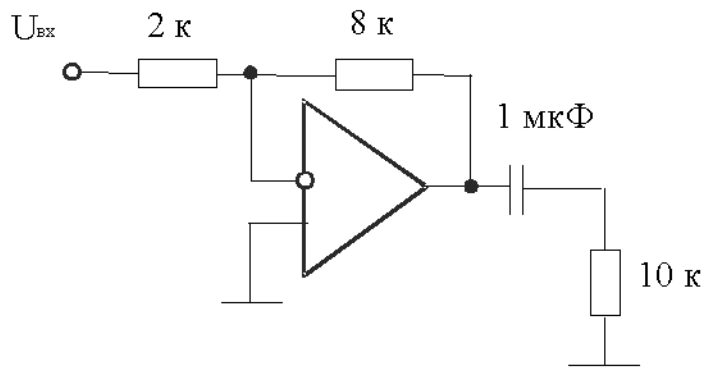


Рисунок 18.

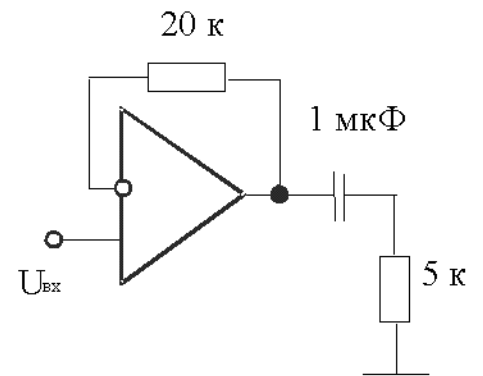


Рисунок 19.

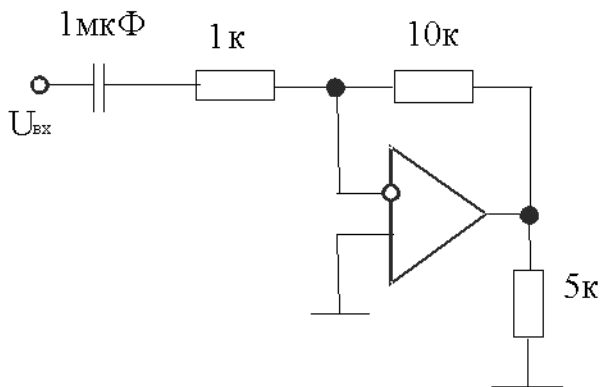


Рисунок 20.

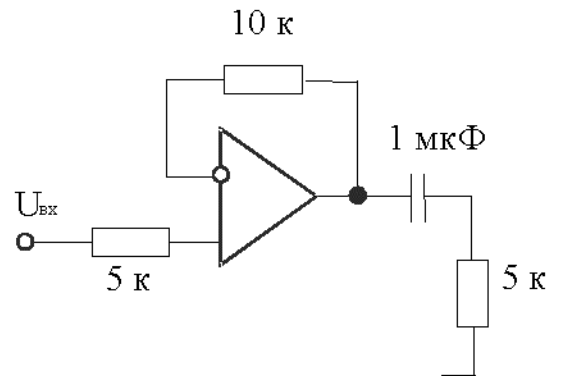
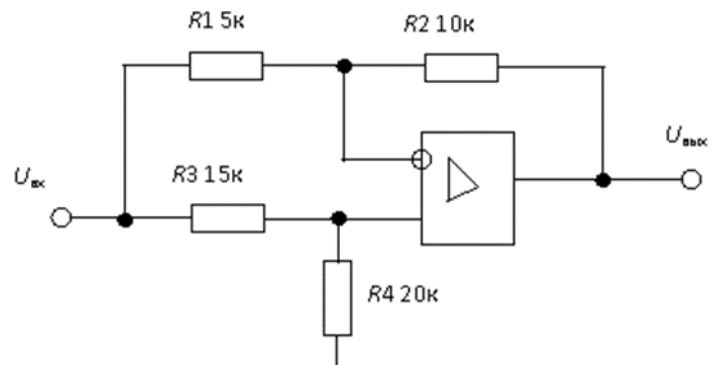


Рисунок 21.

2. Какой глубины ООС нужно ввести в усилитель, чтобы уменьшить погрешность коэффициента усиления до 1%, если температурная нестабильность $\delta K_{\text{тем}} = 50\%$, технологический разброс $\delta K_{\text{тех}} = 50\%$, а погрешность коэффициента передачи цепи обратной связи $\delta \gamma = 0,5\%$.

3. Оценить $U_{\text{ВЫХ}}$ при $U_{\text{ВХ}} = 1 \text{ В}$.



ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 18

Аудиторная контрольная работа

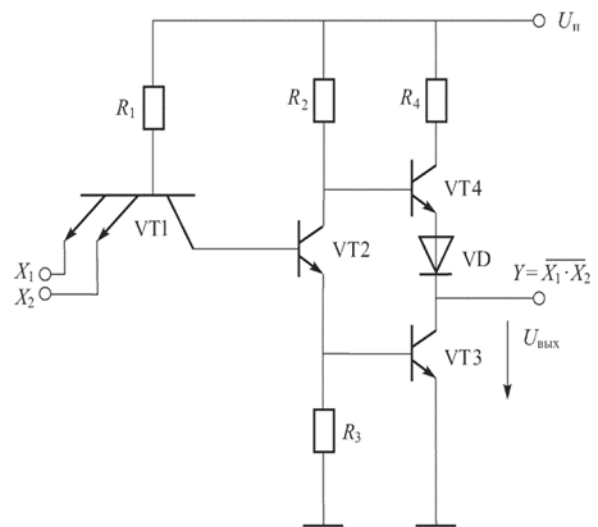
Цель: Контроль знаний.

Формируемые компетенции: ПК-1 (способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения), ПК-5 (готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения).

Примерные варианты заданий на контрольную работу

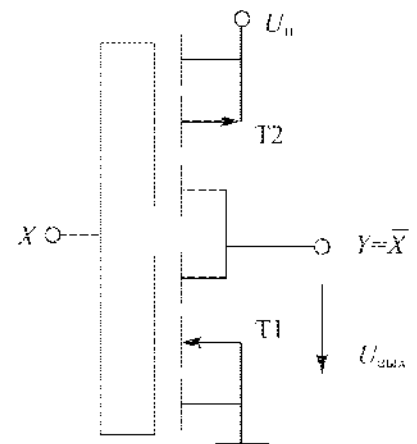
Вариант 1

1. В схеме ТТЛ 2И-НЕ со сложным инвертором $R_1 = 4 \text{ кОм}$; $R_2 = 1,5 \text{ кОм}$; $R_3 = 1 \text{ кОм}$; $R_4 = 100 \text{ Ом}$. Входные сигналы отвечают высокому уровню напряжения $U_{вх1} = U_{вх2} = 3 \text{ В}$. Напряжение питания $U_{п} = 5 \text{ В}$. Считать, что для открытого транзистора $U_{бэ} = 0,7 \text{ В}$,

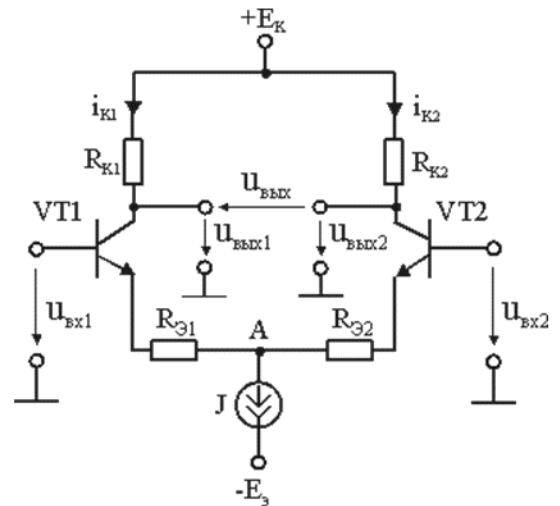


$U_{кз \text{ нас}} = 0,2 \text{ В}$. Рассчитать токи, текущие через все резисторы.

2. В инверторе на КМОП транзисторах сопротивление n -канала в открытом состоянии составляет 100 Ом , в закрытом – 30 кОм . Сопротивление p -канала равно соответственно 200 Ом и 100 кОм для открытого и закрытого транзистора. Определить выходное напряжение логической единицы $U_{вых}^1$ в режиме холостого хода, т. е. при токе нагрузки равном нулю. $U_{п} = 5 \text{ В}$.

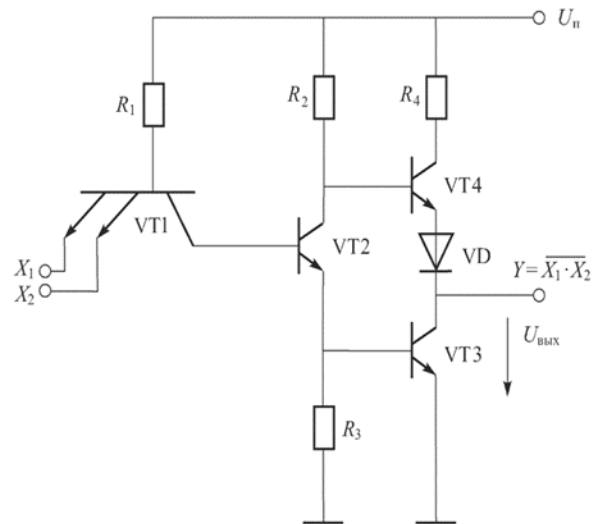


3. Определить в схеме дифференциального усилителя выходные напряжения $U_{\text{ВЫХ1}}$, $U_{\text{ВЫХ2}}$, $U_{\text{ВЫХ}}$ при отсутствии входных сигналов. Характеристики транзисторов идентичны. Коэффициент $\alpha = 0,99$. $R_K = 1 \text{ кОм}$. $E_K = 12 \text{ В}$, Ток источника 10 мА .

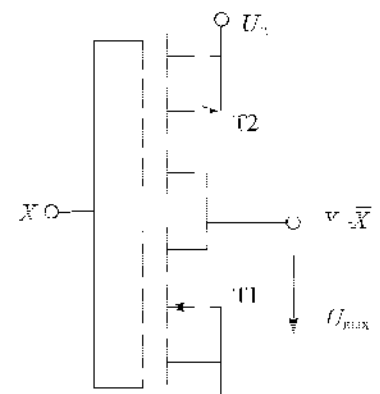


Вариант 2

1. В схеме ТТЛ 2И-НЕ со сложным инвертором $R_1 = 4 \text{ кОм}$; $R_2 = 1,5 \text{ кОм}$; $R_3 = 1 \text{ кОм}$; $R_4 = 100 \text{ Ом}$; сопротивление диода $R_D = 100 \text{ Ом}$; коэффициент передачи тока транзисторов $h_{213} = 40$. Входные сигналы $U_{\text{ВХ1}} = U_{\text{ВХ2}} = 0,1 \text{ В}$. Напряжение питания $U_{\text{П}} = 5 \text{ В}$. Считать, что для открытого транзистора $U_{\text{БЭ}} = 0,7 \text{ В}$, $U_{\text{КЭ нас}} = 0,2 \text{ В}$. Транзистор VT4 не входит в насыщение. Рассчитать токи, текущие через все резисторы.

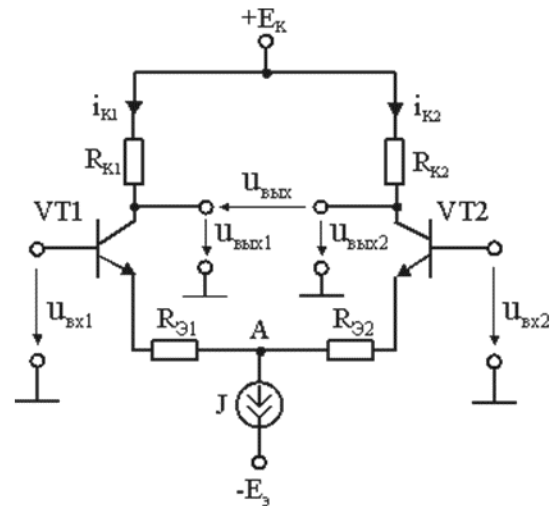


2. В инверторе на КМОП транзисторах сопротивление n -канала в открытом состоянии составляет 100 Ом , в закрытом – 40 кОм . Сопротивление p -канала равно соответственно 300 Ом и 200 кОм для открытого и закрытого транзистора. Определить выходное напряжение логической единицы $U_{\text{ВЫХ}}^1$, если нагрузка



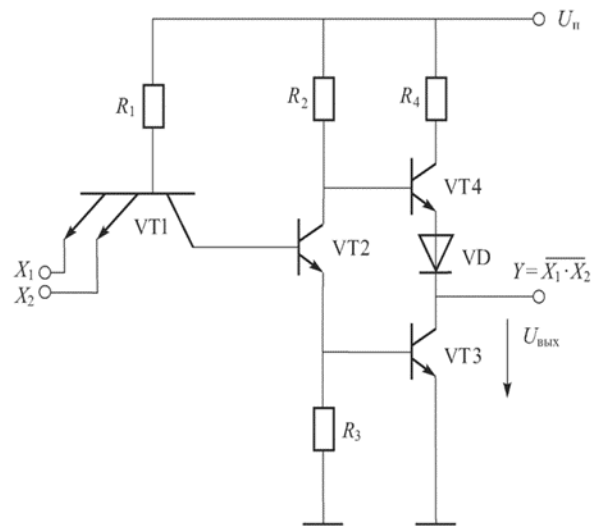
сопротивлением 2 кОм подключена между выходом инвертора и землей.

3. Определить в схеме дифференциального усилителя выходные напряжения $U_{ВЫХ1}$, $U_{ВЫХ2}$, $U_{ВЫХ}$ при $U_{ВХ1} = 1$ В, $U_{ВХ2} = 0$. Характеристики транзисторов идентичны. Коэффициент $\alpha = 0,99$. $R_K = 1$ кОм. $E_K = 12$ В, Ток источника 10 мА.



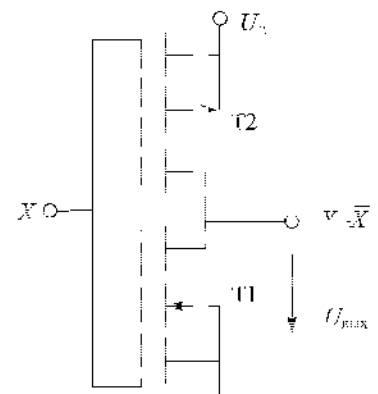
Вариант 3

1. В схеме ТТЛ 2И-НЕ со сложным инвертором $R_1 = 4$ кОм; $R_2 = 1,5$ кОм; $R_3 = 1$ кОм; $R_4 = 100$ Ом. Входные сигналы отвечают высокому уровню напряжения $U_{ВХ1} = U_{ВХ2} = 3$ В. Напряжение питания $U_{П} = 5$ В. Считать, что для открытого транзистора

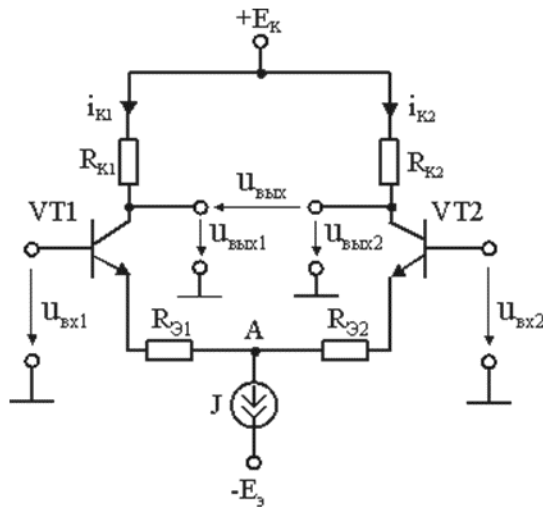


$U_{бэ} = 0,7$ В, $U_{кз \text{ нас}} = 0,2$ В. Определить $U_{ВЫХ}$.

2. В инверторе на КМОП транзисторах сопротивление n -канала в открытом состоянии составляет 100 Ом, в закрытом – 30 кОм. Сопротивление p -канала равно соответственно 200 Ом и 100 кОм для открытого и закрытого транзистора. Определить выходное напряжение логического нуля $U_{ВЫХ}^0$, если нагрузка сопротивлением 2 кОм подключена между выходом инвертора и землей.



3. Рассчитать коэффициент усиления дифференциального сигнала и коэффициент ослабления синфазного сигнала, если $R_K = 20 \text{ кОм}$, $R_{Э2} = 100 \text{ Ом}$, Коэффициент усиления тока базы $\beta = 100$. Внутреннее сопротивление источника тока $R_J = 100 \text{ кОм}$.



РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. Смирнов, Ю. А. Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники : учеб. пособие для вузов / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2013. – 495 с.
2. Щука, А. А. Электроника : учеб. пособие для вузов / А.А. Щука. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2012. – 739 с. : ил. ; 24. – (Учебная литература для вузов). – Гриф: Рек. УМО.

Дополнительная литература

1. Барыбин, А. А. Электроника и микроэлектроника: физико-технологические основы : учеб. пособие / А. А. Барыбин. - М. : Физматлит, 2008. - 424 с.
2. Коваленко, А. А. Основы микроэлектроники : учеб. пособие для вузов / А. А. Коваленко, М. Д. Петропавловский. - М. : Академия, 2006. - 240 с.
3. Марголин, В. И. Физические основы микроэлектроники : учебник / В. И. Марголин, В. А. Жабрев, В. А. Тупик. – М. : Академия, 2008. - 398 с.
4. Бурбаева, Н.В. Сборник задач по полупроводниковой электронике / Н.В. Бурбаева, Т.С. Днепровская – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004 – 168 с.
5. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники : учеб. пособие / И. П. Степаненко. - Изд. 2-ое. - М. ; СПб. : Лаборатория Базовых Знаний ; Невский диалект, 2001. - 488 с.
6. Микроэлектроника : учеб. пособие : в 9 кн. / под ред. Л. А. Коледова, Кн. 8, Микроэлектронная аппаратура. - М. : Высш. школа, 1987. - 128 с.
7. Росадо, Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо ; пер. с исп. С. И. Баскакова ; под ред. В. А. Терехова. - М. : Высшая школа, 1991. – 351 с.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Элементарный заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Энергия покоя электрона	$E_0 = m_e \cdot c^2 = 0,51 \text{ МэВ}$
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/с}$ $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/с}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ФУНКЦИЯ ОШИБОК

z	erfc(z)	z	erfc(z)	z	erfc(z)	z	erfc(z)
2,5	0,000407	2,67	0,000159	2,84	5,91E-05	3,01	2,07E-05
2,51	0,000386	2,68	0,000151	2,85	5,57E-05	3,02	1,95E-05
2,52	0,000365	2,69	0,000142	2,86	5,24E-05	3,03	1,83E-05
2,53	0,000346	2,7	0,000134	2,87	4,93E-05	3,04	1,71E-05
2,54	0,000328	2,71	0,000127	2,88	4,64E-05	3,05	1,61E-05
2,55	0,000311	2,72	0,00012	2,89	4,37E-05	3,06	1,51E-05
2,56	0,000294	2,73	0,000113	2,9	4,11E-05	3,07	1,41E-05
2,57	0,000278	2,74	0,000107	2,91	3,87E-05	3,08	1,33E-05
2,58	0,000264	2,75	0,000101	2,92	3,64E-05	3,09	1,24E-05
2,59	0,000249	2,76	9,49E-05	2,93	3,42E-05	3,1	1,16E-05
2,6	0,000236	2,77	8,95E-05	2,94	3,21E-05	3,11	1,09E-05
2,61	0,000223	2,78	8,44E-05	2,95	3,02E-05	3,12	1,02E-05
2,62	0,000211	2,79	7,96E-05	2,96	2,84E-05	3,13	9,58E-06
2,63	0,0002	2,8	7,5E-05	2,97	2,67E-05	3,14	8,97E-06
2,64	0,000189	2,81	7,07E-05	2,98	2,5E-05	3,15	8,4E-06
2,65	0,000178	2,82	6,66E-05	2,99	2,35E-05	3,16	7,86E-06
2,66	0,000169	2,83	6,27E-05	3	2,21E-05	3,17	7,36E-06

ПАРАМЕТРЫ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ

Ион		$E, \text{кэВ}$								
		20	40	60	80	100	120	140	160	180
В	$\bar{R}_p, \text{нм}$	78,4	161	243,8	323,8	397,7	468,8	537,4	603	665,4
	$\Delta \bar{R}_p, \text{нм}$	32,1	53,8	70,8	83,9	93,9	102,5	109,8	116	121,3
Р	$\bar{R}_p, \text{нм}$	26	49	73,2	98	123,3	149,1	175,2	201,4	227,7
	$\Delta \bar{R}_p, \text{нм}$	9,4	16,4	23,1	29,5	35,4	41,1	46,6	51,8	56,6
As	$\bar{R}_p, \text{нм}$	15,9	27,1	37,7	48,1	58,4	68,6	78,9	89,1	99,5
	$\Delta \bar{R}_p, \text{нм}$	3,7	6,2	8,4	10,5	12,5	14,5	16,3	18,2	20
Sb	$\bar{R}_p, \text{нм}$	14	22,9	30,8	38,4	45,7	52,8	59,9	66,9	73,9
	$\Delta \bar{R}_p, \text{нм}$	2,4	3,8	5,1	6,3	7,4	8,4	9,5	10,5	11,5

КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ ОКИСЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

	Температура °C	A , мкм	Параболическая константа B , мкм ² /ч	Линейная константа B/A , мкм/ч
В сухом кислороде	1200	0,040	0,045	1,12
	1110	0,09,	0,027	0,30
	1000	0,165	0,0117	0,071
	920	0,235	0,0049	0,021
	800	0,370	0,0011	0,003
Во влажном кислороде	1200	0,05	0,720	14,4
	1100	0,11	0,510	4,64
	1000	0,226	0,287	1,27
	920	0,50	0,203	0,406

СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Материал	$R_{\square}$, Ом/ $\square$	α_R , 10^{-4} град $^{-1}$	P_0 , Вт/см ^{2}	* $\gamma_{\text{Рст}}$, %
Хром	50 – 500	0,6 – 1,8	1	2
Тантал	25 – 100	–12	3	1
TaN	50 – 500	1	3	0,2
Нихром	25 – 300	± 1	2	1
МЛТ-3М	50 – 500	0,6	2	$\pm 0,5$
Кермет К-20С	$(1 - 3)10^3$	0,5	2	± 1
Кермет К-50С	$(3 - 10)10^3$	-5 – + 3	2	± 1
РС 4800	$10^2 - 10^3$	2	5	1
РС 3710	$50 - 3 \cdot 10^3$	– 1	5	0,5
РС 3001	$800 - 3 \cdot 10^3$	– 0,2	5	0,5
РС 4400	$(1 - 5)10^3$	3	10	-
РС 2005	$(8 - 50)10^4$	12	5	2
РС 5400	5 – 100	0,5	2	1

*после 1000 часов работы под нагрузкой 1 Вт/см ^{2} при 85 °С.

СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПЛЕНОЧНЫХ
КОНДЕНСАТОРОВ

Материал	ϵ , $f = 1$ кГц	$E_{пр}$, 10^6 В/см	$tg\delta$	C_0 , 10^3 пФ/см ²	ТКЕ, 10^{-4} град ⁻¹
SiO ₂	4	10		20	2
SiO	6 – 8	1 – 2	1 – 2	5 – 10	1 – 2
GeO	10 – 12	0,5 – 0,8	5 – 7	5 – 20	3 – 5
Al ₂ O ₃	10	9	0,3 – 1,5	30 – 80	1,5 – 5
Ta ₂ O ₅	21 – 27	5	10	100	2 – 3
TiO ₂	30 – 100	0,24	26	10 – 100	3
Sb ₂ S ₃	18 – 21	0,3 – 0,5	4 – 10	1 – 1,5	5
АСС	5,2 – 5,5	3 – 5	3	30	1,5
БСС	3,9 – 4,2	3 – 5	1	15	0,2
ИБС	10 – 12	2 – 3	7	60	5

АСС – алюмосиликатное стекло;

БСС – боросиликатное стекло, в состав которого входит 15 % В₂О₃ и 85 % SiO₂;

ИБС – иттрий-боритное стекло.

СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Параметр	Обозначение	Si	Ge	GaAs
Плотность, г/см ³		2,33	5,32	5,32
Относительная диэлектрическая проницаемость	ε	11,7	16,0	12.9
Ширина запрещенной зоны при 300 К, эВ	E_g	1,124	0,67	1,424
Собственная концентрация носителей заряда при 300 К, см ⁻³	n_i	$1,45 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^7$
Подвижность электронов при 300 К, см ² /В·с	μ_n	1300	3800	8500
Подвижность дырок при 300 К, см ² /(В·с)	μ_p	500	1800	400
Электрическое поле при пробое, В/см	E_m	$3 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^4$	
Эффективная масса: электронов,	m_n/m	1,08	0,55	0.067
дырок	m_p/m	0,81	0,3	0.45
Сродство к электрону, эВ	χ	4,05	4	4.07

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
для по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине «**Микроэлектроника**»
для студентов направления подготовки
11.03.04 Электроника и нанoeлектроника
Направленность (профиль):
Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Ставрополь
2026

Содержание

Введение

Самостоятельная работа как важнейшая форма учебного процесса

Цели и основные задачи СРС

Виды самостоятельной работы

Организация СРС

Общие рекомендации по организации самостоятельной работы

Самостоятельная работа студента - необходимое звено становления исследователя

Методические рекомендации для студентов по отдельным формам самостоятельной работы

Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

ВВЕДЕНИЕ

1. Цель и задачи освоения дисциплины (модуля)

Цель освоения дисциплины: формирование набора профессиональных компетенций будущего бакалавра по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, путем ознакомления студентов с основными задачами, принципами и направлениями развития современной микроэлектроники и возможностями применения современных достижений микроэлектроники при решении задач, возникающих в их последующей профессиональной деятельности.

Задачи освоения дисциплины:

- приобретение знаний по принципам построения, функциональных возможностей, изготовления и использования МЭ в аппаратуре различного функционального назначения;
- ознакомление с конструкциями и технологиями устройств и приборов, выполненных с применением технологий микроэлектроники.

2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ПК-1. Способен строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники различного функционального назначения, а также использовать для решения аналитических и исследовательских задач современные стандартные программные средства компьютерного моделирования и информационные технологии.	ИД-1 _{ПК-1} Анализирует и рассчитывает физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения	Анализирует и рассчитывает физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения
	ИД-2 _{ПК-1} Создает компьютерные модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники	Создает компьютерные модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники
	ИД-3 _{ПК1} Применяет на практике физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения, а также стандартные программы, средства компьютерного моделирования	Применяет на практике физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения, а также стандартные программы, средства компьютерного моделирования
	ИД-4 _{ПК1} Применяет современные программные среды разработки	Применяет современные программные среды

	оригинальных алгоритмов и компьютерных программ, пригодных для практического применения	разработки оригинальных алгоритмов и компьютерных программ, пригодных для практического применения
ПК-2. Способен производить расчет, моделирование, тестирование, программирование интеллектуальных систем и устройств с применением цифровых и микроконтроллерных устройств в соответствии с техническим заданием с использованием специализированных сред интегрированной разработки.	ИД-1 _{ПК-2} Выполняет расчет электронных приборов, схем и устройств в области электроники и нанoeлектроники	Выполняет расчет электронных приборов, схем и устройств в области электроники и нанoeлектроники
	ИД-2 _{ПК-2} Использует средства автоматизации проектирования приборов, схем и устройств различного функционального назначения	Использует средства автоматизации проектирования приборов, схем и устройств различного функционального назначения
	ИД-3 _{ПК-2} Проектирует электронные приборы, схемы и устройства различного функционального назначения в соответствии с техническим заданием	Проектирует электронные приборы, схемы и устройства различного функционального назначения в соответствии с техническим заданием

ПРОЦЕССА

Самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента. Самостоятельная работа студентов играет значительную роль в рейтинговой технологии обучения. Обучение в ВУЗе включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому СРС должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

Концепцией модернизации российского образования определены основные задачи профессионального образования - "подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего своей профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности".

Решение этих задач невозможно без повышения роли самостоятельной работы студентов над учебным материалом, усиления ответственности преподавателей за развитие навыков самостоятельной работы, за стимулирование профессионального роста студентов, воспитание творческой активности и инициативы.

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие студентов в лабораторных занятиях, выполнение контрольных заданий и тестов, написание курсовых и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. По данной дисциплине «Основы нейронных сетей» предусмотрены следующие:

Использование материала учебно-методического комплекса дисциплины

На первом этапе необходимо ознакомиться с обязательным минимумом содержания основной образовательной программы по изучаемой дисциплине. Далее необходимо изучить рабочую программу дисциплины, в которой рассмотрено содержание тем дисциплины лекционного курса, взаимосвязь тем лекций с лабораторных занятий, темы и виды самостоятельной работы. По каждому виду самостоятельной работы предусмотрены определённые формы отчетности, представленные в учебной программе по дисциплине «Основы нейронных сетей».

Работа с литературой

Для успешного освоения дисциплины, необходимо самостоятельно детально изучить представленные темы по рекомендуемым источникам информации, которые представлены в учебной программе.

Самостоятельная работа приобщает студентов к научному творчеству, поиску и решению актуальных современных проблем.

ЦЕЛИ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ СРС

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

Задачами СРС являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;

- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на лабораторных занятиях, при написании курсовых и выпускной квалификационной работ, для эффективной подготовки к итоговым зачетам и экзаменам.

ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

В образовательном процессе высшего профессионального образовательного учреждения выделяется два вида самостоятельной работы – аудиторная, под руководством преподавателя, и внеаудиторная. Тесная взаимосвязь этих видов работ предусматривает дифференциацию и эффективность результатов ее выполнения и зависит от организации, содержания, логики учебного процесса (межпредметных связей, перспективных знаний и др.):

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется студентом по заданию преподавателя, но без его непосредственного участия.

Основными видами самостоятельной работы студентов без участия преподавателя по данной дисциплине являются:

- формирование и усвоение содержания конспекта лекций на базе рекомендованной лектором учебной литературы, включая информационные образовательные ресурсы (электронные учебники, электронные библиотеки и др.);
- подготовка к лабораторным работам, их оформление.

Основными видами самостоятельной работы студентов с участием преподавателей являются:

- текущие консультации;
- прием и защита лабораторных работ (во время проведения л/р).

ОРГАНИЗАЦИЯ СРС

Методика организации самостоятельной работы студентов зависит от структуры, характера и особенностей дисциплины «Основы нейронных сетей», объема часов на ее изучение, вида заданий для самостоятельной работы студентов, индивидуальных качеств студентов и условий учебной деятельности.

Процесс организации самостоятельной работы студентов включает в себя следующие этапы:

- подготовительный (определение целей, составление программы, подготовка методического обеспечения, подготовка оборудования);
- основной (реализация программы, использование приемов поиска информации, усвоения, переработки, применения, передачи знаний, фиксирование результатов, самоорганизация процесса работы);
- заключительный (оценка значимости и анализ результатов, их систематизация, оценка эффективности программы и приемов работы, выводы о направлениях оптимизации труда).

Деятельность студентов по формированию и развитию навыков учебной самостоятельной работы

В процессе самостоятельной работы студент приобретает навыки самоорганизации, самоконтроля, самоуправления, саморефлексии и становится активным самостоятельным субъектом учебной деятельности.

Выполняя самостоятельную работу под контролем преподавателя студент должен:

- освоить минимум содержания, выносимый на самостоятельную работу студентов и предложенный преподавателем в соответствии с образовательными стандартами высшего образования;
- планировать самостоятельную работу в соответствии с графиком самостоятельной работы, предложенным преподавателем;
- самостоятельную работу студент должен осуществлять в организационных формах, предусмотренных учебным планом и рабочей программой преподавателя;
- выполнять самостоятельную работу и отчитываться по ее результатам в соответствии с графиком представления результатов, видами и сроками отчетности по самостоятельной работе студентов.

студент может:

сверх предложенного преподавателем (при обосновании и согласовании с ним) и минимума обязательного содержания, определяемого программой по данной дисциплине:

- самостоятельно определять уровень (глубину) проработки содержания материала;
- предлагать темы и вопросы для самостоятельной проработки;
- в рамках общего графика выполнения самостоятельной работы предлагать обоснованный индивидуальный график выполнения и отчетности по результатам самостоятельной работы;
- предлагать свои варианты организационных форм самостоятельной работы;
- использовать для самостоятельной работы методические пособия, учебные пособия, разработки сверх предложенного преподавателем перечня;
- использовать не только контроль, но и самоконтроль результатов самостоятельной работы в соответствии с методами самоконтроля, предложенными преподавателем или выбранными самостоятельно.

Самостоятельная работа студентов должна оказывать важное влияние на формирование личности будущего бакалавра, она планируется студентом самостоятельно. Каждый студент самостоятельно определяет режим своей работы и меру труда, затрачиваемого на овладение учебным содержанием по каждой дисциплине. Он выполняет внеаудиторную работу по личному индивидуальному плану, в зависимости от его подготовки, времени и других условий.

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Основной формой самостоятельной работы студента является изучение конспекта лекций, их дополнение, рекомендованной литературы, активное участие на лабораторных

занятиях. Но для успешной учебной деятельности, ее интенсификации, необходимо учитывать следующие субъективные факторы:

1. Знание школьного программного материала, наличие прочной системы знаний, необходимой для усвоения основных вузовских курсов. Это особенно важно для математических дисциплин. Необходимо отличать пробелы в знаниях, затрудняющие усвоение нового материала, от малых способностей. Затратив силы на преодоление этих пробелов, студент обеспечит себе нормальную успеваемость и поверит в свои способности.

2. Наличие умений, навыков умственного труда:

а) умение конспектировать на лекции и при работе с книгой;
б) владение логическими операциями: сравнение, анализ, синтез, обобщение, определение понятий, правила систематизации и классификации.

3. Специфика познавательных психических процессов: внимание, память, речь, наблюдательность, интеллект и мышление. Слабое развитие каждого из них становится серьезным препятствием в учебе.

4. Хорошая работоспособность, которая обеспечивается нормальным физическим состоянием. Ведь серьезное учение — это большой многосторонний и разнообразный труд. Результат обучения оценивается не количеством сообщаемой информации, а качеством ее усвоения, умением ее использовать и развитием у себя способности к дальнейшему самостоятельному образованию.

5. Соответствие избранной деятельности, профессии индивидуальным способностям. Необходимо выработать у себя умение саморегулировать свое эмоциональное состояние и устранять обстоятельства, нарушающие деловой настрой, мешающие намеченной работе.

6. Овладение оптимальным стилем работы, обеспечивающим успех в деятельности. Чередование труда и пауз в работе, периоды отдыха, индивидуально обоснованная норма продолжительности сна, предпочтение вечерних или утренних занятий, стрессоустойчивость на экзаменах и особенности подготовки к ним,

7. Уровень требований к себе, определяемый сложившейся самооценкой.

Адекватная оценка знаний, достоинств, недостатков - важная составляющая самоорганизации человека, без нее невозможна успешная работа по управлению своим поведением, деятельностью.

Одна из основных особенностей обучения в высшей школе заключается в том, что постоянный внешний контроль заменяется самоконтролем, активная роль в обучении принадлежит уже не столько преподавателю, сколько студенту.

Зная основные методы научной организации умственного труда, можно при наименьших затратах времени, средств и трудовых усилий достичь наилучших результатов.

Эффективность усвоения поступающей информации зависит от работоспособности человека в тот или иной момент его деятельности.

Работоспособность - способность человека к труду с высокой степенью напряженности в течение определенного времени. Различают внутренние и внешние факторы работоспособности.

К внутренним факторам работоспособности относятся интеллектуальные особенности, воля, состояние здоровья.

К внешним:

- организация рабочего места, режим труда и отдыха;
- уровень организации труда - умение получить справку и пользоваться информацией;
- величина умственной нагрузки.

Выдающийся русский физиолог Н. Е. Введенский выделил следующие условия продуктивности умственной деятельности:

- во всякий труд нужно входить постепенно;
- мерность и ритм работы. Разным людям присущ более или менее разный темп работы;
- привычная последовательность и систематичность деятельности;
- правильное чередование труда и отдыха.

Отдых не предполагает обязательного полного бездействия со стороны человека, он может быть достигнут простой переменой дела. В течение дня работоспособность изменяется. Наиболее плодотворным является *утреннее время (с 8 до 14 часов)*, причем максимальная работоспособность приходится на период с 10 до 13 часов, затем *послеобеденное* - (с 16 до 19 часов) и *вечернее* (с 20 до 24 часов). Очень трудный для понимания материал лучше изучать в начале каждого отрезка времени (лучше всего утреннего) после хорошего отдыха. Через 1-1,5 часа нужны перерывы по 10 - 15 мин, через 3 - 4 часа работы отдых должен быть продолжительным - около часа.

Составной частью научной организации умственного труда является овладение техникой умственного труда.

Время, которым располагает студент для выполнения учебного плана, складывается из двух составляющих: одна из них — это аудиторная работа в вузе по расписанию занятий, другая - внеаудиторная самостоятельная работа. Задания и материалы для самостоятельной работы выдаются во время учебных занятий по расписанию, на этих же занятиях преподаватель осуществляет контроль за самостоятельной работой, а также оказывает помощь студентам по правильной организации работы.

Самостоятельные занятия потребуют интенсивного умственного труда, который необходимо не только правильно организовать, но и стимулировать. При этом очень важно уметь поддерживать устойчивое внимание к изучаемому материалу. Выработка внимания требует значительных волевых усилий. Именно поэтому, если студент замечает, что он часто отвлекается во время самостоятельных занятий, ему надо заставить себя сосредоточиться. Подобную процедуру необходимо проделывать постоянно, так как это является тренировкой внимания. Устойчивое внимание появляется тогда, когда человек относится к делу с интересом.

Следует правильно организовать свои занятия по времени: 50 минут - работа, 5-10 минут - перерыв; после 3 часов работы перерыв - 20-25 минут. Иначе нарастающее утомление повлечет неустойчивость внимания. Очень существенным фактором, влияющим на повышение умственной работоспособности, являются систематические занятия физической культурой. Организация активного отдыха предусматривает чередование умственной и физической деятельности, что полностью восстанавливает работоспособность человека.

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТА - НЕОБХОДИМОЕ ЗВЕНО СТАНОВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЯ

Прогресс науки и техники, информационных технологий приводит к значительному увеличению научной информации, что предъявляет более высокие требования не только к моральным, нравственным свойствам человека, но и в особенности, постоянно возрастающие требования в области образования – обновление, модернизация общих и профессиональных знаний, умений специалиста.

Всякое образование должно выступать как динамический процесс, присущий человеку и продолжающийся всю его жизнь. Овладение научной мыслью и языком науки является необходимой составляющей в самоорганизации будущего специалиста исследователя. Под этим понимается не столько накопление знаний, сколько овладение научно обоснованными способами их приобретения. В этом, вообще говоря, состоит основная задача вуза.

Специфика вузовского учебного процесса, в организации которого самостоятельной работе студента отводятся все больше места, состоит в том, что он является как будто бы последним и самым адекватным звеном для реализации этой задачи. Ибо во время учебы в вузе происходит выработка стиля, навыков учебной (познавательной) деятельности, рациональный характер которых будет способствовать постоянному обновлению знаний высококвалифицированного выпускника вуза.

Однако до этого пути существуют определенные трудности, в частности, переход студента от синтетического процесса обучения в средней школе, к аналитическому в высшей. Это связано как с новым содержанием обучения (расширение общего образования и углубление профессиональной подготовки), так и с новыми, неизвестными до сих пор формами: обучения (лекции, семинары, лабораторные занятия и т.д.). Студент получает не только знания, предусмотренные программой и учебными пособиями, но он также должен познакомиться со способами приобретения знаний так, чтобы суметь оценить, что мы знаем, откуда мы это знаем и как этого знания мы достигли. Ко всему этому приходят через собственную самостоятельную работу.

Это и потому, что самостоятельно приобретенные знания являются более оперативными, они становятся личной собственностью, а также мотивом поведения, развивают интеллектуальные черты, внимание, наблюдательность, критичность, умение оценивать. Роль преподавателя в основном заключается в руководстве накопления знаний (по отношению к первокурсникам), а в последующие годы учебы, на старших курсах, в совместном установлении проблем и заботе о самостоятельных поисках студента, а также контролирования за их деятельностью. Отметим, что нельзя ограничиваться только приобретением знаний, предусмотренных программой изучаемой дисциплины, надо постоянно углублять полученные знания, сосредотачивая их на какой-нибудь узкой определенной области, соответствующей интересам студента. Углубленное изучение всех предметов, предусмотренных программой, на практике является возможным, и хорошая организация работы позволяет экономить время, что создает условия для глубокого, систематического, заинтересованного изучения самостоятельно выбранной студентом темы.

Конечно, все советы, примеры, рекомендации в этой области, даваемые преподавателем, или определенными публикациями, или другими источниками, не гарантируют никакого успеха без проявления собственной активности в этом деле, т. е. они не дают готовых рецептов, а должны способствовать анализу собственной работы, ее

целей, организации в соответствии с индивидуальными особенностями. Учитывая личные возможности, существующие условия жизни и работы, навыки, на основе этих рекомендаций, возможно, выработать индивидуально обоснованную совокупность методов, способов, найти свой стиль или усовершенствовать его, чтобы изучив определенный материал, иметь время оценить его значимость, пригодность и возможности его применения, чтобы, в конечном счете, обеспечить успешность своей учебы с будущей профессиональной деятельности

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПО ОТДЕЛЬНЫМ ФОРМАМ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Система вузовского обучения подразумевает значительно большую самостоятельность студентов в планировании и организации своей деятельности.

Работа с литературой

При работе с литературой необходимо подобрать литературу, научиться правильно ее читать, вести записи. Для подбора литературы в библиотеке используются алфавитный и систематический каталоги.

Важно помнить, что рациональные навыки работы с книгой — это всегда большая экономия времени и сил.

Правильный подбор учебников рекомендуется преподавателем, читающим лекционный курс. Необходимая литература может быть также указана в методических разработках по данному курсу.

Изучая материал по учебнику, следует переходить к следующему вопросу только после правильного уяснения предыдущего, описывая на бумаге все выкладки и вычисления (в том числе те, которые в учебнике опущены или на лекции даны для самостоятельного вывода).

При изучении любой дисциплины большую и важную роль играет самостоятельная индивидуальная работа.

Особое внимание следует обратить на определение основных понятий курса. Студент должен подробно разбирать примеры, которые поясняют такие определения, и уметь строить аналогичные примеры самостоятельно. Нужно добиваться точного представления о том, что изучаешь. Полезно составлять опорные конспекты. При изучении материала по учебнику полезно в тетради (на специально отведенных полях) дополнять конспект лекций. Там же следует отмечать вопросы, выделенные студентом для консультации с преподавателем.

Выводы, полученные в результате изучения, рекомендуется в конспекте выделять, чтобы они при перечитывании записей лучше запоминались.

Опыт показывает, что многим студентам помогает составление листа опорных сигналов, содержащего важнейшие и наиболее часто употребляемые формулы и понятия. Такой лист помогает запомнить формулы, основные положения лекции, а также может служить постоянным справочником для студента.

Различают два вида чтения; первичное и вторичное. *Первичное* - это внимательное, неторопливое чтение, при котором можно остановиться на трудных местах. После него не должно остаться ни одного непонятого слова. Содержание не всегда может быть понятно после первичного чтения.

Задача *вторичного* чтения полное усвоение смысла целого (по счету это чтение может быть и не вторым, а третьим или четвертым).

Чтение научного текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации. От того, насколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия.

Выделяют **четыре основные установки в чтении научного текста**:

1. информационно-поисковый (задача – найти, выделить искомую информацию)
1. усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений)
2. аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему)
3. творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к научному тексту связано существование и нескольких **видов чтения**:

1. библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;
2. просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;
3. ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц, цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;
4. изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;
5. аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач. Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым или в связи, с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках учебной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с научным текстом.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

1. Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения;

1. Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала;
2. Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала;
3. Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора;
4. Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного.

Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Методические рекомендации по составлению конспекта:

1. Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта.
2. Выделите главное, составьте план.
3. Кратко сформулируйте основные положения текста, отметьте аргументацию автора.
4. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно.
5. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли.

В тексте конспекта желательно приводить не только тезисные положения, но и их доказательства. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы.

Лабораторные занятия

Следует подчеркнуть, что только после усвоения лекционного материала с определенной точки зрения (а именно с той, с которой он излагается на лекциях) он будет закрепляться на лабораторных занятиях как в результате обсуждения и анализа лекционного материала, так и с помощью выполнения заданий лабораторной работы, поставленных задач. При этих условиях студент не только хорошо усвоит материал, но и научится применять его на практике, а также получит дополнительный стимул (и это очень важно) для активной проработки лекции.

При самостоятельном выполнении заданий нужно обосновывать каждый этап решения, исходя из теоретических положений курса. Если студент видит несколько путей решения проблемы (задачи), то нужно сравнить их и выбрать самый рациональный. Полезно до начала вычислений составить краткий план решения проблемы (задачи).

Решение задач или примеров следует излагать подробно, вычисления располагать в строгом порядке, отделяя вспомогательные вычисления от основных. Решения при необходимости нужно сопровождать комментариями, схемами, чертежами и рисунками.

Следует помнить, что выполнение каждого учебного задания должно доводиться до окончательного логического ответа, которого требует условие, и по возможности с выводом. Выполнение заданий данного типа нужно продолжать до приобретения твердых навыков в их решении.

Самопроверка

После изучения определенной темы по записям в конспекте и учебнику, а также решения достаточного количества соответствующих заданий на лабораторных занятиях и самостоятельно студенту рекомендуется, используя лист опорных материалов, воспроизвести по памяти определения, выводы формул, формулировки основных положений и доказательств.

В случае необходимости нужно еще раз внимательно разобраться в материале.

Иногда недостаточность усвоения того или иного вопроса выясняется только при изучении дальнейшего материала. В этом случае надо вернуться назад и повторить плохо усвоенный материал. Важный критерий усвоения теоретического материала - умение решать задачи или пройти тестирование по пройденному материалу. Однако следует помнить, что правильное решение задачи может получиться в результате применения механически заученных формул без понимания сущности теоретических положений.

Консультации

Если в процессе самостоятельной работы над изучением теоретического материала или при выполнении заданий у студента возникают вопросы, разрешить которые самостоятельно не удастся, необходимо обратиться к преподавателю для получения у него разъяснений или указаний. В своих вопросах студент должен четко выразить, в чем он испытывает затруднения, характер этого затруднения. За консультацией следует обращаться и в случае, если возникнут сомнения в правильности ответов на вопросы самопроверки.

Подготовка к экзамену по дисциплине «Основы нейронных сетей».

Изучение многих общепрофессиональных и специальных дисциплин завершается экзаменом. Подготовка к экзамену способствует закреплению, углублению и обобщению знаний, получаемых, в процессе обучения, а также применению их к решению практических задач. Готовясь к экзамену, студент ликвидирует имеющиеся пробелы в знаниях, углубляет, систематизирует и упорядочивает свои знания.

Экзамен - форма промежуточной аттестации студентов по результатам освоения теоретических знаний, приобретения практических навыков и компетенций, целью которой является контроль результатов освоения студентами учебного материала по программе конкретной дисциплины, проверка и оценка знаний, полученных за семестр (курс), их прочности, развития творческого мышления, приобретения навыков самостоятельной работы, умения применять теоретические знания при решении практических задач. Экзамен может быть проведен в устной форме, в устно-письменной форме, в форме письменной работы или тестирования.

Число вопросов, включаемых в экзаменационный билет, должно быть не менее двух и не более пяти, при этом вопросы могут носить как теоретический, так и прикладной характер. На экзамен могут выноситься типовые задачи, проработанные в течение семестра на аудиторных занятиях и в процессе самостоятельной работы.

Содержание вопросов и задач, включаемых в экзаменационный билет, должно соответствовать учебной программе дисциплины и фондам оценочных средств. Перечень примерных вопросов, заданий и критерии оценки уровня обученности и уровня сформированности компетенций доводятся до сведения обучающихся в начале семестра изучения дисциплины.

Систематическая подготовка к занятиям в течение семестра позволит использовать время экзаменационной сессии для систематизации знаний.

Текущая аттестация студентов проводится преподавателями, ведущими лабораторные занятия по дисциплине в следующих формах: собеседование при защите лабораторной работы с предоставлением письменного отчета. Допуск к лабораторным работам происходит при наличии у студентов печатного варианта отчета. Защита отчета проходит в форме собеседования. Максимальное количество баллов студент получает, если оформление отчета соответствует установленным требованиям, а отчет полностью раскрывает суть работы. Основанием для снижения оценки являются:

- не качественно выполненная работа на персональном компьютере,
- письменный отчет выполнен в небрежной форме и с ошибками,
- студент не дает исчерпывающий ответ на вопрос преподавателя,
- путается или затрудняется в демонстрации работы на компьютере.

Отчет может быть отправлен на доработку в следующих случаях:

- небрежное выполнение и с ошибками,
- сокращенное содержание отчета.

Критерии оценивания собеседования приведены в Фонде оценочных средств по дисциплине Основы нейронных сетей.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

8.1. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)

8.1.1. Перечень основной литературы:

Смирнов, Ю. А. Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники : учеб. пособие для вузов / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. - 2-е изд., испр. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2013. - 495 с. : ил., табл. ; 25. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Библиогр.: с. 493. - ISBN 978-5-8114-1379-9

8.1.2. Перечень дополнительной литературы:

Барыбин, А. А. Электроника и микроэлектроника: физико-технологические основы : учеб. пособие / А. А. Барыбин. - М. : Физматлит, 2008. - 424 с. - Прил.: с. 392-414. - Библиогр.: с. 415-416. - ISBN 978-5-9221-0679-5

Каменская, А. В. Основы технологии материалов микроэлектроники : Учебно-методическое пособие / Каменская А. В. - Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. - 96 с. - Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks. - ISBN 978-5-7782-1420-0

Коваленко, А. А. Основы микроэлектроники : учеб. пособие для вузов / А. А. Коваленко, М. Д. Петропавловский. - М. : Академия, 2006. - 240 с. - (Высшее профессиональное образование). - Библиогр. с. 235. - ISBN 5-7695-2861-3

Марголин, В. И. Физические основы микроэлектроники : учебник / В. И. Марголин, В. А. Жабров, В. А. Турик. - Москва : Академия, 2008. - 398 с. : ил. - (Высшее профессиональное образование. Радиоэлектроника). - Библиогр.: с. 395. - ISBN 978-5-7695-4227-5

Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники : учеб. пособие для вузов / И. П. Степаненко. - Изд. 2-е. - М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2001. - 488 с. : ил. - (Технический университет). - Библиогр.: с. 488. - ISBN 5-93208-045-0

Филяк, М. М. Конструктивно-технологические основы микроэлектроники / М.М. Филяк. - Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2011. - 112 с.

8.2. Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

Жданова Н. В., Сидоров К. И. «Микроэлектроника»: Методические рекомендации к выполнению контрольной работы. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2018. – 51 с.

Лапин, А.А. Микроэлектроника: методические указания к выполнению лабораторных работ. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2019. – 146 с.

Лапин, А.А. Микроэлектроника: методические указания к выполнению практических работ. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2019. – 209 с.

Лапин, А.А. Микроэлектроника: методические указания к самостоятельной работе студентов. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2019. – 10 с.

8.3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<http://window.edu.ru> – единое окно доступа к образовательным ресурсам.

<http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».

<http://www.en.edu.ru> – естественно-научный образовательный портал.