

Министерство образования Республики Беларусь

Научно–производственное объединение “ИНТЕГРАЛ”

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Филиал кафедры электронной техники и технологии

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплинам

“ТЕХНОЛОГИЯ ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ”,

“СПЕЦИАЛЬНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ”

для студентов специальностей:

“Проектирование и производство РЭС”,
“Электронно-оптические системы и технологии”

Часть 2

Минск
“Интегралполиграф”
2007

УДК 621.3.049.77 (076.5)(075.8)

ББК 32.844.1 я 73

Л 12

Авторы: В.А. Емельянов, Л.П. Ануфриев, А.П. Достанко, В.Л. Ланин,
В.В. Глухманчук, С. М. Завадский, О. Л. Кайдов, А.О. Коробко,
С.В. Гвоздевич, В.И. Сивец, В.П. Шамягин

Под редакцией академика НАН Беларуси А.П. Достанко

Лабораторный практикум по дисциплинам «Технология изделий интегральной электроники», «Специальное технологическое оборудование» для студентов специальностей «Проектирование и производство РЭС», «Электронно-оптические системы и технологии» / В.А. Емельянов [и др.] ; под ред. А.П. Достанко – Минск: Интегралполиграф, 2007. –60 с.: ISBN

Лабораторный практикум включает исследования процессов формирования легированных слоев в кремнии ионной имплантацией на установке «ЛАДА-30», эпитаксиальных слоев кремниевых структур и контроля их параметров, технологии изготовления биполярных транзисторов и контроля их параметров.

Предназначен для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков работы с технологическим оборудованием и приборами контроля параметров кремниевых структур.

УДК 621.3.049.77 (076.5)(075.8)

ББК 32.844.1 я 73

© УП «Интегралполиграф», 2007

ISBN

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №4

ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕГИРОВАННЫХ СЛОЕВ В КРЕМНИИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ПРИ СОЗДАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ..... 4

Лабораторная работа №5

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И ИЗМЕРЕНИЕ ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ..... 22

Лабораторная работа №6

ФОРМИРОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР И КОНТРОЛЬ ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.....38

Лабораторная работа № 4

ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕГИРОВАННЫХ СЛОЕВ В КРЕМНИИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ПРИ СОЗДАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Цель работы

Изучить основы процесса ионной имплантации при создании элементов интегральных схем, принцип действия и устройство установок для ионного легирования на примере установки ЛАДА-30.

1. Теоретические сведения

Создание биполярных и КМОП СБИС с хорошими технико-экономическими характеристиками невозможно без использования метода ионной имплантации. Одной из важнейших задач при создании ИС и БИС является уменьшение линейных размеров элементов и расстояний между ними. При планарной технологии элементы характеризуются минимальным размером $\sim 2\text{—}3$ мкм, а для получения современных БИС и СБИС ($\sim 10^5$ элементов на 1 кристалле) необходимо с помощью литографии формировать элементы ≤ 1 мкм. Кроме того, глубина залегания легированных областей в ряде случаев должна составлять $\geq 0,1$ мкм. Создание диффузией таких областей с резкими границами затруднительно. Применение ионной имплантации в диапазоне энергий $\sim 10\text{—}300$ кэВ с дозами ионов $\sim 10^{11}\text{—}10^{18}\text{см}^{-2}$ позволило разработать рентабельную технологию полупроводниковых приборов и ИС с микронными и субмикронными размерами элементов. Возможности ионной имплантации для формирования дискретных приборов, биполярных и МОП ИС приведены на рис. 4.1.

Изменяя дозу имплантированных ионов и тем самым обогащая или обедняя приповерхностные слои полупроводника, можно управлять (в определенных пределах) высотой потенциального барьера и создавать невыпрямляющие контакты или барьеры Шоттки на n- и p- полупроводниках с различным пороговым напряжением.

Точное управление толщиной и концентрацией в биполярных структурах позволяет добиться высоких и воспроизводимых параметров элементов и ИС в целом. Например, при усилении транзисторов по току 2000—3000, времени задержки распространения сигнала 1—3 нс для ЭСЛ и ТТЛ ИС величина произведения быстродействия на мощность в схемах И2Л составляет $\sim 0,13$ пДж при токе 5 мкА. Достигнуты размеры вентиля $\sim 0,065$ мкм² при ширине межсоединений и промежутков между ними $\sim 1,25$ мкм для И²Л схем.

Области и масштабы применения ионной имплантации постоянно расширяются благодаря возможности дозировки имплантируемых ионов в области микронных и субмикронных размеров глубиной $> 0,1$ мкм; легиро-

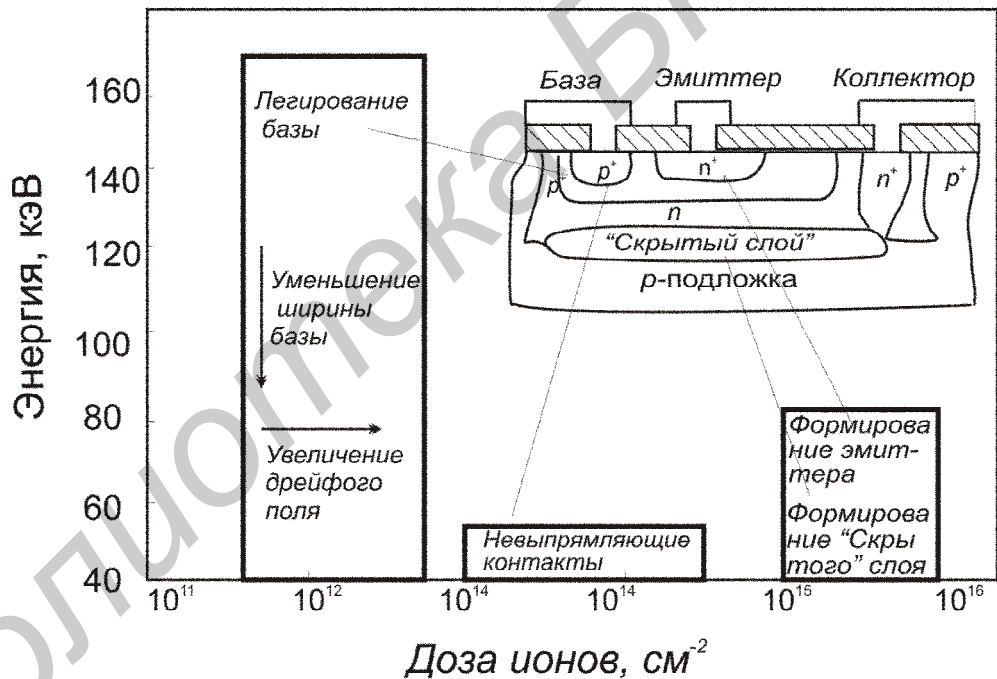
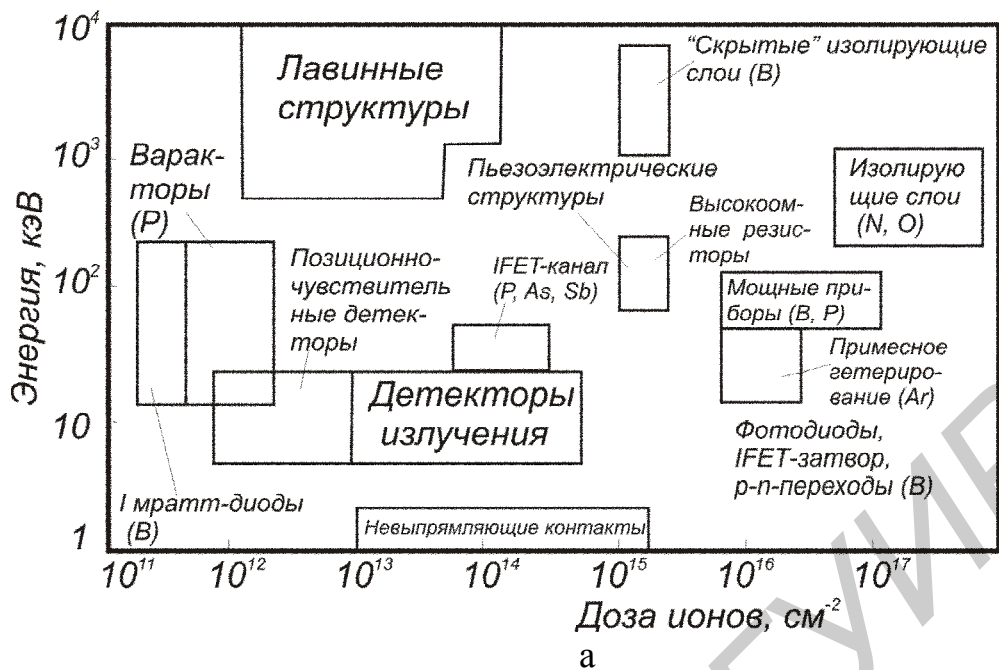


Рис. 4.1. Диапазон энергий и доз ионов, используемых для формирования легированных областей ионной имплантацией: а — полупроводниковые приборы; б — биполярные ИС

вания элементарных и сложных полупроводников в широком диапазоне доз (10^{11} — 10^{16} см⁻²) при ускоряющих напряжениях до 200—350 кэВ; легирования из одно- и полиатомных молекулярных пучков; управления профилем и дозой легирования с помощью электронных методов при высокой повторяемости и воспроизводимости процесса; широкого выбора маскирующих материалов (диэлектрики, металлы, фоторезисты); проведению процесса при низких температурах и чистой среде и др.

1.1. Основы процесса ионной имплантации

Ионная имплантация – это внедрение в твердое тело направленных потоков заряженных атомных частиц с энергиями от нескольких кэВ до нескольких сотен МэВ, с целью изменения его структурных, электрофизических, физико–химических, электрических и других свойств.

Ионы, внедренные с энергией $E \geq 1$ кэВ в кристаллическую решетку полупроводника, сталкиваются и взаимодействуют со встречаемыми ими атомами, передавая при каждом столкновении некоторую часть своей кинетической энергии ядрам атомов и электронам. В начале своего пути они захватывают недостающие электроны и нейтрализуются, если скорость иона меньше скорости электронов на первой боровской орбите. Столкновения, в результате которых происходит потеря энергии, подразделяют на упругие и неупругие (ионизация и возбуждение атомов). Скорость потерь энергии dE/dx определяется массой и зарядом внедрившегося иона и атомов полупроводника (мишени), а также энергией движущегося иона. Эта зависимость носит различный характер для упругих и неупругих столкновений. Если энергия, переданная атому при упругом столкновении, превышает энергию связи атомов в твердом теле, то атом покидает узел. В результате образуется пара Френкеля – вакансия и междоузельный атом. Атомы, находящиеся в поверхностном слое, получив энергию, могут отрываться от кристалла - происходит процесс распыления и образуется вакансия - дефект по Шоттки. Энергия первично смещенного атома, называемого атомом отдачи, сравнительно велика, поэтому на пути своего движения атом отдачи образует целый каскад смещений, вследствие чего в кристалле возникают отдельные разупорядоченные зоны размером 3-10 нм. По мере имплантации ионов идет накопление радиационных эффектов. Когда плотность ионов, внедренных на единице поверхности, превосходит критическую величину, называемую дозой аморфизации, образуется сплошной аморфный слой.

Ориентированный монокристалл можно представить как систему плотно упакованных рядов атомов, между которыми имеются свободные каналы. Ионы, попавшие перпендикулярно в канал, движутся, практически не взаимодействуя с атомами, ионы же, налетевшие на структуры под некоторым углом, могут двигаться хаотично по кристаллу. После прохождения в кристалле расстояния порядка нескольких монослоев первоначально однородный ионный пучок разделяется на два: ориентированный (каналированный) и неупорядоченный (хаотический, изотропный). К ориентированному пучку относятся ионы, для которых угол между траекторией их движения и каналирующим направлением не превышает $\psi_{кр}$, а для неориентированного пучка этот угол не менее $\sim 2\psi_{кр}$.

Теоретически обосновано, что переход ионов из одного пучка в другой не должен происходить. Однако в ряде работ установлено, что в реальных кристаллах возможно деканалирование — переход ионов из ориентированных пучков в хаотические, и наоборот. Считают, что деканалирование возможно в

случае резонанса колебаний ионов в канале с колебаниями атомов при замедлении частиц (каналлируемые частицы постепенно изменяют угол, приближаются к границам каналлирования и переходят в изотропный пучок) и воздействии дефектов кристаллической решетки. Дефекты (вакансии, дислокации) исходной матрицы, генерируемые в процессе внедрения ионов, искажают близлежащие каналы и расположение атомов в цепочках (рядах). За счет перемещения атомов каналы могут перекрываться, и вероятность деканаллирования возрастает. Дефекты больших размеров (кластеры, рекристаллизованные зоны) вызывают почти полную потерю ориентации каналлируемым пучком. В результате заполнения решетки ионами, электронного и атомного взаимодействия происходит нарушение кристаллической решетки с большим числом таких дефектов, как вакансии, междоузельные атомы, дивакансии, кластеры.

Если полупроводник обрабатывается потоками с критической дозой $\sim 6 \cdot 10^{23}$ эВ/см³, то формируется полностью аморфизированный слой. Такие слои не пригодны для создания элементов ИС. Для стабилизации имплантированных слоев и активации примесей проводят термический отжиг: низкотемпературный (573—673 К), высокотемпературный (1173—1273 К), разгонку примесей (≥ 1273 К). При низкотемпературном отжиге значительное количество дефектов от поверхности перемещается в глубь полупроводника и позволяет в приповерхностных слоях формировать активные и пассивные элементы. Низкотемпературный отжиг применяют при наличии в структуре микрогетерогенных областей (например, Me–Si, Me–SiO₂) с невысокой температурой эвтектики. Большая часть нарушений отжигается при температуре ~ 1170 К, но при этом точечные дефекты могут не устраниться.

Разгонку примесей осуществляют при температуре ≥ 1270 К. Количество дефектов зависит и от среды, в которой проводится обработка. В некоторых случаях ведут имплантацию не элементарных веществ, а их соединений, например фторидов бора BF⁺₂, хлоридов бора BC1⁺, бромидов (например, пучок ионов BF⁺₂, генерируемый ионными источниками, работающими на BF₃, имеет намного больший ток (50 мкА при 150 кэВ), чем пучок ионов B⁺ (~ 2 мкА при 35 кэВ)).

Облучение потоками ионов МОП-структур сопровождается, как правило, возникновением на границе Si–SiO₂ фиксированного положительного заряда и быстрых поверхностных состояний. Фиксированный положительный заряд можно устранить термическим отжигом в интервале температур 420—770 К или путем ультрафиолетового облучения при энергиях света, больших высоты барьера границы раздела Si—SiO₂. Быстрые поверхностные состояния удаляются при температурах отжига 670—770 К в атмосфере азота.

Режимы ионной имплантации. При определении режимов ионной имплантации основными параметрами являются энергия ускоренных ионов и доза облучения. Ион с зарядом q (Кл) под действием разности потенциалов U (В) приобретает энергию E (Дж):

$$E = qU . \quad (4.1)$$

В практике принято, говоря об энергии ускоренных ионов, выражать ее в электрон-вольтах (эВ) или килоэлектрон-вольтах (кэВ). Так как кратность ионизации обычно составляет $n=1, 2$ или 3 электрона, то заряд иона может изменяться от 1 до $3e$. В общем случае

$$q = ne. \quad (4.2)$$

Для обозначения кратности ионизации применяют символ «+», например $^{31}\text{P}^+$, $^{31}\text{P}^{++}$, $^{31}\text{P}^{+++}$. Числом 31 обозначена атомная масса иона фосфора. Иногда для имплантации используют не моноатомные ионы, а молекулярные, например $^{14}\text{N}_2^+$ — однократно ионизированная двухатомная молекула азота с атомной массой 14 , молекулярной массой $2 \cdot 14 = 28$ или BF_2^+ — однократно ионизированная трехатомная молекула фторида бора. Молекулярные ионы, внедряясь в кристалл, обычно сразу распадаются на отдельные атомы. Для подсчета энергии, которой будет обладать каждый атом с массой (M_1), входящий в ускоренный ион с молекулярной массой (M_n), используют соотношение:

$$E_1 = EM_1 / M_n. \quad (4.3)$$

Доза облучения — это количество частиц, бомбардирующих единицу поверхности за данное время. Доза может не быть равной тому количеству ионов, которое осталось в кристалле после завершения процесса облучения, вследствие наличия явлений распыления и отражения. В большинстве случаев эти явления не оказывают заметного влияния на количество внедренных ионов. Доза облучения q (Кл/м²) определяется плотностью ионного тока j (А/м²) и длительностью облучения t (с):

$$Q = jt. \quad (4.4)$$

Практически плотность ионного тока выражают обычно в мкА/см², поэтому дозу облучения выражают в мкКл/см². Величина Q не отражает в явном виде числа примесных ионов, внедренных в кристалл. Чтобы выразить дозу в количестве частиц, внедренных на единице поверхности (ион/м²), величину Q делят на заряд одного иона:

$$N = Q / q = jt / (en). \quad (4.5)$$

Так как $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а Q имеет размерность мкКл/см², доза облучения (ион/см²)

$$N = 6,25 \cdot 10^{12} Q / n. \quad (4.6)$$

Пробег иона — это путь, который ион проходит до остановки. Вследствие того, что число соударений, которые испытывает ион, и энергия, теряемая при каждом соударении, носят случайный характер, траектория каждого иона индивидуальна и длины их пробегов отличаются друг от друга.

При проведении технологических операций более важной, чем траекторный пробег является глубина, на которой остановится ион (рис. 4.2.).

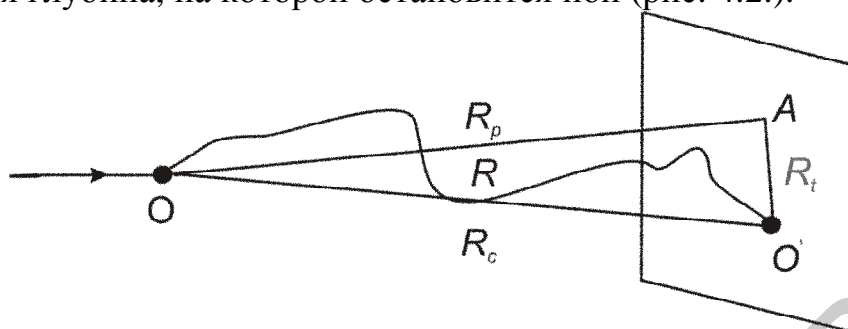


Рис. 4.2. Связь между траекторным пробегом R , проецированным пробегом R_p , поперечным пробегом R_t и векторным пробегом R_c , O и O' — точки входа и остановки иона в твердом теле, соответственно

При облучении образца вдоль нормали к поверхности глубина внедрения совпадает с проекцией траекторного пробега на первоначальное движение иона. Эта величина называется **проецированным (проективным) пробегом**. Расстояние, на которое сместится ион до своей остановки относительно начального направления движения, называется **поперечным пробегом**.

Метод ионной имплантации является основным в планарной технологии, сочетающей загонку примеси в виде дозированного количества ионов и диффузионную разгонку. Совмещение ионной имплантации с планарной технологией облегчается применением тех же легирующих примесей и веществ для их получения, что и при диффузии; использованием тех же материалов для маскирования при таких же толщинах, что не влияет на процесс фотолитографии; возможностью управления дозами облучения в очень широких пределах (от 10^{10} до 10^{17} см⁻²) при высокой производительности.

Основные преимущества метода ионной имплантации, на которых базируется его использование в серийном производстве, состоят в точном контроле полного количества внедренной примеси и высокой однородности легирования по поверхности пластины. Неоднородность в распределении плотности внедренной примеси по пластине с диаметрами 100 мм составляет 1 % или менее; при невоспроизводимости результатов от процесса к процессу — в пределах 3 %. Точность контроля на большинстве технологических операций полупроводникового производства колеблется в пределах 10—20 %. Даже в исходных кремниевых пластинах разброс по концентрации легирующей примеси достигает до 30 %. По этой причине типичная концентрация внедренной с помощью ионной имплантации примеси должна на порядок превышать исходный уровень легирования кремниевой пластины. Резко выраженная перекомпенсация или перелегирование (для однотипных по электропроводности примесей) является необходимым условием получения точности, присущей методу ионной имплантации.

Преимущества ионного легирования:

- 1) Высокая управляемость процесса (точное знание дозы и E).
- 2) Выбор примеси не ограничивается предельной растворимостью материалов в твердом состоянии.
- 3) Уменьшение геометрических размеров приборов за счет малого бокового отклонения ионов под защитную маску.
- 4) Возможность получения сложных ступенчатых профилей.
- 5) Низкая температура процесса.
- 6) Чистота процесса (возможность легирования через маску).

Недостатки ионного легирования:

- 1) Возможность получать только неглубокие профили (~0,5 мкм).
- 2) Повреждение кристаллической решетки требует последующего отжига при $T \sim 450-900$ °С.
- 3) Сложность и громоздкость оборудования.

1.2. Требования к оборудованию для ионного легирования

При изготовлении современных планарных полупроводниковых структур наиболее широкое распространение ионная имплантация получила в технологии загонки строго дозированного количества примесных атомов, которое используется в качестве источника при последующей диффузионной разгонке для формирования примесного профиля. Также, имплантация используется для создания тонких базовых областей биполярных транзисторов, управления пороговыми напряжениями МОП-транзисторов, создания прецизионных резисторов и других целей. Поэтому, учитывая важность процессов ионной имплантации для получения требуемых параметров ИМС важно знать влияние факторов процессов имплантации, зависящих от технологического оборудования, на результаты процесса и его воспроизводимость в условиях массового производства.

Современные установки ионной имплантации, как правило, содержат ионный источник, экстрагирующую и фокусирующую оптику, ускоритель, сепаратор масс, устройство сканирования ионного пучка, систему источников питания, приемную камеру, вакуумную систему, а также устройства контроля и управления технологическим процессом. На конечный результат работы УИИ, на неравномерность легирования по дозе и невозможность воспроизводства от процесса к процессу оказывает влияние функционирование всех выше перечисленных систем.

Ионный источник является одним из наиболее существенных узлов УИИ и, в общем случае, включает собственно ионный источник, предназначенный для производства ионов необходимого типа, а также устройство экстракции ионов. Характеристики ионных источников в большей степени, чем характеристики остальных функциональных узлов определяют технологические возможности и эффективность работы системы в целом. К источникам ионов предъявляются следующие требования:

- возможность генерирования однородного высокоинтенсивного ионного пучка со стабильными во времени параметрами;
- возможность получения двухзарядных ионов с высоким выходом и молекулярных ионов;
- получение предельной для данной конструкции плотности ионного тока при максимально низких вытягивающих напряжениях;
- возможность ионизации как газообразных так и твердых диффузентов;
- возможность легкой замены легирующего элемента;
- возможность первичной фокусировки ионного пучка различной заданной формы;
- простота управления и обслуживания;
- высокое время наработки на отказ катода и источника в целом.

Ускорительная система должна удовлетворять следующим требованиям:

- ускорять пучок максимальной ионной концентрации до заданной энергии с минимальной потребляемой мощностью;
- компактность ускорителя;
- возможность дополнительной фокусировки пучка при его транспортировке вдоль ускорителя;
- обеспечения минимального рассеивания и загрязнения пучка в ускорителе;
- снижение вероятности электрических пробоев между элементами ускорителя;
- обеспечения эффективной защиты от рентгеновского и ВЧ излучения, а также от высокого напряжения.

Существует две базовые конструкции ускорителей для УИИ — одно- или двух электродные линзы; и ускорительные трубки (ускорители с постоянным градиентом потенциала: т. е. ускоряющее напряжение, прикладываемое к электродам, линейно возрастает по длине ускорителя).

Ускорители первого типа имеют относительно простую конструкцию, небольшие размеры, но хорошо работают только с низкими (до 60 кэВ) энергиями ионов. Поэтому, при использовании энергий до 200 кэВ, более широкое распространение в УИИ получили ускорительные трубки. Трубки, как правило, имеют цилиндрическую конструкцию и состоят из необходимого числа вогнутых (тарелкообразных) электродов, изолированных друг от друга керамическими или стеклянными кольцами. В целом конструкции ускорительных трубок бывают паяными, клееными или смонтированными с помощью уплотнительных колец и специальных стяжек, расположенных вдоль ускорителя.

Масс-сепаратор является существенным функциональным узлом УИИ любого типа и предназначен для формирования изотопно-чистого ионного пучка, т. е. для очистки легирующего пучка от сопутствующих ионов примесей. Масс-сепараторы должны обеспечивать:

- возможность сепарирования ионов в широком диапазоне масс, от 1 до 130 с точностью не хуже $\pm 1\%$;

- минимальную абберацию пучка и возможность его фокусировки в вертикальном и горизонтальном направлениях, а также максимально точную передачу формы пучка;

- минимальное загрязнение пучка продуктами распыления стенок сепаратора в результате их бомбардировки отклоненными ионами.

В УИИ используют три метода сепарирования ионов:

- по массам с отклонением изотопно-чистого легирующего пучка от первоначального направления, в котором сепараторами масс служат магниты различной конфигурации;

- по скоростям без изменения направления легирующего пучка, в котором применяются $\vec{E} \times \vec{B}$ сепараторы со скрещенными электрическим и магнитным полями;

- по массам с сепарацией ВЧ фильтром.

Наибольшее распространение в современном имплантационном оборудовании получил первый метод.

Устройство сканирования ионного пучка. В настоящее время в УИИ различного типа используются три способа сканирования ионного пучка по поверхности обрабатываемых подложек:

- полное механическое сканирование, при котором ионный пучок остаётся неподвижным относительно мишени, а подложки перемещаются относительно пучка в вертикальном (Y) и горизонтальном (X) направлениях;

- полное электростатическое сканирование ионного пучка по поверхности неподвижной подложки;

- гибридное сканирование, при котором подложки механически перемещаются в одном направлении, а пучок электростатически сканируется в другом (вертикальном).

При полном механическом сканировании (примененном в установке ЛАДА-30) ионный пучок в процессе бомбардировки остается неподвижным, а карусель с подложками перемещается относительно пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях, совершая при этом вращательное и возвратно-поступательное движения. Достоинством является постоянство угла падения пучка на поверхность подложки, недостатками – сложный механизм обеспечения комплексного движения карусели, наличие в вакуумной камере большого количества движущихся частей, требующих смазки. Часть этих недостатков устранена в механизме с дисковой каруселью. В современных УИИ основное внимание уделяют использованию индивидуальной обработки подложки электростатически сканируемым в двух направлениях ионным пучком, что позволяет, не снижая производительности, увеличить плотность ионного тока на мишени и улучшить однородность легирования.

Вакуумные системы должны удовлетворять следующим требованиям, выполнение которых позволяет повысить качество технологических процессов и производительность оборудования:

-свободный от загрязнений рабочий вакуум в системе ионного тракта и приемной камеры не хуже $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па;

-рабочий вакуум, свободный от паров масла, в зоне мишени;

-использование высокоэффективных откачных средств (безмасляных) с максимальной скоростью откачки по всем газам, обеспечивающих получение вакуума $6,5 \cdot 10^{-4}$ Па за максимально короткое время (порядка трех минут);

-минимальное газовыделение конструкционных материалов вакуумного тракта;

-наличие эффективных азотных ловушек на насосах, а также криогенных панелей в объеме приемной камеры и внутри системы ионного тракта при использовании диффузионных откачных средств;

-наличие высокого вакуума и вакуумных затворов, изолирующих систему ионного тракта от приемной камеры в процессе смены подложек;

-возможность вентиляции сухим азотом ионного тракта и приемной камеры в случае разгерметизации.

В вакуумных системах различных УИИ применяются масляные диффузионные насосы, а также криогенные, турбомолекулярные и ионные насосы. В установке ЛАДА-30 используется полная диффузионная откачка, при которой все вакуумные объемы (источник, ускорительная и приемная камеры) откачиваются своими отдельными насосами.

1.3. Принцип действия и конструкция ионно–лучевого ускорителя

Ионно-лучевой ускоритель состоит из следующих основных блоков; источника ионов, источника высокого напряжения, ускорительной трубки, магнитного сепаратора, системы фокусировки и сканирования пучка ионов, приемной камеры и вакуумной системы откачки.

Источник ионов предназначен для ионизации паров рабочего вещества и первичной фокусировки ионного пучка. Он представляет собой газоразрядную камеру, при поступлении газа или паров рабочего вещества в которую происходит ионизация молекул и атомов путем бомбардировки электронами, эмитируемыми термокатодом. Поперечное магнитное поле в разрядной камере, создаваемое магнитной системой, вызывает вращение движущихся в нем электронов по спирали, что увеличивает эффективность ионизации. В ионно-лучевых ускорителях типа «Везувий-3М» предусмотрены два источника ионов: для фосфора $I_{\text{Ф}}$ и для бора $I_{\text{Б}}$. Они различаются способом подачи вещества. В источник ионов бора поступает газ — трехфтористый бор BF_3 — из баллона с микронатекателем МН. Расход газа контролируется автоматически. В источник ионов фосфора подают пары фосфора, образующиеся в испарителе с нагревателем Н, в который загружают порошок красного фосфора. В процессе имплантации функционирует только один из ионных источников.

Положительные ионы вытягиваются из разрядной камеры небольшим ускоряющим напряжением первой ступени — до 40 кВ, подаваемым на вытягивающий электрод ВЭ. Формирование ионного пучка производят с

помощью магнитного сепаратора МС и системы фокусировки и сканирования ФС. Магнитный сепаратор предназначен для разделения пучка ионов в соответствии с их зарядом и массой, так как под действием силы Лоренца в области магнитного поля сепаратора ионы движутся по круговым траекториям, радиусы (r) которых зависят от их массы M_1 , ускоряющего напряжения U и магнитной индукции B :

$$r = \sqrt{\frac{2M_1U}{qB^2}}. \quad (4.7)$$

После прохождения магнитного сепаратора ионы больших масс имеют более плавные траектории, ионы меньших масс — меньший радиус поворота и более резкое искривление траектории. Магнитная система сепаратора выполнена в виде постоянного магнита, для которого $B = \text{const}$, поэтому, чтобы вывести пучки ионов B^+ и P^+ в систему фокусировки и сканирования, источники ионов бора и фосфора разделяют, как показано на рис. 4.3.

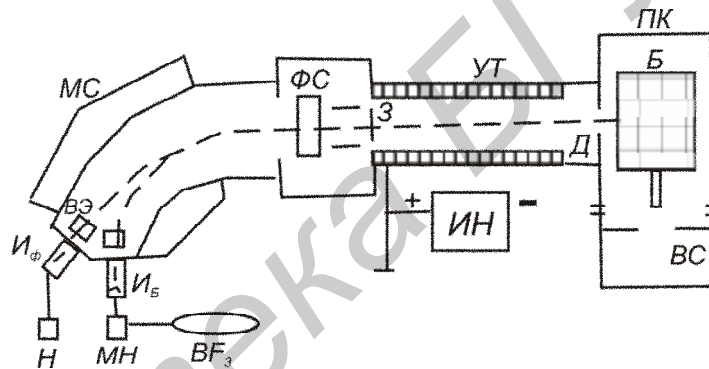


Рис 4.3. Схема ионно-лучевого ускорителя

Система фокусировки и сканирования формирует ионный пучок и осуществляет его сканирование в вертикальной плоскости. В систему входит электростатическая фокусирующая линза и два электрода электростатического сканирования. Смещение S пучка в вертикальной плоскости прямо пропорционально напряжению U_c на электродах сканирования:

$$S = \frac{U_c l L}{2dU}, \quad (4.8)$$

где l — длина сканирующего электрода; L — расстояние от центра сканирующего электрода до мишени; d — расстояние между электродами сканирования по вертикали; U — ускоряющее напряжение.

Между системой ФС и ускоряющей трубкой УТ находится заслонка З для автоматического перекрытия ионного пучка при наборе заданной дозы.

Ускорительная трубка состоит из последовательности изолированных электродов, между каждым из которых от источника высоковольтного питания ИН прикладывается напряжение до 20 кВ так, что крайние электроды имеют разность потенциалов около 200 кВ. Положительный пучок ионов ускоряется в направлении отрицательно смещенного электрода.

Приемная камера ПК служит для загрузки обрабатываемых полупроводниковых пластин, которые размещаются на кассете барабанного типа Б в несколько рядов. Вакуумная система ВС обеспечивает разрежение 2×10^{-3} Па. При облучении ионный пучок сканирует вдоль оси вращающейся кассеты Б, что обеспечивает высокую однородность легирования. Перед кассетой стоит прямоугольная диафрагма Д, которая задает высоту и ширину облучаемой области. Время облучения t (с) для набора дозы Q (Кл/м²) при плотности ионного тока j (А/м²) определяется соотношением

$$t = \frac{2pQ}{\alpha j}, \quad (4.9)$$

где α — выраженный в радианах угол, определяемый сектором окружности барабана, на который попадает ионный пучок, проходящий через диафрагму заданной ширины.

Сектор тем больше, чем шире диафрагма. Для набора малых доз ширину диафрагмы уменьшают, что ведет к уменьшению α и увеличению длительности облучения до нескольких минут, что, в свою очередь, улучшает точность контроля дозы.

Вещества — источники ионов. Рабочие вещества для получения ионов могут находиться в газообразном, твердом и жидком состояниях. Для получения ионов O^+ , N^+ , Ne^+ , Ar^+ , F^+ , Cl^+ и т. п. используют соответствующий газ, поступающий в вакуумную камеру источника ионов через микронатекатель. Из других газообразных материалов следует отметить применение BF_3 для ионов B^+ , CO_2 для ионов C^+ , H_2S для ионов S^+ . Широко применяют жидкие вещества, особенно хлориды BCl_3 , BBr_3 , PCl_3 , CCl_4 , $SiCl_4$, хорошо испаряющиеся при комнатной температуре. Наибольшие ионные токи обычно достигаются при употреблении твердых материалов в элементарном виде. Эти вещества требуют нагрева, чтобы получить достаточное давление паров: S и P (красный) — 175 °С, As — 260 °С, Zn, Se и Te — 550 °С, Mg и Sb — 580 °С. Могут быть использованы и другие вещества. Основное требование к ним — большое парциальное содержание легирующего элемента в парах. Вследствие выделения изотопной линии легирующего элемента в анализаторе масс в отличие от других методов легирования полупроводников к рабочим веществам не предъявляют жестких требований по чистоте.

2. Устройство и работа установки ионного легирования “ЛАДА-30”

Установка представляет собой технологический комплекс, в котором в условиях глубокого вакуума осуществляется получение ионов различных типов вещества, магнитная сепарация ионов, формирования ионного пучка, ускорение ионов до получения требуемой энергии и имплантация ионов в полупроводниковые пластины диаметром 75–150 мм при их обработке в групповом режиме до набора заданной дозы.

Структурная схема установки приведена на рис. 4.4.

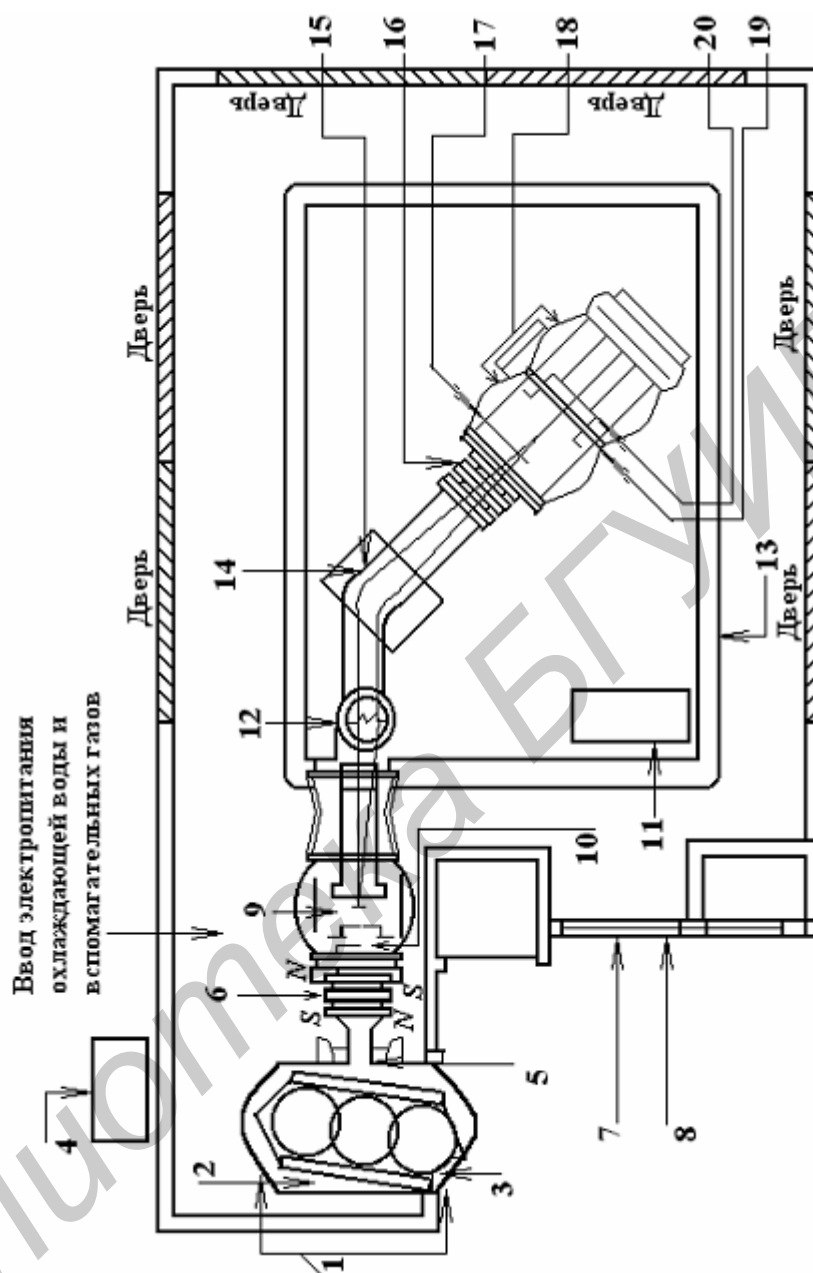


Рис. 4.4. Структурная схема установки “ЛАДА-30”:

- 1 — дверки приемной камеры; 2 — приемная камера; 3 — карусель;
 4 — блок подачи деионизованной воды; 5 — коллектор вторичных электродов; 6 — затвор 2; 7 — смотровое окно; 8 — панель управления;
 9 — ускорительная трубка; 10 — заслонка 2; 11 — измерительно-индикаторные панели; 12 — коллиматор; 13 — высоковольтный отсек; 14 — анализирующий электромагнит; 15 — фокусирующие насадки; 16 — затвор 1; 17 — заслонка 1; 18 — изоляторы диффузионного насоса; 19 — вытягивающие электроды; 20 — ионный источник.

Установка сконструирована таким образом, что система формирования ионного луча, анализирующий электромагнит, коллиматор, ускорительная

трубка находятся под потенциалом ускоряющего напряжения, а приемная камера с каруселью — под потенциалом «земля».

Внутри установки расположен высоковольтный отсек установленный на изоляторах, закрепленных на раме основания. На основании расположены два диффузионных насоса, которые через изоляторы осуществляют откачку камеры ионного источника.

На высоковольтный отсек установки подается регулируемое постоянное напряжение до + 150 кВ, а на ионный источник – вытягивающее напряжение до +40 кВ, что позволяет получить ионный пучок с энергией ионов до 180 кэВ. Питание высоковольтного отсека и системы ионного источника осуществляется посредством двух изолирующих трансформаторов.

Источники питания и исполнительные механизмы, находящиеся в высоковольтном отсеке, управляются командами, передаваемыми по волоконно-оптическим линиям связи. Визуальный контроль работы узлов и блоков высоковольтного отсека осуществляется через смотровое окно по приборам, расположенным на измерительно-индикаторных панелях высоковольтного отсека.

Узлы установки, находящиеся под высоким напряжением и выделяющие большое количество тепла, охлаждаются деионизованной водой, которая прокачивается через систему охлаждения высоковольтного отсека при помощи блока подачи деионизованной воды.

В установке применён универсальный ионный источник с прямонакальным вольфрамовым катодом, допускающим работу, как с газообразным, так и с твёрдым рабочим веществом (рис. 4.5).

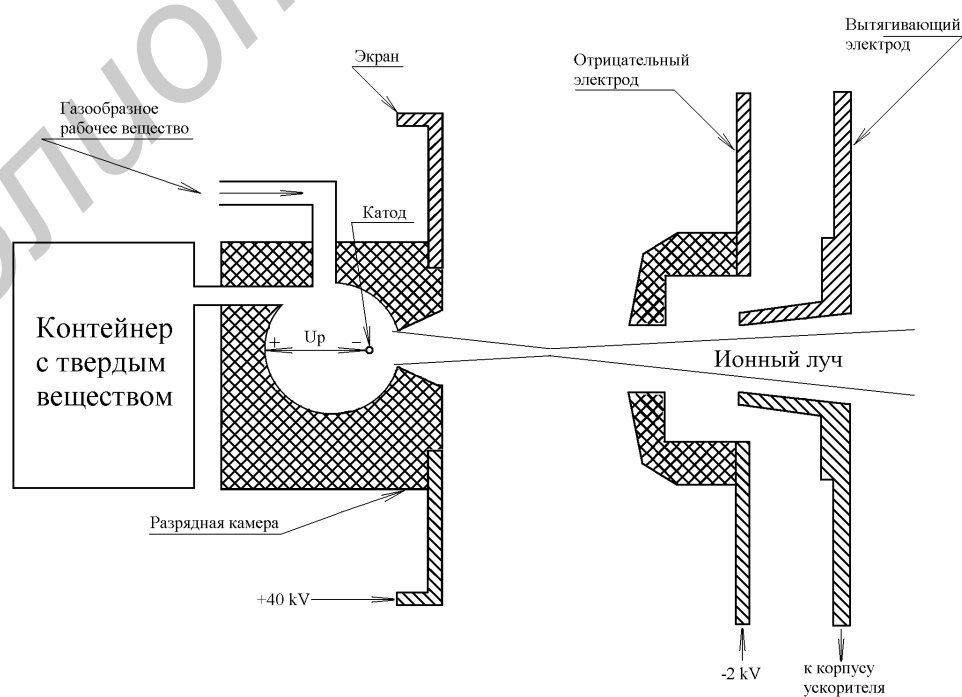


Рис. 4.5. Схема формирования ионного пучка в ионном источнике

Газообразное рабочее вещество в ионный источник подаётся из трубопровода системы газонапуска. Для испарения твёрдых веществ ионный источник оборудован испарителем с регулируемой и стабилизируемой температурой. Температура испарителя контролируется термопарой.

Слабое магнитное поле ($\sim 10^{-2}$ Тл) вдоль оси катода обеспечивается электромагнитом, расположенным вне камеры ионного источника. Ионный пучок вытягивается из 40 мм щели в боковой стенке цилиндрической разрядной камеры при помощи простой двухэлектродной системы манипулятора.

Анализирующий электромагнит, масс-сепаратор, охлаждаемый деионизованной водой, представляет собой электромагнит с переменной геометрией. Электромагнит имеет на входе вращающиеся полюсные наконечники, которые приводятся в движение электродвигателем. Вращение полюсных наконечников используется для фокусировки пучка. После анализирующего электромагнита ионный луч проходит коллиматор, автоматически поддерживающий постоянную величину тока луча.

Высоковольтный отсек изолирован от ускорительной камеры изолятором, внутри которого размещена однозаякорная ускорительная трубка. Для уменьшения рентгеновского излучения ускорительная трубка имеет экран из эпоксидного компаунда, содержащего окислы свинца, а ускорительная камера имеет кожух из металлического свинца.

В установке применено полное механическое сканирование. Полупроводниковые пластины размещаются на карусели приёмной камеры, вращающейся в горизонтальной плоскости и перемещающейся в вертикальной. При сканировании движение вверх и движение вниз заканчиваются в одном и том же положении.

Вакуумная система установки состоит из трёх зон: камеры ионного источника, ускорительной камеры и приёмной камеры. Камеры установки при необходимости могут быть изолированы друг от друга с помощью двух изолирующих затворов шиберного типа.

Все клапаны и затворы (за исключением высоковакуумного затвора приёмной камеры) управляются пневматически, а натекатели бора, аргона и высоковакуумный затвор приёмной камеры имеют электропривод.

Управление вакуумной системой установки – автоматическое, ручной режим является вспомогательным и используется для отладки установки. Вакуумная система установки имеет блокировки в случае прекращения подачи сжатого воздуха: охлаждающей воды, выключения питания механических насосов.

2.1. Управление процессами имплантации

Доза имплантации устанавливается переключателями на передней панели блока управления приёмной камерой. Величина дозы может быть задана от $1,00 \cdot 10^{10}$ до $9,99 \cdot 10^{15}$ ион/см²/сканирование. Скорость сканирования

по вертикали пропорциональна скорости вращения карусели и полное сканирование занимает 6 мин. при максимальной скорости вращения, равной 60,9 радиан/мин. Имплантация может осуществляться лишь при условии, что ток пучка отличается не более, чем в два раза от тока, определяемого установкой значения ион/см²/сканир.

При работе в автоматическом режиме сигналом к началу имплантации является закрытие дверок приёмной камеры. Если в процессе имплантации происходит отказ в работе системы формирования ионного пучка, вакуумной системы или источника ускоряющего напряжения – закрывается заслонка приёмной камеры и прекращается вертикальное перемещение карусели.

Положение карусели, в котором прервалась имплантация, запоминается специальной схемой, и при повторном запуске системы заслонка открывается тогда, когда карусель достигает положения, в котором прервалась подача ионного пучка.

Для сохранения информации о режиме имплантации (число законченных сканирований, положение карусели, в котором прервалось поступление ионного пучка в приемную камеру, направление вертикального перемещения карусели) в случае выключения электропитания установки, платы счетчика «число сканирований» и счетчика импульсов положения карусели имеют автономное питание от специального источника напряжения.

Технические характеристики установки ЛАДА-30М

1. Габаритные размеры установки не более:
длина – 4135 мм; ширина – 3286 мм; высота – 2605 мм.
2. Масса установки не более 5900 кг.
3. Максимальная производительность при работе на боре в диапазоне доз легирования от $2,0 \cdot 10^{10}$ до $4,0 \cdot 10^{14}$ ион/см² (от 0,003 до 64,0 мкКл/см²), а на фосфоре и мышьяке в диапазоне доз от $2,0 \cdot 10^{10}$ до $1,6 \cdot 10^{15}$ ион/см² (от 0,003 до 256,0 мкКл/см²) на сурьме в диапазоне доз от $2,0 \cdot 10^{10}$ до $4,8 \cdot 10^{14}$ ион/см² (от 0,003 до 78,8 мкКл/см²), не менее:
 - 1) для пластин диаметром 76 мм – 200 шт/ч при одновременной загрузке карусели 54 пластинами;
 - 2) для пластин диаметром 100 мм – 95 шт/ч при одновременной загрузке карусели 27 пластинами;
 - 3) для пластин диаметром 150 мм – 30 шт/ч при одновременной загрузке карусели 9 пластинами.
- Производительность установки при работе на фосфоре и мышьяке на дозе $6,25 \cdot 10^{15}$ ион/см² (1000 мкКл/см²) для пластин диаметром 76 мм – 90 шт/ч.
4. Предельное остаточное давление в приемной и ускорительной камерах не более $6,0 \cdot 10^{-4}$ Па; после вскрытия на атмосферу время откачки камеры до рабочего давления $3 \cdot 10^{-3}$ Па не более 6 мин.
5. Расход воды - от 1,0 до 1,5 м³/ч при давлении от 200 до 400 кПа.
6. Неравномерность дозы ионной имплантации не более 1,5 % .

7. Максимальная потребляемая электрическая мощность, не более 35 кВт.
8. Рабочее остаточное давление в приемной камере не более $3,0 \cdot 10^{-3}$ Па.
9. Суммарное ускоряющее напряжение: 180 кВ — в течение 2 часов, 130 кВ — в течение 14 часов.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими основами процесса ионной имплантации, изучить принцип работы и состав основных систем установок ионного легирования, технические характеристики и систему управления установки ЛАДА 30М.

2. По индивидуальному заданию преподавателя под руководством инженера произвести легирование и термообработку пластины в соответствии с режимами указанными в табл. 4.1. Рассчитать время процесса ионного легирования.

Таблица 4.1 Технологические параметры ионного легирования

Тип примеси	Режим легирования		Тип подложки с $d \text{SiO}_2$ 425 Å	Режим термообработки	Параметры X_j , мкм
	E, кэВ	D мкКл/см ²			
бор	100	2	КЭФ-4,5	1050°C, N ₂ , 20'	0.7
бор	40	65	КЭФ-4,5	1050°C, N ₂ , 20'	0.6
бор	30	10	КЭФ-4,5	1050°C, N ₂ , 20'	0.5
бор	30	300	КЭФ-4,5	1050°C, N ₂ , 20'	0.6
бор	75	150	КЭФ-4,5	1050°C, N ₂ , 20'	0.75
фосфор	80	5	КДБ-12	1050°C, N ₂ , 20'	0.5
фосфор	75	0,5	КДБ-12	1050°C, N ₂ , 20'	0.4
фосфор	60	500	КДБ-12	1050°C, N ₂ , 20'	0.6
фосфор	75	0,35	КДБ-12	1050°C, N ₂ , 20'	0.4

3. Под руководством инженера произвести удаление с поверхности пластины слоя SiO_2 и измерить поверхностное сопротивление ионно-легированного слоя в пяти точках.

4. Рассчитать концентрацию примеси в ионно-легированном слое.

5. По результатам измерения поверхностного сопротивления оценить равномерность легирования примеси.

6. По техническим характеристикам установки рассчитать теоретически время процесса ионного легирования.

7. Проанализировать полученные результаты эксперимента.

8. Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Структурная схема установки и основные расчетные формулы.
3. Результаты выполнения индивидуального задания, измерения поверхностного сопротивления R_s .
4. Расчеты концентрации примеси, неравномерности легирования, времени процесса.
5. Анализ полученных результатов и расчетов.
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение процессу ионной имплантации, понятиям доза облучения и проективный пробег ионов.
2. Какие требования предъявляются к вакуумному оборудованию?
3. Опишите устройство ионного источника.
4. Назовите состав и характеристики установки ионного легирования.
5. Сформулируйте принцип действия ионно-лучевого ускорителя.
6. Какие элементы входят в состав устройства газораспределения установки?
7. Опишите конструкцию приемной камеры.
8. Назовите требования к масс-сепаратору.
9. Отметьте основные технические характеристики установки ионного легирования ЛАДА-30.

Литература

1. Достанко А.П. Технология интегральных схем. — Минск: Выш. школа, 1989.—206 с.
2. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Высшая школа, 1986.- 368 с.: ил.
3. Блинов И.Т., Кожитов Л.В. Оборудование полупроводникового производства. Учебное пособие.— М.: Машиностроение, 1986.
4. Установка для ионной имплантации. УЛ.ИП-180-027. Техническая документация. Книга 9.
5. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. ТП-8 / Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др. Под общ. ред. Ю.В. Панфилова .- М.: Машиностроение, 2000.— 744 с.
6. Комаров Ф.Ф., Комаров А.Ф. Физические процессы при ионной имплантации в твердые тела. — Минск: УП «Технопринт», 2001.— 392 с.

Лабораторная работа № 5

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Цель работы

Изучить маршрут, назначение технологических операций, конструкцию, получить практические навыки в измерении параметров биполярных транзисторов.

1. Теоретические сведения

При изготовлении современных биполярных транзисторов широко используются термические процессы получения диффузионных легированных и изолирующих оксидных слоев. Основными параметрами эпитаксиальных слоев являются: толщина и удельное сопротивление, глубина залегания и концентрация примесей, для диэлектрических слоев величина и подвижность заряда в оксиде, все это определяет электрические параметры биполярных транзисторов.

Биполярный транзистор представляет собой совокупность двух встречно включенных взаимодействующих р-п-переходов. В зависимости от этих особенностей различаются и маршруты их изготовления. Изготовление п-р-п дискретного биполярного транзистора начинается со сформированной эпитаксиальной структуры (рис. 5.1.), которая представляет собой тонкий монокристаллический слой, выращенный методом эпитаксии на кремниевой пластине, и повторяющий ее кристаллографическую ориентацию.

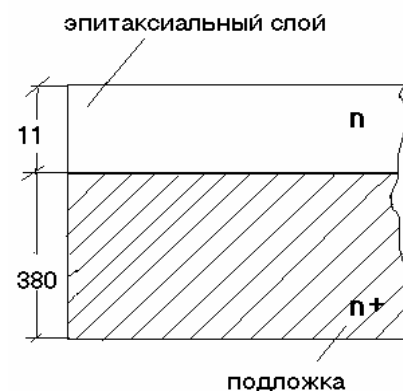


Рис. 5.1. Пластина с эпитаксиальным слоем

1.1. Изготовление биполярных кремниевых транзисторов

1 Этап. Формирование партий пластин. Включает маркировку пластин на планарной стороне возле базового среза на автоматической установке лазерной маркировки полупроводниковых пластин ЭМ-237П1, составление партий (максимальное количество 24 пластины, и одна контрольная пластина КЭФ 4,5 и оформление сопроводительного листа, где указывается тип изделия, номер партии и маршрут изготовления.

2 Этап. Отмывка.

Отмывка пластин проводится на установке химической обработки в перекисно-аммиачном (ПАР) и перекисно-соляном растворах (ПСР) с

последующей отмывкой в деионизованной воде. Применяют два основных метода очистки поверхности пластин: химическую реакцию, в результате чего загрязнения превращаются в растворимые продукты, которые потом могут быть смыты, и механическую очистку. Эффективной считается очистка, основанная на сочетании этих методов. При обработке пластин в ПАР происходит удаление отрицательных ионов кислотных остатков, в ПСР – положительных ионов металлов. Механические загрязнения удаляются при помощи установки гидромеханической отмывки путем механического воздействия кистей и струи деионизованной воды на вращающиеся в центрифуге пластины. Степень деионизации оценивается по удельному сопротивлению воды, которое должно быть не ниже 18 МОм·см. Контроль чистоты поверхности отмытых пластин производится под микроскопом при увеличении не ниже 100 крат в темном поле. Количество светящихся точек не должно превышать пяти в поле зрения микроскопа. Проверка производится на трех контрольных пластинах (номера 1, 5, 15) из партии в пяти точках по кресту. Запыленность в рабочей зоне не должна превышать 4 частицы размером не более 0,5 мкм в 1 м³. Контроль запыленности производится в начале смены с помощью счетчика аэрозольных частиц АЗ-5.

3. Окисление.

Технология получения диффузионных областей различной конфигурации базируется на использовании слоев оксида кремния в процессе фотолитографии, обладающих маскирующими (при диффузии), диэлектрическими, изолирующими и защитными свойствами. Окисление пластин осуществляется в электропечи СДОМ 125/3-15 или в системе пирогенного окисления СОТ ППЭ-3/100.

Получение пленки диоксида кремния осуществляется в мягких режимах: температура загрузки-выгрузки пластин – в пределах 850±10°С с последующим подъемом до 1150±0,5°С в среде сухого кислорода.

На первой стадии производится загрузка пластин в течение 9±1 мин с помощью автоматического загрузчика. Для обеспечения равномерного прогрева пластин по всему объему время выбрано исходя из скорости их перемещения с целью избежания механических напряжений, приводящих в последующем к росту дефектов в объеме пластины. В атмосфере сухого кислорода выращивается тонкий слой оксида кремния, защищающий кремниевую пластину на пятом интервале от травления кремния ионами хлора, получающихся в процессе ионизации при высокой температуре паров HCl. Особенность слоев (пленок) диоксида кремния состоит в том, что они всегда содержат примеси донорного типа. Наиболее распространенными примесями такого типа являются натрий, калий и водород. Все они содержатся в типовых растворах, которыми обрабатывают поверхность кремния и его оксида, а также в стекле и кварце, из которых изготавливаются посуда и оснастка для технологических процессов микроэлектроники. Донорные примеси, свойственные пленке SiO₂, сосредоточены вблизи границы с кремнием. Поэтому в пленке диоксида кремния на границе с

кремнием образуется тонкий слой положительно заряженных донорных атомов, в приповерхностном слое кремния в следствии повышенной концентрации электронов обогащенный слой, Ионы хлора нейтрализуют положительные ионы, исключая их приход в приповерхностный слой кремния. На последующих этапах производится продувка трубы от паров HCl сухим кислородом и этап пирогенного окисления - выращивания необходимой толщины диоксида кремния (0,6-1мкм) в парах воды, образующихся в процессе сгорания водорода и затем отжиг оксида кремния в среде азота, снижение температуры и выгрузка пластин из рабочей камеры. Перед загрузкой пластин в кварцевую лодочку и при выгрузке пластин осуществляется контроль пластин под микроскопом в отраженном свете. На контрольной пластине определяется толщина оксидной пленки путем предварительного травливания части оксида. По цвету и порядку интерференционных полос определяется толщина пленки оксида кремния согласно специальной таблицы. Скорость роста оксида со временем должна убывать, так как новым атомам кислорода приходится диффундировать через более толстый слой оксида. Толщина оксидной пленки связана со временем термического окисления формулой:

$$d = k \times \sqrt{t}, \quad (5.1)$$

где k- параметр, зависящий от температуры и влажности кислорода, t – время, d – толщина оксидной пленки.

4. Фотолитография - процесс создания защитной маски, необходимой для проведения локальной обработки полупроводниковых пластин при формировании структуры транзистора. В качестве материала маски используют диоксид или нитрид кремния. В основу фотолитографии положено свойство некоторых органических веществ (фоторезистов) изменять свою структуру под действием излучения (света). Фоторезисты бывают позитивные (используется для производства транзисторов) и негативные. Негативные фоторезисты под действием света полимеризуются и становятся устойчивыми к травителям (кислотным и щелочным). В позитивных фоторезистах свет, наоборот, разрушает полимерные цепочки и, значит, будут вытравливаться засвеченные участки. Процесс фотолитографии начинается с нанесения на окисленную поверхность пластины слоя фоторезиста. Для этого в центр пластины помещается небольшое количество фоторезиста (одна капля), затем на центрифуге, которая вращает пластину с большой скоростью под действием центробежных сил, капля распределяется тонким ровным слоем (около 1 мкм) по всей поверхности. С увеличением скорости вращения толщина слоя уменьшается, но до определенного предела. Для заданной вязкости фоторезиста существует критическая скорость, превышение которой не снижает толщины слоя. Полученную пленку фоторезиста высушивают до затвердевания. ИК - сушка (воздействие инфракрасного излучения) фоторезиста производится в три стадии (90 °С, 100 °С, 110 °С) с целью

исключения мгновенного испарения растворителя. Фоторезисты чувствительны к ультрафиолетовому свету, поэтому их можно обрабатывать в не очень затемненном помещении. Совмещение и последующее экспонирование производятся на одной установке. При этом совмещение на 1-й фотолитографии (ФЛ) проводится автоматически с ориентацией на базовый срез пластины, остальные – по меткам совмещения с предыдущей ФЛ. В зависимости от типа совмещения различают контактную (существует зазор в несколько микрон между фотошаблоном (маска) и рабочей пластиной) и проекционную (изображение фотошаблона проецируется на пластину) фотолитографию. Экспонирование осуществляется путем воздействия УФ излучения через фотошаблон в течение 5-15 секунд. Подбор времени экспонирования осуществляется путем контрольного процесса (экспонирования, задубливание, травления) на одной пластине из каждой партии. После засветки будут вытравливаться незасвеченные участки (как в обычном фотонегативе). При проявлении фоторезиста в результате химической обработки в слабощелочном растворе (NaOH) с отдельных участков (окон) фоторезист удаляется, оставшийся на поверхности используется как промежуточная маска. После этого производят задубливание фоторезиста в ИК - сушке при температуре $T=100-130^{\circ}\text{C}$, травление незащищенных фоторезистом участков маскирующего слоя травителем HF, не действующим на фоторезист, в результате чего после удаления оставшегося фоторезиста получают защитную маску из оксида или нитрида кремния. Перед снятием фоторезиста производится контроль качества вскрытия окон под паром. Снятие фоторезиста осуществляется по оксиду в горячем растворе серной кислоты (H_2SO_4) или плазмохимическим способом (ПХУФ).

Маршрут фотолитографии включает в себя нанесение и сушку фоторезиста, совмещение и экспонирование через фотошаблон, проявление фоторезиста, задубливание, травление незащищенных маской участков оксида кремния, снятие фоторезиста. Проводится контроль на соответствие размеров вытравленных окон.

5. Первая стадия диффузии бора (создание “базы”).

Диффузия – это обусловленное тепловым воздействием перемещение частиц в направлении убывания их концентрации. Скорость диффузии примесных атомов в полупроводниках обратно пропорциональна их растворимости. Если атомы растворителя (кремния) и растворяемого вещества (бора) идентичны, то примесь проникает в кристаллическую решетку по вакансиям, замещая узлы растворителя. В результате образуется твердый раствор замещения, и примесные атомы обладают большой растворимостью. Требуемая максимальная концентрация диффузанта должна быть меньше его твердой растворимости в кремнии. Наличие на поверхности пластины посторонних частиц или нарушение структуры могут привести к неравномерному распределению примесей, к образованию p-n-переходов с изменяющейся глубиной залегания, а в транзисторных структурах – к

неравномерности толщины базы и изменению свойств транзисторов. Предельная растворимость – это максимально возможная растворимость элемента (бора) в кремнии при любой температуре. Она определяет верхний предел концентрации примеси в полупроводнике. Локальная диффузия предназначена для создания локального распределения примеси методом диффузии или ионного легирования. При локальной диффузии примесь распространяется не только вглубь пластины, но и во всех перпендикулярных направлениях, т.е. под маску. В результате этой так называемой боковой диффузии участок p-n- перехода, выходящий на поверхность, оказывается “автоматически” защищенным оксидом. Соотношение между глубинами боковой и основной – “вертикальной” диффузии зависит от ряда факторов, в том числе от глубины диффузионного слоя L. Типичным для глубины боковой диффузии можно считать значение 0,7L. Теория диффузии основана на двух законах Фика. 1-й закон Фика связывает плотность потока частиц J с градиентом их концентрации:

$$J = -D \left(\frac{dN}{dx} \right), \quad (5.2)$$

где D – коэффициент диффузии, N – концентрация.

2-й закон Фика характеризует скорость накопления атомов примеси:

$$\frac{dN}{dt} = D \left(\frac{d^2 N}{dx^2} \right). \quad (5.3)$$

Из последнего уравнения можно найти функцию N(x,t), т.е. распределение концентрации бора N в любой момент времени. Для этого нужно задаться двумя граничными условиями. Рассмотрим второе граничное условие, которое имеет два варианта, соответствующее двум разновидностям технологического процесса.

1) Случай неограниченного источника - диффузант непрерывно поступает к пластине, так что в ее приповерхностном слое концентрация примеси поддерживается постоянной. Граничное условие для этого варианта имеет вид: $N(0;t)=N_s = \text{const}$.

2) Случай ограниченного источника: в этом случае сначала в тонкий приповерхностный слой пластины вводят некоторое количество атомов диффузанта, а потом источник диффузанта отключают и атомы примеси перераспределяются по глубине пластины при неизменном общем количестве. Первую стадию называют “загонкой”, вторую – “разгонкой” примеси.

Диффузия бора осуществляется в две стадии. На первой стадии производится загонка бора на определенных участках через окна маски (слой SiO₂), на второй – разгонка примеси на необходимую глубину при более высокой температуре. Источником примеси служит область с повышенной концентрацией. Источниками диффузантов являются химические соединения (жидкие - BBr₃, твердые B₂O₃, газообразные – B₂H₆). В данном технологическом процессе используются твердые источники: 1- пластины

нитрида бора, где оксид бора получается в виде пленки предварительно окисленных в среде кислорода; 2- на предварительно окисленные пластины кремния наносится спиртовой раствор оксида бора, после чего производится отжиг пластин. В результате на поверхности получается пленка из оксида бора. Загонка бора осуществляется при температуре $950\pm 1^\circ\text{C}$ в электропечи СДОМ 125/3-15. Температура диффузии выбирается исходя из значения поверхностного сопротивления, которое необходимо получить, и определяется растворимостью диффузанта кремния. Загонка бора осуществляется в 4-е этапа:

1-загрузка пластин в среде азота;

2- диффузия бора в среде азота. (время диффузии выбирается исходя из получения необходимого поверхностного сопротивления, глубина диффузии бора на первой стадии составляет менее 1 мкм);

3- окисление пластин в среде кислорода и получение боросиликатного стекла (БСС) на поверхности кремния;

4- выгрузка пластин в атмосфере кислорода.

Для контроля поверхностного сопротивления в рабочую партию подставляется контрольная пластина с противоположным типом проводимости (например, КЭФ 4,5). После загонки бора с данной пластины снимается БСС и происходит измерение поверхностного сопротивления на установке измерения удельного сопротивления полупроводниковых материалов ИУС-2. Измерение поверхностного сопротивления производится четырехзондовым методом. К рабочей поверхности пластины прижимается головка с четырьмя зондами. Два крайних зонда присоединены к цепи питания, по которой течет ток; на средних зондах компенсационным методом измеряется падение напряжения U . Для тонких диффузионных слоев используют выражение

$$R_s = 4.53U/I \text{ (Ом/}\square\text{)}, \quad (5.4)$$

где U -падение напряжения на средних зондах, I -ток через зонды.

В случае превышения величины поверхностного сопротивления R_s проводят дозагонку пластин вместе с контрольной в среде азота с повторным контролем R_s , при заниженной величине R_s проводят подокисление пластин вместе с контрольной пластиной с повторным контролем R_s . На стадии загонки бора R_s составляет 50-90 Ом/□.

6. Снятие БСС. Скорость травления БСС на несколько порядков ниже скорости травления SiO_2 , поэтому образующееся по всей поверхности БСС будет препятствовать вскрытию окон при дальнейших фотолитографиях, и приводит к уходу от заданных размеров. По этой причине целесообразно удалять БСС. Снятие БСС осуществляется в травителе на основе плавиковой кислоты. Контроль снятия БСС осуществляется по скатыванию (образованию “вафельки”). Процесс скатывания основан на несмачиваемости кремния в воде и HF, т.е. во вскрытых областях. После снятия БСС производится

промывка пластин в деионизованной воде с удельным сопротивлением свыше 18 МОм·см.

7. Разгонка бора проводится при температуре 1150°C в электропечи СДОМ 125/3-15. Данный процесс идентичен стадии окисления пластин, но отличается по продолжительности 7 и 8 этапов (рис 5.2.), которые выбираются исходя из необходимости получения определенной глубины залегания примеси и толщины защитной оксидной пленки. Разгонка бора является диффузией из ограниченного источника. Граничным условием при такой диффузии является абсолютно непроницаемая поверхность, т.е. поверхность кремния покрывается материалом со значительно меньшим, чем у него коэффициентом диффузии (SiO_2), получаемый на 1-5 этапе разгонки. Атомы бора, диффундированные на первой стадии бора, перераспределяются по глубине пластины при неизменном их общем количестве.

Далее происходит диффузия примеси в глубь пластины. Закон распределения примеси представляет собой функцию Гаусса. После проведения разгонки бора производится контроль поверхностного сопротивления, глубины залегания p-n-перехода и толщины оксидной пленки. На стадии разгонки бора поверхностное сопротивление — 160-260 Ом/□. Глубина диффузии в зависимости от типа транзистора может составлять от 1,5 до 14 мкм.

8. Фотолитография “эмиттер” - производится вскрытие окон под эмиттер в защитном оксиде кремния. Изображение итоговой структуры после фотолитографии "эмиттер" приводится на рис. 5.2.

9. Проверка *Uкб* проводится для отбраковки на ранней стадии потенциального брака.

10. Отмывка.

11. Диффузия фосфора (“эмиттер”) проводится с целью создания локальной области n+-типа через маску оксида кремния и является комбинированной диффузией как из бесконечного источника так и ограниченного источника примеси. Обычно количество поступающего диффузанта обеспечивает режим предельной растворимости.

Источником диффузанта являются химические соединения (жидкие – PCl_3 , PClO ; газообразные – PH_3). В данном процессе используется PCl_3 . Диффузия проводится в электропечи СДОМ 125/3-15.

Диффузия фосфора проводится в мягких режимах в открытой трубе в потоке газа-носителя $\text{PCl}_3 + \text{N}_2$ (рис. 5.3), а итоговая структура на рис. 5.4.

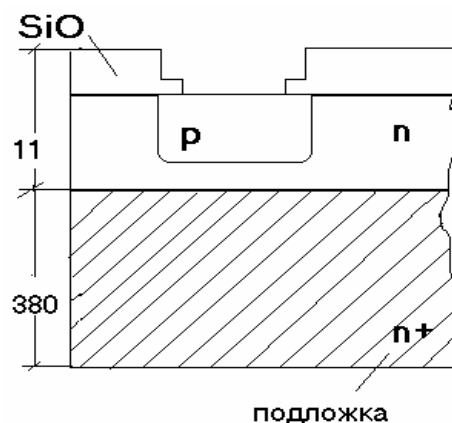


Рис. 5.2. Итоговая структура после фотолитографии

Операция диффузии фосфора является одной из важнейших операций в маршруте изготовления биполярных n-p-n-транзисторов. На данной операции формируется окончательная конструкция кристалла в объеме эпитаксиального слоя.

При этом закладываются основные электрические параметры транзистора: обратное пробивное напряжение ($U_{кэ0}$), коэффициент усиления ($h_{21б}$), обратный ток “коллектор-эмиттер” ($I_{кэr}$), обратный ток “эмиттер-база” ($I_{эб0}$), время рассасывания основных носителей в базе ($\tau_{рас}$), коэффициент шума, частотные характеристики (граничная частота - $f_{гран}$, постоянное время в цепи коллектора - τ_k).

Важнейшим является получение необходимой ширины базы транзистора ($W = x_p - x_n$).

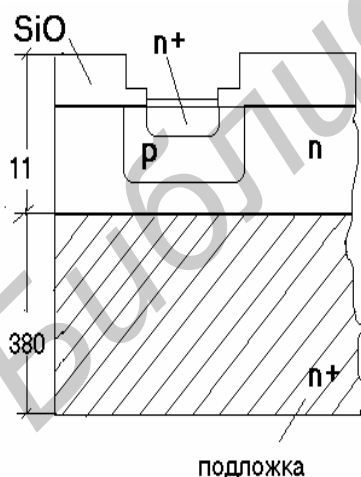


Рис. 5.4. Итоговая структура

внутрисхемной коммутации, они должны обеспечивать невыпрямляющий контакт с полупроводником, иметь хорошую адгезию с кремнием и диоксидом кремния и низкое удельное сопротивление, давать возможность присоединения выводов транзистора. Для осуществления металлизации

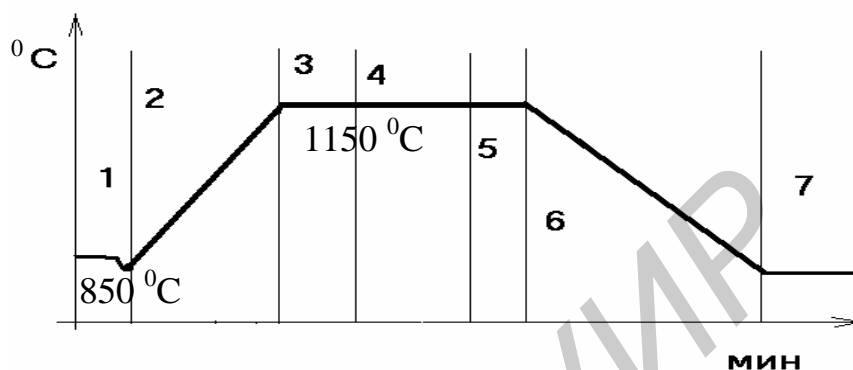


Рис. 5.3. Изменение температуры кремниевых пластин при диффузии фосфора: температура загрузки-выгрузки - $850 \pm 5^\circ\text{C}$, температура диффузии фосфора - $1150 \pm 1^\circ\text{C}$. 1 - загрузка пластин в среде в среде кислорода и азота; 2 - подъем температуры до 1150°C в среде кислорода и азота; 3 - продувка в среде азота, $T=1150^\circ\text{C}$; 4 - диффузия фосфора в потоке газа-носителя $\text{PCl}_3 + \text{N}_2$; 5 - отжиг в среде кислорода; 6 - снижение температуры до 850°C в среде кислорода; 7 - выгрузка пластин

12. Фотолитография (контакты)

13. Металлизация

Металлизация – это процесс создания внутрисхемных соединений. В планарных структурах внутрисхемные соединения выполняют с помощью тонких металлических пленок, которые наносят на изолирующий слой диоксида кремния. Так как эти пленки используют в качестве проводников

можно применять золото, никель, свинец, серебро, хром, алюминий и системы Cr-Au, Ti-Au, Mo-Au, Ti-Pt-Au и т. д. Основным материалом для металлизации служит алюминий, который имеет следующие положительные качества:

- 1) позволяет изготавливать структуры с металлизацией одним металлом, что упрощает технологию;
- 2) металлизация имеет высокую проводимость, и хорошую адгезию к кремнию и диоксиду кремния;
- 3) хорошо термически испаряется в вакууме;
- 4) пленки алюминия хорошо обрабатываются при проведении фотолитографии для получения нужной конфигурации проводников, они легко поддаются травлению, которое не действует на Si и SiO₂;
- 5) вступает в реакцию с диоксидом кремния, который частично остается на контактных площадках;
- 6) образует низкоомные контакты с кремнием n+-типа и p-типа;
- 7) не образует хрупких химических соединений с кремнием;
- 8) проводимость его почти не уменьшается за счет кремния, находящегося в нем в виде твердого раствора;
- 9) допускает присоединение золотой и алюминиевой проволоки;
- 10) выдерживает циклические изменения температуры (достаточно пластичен);
- 11) стоек к окислению в атмосфере;
- 12) является хорошим материалом для схем, стойких к радиации;
- 13) имеет невысокую стоимость.

При создании металлической разводки сначала на всю поверхность транзистора напыляют **сплошную** пленку алюминия толщиной около 1 мкм. Эта пленка контактирует со слоями кремния в специально сделанных (с помощью предыдущей фотолитографии) окнах в оксиде кремния. Основная же часть алюминиевой пленки лежит на поверхности оксида.

14. Фотолитография (металл)

Покрывая пленку алюминия фоторезистом, экспонируя его через соответствующий фотошаблон и проявляя, получают фоторезистивную маску, которая защищает будущие полоски металлизации и контактные площадки от травителя. После удаления (путем травления) алюминия с незащищенных участков и удаления фоторезиста остается запланированная металлическая разводка. Травление металла осуществляется в травителе на основе ортофосфорной кислоты, а снятие фоторезиста в диметилформамиде.

Ширина полосок может составлять 5-15 мкм. Погонное сопротивление полоски шириной 10 мкм и толщиной 1 мкм составляет около 2 Ом/мм. Для контактных площадок, к которым в дальнейшем присоединяются внешние выводы, типичны размеры 100×100 мкм. Присоединение внешних выводов непосредственно к полоскам металлизации невозможно из-за их малой ширины.

15. Вжигание алюминия.

Проблема омических контактов при использовании алюминия состоит в следующем. Если пленку алюминия просто напылить на поверхность кремния, то образуются барьеры Шоттки, причем барьер на границе с n -слоем является не омическим, а выпрямляющим. Чтобы избежать барьеров Шоттки, алюминий вжигают в кремний при температуре около 450°C , близкой к температуре эвтектики сплава Al-Si в среде азота. При такой температуре на границе алюминиевой пленки с кремнием образуется слой, в котором растворена часть прилегающего алюминия. После застывания сплав представляет собой кремний, легированный алюминием. Поскольку алюминий является акцептором по отношению к кремнию, возникает новая проблема: предотвращение образования p - n -переходов в n -слоях. Сечение итоговой структуры приведено на рис. 5.5.

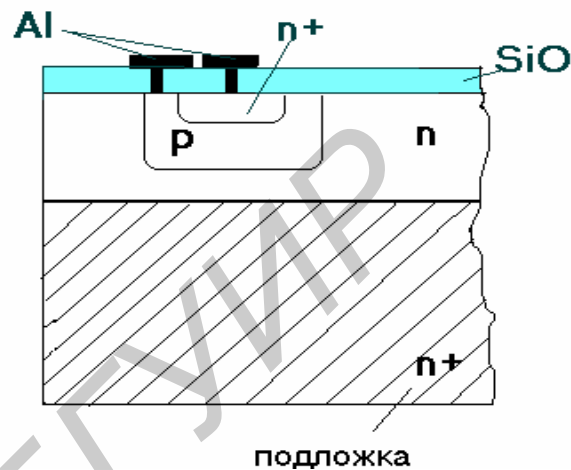


Рис. 5.5. Итоговая структура транзистора

16. Подшлифовка.

Утонение пластин до требуемой толщины проводится с целью обеспечения требуемого параметра $U_{кэн}$. Толщина кристалла зависит от типа корпуса и составляет от 180-350 мкм. В начале планарную сторону пластины защищают пленкой, потом утоняют до требуемой толщины и снимают пленку.

17. Отмывка (гидромеханическая).

18. Ионное легирование (коллектор.)

Проводится только для определенных типов (биполярных p - r - p транзисторов) с целью снижения напряжения насыщения $U_{кэн}$ транзистора.

19. Выборочный замер.

20. Классификация.

21. Контроль внешнего вида.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомится с маршрутным технологическим процессом изготовления биполярного транзистора, составом и структурой слоев.
2. Под руководством инженера при помощи прибора ПНХТ Л2-56 измерить основные параметры биполярного транзистора: $U_{кэо}$, $I_{кэо}$, h_{21e} , $U_{бэ}$, $I_{бэ}$, $U_{кэн}$ в пяти точках на пластине.
3. По образцу косоугольного шлифа определить глубину диффузионных областей эпитаксиального слоя.

4. Под руководством инженера с помощью спектрофотометра – толщиномера измерить толщину окисла.

5. По образцу сопроводительного листа провести анализ режимов формирования диффузионных областей транзистора.

6. Проанализировать полученные результаты, сопоставить технологические режимы с результатами измерения электрических параметров.

7. Оформить отчет.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.

2. Маршрутный технологический процесс изготовления транзистора.

3. Структура исследования биполярного транзистора.

4. Режимы проведения базовых технологических операций с указанием результатов измерения толщины диффузионных слоев.

5. Результаты измерения электрических параметров биполярного транзистора.

6. Результаты сопоставительного анализа технологических режимов и измерений электрических параметров.

7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Основные параметры эпитаксиального слоя.

2. Назначение операции окисления.

3. Назовите интервал, оказывающий наибольшее влияние на рост толщины окисла на окислительных операциях.

4. На что оказывает влияние скорость подъема температуры на окислительных операциях.

5. Какие электрические параметры закладываются на разгонке бора и диффузии фосфора и что оказывает влияние на них.

6. Требования к газам на термодиффузионных операциях.

Литература

1. Аппаратные средства контроля параметров твердотельных структур. В.А. Емельянов, В.В. Баранов, Т.В. Петлицкая, Л.Д. Буйко и др. Под редакцией В.А. Емельянова – Минск, 1997.

2. Емельянов В.А., Баранов В.В., Петлицкая Т.В., Буйко Л.Д. Методы контроля параметров твердотельных структур СБИС. – Минск, 1998.

3. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3-х т. Т. 2 /А.П. Достанко, С.В. Бордусов, И.В. Свадковский и др.; Под общ. ред. А.П. Достанко.- Минск: ФУАинформ, 2001.- 244 с.

Лабораторная работа № 6

ФОРМИРОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР И КОНТРОЛЬ ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Цель работы

Изучение процесса эпитаксии, основных методов определения параметров кремниевых эпитаксиальных слоев, измерение параметров эпитаксиальных слоев.

1. Теоретические сведения

В производстве полупроводниковых ИС и многих дискретных приборов необходимо на подложке создавать однородно легированные по толщине слои одноименного ей полупроводника, а в некоторых случаях – и полупроводника другого вида, с иной шириной запрещенной зоны.

Термин «эпитаксия» означает процесс ориентированного наращивания, в результате которого образующаяся новая фаза закономерно продолжает кристаллическую решетку имеющейся фазы – подложки с образованием некоторого переходного слоя, способствующего когерентному срастанию двух решеток по плоскости подложки со сходной плотностью упаковки атомов. По окончании формирования переходного слоя эпитаксиальный процесс продолжается с образованием слоя требуемой толщины.

На практике дальнейший рост этого слоя можно интерпретировать как автоэпитаксиальный процесс, т.е. процесс ориентированного нарастания кристаллического вещества, незначительно отличающегося по химическому составу от вещества подложки (Si – Si, Ge – Ge, GaAs – GaAs).

В отличие от автоэпитаксии гетероэпитаксия представляет собой процесс ориентированного нарастания вещества, отличающегося по составу от вещества подложки, происходящий без химического взаимодействия срастающихся веществ (Si – Ge, Si – GaAs, Si – сапфир). В результате гетероэпитаксии новая фаза закономерно продолжает кристаллическую решетку имеющейся фазы – подложки с образованием переходного эпитаксиального слоя, способствующего когерентному срастанию двух решеток по плоскости, сходной с плоскостью упаковки атомов.

Эпитаксиальный слой (ЭС) – это монокристаллический слой новой фазы, выросший в результате эпитаксии на поверхности монокристаллической подложки строго определенным образом, который имеет прочную кристаллохимическую связь с подложкой и не может быть отделен от нее без разрушения слоя или поверхности подложки.

Основное физическое явление, которое имеет место в процессе эпитаксии – это кристаллизация вещества. В зависимости от того, из каких составов получают ЭС, различают следующие механизмы кристаллизации:

механизм пар – кристалл (П – К), когда образование твердой фазы происходит из парообразного или газообразного состояния вещества;

механизм пар – жидкость – кристалл (П – Ж – К), когда образование твердой фазы из парообразного состояния проходит стадию жидкого состояния. Примером может служить кристаллизация Ge на подложке Si, если последнюю нагреть до температуры, превышающей температуру плавления Ge;

механизм твердое тело – кристалл, когда выращивание эпитаксиального слоя производится из электролитов или расплавов.

Основным физическим условием кристаллизации является уменьшение свободной энергии в соответствии с выражением:

$$\Delta G = rV \frac{G_2 - G_1}{m} + \sigma S \quad (6.1)$$

где ρ – плотность кристаллизующегося вещества; V и S – объем и поверхность зародыша; G_1 и G_2 – соответственно свободные энергии моля исходной и твердой фаз; μ – молекулярный вес вещества; σ – коэффициент поверхностного натяжения. Процесс кристаллизации будет иметь место только при отрицательном значении ΔG .

1.1. Основные варианты процесса эпитаксии

Восстановление хлоридов кремния. В производстве интегральных схем и полупроводниковых приборов наибольший объем эпитаксиальных процессов приходится на эпитаксию кремния. Восстановление тетрахлорида кремния – это наиболее распространенный способ вследствие простоты и доступности исходных материалов. Установки для эпитаксиального выращивания имеют вертикальный или горизонтальный реактор (рис. 6.1.).

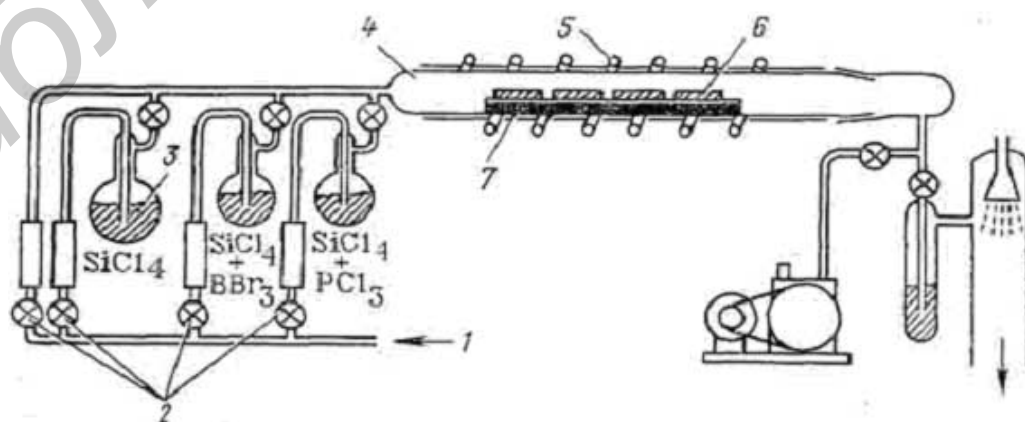
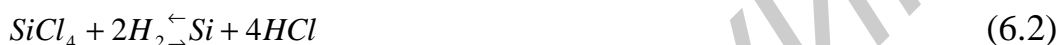


Рис. 6.1. Схема установки для выращивания эпитаксиальных пленок кремния 1 – поток водорода; 2 – краны; 3 – тетрахлорид кремния; 4 – реактор; 5 – индуктор; 6 – пластины; 7 – подложки

Тетрахлорид кремния 3 охлаждается смесью сухого льда со спиртом. Для осушки и очистки водорода предусмотрены ловушки с палладированным алюмогелем. Краны 2 на сосуде с SiCl_4 позволяют пропускать водород 1 непосредственно в реактор 4 или через сосуд с SiCl_4 . Пластины кремния 6 помещают на графитовые или стеклографитовые подложки 7, нагреваемые с помощью индуктора 5 токами высокой частоты. Перед осаждением пластины кремния обрабатывают в токе хлористого водорода при 1200°C для удаления остаточной поверхностной пленки SiO_2 . Затем в реактор подается водород, насыщенный парами тетрахлорида, и на пластине происходит восстановление SiCl_4 до атомарного кремния:



На рис. 6.2. изображены кривые температурной зависимости скорости роста пленки кремния v для вертикального 1 и горизонтального 2 реакторов. Энергия активации этой реакции составляет около 105 кДж.

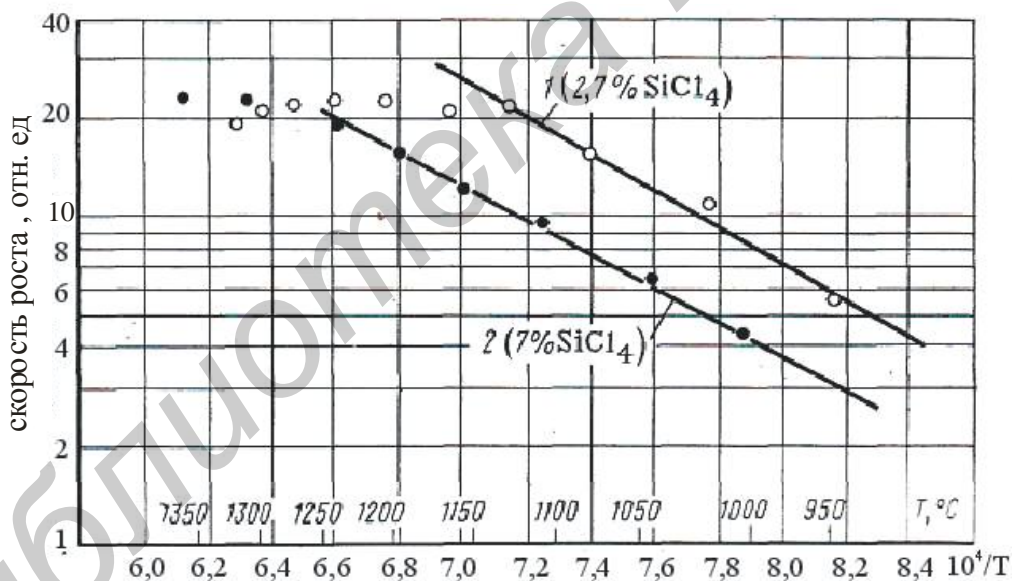


Рис. 6.2. Температурная зависимость скорости роста пленки кремния

Увеличение содержания SiCl_4 до 5% приводит к увеличению скорости роста пленки v (рис. 6.3.), затем скорость уменьшается вследствие неполного восстановления SiCl_4 . При невысоких температурах и больших содержаниях SiCl_4 образуются рыхлые аморфные пленки. Увеличение температуры подложки и уменьшение мольной доли SiCl_4 обуславливают уплотнение пленок.

Выращивание производится при температурах подложки $1200 - 1280^\circ\text{C}$, молярном содержании SiCl_4 1 – 3% и протоке водорода $(2 - 3) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$. Оптимальная скорость роста 16 – 20 нм/с. Из – за неплотного прилегания

подложки к кассете на обратной стороне может происходить частичное осаждение пленки или травление пластины.

Вместо SiCl_4 иногда используют трихлорсилан SiHCl_3 , восстановление которого происходит в соответствии с реакцией:



Энергия активации этого процесса составляет 92 кДж. При избытке хлористого водорода реакции (6.1) и (6.3) идут справа налево, что обуславливает удаление поверхностного слоя кремния и присутствующих на нем пленок, в частности SiO_2 .

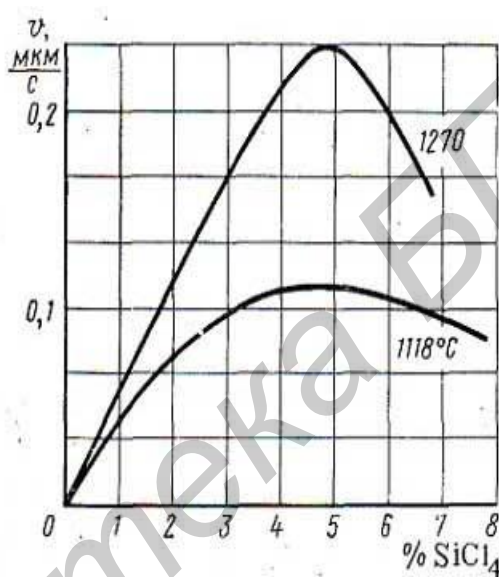


Рис. 6.3. Зависимость скорости роста пленки кремния от молярного содержания SiCl_4

Реакция диспропорционирования. Осаждение кремния можно производить путем пиролиза тетраиодида кремния (SiI_4) при низком давлении и небольшой скорости роста. Для увеличения скорости роста пленки можно использовать реакцию частичного восстановления SiI_4 при нормальном давлении:



Образующийся диодид нестабилен и существует только в равновесии с SiI_4 и йодом



Замкнутая труба содержит пары йода с концентрацией около 1 кг/м^3 , наполнена водородом до давления $4 \cdot 10^4 \text{ Па}$ и имеет продольный температурный градиент. Источник и подложка, выполненные из кремния, размещены в ее противоположных концах. В области источника при

температуре 1100° С реакция (6.3) идет справа налево – происходит травление источника. Образующиеся пары SiI₄ под действием градиента концентрации переносятся в зону подложки, где поддерживается температура 950° С. При этой температуре реакция (6.3) идет слева направо, в результате чего кремний осаждается на подложку, а пары диффундируют обратно в зону источника. Скорость роста составляет 3 – 4 нм/с. Монокристаллическая пленка может быть получена при $T \leq 800$ °С, что значительно ниже температуры других процессов.

Пиролиз силана. При высоких температурах во время осаждения происходит заметная диффузия примесей из сильно легированной пластины в пленку (автолегирование), что изменяет концентрацию примеси в пленке. Для уменьшения диффузии стремятся выбирать легирующую примесь в подложке с минимальным коэффициентом диффузии, например сурьму или мышьяк. Силановый метод позволяет снизить температуру подложки. Уравнение реакции термического разложения силана имеет вид:



Температуру подложки можно уменьшить до 1000° С. Это практически предотвращает диффузию, способствует росту пленок с равномерным распределением легирующей примеси.

Метод близкого переноса («сэндвич» – метод) основан на использовании обратимых химических реакций переноса. Расстояние между источником и пластиной (подложкой) составляет доли миллиметра. Условия химического переноса в зазоре почти не зависят от состояния других частей системы, так как транспортирующий агент не расходуется при переносе, а используется многократно. В качестве газообразных реагентов для получения кремния обычно применяют безводный хлористый водород и пары SiCl₄ или SiHCl₃. В поле температурного градиента при температуре источника на 10 – 15 К больше температуры подложки протекает обратимая реакция:



Под действием градиента концентрации образовавшиеся пары летучего SiCl₂ переносятся к подложке, где идет обратная реакция. Возникший у подложки хлористый водород диффундирует к источнику, где вновь идет прямая реакция. Наиболее существенным преимуществом «сэндвич» – метода является незначительный обмен между реакционным промежутком и окружающей средой, что уменьшает содержание неконтролируемых примесей, дает возможность получить пленки кремния с высоким удельным сопротивлением. Данный метод применим также для эпитаксии на германии, арсениде и фосфиде галлия.

Селективная эпитаксия. При изготовлении интегральных схем часто оказывается необходимым обеспечить локальный рост эпитаксиальных

слоев. Это достигается путем маскировки части полупроводника таким материалом, на котором вследствие отсутствия ядрообразования не происходит осаждения пленки, либо материалом, который впоследствии удаляется совместно с осевшей на него пленкой. Обычно селективную эпитаксию осуществляют с помощью окон в слое SiO_2 , однако поверхность оксида, чтобы на нее не осаждался кремний, должна быть достаточно совершенной. Иногда применяют металлические маски, но они не обеспечивают достаточно четких границ.

Гетероэпитаксия кремния на сапфире. Пленки кремния на изолирующих подложках применяют при изготовлении интегральных схем. Успешное выращивание их в значительной степени зависит от кристаллографических соотношений на границе раздела и от состояния поверхности подложки. Кремний обладает кубической алмазной решеткой с постоянной $a=0,357$ нм. Структура сапфира более сложна, он принадлежит к ромбоэдрическому классу, но ему можно приписать гексагональные символы. Параметры решетки сапфира: $a_0=0,475$ нм, $c_0= 1,295$ нм. Химические особенности системы $\text{Si} - \text{Al}_2\text{O}_3$ изучены недостаточно, чтобы можно было указать характер установления граничных связей, однако наиболее вероятно, что рост пленки начинается с замещения кремнием атомов алюминия. Плоскость (111) кремния растет на плоскости (0001) и плоскости (0010) сапфира.

Поверхность подложки подвергают шлифовке, полировке и ультразвуковой очистке. В реакторе сапфировую пластину помещают на алундовый держатель, расположенный на кремниевом держателе, нагреваемом токами высокой частоты. При температуре $1400 - 1500^\circ \text{C}$ происходит газовая полировка сапфира хлористым водородом, в результате которой удаляются поверхностные несовершенства. Затем подложки очищают путем прогрева при $1200 - 1300^\circ \text{C}$ в водороде. Выращивание пленки осуществляют хлоридным или силановым методом при температуре подложек $1100 - 1200^\circ \text{C}$.

Пленки, выращенные из SiCl_4 , обычно имеют электропроводность p -типа и высокое удельное сопротивление. При использовании силана воспроизводимость результатов хуже, но плотность дислокаций меньше. Образование дислокаций связано с различием коэффициентов расширения сапфира и кремния, их плотность обычно около 10^8 см^{-2} . Подвижность носителей заряда в пленке вследствие структурных несовершенств на 20 – 30% меньше, чем в слитках кремния.

Эпитаксия в вакууме. Основными преимуществами эпитаксии в вакууме являются высокая чистота при использовании вакуума около $10^{-7} - 10^{-8}$ Па, возможность применения масок и создания тонких пленок (менее 1 мкм), что невоспроизводимо при газотранспортных реакциях.

При конденсации кремния из молекулярного потока на холодной подложке образуются поликристаллические или аморфные пленки, обладающие высоким сопротивлением и применяемые поэтому при изготовлении резисторов. При температуре подложки свыше 1000°C

получают монокристаллические пленки, качество и сопротивление которых в значительной степени зависят от подготовки подложки и остаточного давления. Для обеспечения чистоты испарение кремния проводят из кремниевого кристалла с помощью электронного луча (рис. 6.4), либо из расплавленной капли в высокочастотном поле.

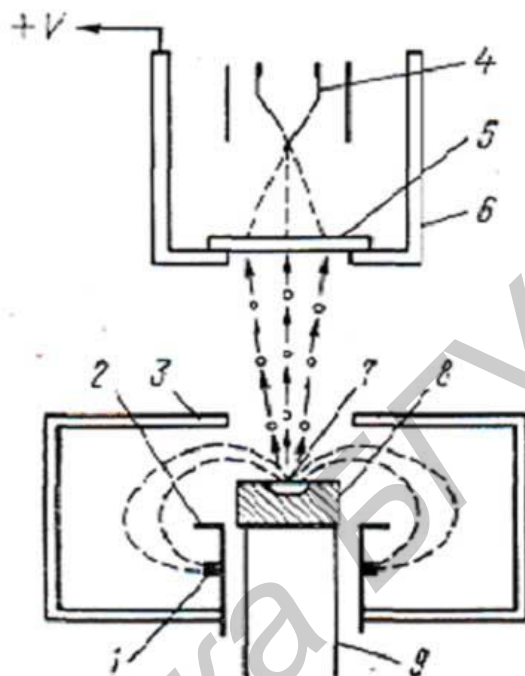


Рис. 6.4. Схема установки для вакуумной эпитаксии:

1 – нить нагрева источника; 2 – экран; 3 – электростатический экран; 4 – нагреватель подложки; 5 – подложка; 6 – держатель подложки; 7 – зона расплава; 8 – кремниевый кристалл; 9 – водоохлаждаемая подставка

Менее производительным является метод сублимации, при котором испарение кремния на подложку производят путем прямого разогрева электрическим током прямоугольной пластины кремния, отстоящей от подложки на несколько сотен микрон. Получаемые пленки имеют большие удельные сопротивления. На рис. 6.5 приведена зависимость скорости испарения кремния от температуры.

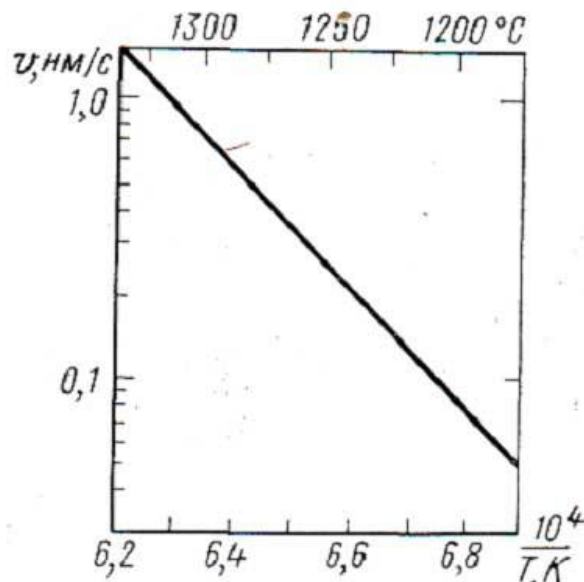


Рис. 6.5. Зависимость скорости испарения кремния от температуры

1.2. Легирование в процессе эпитаксии

Для введения легирующей примеси в выращиваемую пленку используют следующие способы:

- 1) легирование с помощью примесей, растворенных в кристалле полупроводника (источнике);
- 2) легирование из паров примеси, находящейся в элементарной форме;
- 3) легирование из газов и паров соединений, содержащих примесные элементы.

Первый способ позволяет изменять тип и концентрацию примеси в очень широком диапазоне. Важным является то, что можно использовать летучие примеси – фосфор, мышьяк, сурьму. Атомы примеси не могут быть перенесены из источника до тех пор, пока не испарятся окружающие их атомы полупроводника. Таким образом, можно точно регулировать концентрацию примеси.

Введение примесей в состав газообразных веществ производят с использованием фосфина PH_3 , арсина AsH_3 , диборана B_2H_6 и некоторых других газов, добавляемых в водород или инертные газы в концентрациях от $5 \cdot 10^{-4}$ до 1%. Наиболее широко в методе открытой трубы применяют легирование из паров трехбромистого бора BBr_3 , треххлористого фосфора PCl_3 или оксихлорида фосфора POCl_3 , добавляемых в сосуд с SiCl_4 , либо испаряемых из отдельных резервуаров.

Наличие атомов примеси, адсорбированных на растущей поверхности пленки, влияет на активность центров кристаллизации. Акцепторные примеси почти не сказываются на скорости роста пленки, донорные уменьшают ее.

Рост пленки сопровождается перераспределением атомов примеси из подложки в пленку. Уровень легирования и распределение концентрации

примеси в эпитаксиальной пленке определяются не только содержанием примесей в окружающем газе, но также перераспределением примеси в приповерхностной области подложки, на которой растет пленка. Процесс легирования пленки за счет диффузии атомов примеси из подложки называют автолегированием. Распределение концентрации примеси на границе пленка – подложка описывается выражением:

$$C_x = C_0 \exp(-x/L) \pm C_e [1 - \exp(-x/L)] \quad (6.8)$$

где C_0 – концентрация примеси на границе пленки с подложкой; C_e – равновесная установившаяся концентрация примеси в эпитаксиальном слое; L – параметр наклона функции распределения, зависящий от коэффициента и времени диффузии.

Первый член правой части выражения (6.8) характеризует зависимость легирования пленки примесью подложки, второй член – примесью газовой фазы. Если производится выращивание пленки с электропроводностью n – типа на подложке n – типа или пленки p – типа на подложке p – типа, то результирующая концентрация определяется суммой обоих членов. Если пленка и подложка с разным типом электропроводности, то результирующая концентрация определяется их разностью. Соответствующие кривые распределения примесей показаны на рис. 6.6. Положение p – n – перехода можно вычислить, логарифмируя выражение (6.4) с учетом условия $C_x = 0$ при $x=x_j$:

$$x_j = L \ln(C_0 / C_e + 1) \quad (6.9)$$

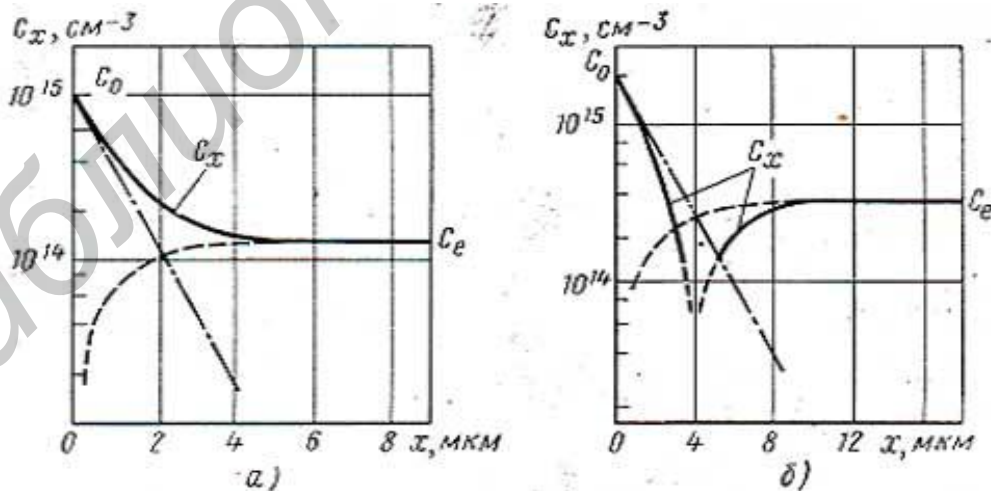


Рис. 6.6. Распределение концентрации примеси в эпитаксиальном слое при создании $n - n^+$ (а) и $p - n$ переходов (б)

1.3. Дефекты эпитаксиальных пленок

Эпитаксиальные пленки имеют кристаллические дефекты двух типов: дислокации и дефекты упаковки.

Дислокации. Так как при эпитаксиальном росте пленки воспроизводится морфология подложки, то дислокации, имевшиеся в подложке (пластине полупроводника), переходят в пленку.

Однако почти во всех случаях плотность дислокаций в пленке превышает плотность дислокаций в подложке. При этом плотность дислокаций возрастает в направлении от поверхности пленки к границе раздела пленка – подложка. Область вблизи раздела характеризуется повышенной плотностью дислокаций, в том числе инородных включений, например хлоридов.

Образование несовершенной промежуточной области с большой плотностью дислокаций зависит от состояния поверхности подложки. Для получения пленок с малой плотностью дислокаций требуется тщательная механическая обработка, очистка поверхности пластин и обработка водородом.

Дефекты упаковки встречаются в форме равносторонних треугольников и прямых линий; иногда образуются более сложные формы: комбинации треугольников и линий. В конце каждой линии присутствует линия дислокации.

Форма дефектов упаковки зависит от кристаллографической ориентации эпитаксиального слоя. В слоях, выращенных на подложках, которые ориентированы по плоскости (111), дефекты упаковки могут быть в виде равносторонних треугольников, незамкнутых треугольников, отдельных прямых линий, параллельных сторонам этих треугольников, или более сложных геометрических фигур, образованных в результате пересечения двух или более дефектов упаковки (рис. 6.7). На слоях с ориентацией (110) возникают равнобедренные треугольники, на плоскостях (100) – квадраты.

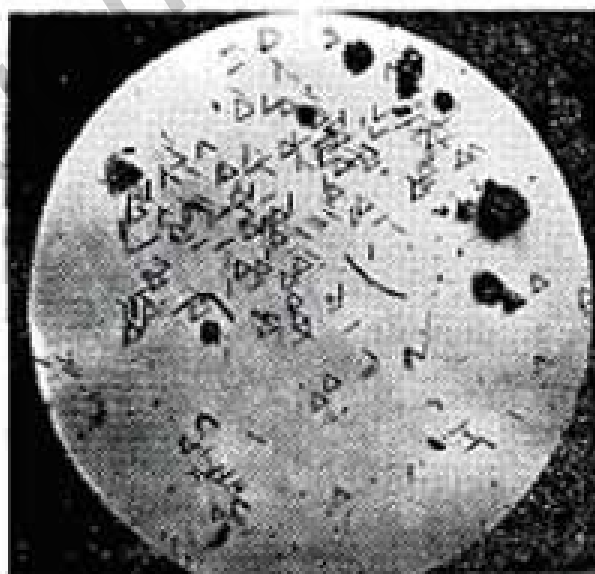


Рис. 6.7. Дефекты упаковки на плоскости (111)

Рост кристаллической пленки состоит из зарождения центров кристаллизации, перемещения атомов к этим центрам, бокового роста и соединения отдельных плоских образований в единое целое. Если какой –

либо атом выдвигается из своего слоя, то он служит исходной точкой развития дефекта, ибо окружающие его атомы в процессе последующего роста также будут сдвинуты относительно моноатомных слоев всего объема.

Рис. 6.8 иллюстрирует образование трехмерных геометрических дефектов. Рост дефекта начинается в точке N , расположенной на подложке или вблизи от нее, и развивается вдоль трех наклонных плоскостей (111).

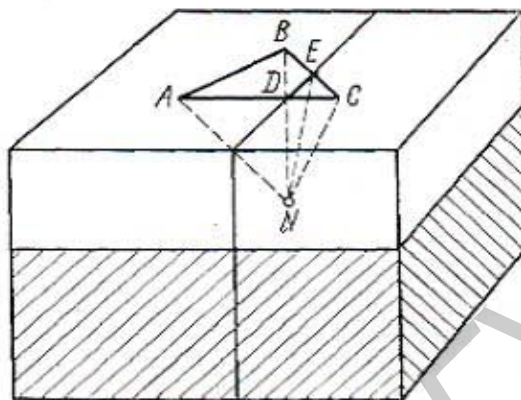


Рис. 6.8. Дефекты упаковки: линейные (DE) и треугольные (ABC), N – зародышевая точка образования дефектов

На поверхности пленки появляется треугольник, а на поперечном срезе – V -образная фигура. Линейный дефект также начинается в точке N , но развивается только вдоль одной из трех плоскостей (111). Более сложные формы образуются в процессе взаимодействия нескольких дефектов.

Большинство дефектов возникает на поверхности раздела пленка – подложка. Это обусловлено тем, что поверхность подложки обычно несовершенна: на ней встречаются царапины от абразива, примесные атомы, остатки окисной пленки и др. Возникающие дефекты с развитием эпитаксиального слоя увеличивают свои размеры пропорционально его толщине. Часть подобных дефектов образуется в процессе роста пленки внутри слоя. Зародышем в этом случае может стать, например, примесный атом, адсорбированный из газового потока и осевший в неправильной последовательности. На поверхности выращенной пленки такой дефект будет выглядеть уменьшенным, но иметь ориентацию, подобную ориентации всех других дефектов.

Установлено, что на хорошо обработанных подложках чаще встречаются дефекты в форме треугольников, так как боковое развитие центров кристаллизации происходит более правильно. Плохо обработанным подложкам сопутствуют линейные дефекты и дефекты в форме треугольников, обнаруживаемых с помощью оптического микроскопа без предварительной химической обработки. Если пластины подвергались только механической обработке (полировке), то плотность дефектов упаковки составляет до 10^7 см⁻². Наличие в газовой смеси кислорода с концентрацией около $7,5 \cdot 10^{-3}$ % приводит к образованию на химически травленых подложках до 10^5 дефектов упаковки на 1 см², а наличие паров воды с концентрацией около $1 - 10^{-3}$ % обуславливает образование

поликристаллических пленок. Наилучшие результаты дает для кремния газовое травление в хлористом водороде – плотность дефектов не превышает 10^2 см^{-2} .

Кроме дислокаций и дефектов упаковки в эпитаксиальных пленках присутствуют и другие дефекты роста: усеченные пирамиды, прорастающие от подложки и возвышающиеся над поверхностью пленки; дефекты поверхности в виде пустот, выступов и др. Пирамиды роста объясняют включениями карбида кремния. Некоторые исследователи наблюдали на поверхности пленок фигуры в виде лежащего «гвоздя», шляпка которого являлась примесь из жидкой фазы, перемещавшаяся по поверхности пленки в поле градиента температуры.

1.4. Методы контроля толщины эпитаксиальных слоев

Среди методов контроля толщины эпитаксиальных слоев известны следующие: метод декорирования сферического шлифа, косого шлифа или скола, метод ИК – спектроскопии, по размеру эпитаксиального дефекта упаковки, зародившегося на поверхности подложки, метод эллипсометрии. Выбор метода контроля определяется целью контроля и возможностями самого метода. В условиях промышленного производства обязательным требованием является также скорость измерения и отсутствие необходимости специальной подготовки образца, поэтому широкое применение получили метод декорирования сферического шлифа и ИК – спектроскопии.

Граница эпитаксиальный слой – подложка не является резкой, поэтому понятие «толщина эпитаксиального слоя» – это величина условная и результаты измерений ее разными методами могут быть различны.

На рис. 6.9 представлен обобщенный профиль легирования эпитаксиального слоя. Так, толщина, измеренная методом сферического шлифа несколько меньше, чем толщина, измеренная методом ИК – спектроскопии. Граница эпитаксиальный слой – подложка в случае использования ИК – спектроскопии определяется как оптическая, так как отражение ИК лучей происходит в области концентрации примеси $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и в толщину эпитаксиального слоя включается область переходного слоя («хвост» автолегирования). В случае метода сферического шлифа декорируется травителем только область с высоким содержанием примеси, т. е. без переходного слоя. В случае использования метода сферического шлифа наблюдается так называемая электрохимическая граница.

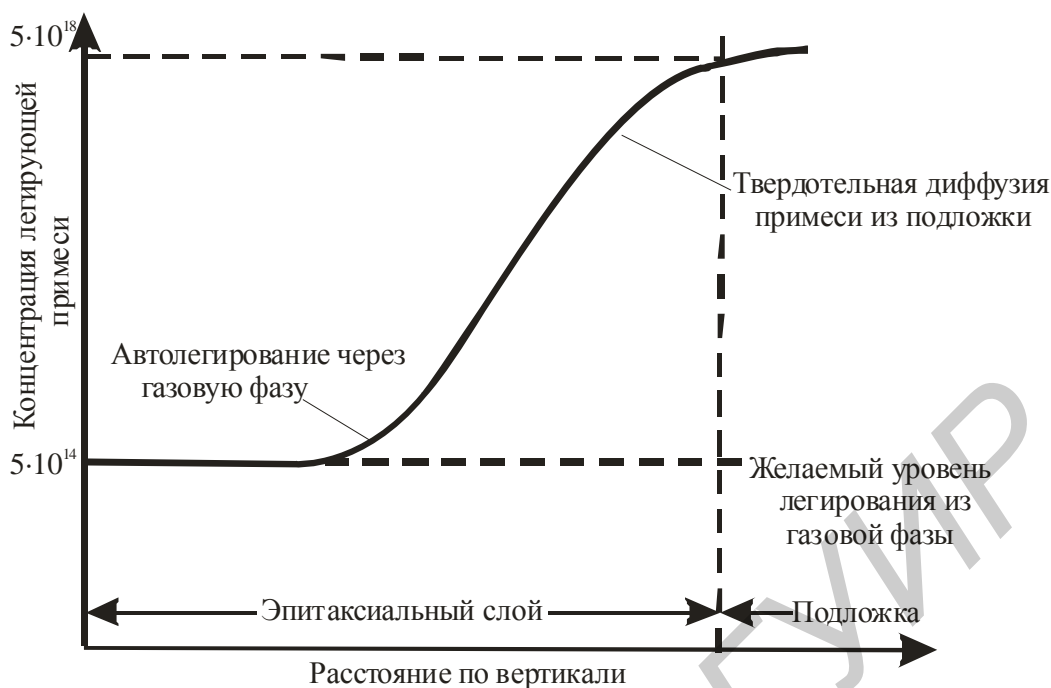


Рис. 6.9. Профиль распределения примеси при эпитаксии

Метод сферического шлифа остается наиболее универсальным для измерения толщины эпитаксиальных и диффузионных слоев. Он очень удобен для исследования сложных эпитаксиальных структур со скрытыми диффузионными слоями, так как позволяет наблюдать взаимное расположение диффузионных слоев, границы слоя в $p - p^+$ и $n - n^+$ структурах. Метод сферического шлифа – метод, разрушающий структуру, практически он применяется в случаях, если использование неразрушающих методов невозможно. При контроле параметров эпитаксиальных слоев он используется для определения толщины эпитаксиального слоя для расчета удельного сопротивления на пластинах – спутниках и определения толщины эпитаксиальных слоев на структурах с двумя скрытыми слоями.

Сущность МСШ состоит в следующем: на структуре с помощью вращающегося шарика и состава на основе алмазной пасты и часового масла изготавливается сферическая лунка. Травителем декорируют границы раздела слоев. Для декорирования шлифов используют те или иные способы химического окрашивания или осаждения металлов, действующих на область одного типа проводимости или чувствительны к уровню легирования. Электрохимические потенциалы кремния n и p типов проводимости, а также кремния одного типа с различной концентрацией легирующей примеси различны благодаря этому в кремнии n и p типов химические реакции протекают с разными скоростями. Жестким является требование, согласно которому реакция должна протекать довольно быстро по одну сторону перехода и медленно или не протекать вообще по другую сторону. В таком случае граница между прореагировавшим кремнием и не вступившим в реакцию укажет положение слоев.

Существуют следующие механизмы декорирования шлифов, применяемые для определения толщины эпитаксиальных слоев:

- 1) электрохимическое осаждение металла с замещением;
- 2) окислительно – восстановительная реакция.

Электрохимическое осаждение металла с замещением имеет следующий механизм: электрохимический потенциал кремния таков, что он замещает ионы металлов типа *Cu*, *Ag*, *Au* (кремний стоит в ряду активности впереди этих элементов). Замещение селективно, поскольку электрохимический потенциал кремния зависит от типа проводимости. Осаждение происходит сначала на кремнии *n* – типа, а затем, если возможно, на кремнии *p* – типа. Методика состоит в наблюдении осаждения до тех пор, пока граница слоев не будет достаточно хорошо выявлена, после чего процесс останавливают промывкой. Осаждение происходит лучше, если в растворе присутствует небольшое количество плавиковой кислоты, которая растворяет первоначально образовавшийся анодный окисел.

При измерении толщины эпитаксиальных слоев данный механизм используется при выявлении границы *p* – *n* перехода на пластинах – спутниках с содержанием фосфора в эпитаксиальном слое на уровне содержания бора в подложке. Используется травитель следующего состава: 5 г сернокислой меди; 40 мл деионизованной воды; 10 – 25 капель плавиковой кислоты.

Для использования механизма декорирования шлифов на основе окислительно – восстановительных реакций необходимо, чтобы реакция была анизотропной, т. е. контролирующей стадией процесса являлась бы непосредственно сама химическая реакция окисления. Реакция окисления очень чувствительна к уровню легирования. Для декорирования границ *n* – *n*⁺ и *p* – *p*⁺ применяются следующие травители на основе окислителей *CrO*₃ и азотной кислоты: 1 часть *CrO*₃; 2 части *HNO*₃; 2 части *H*₂*O*; 6 частей уксусной кислоты; 1 части *HF*.

Происходящие при травлении реакции не вполне выяснены, но, по утверждениям некоторых исследователей, образуется пленка, состоящая либо из окиси Si, либо из гидрида Si, либо из *H*₂*SiF*₆. Скорость реакции определяется уровнем легирования и типом проводимости кремния.

Поскольку ни один из окрашивающих растворов не удовлетворяет всем требованиям, существует большое количество растворов и методик. Осаждение металлов с замещением, вообще говоря, неудовлетворительно из – за плохой адгезии пленок к полированным поверхностям. Очень распространенным является раствор типа *HNO*₃ – *HF*, хорошо окрашивающий полированные поверхности обеспечивающий достаточный контраст с неокрашенными участками.

Схематически изобразив лунку с декорированным слоем (рис. 6.10), можно посредством геометрических расчетов найти связь между хордой, касательной к границе раздела слоев и толщиной слоя.

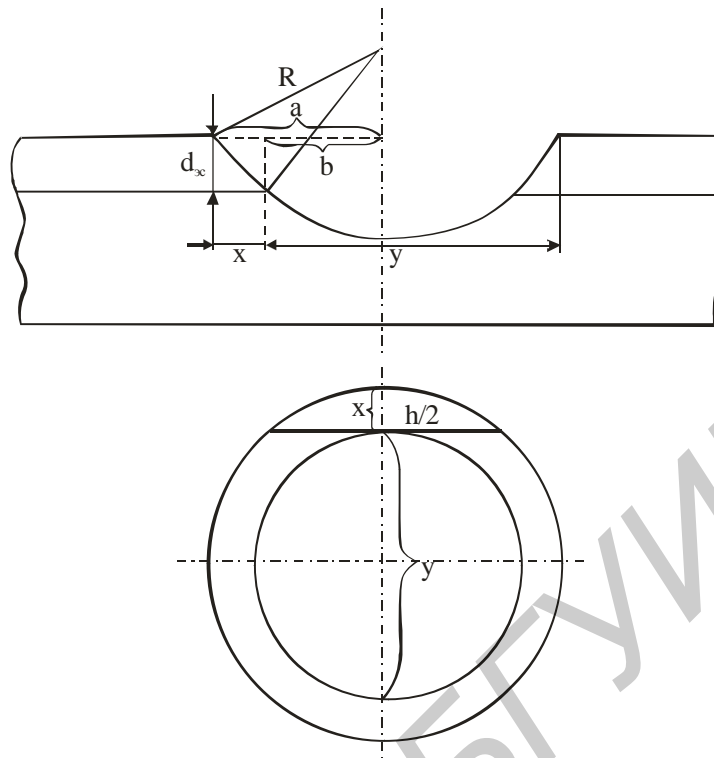


Рис. 6.10. Декорированный сферический шлиф: h – хорда, касательная к границе слоев; R – радиус шара

$$\begin{cases} x = a - b \\ x = a + b \end{cases} \quad (6.10)$$

$$xy = a^2 - b^2 \quad (6.11)$$

$$d = \sqrt{R^2 - b^2} - \sqrt{R^2 - a^2} = R \left(\sqrt{1 - \frac{b^2}{R^2}} - \sqrt{1 - \frac{a^2}{R^2}} \right) \quad (6.12)$$

$$a, b \ll R \quad (6.13)$$

$$d \approx \frac{xy}{D} \quad (6.14)$$

$$h^2 = 4xy \quad (6.15)$$

$$\left(\frac{h}{2}\right)^2 - \left(\frac{y-x}{2}\right)^2 = \left(\frac{y-x}{2} + x\right)^2 \quad (6.16)$$

$$\left(\frac{h}{2}\right)^2 = \left(\frac{y+x}{2}\right)^2 - \left(\frac{y-x}{2}\right)^2 = xy \quad (6.17)$$

$$d = \frac{xy}{D} = \frac{h^2}{4D} \quad (6.18)$$

Конечная формула расчет толщины эпитаксиальных слоев следующая:

$$d_{эс} = h^2 / 8R \quad (6.19)$$

Хотя метод сферического шлифа универсален, одновременно имеют место и ограничения по его применению: чувствительность его резко зависит от разности концентраций легирующей примеси в соседних участках особенно при выявлении границ однотипных слоев в структурах $n - n^+$ и $p - p^+$. Декорирование очень критично и с точки зрения техники, так как зависит от условий эксперимента, а именно: качества поверхности шлифа, температуры окружающей среды, размера декорируемых областей, метода нанесения, длительности воздействия и химического состава травителей. Кроме того, в случае неоднородно легированных слоев различные декорирующие травители дают несовпадающие результаты толщины для одной структуры, часто заниженные, так как декорируется только область с высокой концентрацией примеси.

Несмотря на широкое использование метода сферического шлифа, данных о погрешности этого метода в литературе мало. Погрешность метода включает в себя погрешность расчетной формулы, погрешность измерения хорды, погрешность из – за несферичности шлифа. Максимальная погрешность расчетной формулы 0,17% (для эпитаксиальных слоев толщиной 50 мкм), и она увеличивается с увеличением $d_{эс}$. Погрешность измерения хорды связана с неточностью окулярного микрометра, нечеткостью границы выхода шлифа на поверхность и границы эпитаксиальный слой – подложка. Четкость границы эпитаксиальный слой – подложка, в свою очередь, зависит от качества поверхности лунки и способа выявления границы. Для уменьшения этого вклада погрешности необходимо, чтобы толщина измеряемого слоя составляла бы 3/4 от глубины лунки.

Несферичность шлифа возникает из – за биения шарика в процессе шлифовки, смещения пластины и несферичности самого шарика.

Результирующая погрешность, полученная из экспериментальных данных, составляет для эпитаксиальных слоев толщиной 8 мкм 5% и значительно снижается с увеличением толщины (1,5% для 80 мкм).

Метод ИК – спектроскопии получил очень широкое распространение. Он является косвенным, так как толщина эпитаксиального слоя вычисляется с помощью формул по измеренным косвенным параметрам. Данный метод основан на том факте, что слабо легированный кремний прозрачен в области ближнего ИК – излучения (5 – 50 мкм), а сильнолегированный ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) непрозрачен.

Этот метод используется, если оптические константы подложки сильно отличаются от соответствующих констант эпитаксиального слоя. Надежные данные получают при степени легирования, соответствующей сопротивлению эпитаксиального слоя более 0,09 Ом·см и подложки менее 0,05 Ом·см. С увеличением концентрации примеси в слое возрастает

поглощение ИК – лучей, тогда как с уменьшением концентрации примеси в подложке расчет пропускание ею лучей и уменьшается их отражение на границе.

Отражение ИК лучей происходит не только от поверхности пластины, но и от границы раздела эпитаксиальный слой – подложка вследствие различия показателей преломления подложки и слоя, в результате чего возникают интерференционные полосы (рис. 6.11.).

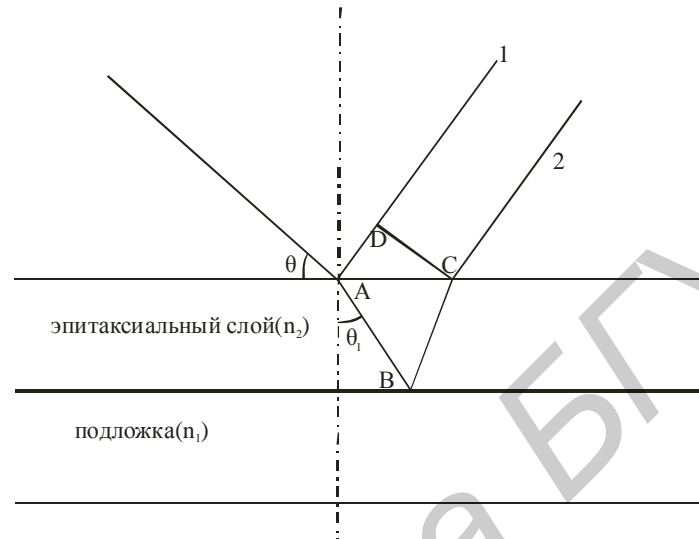


Рис. 6.11. Отражение светового луча от эпитаксиальной структуры

Луч света падает на поверхность структуры в точке А под углом θ к нормали. Часть падающего пучка света отражается от поверхности, образуя отраженный луч 1, а оставшаяся часть пучка проникает в эпитаксиальный слой и, распространяясь под углом преломления θ_1 , достигает поверхности раздела подложка – эпитаксиальный слой в точке В. После отражения от подложки прошедший луч света преломляется в точке С на поверхности эпитаксиального слоя и распространяется дальше параллельно лучу 1. Если длина волны падающего излучения изменяется, то в результате сложения колебаний лучей 1 и 2 будут наблюдаться максимумы и минимумы интенсивности отраженного света, соответствующие тем длинам волн, для которых разность фаз между лучами 1 и 2 равна целому числу полуволн.

Результирующая разность фаз определяется величинами фазовых сдвигов, которые испытывают лучи света при отражении от эпитаксиальной структуры и оптической разностью хода между лучами 1 и 2. Разность хода лучей задается формулой :

$$\Delta = n_1 \cdot (AB + BC) - AD = 2d_{эс} \cdot n_1 \cdot \cos q_1 \quad (6.20)$$

где n_1 – показатель преломления слоя; $d_{эс}$ – толщина слоя ; θ_1 – угол преломления луча.

В точке A происходит изменение фазы отраженного луча на λ или $1/2$, в то время как прошедший в слой луч оказывается синфазным по отношению к падающему. В точке B отраженный луч также изменяет фазу от 0 до θ в зависимости от оптических характеристик поверхности раздела, в том случае, если эпитаксиальный слой легирован слабо, а подложка сильно, изменение фазы в точке B незначительно.

При изменении длины волны разность хода остается постоянной. В каждом из последовательных максимумов порядок максимума возрастает на 1. Если регистрируется длина волны, соответствующая максимуму, то для всех максимумов

$$\Delta = (P + k + P^6) \cdot I_k \quad (6.21)$$

где Δ – разность хода лучей; $(P + k)$ – порядок k – го максимума; I_k – длина волны, соответствующая k – му максимуму, тогда

$$\Delta = \frac{(\sum k I_k) \sum I_k^2 - (\sum I_k) \sum k \cdot I_k^2}{m \sum I_k^2 - (\sum I_k)^2} \quad (6.22)$$

$$d_{\text{эс}} = \frac{\Delta}{2n_1 \cos q_1} \quad (6.23)$$

где Δ – среднеквадратичное значение Δ ; m – число измерений; \sum – сумма всех значений k ; n_1 – показатель преломления слоя.

Нижний предел измеряемых толщин определяется условиями возникновения на интерференционной картине хотя бы двух экстремумов. Так как эпитаксиальный слой должен быть однородным, а межслойная граница достаточно резкой, то на практике метод ИК – интерференции используется для измерения толщины слоев более 1 мкм. Наибольшее значение измеряемой толщины обычно не превышает 80 мкм, оно ограничивается ухудшением качества интерференционной картины вследствие недостаточной параллельности светового луча. Абсолютная случайная погрешность измерений для эпитаксиальных структур кремния при толщине слоев более 5 мкм составляет $0,005d + 0,25$ мкм для структур $n - n^+$ типа и $0,025d + 0,25$ мкм для структур $p - p^+$ типа.

Наряду с традиционными методами ИК – интерференции для измерения толщины эпитаксиальных слоев получил распространение метод Фурье – спектрометрии, который обеспечивает более высокую точность измерений. Он основан на использовании интерферометра Майкельсона. Отраженный от эпитаксиальной структуры световой луч широкого спектрального состава анализируется с помощью интерферометра Майкельсона, состоящего из полупрозрачного светоделителя и двух плоских зеркал. Одно из зеркал интерферометра совершает возвратно – поступательное движение около некоторого среднего положения, для которого оптическая длина пути в

обоих плечам одинакова. Перемещение зеркала на некоторое расстояние создает сдвиг фаз между лучами, прошедшими через два плеча интерферометра. Зависимость интенсивности двух интерферирующих лучей на выходе прибора, которая регистрируется фотоприемником, от перемещения зеркала, и, следовательно, от сдвига фаз называют интерферограммой. Интерферограмма представляет собой суперпозицию кривых, соответствующих каждой из присутствующих в спектре источника света частот. Среднему положению движущегося зеркала на интерферограмме соответствует максимум центральной серии ее пиков. Когда вводимая движущимся зеркалом разность фаз компенсирует разность фаз, создаваемую при отражении от эпитаксиальной структуры, возникает максимум сигнала сопутствующих боковых серий пиков интерферограммы. Толщину эпитаксиального слоя определяют с помощью интерферограммы по координатам X_{max} сопутствующих боковых пиков относительно центрального:

$$d_{эс} = \frac{X_{max}}{n} \quad (6.24)$$

где X_{max} – координаты пика; n – коэффициент преломления кремния.

Толщина эпитаксиального слоя может быть определена автоматически при использовании ЭВМ, которая выполняет Фурье – преобразования и вычисляет толщину. На основании принципов Фурье – спектрометрии работает используемый в производстве Фурье – спектрометр. Для управления процессом получения интерферограммы и обработки полученных данных спектрометр сопряжен с IBM совместимым персональным компьютером (ПК).

В методе Фурье – спектрометрии за счет многократного сканирования подвижного зеркала можно существенно уменьшить случайную погрешность и обеспечить более высокую точность измерения толщины эпитаксиального слоя. Он позволяет измерять толщину от 1 мкм до 200 мкм с высокой точностью (0,05 мкм).

Методы измерения толщины по размеру эпитаксиального дефекта упаковки менее распространены. Метод измерения толщины по размеру эпитаксиального дефекта упаковки пригоден только для контроля эпитаксиальных слоев. В процессе роста дефекты упаковки прорастают через весь слой. Размер эпитаксиального дефекта упаковки, зародившегося на поверхности подложки, связан с толщиной слоя. После селективного травления на поверхности эпитаксиального слоя наблюдаются характерные фигуры травления, соответствующие выходу упомянутых дефектов на поверхность.

Дефект упаковки для ориентации (111) – тетраэдр с вершиной, расположенной на поверхности подложки, для ориентации (100) – параллелепипед. При этом

$$d_{эс} = 0,816L \text{ для (111)} \quad (6.25)$$

$$d_{эс} = 0,707L \text{ для (100)} \quad (6.26)$$

где $d_{эс}$ – толщина эпитаксиального слоя; L – размер стороны дефекта упаковки.

Метод косого шлифа является единственным, который позволяет с необходимой точностью определить толщину каждого слоя в многослойной структуре. Метод заключается в том, что от пластины отрезается небольшой фрагмент, сошлифовывается на специальном шлифовальнике под небольшим углом, декорируется переход и измеряется толщина с помощью калиброванного микроскопа.

Для толстослойных эпитаксиальных структур используется метод декорирования скола. Толщина эпитаксиального слоя измеряется по сколу, перпендикулярному поверхности структуры. Эллипсометрия как метод анализа основана на измерении изменения поляризации света вследствие его взаимодействия с исследуемым объектом. Изменения поляризации света зависят как от объемных свойств материала, так от структуры и свойств его поверхности. В настоящее время эллипсометрия основана главным образом на анализе отраженного света. При этом производится сравнение поляризации падающего и отраженного световых потоков.

Если отражение происходит от структуры эпитаксиальный слой – подложка, то эллипсометрические параметры зависят от толщины эпитаксиального слоя. Эллипсометрические параметры для необходимого интервала толщины эпитаксиальных слоев рассчитываются с помощью основного уравнения эллипсометрии и результаты отображают графически в виде номограмм в координатах эллипсометрических параметров. Таким образом, для экспериментально измеренных эллипсометрических параметров на номограмме соответствует точка, соответствующая некоторому значению толщины эпитаксиального слоя.

1.5. Порядок проведения измерений толщины эпитаксиального слоя.

Для измерения толщины методом сферического шлифа на участке эпитаксии используется следующее оборудование:

- для изготовления шлифа установка для измерения толщины полупроводниковых слоев методом сферического шлифа ЕТМ2.600.047;
- для декорирования шлифа травителя на основе меди, окиси хрома, азотной кислоты – для измерения длины хорды с целью последующего расчета толщины эпитаксиального слоя микроскоп ММУ – 3 с окуляром с микрометрической шкалой.

Данным методом проводится измерение толщины эпитаксиальных слоев на структурах – спутниках $n - p$ типа, однослойных структурах $p - p^+$ – типа на подложке КДБ 003, структурах со скрытыми слоями.

На столик установки ЕТМ2.600.047 помещается структура рабочей поверхностью вверх, фиксируется при помощи вакуумной присоски и приводится в контакт со сферическим металлическим шариком диаметром 30мм с нанесенным на нем полирующим составом (алмазная паста и часовое масло). Шарик включением тумблера приводится в движение на 15 – 60 сек, в результате чего на поверхности структуры образуется лунка. Остатки пасты и масла снимаются с помощью ваты, смоченной в этиловом спирте. Структура помещается на предметный столик: микроскопа МБС – 9 для проведения декорирования шлифа. На шлиф с помощью фторопластовой палочки помещается капля хромового травителя и выдерживается до появления границы раздела слоев (20 – 40 сек.), затем остатки травителя удаляются водой.

Структура с изготовленным сферическим шлифом помещается на столик микроскопа ММУ – 3 так, чтобы в поле зрения микроскопа был сферический шлиф. Установить микрометрическую окулярную шкалу микроскопа касательно границе раздела слоев в соответствии с рис. 6.12.

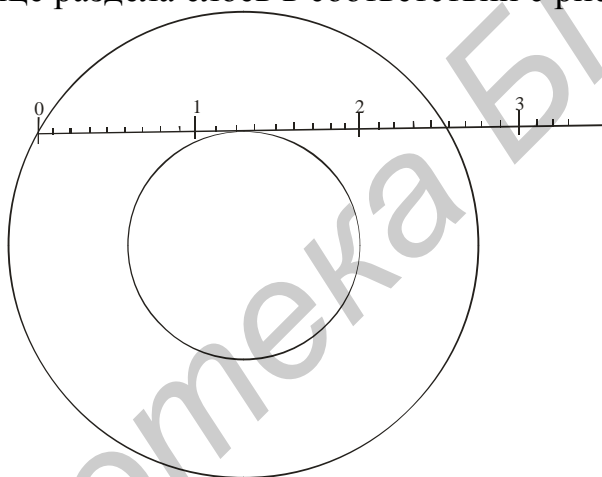


Рис. 6.12. Схема установки образца

Измерить длину хорды в делениях шкалы микроскопа. Определить толщину слоя в данной точке по формуле:

$$d_{\text{эс}} = \frac{(n \cdot H)^2}{8R \cdot 10^3} \quad (6.27)$$

где $d_{\text{эс}}$ – толщина эпитаксиального слоя, мкм; n – цена деления шкалы микроскопа, мкм; H – длина хорды в делениях шкалы микроскопа; R – радиус шарика, мм.

Для упрощения расчетов для определения толщины пользуются заранее рассчитанной таблицей, которая является индивидуальной для определенного микроскопа и окуляра.

Для измерения толщины эпитаксиальных слоев **методом Фурье – спектрометрии** на участке эпитаксии используется ИК Фурье – спектрометр ФСМ.1201.П.СПБИ.001.00.000.ООРЭ. Управление работой

интерферометра, сбор и обработка результатов измерений проводится с использованием ЭВМ.

Перед выполнением измерений необходимо провести проверку спектрометра по контрольным образцам с известными значениями толщины эпитаксиального слоя и величины максимума излучения с целью оценки возможности проведения измерений (обеспечения необходимой погрешности 1 мкм для толщины до 10 мкм и 1% для слоев толщиной свыше 10 мкм).

Данным методом проводится измерение толщины эпитаксиального слоя на однослойных структурах $n - n^+$ и $p - p^+$ типов на подложке 100 КЭС 0,01 – 0,015 и КДБ 0,005. На рабочий стол приставки помещается структура рабочей стороной вверх. В рабочей программе на ЭВМ задаются параметры измерения (диаметр структуры, толщина, маршрут измерения, т.е. количество и расположение контрольных точек, количество сканирований подвижного зеркала (сканов)). Запустив рабочую программу, проводится измерение толщины эпитаксиального слоя. На экране монитора появится интерферограмма и автоматически рассчитанное по ней значение толщины эпитаксиального слоя (если контрольных точек несколько, то привязка значения толщины к расположению точки (ее координатам)).

1.6. Статистическая обработка результатов измерений толщины эпитаксиальных слоев

Проведение статистической обработки результатов измерений толщины эпитаксиальных слоев необходимо для проведения статистического регулирования технологического процесса, что означает корректирование значений параметров технологического процесса (скорости наращивания эпитаксиального слоя, времени наращивания, температуры в реакционной камере во время процесса) по результатам выборочного контроля контролируемых параметров, в частности, толщины эпитаксиального слоя, проводимое для обеспечения требуемого уровня качества.

Для оценки состояния технологического процесса (налаженности, управляемости) используют коэффициенты C_p и C_{pk} . Коэффициент C_p характеризует потенциальную воспроизводимость (потенциальный запас точности техпроцесса, запас по контролируемому параметру, определяющий вероятность появления брака в процессе проведения операции).

Коэффициент C_{pk} характеризует реальную воспроизводимость (реальный запас точности) техпроцесса, который учитывает степень смещения среднего значения контролируемого параметра от его номинального значения. В таблице показано, как оценить настройку техпроцесса по коэффициентам C_p и C_{pk} .

C_p, C_{pk}	Управляемость техпроцессом
$C_p, C_{pk} > 1,67$	Более чем достаточная
$1,33 < C_p, C_{pk} < 1,67$	Достаточная
$1,0 < C_p, C_{pk} < 1,33$	Удовлетворительная

$0,67 < C_p, C_{pk} < 1,00$	Недостаточная
$C_p, C_{pk} < 0,67$	Совершенно недостаточная

C_p вычисляют по формуле:

$$C_p = \frac{\Delta}{3d} \quad (6.28)$$

где Δ – половина поля допуска толщины эпитаксиального слоя; d – среднеквадратичное отклонение толщины эпитаксиального слоя.

$$\Delta = \frac{\text{верхняя граница допуска}}{2} \quad (6.29)$$

$$d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - d_{cb})^2} \quad (6.30)$$

где n – общее количество измерений (должно быть не менее 25); d_i – значение толщины для i -го измерения; d_{cb} – среднее значение толщины;

$$d_{cb} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (6.31)$$

C_{pk} : вычисляют по формуле:

$$C_{pk} = \frac{\Delta - |d_H - d_{cp}|}{3d} \quad (6.32)$$

$$d_H = \frac{\text{верхняя граница допуска} + \text{нижняя граница допуска}}{2} \quad (6.33)$$

Для расчета коэффициентов потенциальной и реальной воспроизводимости процесса целесообразно использовать средства вычислительной техники.

1.7. Измерение удельного сопротивления эпитаксиальных пленок

Если пленка образует на границе с подложкой $p-n$ – переход, то измерение удельного сопротивления не составляет особых трудностей и производится четырехзондовым методом или его упрощенной модификацией – двухзондовым методом. Для контроля пленок типа $n-n^+$ и $p-p^+$ применяют трехзондовый метод.

Трехзондовый метод. Схема этого метода показана на рис. 6.13. Три зонда 1, 2, 3 служат для наблюдения на экране характериографа 4 характеристики пробоя точечного контакта. Измерив напряжение пробоя, по ранее построенной экспериментальной кривой зависимости пробивного

напряжения такой же структуры от удельного сопротивления полупроводника находят удельное сопротивление пленки.

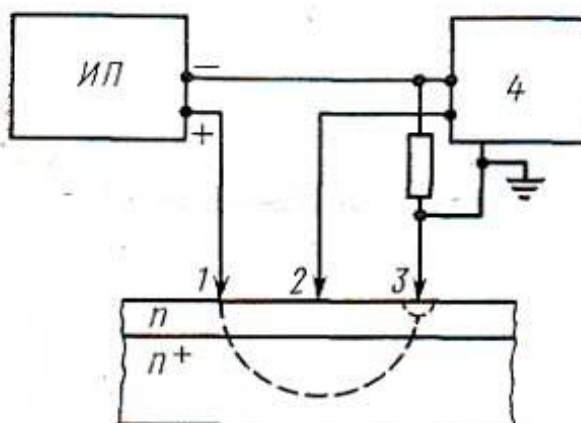


Рис. 6.13. Схема измерения удельного сопротивления пленки трехзондовым методом

1.8. Измерение распределения концентрации примеси

Распределение концентрации примеси в эпитаксиальной пленке определяют путем последовательного удаления тонких слоев и измерения проводимости с помощью четырехзондового метода.

При использовании трехзондового метода нет необходимости знать толщину пленки, но она должна быть больше ширины области объемного заряда при пробое, иначе одно и то же напряжение пробоя может соответствовать различным сочетаниям сопротивления и толщины эпитаксиальной пленки.

Точность измерения $\pm 10\%$ гарантируется для удельных сопротивлений от 0,1 до 1,0 Ом·см для пленок противоположного с подложкой типа электропроводности, или измерения вольт – фарадной характеристики для пленок одного типа электропроводности. В выращенной эпитаксиальной пленке на разной глубине сплавлением или диффузией создают $p-n$ переходы. Толщину базовой области, однако, чаще изменяют не изменением режима создания перехода, а за счет удаления части эпитаксиального слоя. К $p-n$ переходу прикладывают небольшое обратное смещение и с помощью мостовой схемы измеряют емкость. Затем эталонную емкость моста изменяют примерно на 1% и, изменяя смещение, добиваются баланса моста. Эта манипуляция позволяет определить наклон вольт – фарадной характеристики $\Delta C / \Delta U = dC / dU$ при данных C и U . На основании формулы Шоттки можно записать:

$$N = \frac{C^3}{ee} \left(-\frac{1}{dC/dU} \right), \quad (6.34)$$

$$w = e / C_n, \quad (6.35)$$

где N — концентрация примеси в пленке; C_g — удельная емкость перехода; W — ширина области объемного заряда; ϵ — абсолютная диэлектрическая проницаемость; e — заряд электрона.

На рис. 6.14 приведена номограмма для кремния, построенная на основании выражений (6.33) и (6.34). По известным C_g , dC/dU с ее помощью можно определить концентрацию примеси и ширину области W , что необходимо для контроля возможной погрешности.

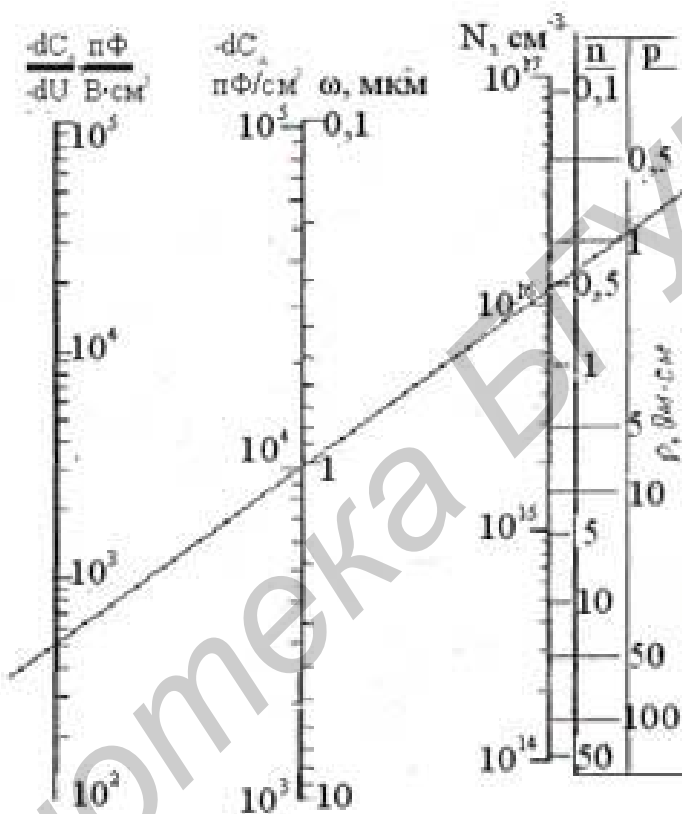


Рис. 6.14. Номограмма для определения концентрации примеси на основании вольт – фарадной характеристики $p - n$ перехода

2. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться с методами и технологией формирования эпитаксиальных слоев, принципом работы и составом установки эпитаксиального наращивания, методами контроля параметров эпитаксиальных слоев.

2. Под руководством инженера провести процесс нанесения эпитаксиального слоя, зафиксировать технологические режимы.

3. Под руководством инженера провести измерение толщины эпитаксиального слоя в 9 точках на пластине с помощью ИК – Фурье спектрометра ФСМ 1201 П. Оценить воспроизводимость результатов.

4. Под руководством инженера произвести измерение толщины эпитаксиального слоя методом сферического шлифа. Проанализировать полученные данные, сопоставить режимы технологического процесса нанесения и параметры эпитаксиальных слоев.

5. Оформить отчет по лабораторной работе.

3. Содержание отчета.

1. Цель работы.
2. Характеристика методов формирования эпитаксиальных слоев.
3. Схема установки нанесения эпитаксиальных слоев, использованные режимы технологического процесса.
4. Результаты измерений удельного сопротивления эпитаксиального слоя.
5. Результаты оценки воспроизводимости технологического процесса.
6. Анализ полученных данных.
7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Чем определяется необходимость использования процесса эпитаксии в производстве полупроводниковых приборов?
2. Основные параметры эпитаксиального слоя.
3. Методы контроля толщины эпитаксиального слоя.
4. Основные требования к методам контроля толщины эпитаксиальных слоев.
5. Условия, определяющие целесообразность применения того или иного метода измерения, их ограничения.
6. Почему толщина эпитаксиальных слоев, измеренная разными методами, различна?
7. Механизмы декорирования сферического шлифа.
8. Травители, используемые для декорирования сферического шлифа.
9. Физические принципы, лежащие в основе метода ИК – спектроскопии и, в частности, Фурье – спектроскопии.
10. Методика проведения статистической обработки результатов измерений толщины эпитаксиальных слоев.

Литература

1. Павлов А. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. – М.: Высшая школа, 1987.
2. Технология СБИС. Пер. с англ. Под ред. С Зи. Т. 1 и 2. М.: Мир, 1988.
3. Моделирование процессов эпитаксии, сублимации и отжига в трехмерном приповерхностном слое кремния / А.В. Зверев, И.Г.

Неизвестный, Н.Л. Шварц, З. Ш.Яновицкая // Физика и техника полупроводников. — 2001. — Т.35, Вып. 9. — С. 1067 – 1074.

4. Ченг Л., Плог К. Молекулярно – лучевая эпитаксия. — М.: Мир, 1989. — 352 с.

5. Колосницын Б.С. Физика активных элементов интегральных схем. — Минск.: БГУИР, 1997.

Библиотека БГУИР

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплинам

“ТЕХНОЛОГИЯ ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ”, “СПЕЦИАЛЬНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ”

для студентов специальностей
«Проектирование и производство РЭС»
и «Электронно оптические системы и комплексы»

Ответственный за выпуск Н.М. Тарасевич

Подписано в печать Формат 60x84 1/16. Бумага
Гарнитура

Печать . Усл. печ. л. Уч.- изд. л. Тираж 150 экз.
Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение:
“ИНТЕГРАЛПОЛИГРАФМАШ”

Лицензия ЛП №.

Лицензия ЛВ №.

220013, Минск, Корженевского.