

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»**

Кафедра полупроводниковой электроники и наноэлектроники

ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к выполнению контрольной работы
для студентов направления
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
(профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»)
заочной формы обучения**



Воронеж 2022

УДК 621.38:620.22(07)
ББК 32.85:30.3я7

Составители:

канд. техн. наук Т. В. Свистова
канд. техн. наук Е. Ю. Плотникова

Технология материалов электронной техники: методические указания к выполнению контрольной работы для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») заочной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Т. В. Свистова, Е. Ю. Плотникова. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. – 17 с.

Методические указания включают содержание контрольной работы, варианты и порядок выполнения работы, общие пояснения к тексту заданий, библиографический список рекомендуемой литературы.

Предназначены для студентов третьего курса.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле Свистова_Плотникова_ТМЭТ_Му_контр_раб.pdf.

Табл. 6. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.38:620.22(07)
ББК 32.85:30.3я7

Рецензент – А.А. Винокуров, канд. техн. наук, доц. кафедры полупроводниковой электроники и наноэлектроники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

СОДЕРЖАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ, ВЫБОР ВАРИАНТОВ, ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ, ОБЩИЕ ПОЯСНЕНИЯ К ТЕКСТУ ЗАДАНИЙ

Для успешного развития электронной техники необходимым условием является разработка прогрессивных, экономичных, экологически чистых, безотходных технологических процессов, обеспечивающих электронную промышленность высококачественными материалами. Технологические процессы получения материалов электронной техники имеют много общего, взаимодополняющего, что делает целесообразным их совместное рассмотрение.

Уровень и темпы развития технологии материалов электронной техники неразрывно связаны с подготовкой высококвалифицированных специалистов. Роль технолога в современной промышленности значительно возросла, поскольку синтез новых материалов или совершенствование уже освоенных позволяют разрабатывать приборы с уникальными характеристиками, способные существенно повысить функциональные возможности электронной аппаратуры. Усложнение производства, а также значительное расширение номенклатуры выпускаемых материалов требуют от будущих специалистов электронной техники углубленного изучения теоретических основ технологии. Это обеспечивает успех в создании управляемой технологии, в прогнозировании состава и свойств получаемых материалов. Общее состояние микроэлектроники зависит от уровня развития почти всех отраслей промышленности, так как предъявляет высокие требования к их продукции. Требования к качеству материалов и методы его достижения позволяют выделить проблему электронного материаловедения в отдельную дисциплину, называемую «Технологией материалов электронной техники» (ТМЭТ). Многообразие процессов, используемых в технологии материалов электронной техники может быть сведено к обобщенным физико-химическим закономерностям их протекания. Теоретические основы технологии будут изложены в сочетании с описанием конкретных процессов получения материалов электронной техники.

В микроэлектронике используется большое количество различных материалов как простых, так и сложных по составу. Возрастают требования к получению материалов с точно заданным составом, большие требования предъявляются к структурному совершенствованию монокристаллов, в особенности при переходе к субмикронным размерам элементов.

Для современного производства большое значение имеет выбор оптимальных условий проведения технологического процесса для достижения наилучшего качества материалов электронной техники, максимальной производительности, минимальной себестоимости.

В основе технологии материалов электронной техники лежат физико-химические закономерности протекания отдельных процессов, включая их математическое описание.

В настоящее время технология полупроводниковых материалов включает в себя производство объемных монокристаллов, подложек и эпитаксиальных структур.

К полупроводниковым материалам предъявляются следующие требования:

- особая (полупроводниковая) чистота материала;
- монокристалличность;
- максимальное структурное совершенство и однородность состава (однородность распределения примесей и дефектов по объему);
- стехиометричность состава (для химических полупроводниковых соединений).

Целями преподавания дисциплины **«Технология материалов электронной техники»** являются изучение физико-химических процессов производства основных полупроводниковых, композиционных и диэлектрических материалов электронной техники, технологических основ подготовки сырья и обработки (механической, термической, технохимической) готовых материалов; способов управления свойствами материалов и методов получения материалов с заданными характеристиками.

В результате изучения дисциплины студент должен знать: физико-химические процессы и технологические основы подготовки сырья, производства и обработки (механической, термической, технохимической) основных полупроводниковых, композиционных и диэлектрических материалов электронной техники; способы управления свойствами материалов и методы получения материалов с заданными характеристиками.

Студенты направления подготовки бакалавров 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника» заочной формы обучения согласно рабочей программе дисциплины «Технология материалов электронной техники» выполняют одну контрольную работу. Контрольная работа состоит из 6 заданий. Каждое задание имеет 15 вариантов. ***Номер варианта задания соответствует порядковому номеру студента в списке группы. Работа, выполненная не по своему варианту, не засчитывается.***

Контрольная работа выполняется в тетради 12 листов, в соответствии с требованиями «Стандарт предприятия. Текстовые документы (курсовые работы (проекты), рефераты, отчеты по лабораторным работам, контрольные работы). Правила оформления». На обложке указывается название дисциплины, фамилия и инициалы студента, номер зачетной книжки, специальность и факультет, телефон, а также варианты выполняемых заданий. Выполнение каждого задания желательно начинать с новой страницы. При оформлении контрольной работы в тетради следует оставлять поля для замечаний преподавателя. Запрещается писать на каждой строчке тетради в клетку. Вначале пишется номер варианта, затем содержание вопроса и с красной строки - ответ. Ответы на вопросы должны быть четкими и исчерпывающими.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Задание № 1. Общая характеристика основных процессов технологии материалов электронной техники.

Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 1

Вариант	Вопрос
1	Классификация материалов электронной техники
2	Общие требования к материалам электронной техники.
3	Понятие «чистое вещество».
4	Классификация чистых веществ и реактивов
5	Технологический процесс получения материалов электронной техники
6	Периодические, непрерывные и комбинированные технологические процессы
7	Параметры технологического процесса
8	Основные виды моделей технологического процесса
9	Моделирование технологических процессов. Теория подобия.
10	Процессы массопереноса исходных реагентов в зону реакции и продуктов реакции из этой зоны.
11	Из каких этапов состоит процесс массопередачи? Почему процессы массопередачи называют диффузионными?
12	Что является движущей силой процессов массопередачи?
13	Процессы теплопереноса между зоной реакции и окружающей средой.
14	Что является движущей силой теплопередачи?
15	Основные процессы теплопередачи.

Рекомендуемая литература: [1], стр. 4 – 22, 25 - 26; [2], стр. 5 – 48; [3], стр. 7 – 18.

Число материалов, используемых в современной микроэлектронике, вряд ли можно точно определить, оно постоянно растет. Свойства изделия микроэлектроники определяются свойствами материалов, используемых при его изготовлении, и в свою очередь зависят от технологии их получения.

Таким образом, основная задача электронного материаловедения сводится к созданию технологии получения материала с заданными свойствами. Набор необходимых параметров материала зависит от его конкретного применения. Создание конкретной технологической схемы получения такого материала определяется многими факторами. Однако некоторые общие требования к материалам и технологии могут быть сформулированы.

Основные попытки классификации материалов выделяют какой-то критерий, важный для ориентации в огромном числе материалов. Так, **по функциональному назначению** все материалы подразделяют на три класса по их роли в ИС: 1) материалы для активных элементов схем; 2) материалы для пассивных элементов схем; 3) вспомогательные материалы.

К первому классу относятся материалы, в которых происходит преобразование сигнала (германий, кремний, арсенид галлия, нитрид галлия, фосфид галлия, феррит-гранат, пьезокерамика и т. п.); ко второму - материалы ИС, не преобразующие сигнал (золото, медь, алюминий, керамика, сапфир, стекла и т. п.); к третьему - материалы, не входящие в состав схемы, но участвующие в ее изготовлении (вода, кислоты, щелочи, растворители, абразивы, газы, тигельные материалы, графит, кварцевое стекло и т. п.).

Классификация **по областям применения** делит материалы на следующие группы: 1) материалы микроэлектроники; 2) материалы оптоэлектроники; 3) материалы акустоэлектроники; 4) материалы магнитоэлектроники; 5) материалы сверхпроводимости; 6) материалы СВЧ-техники и т.д.

Наиболее часто используется классификация **по поведению материала в электрическом поле**. С этой точки зрения все материалы делят на три группы: 1) металлы; 2) полупроводники; 3) диэлектрики.

В металлах и полупроводниках под действием внешнего электрического поля возникает электрический ток, обусловленный движением зарядов (электронов, дырок, ионов). В диэлектриках же внешнее электрическое поле приводит к явлению поляризации, т. е. возникновению внутреннего электрического поля, направленного навстречу внешнему. При этом проводимость металлов составляет $10^3 - 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, диэлектриков – $10^{-20} - 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, а полупроводников - промежуточные значения. Полупроводники и диэлектрики имеют сходную зонную структуру, причем условно принято считать диэлектриками такие материалы, ширина запрещенной зоны которых превышает 3 эВ.

Наиболее жесткие требования предъявляются к свойствам полупроводниковых материалов, их технология является более сложной по сравнению, например, с технологией металлов. Если сформулировать общие требования к полупроводниковым материалам, то их выполнение (даже частичное) обеспечит надлежащее качество металлов и диэлектриков.

Общие требования к материалам электронной техники. Технология полупроводникового материала должна быть построена таким образом, чтобы обеспечивалось выполнение следующих общих требований: 1) высокая чистота; 2) высокое совершенство кристаллической структуры; 3) дозированное легирование определенной примесью.

Понятие высокой чистоты для каждого материала свое, однако суммарное содержание остаточных примесей в полупроводнике должно быть не выше концентрации собственных носителей. Например, для германия она $< 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Высокое совершенство кристаллической структуры предполагает сведение к минимуму или полное исключение в монокристалле таких дефектов, как

вакансии, междоузельные атомы, дислокации, малоугловые границы, двойники, включение второй фазы, дефекты упаковки, поры, трещины и т. д. Между тем, из термодинамики известно, что при каждой температуре в реальном кристалле присутствуют вакансии и междоузельные атомы, причем их концентрации будут соответствовать термодинамически равновесным. В реальных условиях кристаллы выращиваются и охлаждаются с достаточно большими скоростями, и концентрация таких дефектов может даже превышать равновесную.

Проблема легирования сводится к введению в кристаллическую решетку полупроводника примесных атомов в определенное место, в заданной концентрации, по определенному закону распределения в объеме.

Могут возникать и дополнительные требования, например, гарантия определенного стехиометрического состава соединения и т. д.

При выборе и разработке технологической схемы получения конкретного материала, помимо указанных требований, следует обеспечить экономичность, экологическую безопасность, личную безопасность персонала, доступность сырья и т. п. Следует отметить важность проблемы контроля (входного, промежуточного, выходного) параметров материала.

Задание № 2. Физико-химические основы процессов переработки сырьевых материалов.

Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 2

Вариант	Вопрос
1	Выбор технологической схемы очистки
2	Классификация методов разделения и очистки
3	Разделение гетерогенных систем в гравитационном и центробежном полях (фильтрация, центрифугирование)
4	Разделение гетерогенных систем в электрическом поле (электрофорез)
5	Процесс разделения гетерогенных систем при помощи пористых перегородок (фильтрация, промывка осадков)
6	Разделения и очистка адсорбцией. Типы сорбентов
7	Ионный обмен, механизм ионного обмена. Иониты.
8	Хроматография. Основные хроматографические методы разделения и очистки веществ.
9	Классификация видов хроматографии.
10	Экстракционные процессы. Жидкостная экстракция. Принцип экстракционного разделения
11	Разделения и очистка сублимацией.
12	Разделения и очистка дистилляцией.
13	Разделения и очистка ректификацией. Ректификационная колонна.

Вариант	Вопрос
14	Перегонка с помощью химических транспортных реакций
15	Кристаллизационная очистка. Принцип очистки кристаллизацией.

Рекомендуемая литература: [1], стр. 23 – 60; [2], стр. 49 – 93; [3], стр. 19 – 62.

Очистка элементов Периодической системы может быть весьма затруднительной вследствие небольшого спектра методов очистки, которые могут быть применены именно к данному элементу. В то же время всегда можно выбрать какое-то химическое соединение данного элемента, которое гораздо удобнее очищать, чем сам элемент (чаще всего используют летучие легкоплавкие соединения – галогениды). Типовая схема получения высокочистого элементарного вещества в этом случае выглядит следующим образом:

а) синтез химического соединения из элементарного вещества. Метод синтеза обычно уже сам по себе характеризуется высокой избирательностью и позволяет отделить ряд примесей;

б) очистка химического соединения (используют несколько методов, связанных общей методологией);

в) восстановление высокочистого элементарного вещества из соединения;

г) очистка элемента от вновь внесенных примесей и от следов использовавшегося соединения (обычно на этой стадии наиболее часто используют кристаллизационные методы, в частности, метод зонной плавки);

д) получение и оптимизация нужной формы. Данный этап технологической схемы может быть связан с синтезом требуемого конечного соединения, с выращиванием и легированием монокристаллических слитков и т. д.

Все методы разделения и очистки основаны на различии в химических, физических или физико-химических свойствах основного компонента и примеси. Очевидно, что очистка наиболее сложна в том случае, если очищаемый материал и примесь очень близки по своим свойствам.

Все методы очистки можно проклассифицировать по свойствам, используемым для разделения:

– процессы, основанные на различной сорбционной способности веществ, – **адсорбция, абсорбция, ионный обмен и хроматография**;

– процессы, основанные на различии в температурах кипения или сублимации основного компонента и примеси, – **сублимация, дистилляция, ректификация, выпаривание**;

– процесс, основанный на избирательном переводе компонента раствора из одной жидкой фазы в другую, не смешивающуюся с ней жидкую фазу, – **жидкостная экстракция**;

- процессы, основанные на различной растворимости примесей в жидком и твердом основном веществе, – **кристаллизационные процессы**;
- процессы, основанные на различии в константах равновесия или константах скоростей химических реакций с одним и тем же реагентом для основного вещества и примеси, – **выщелачивание, цементация, транспортные реакции, избирательное оксидирование или восстановление**;
- процессы, основанные на различной химической активности металлов в окислительно-восстановительных реакциях на электродах электролитической ячейки, – **непосредственно электролиз, анодное растворение, амальгамная электрохимия**;
- процессы, основанные на преимущественной проницаемости разделительных перегородок – мембран – для одного или нескольких компонентов смеси, – **мембранное разделение газов, фильтрование, электродиализ** и т. д.;
- процессы, основанные на различном поведении компонентов смесей в центробежном поле, – **центрифугирование, циклонный процесс**;
- процессы, основанные на различии в траектории движения частиц, обладающих различным отношением массы к заряду, при движении в скрещенных электрическом и магнитном полях;
- процессы, основанные на различии в магнитных свойствах компонентов смеси и различном поведении частиц в зоне действия магнитного поля, – **магнитная сепарация**;
- процессы, использующие эффект Соре – появление в смеси, вследствие разности температур, градиента концентрации жидких или газообразных компонентов.

В принципе, все методы очистки можно разделить на гомогенные и гетерогенные, а также на химические и физические.

Задание № 3. Физико-химические основы процессов затвердевания. Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 3

Вариант	Вопрос
1	Кристаллизация. Пересыщение (переохлаждение).
2	Гомогенный и гетерогенный механизмы зародышеобразования
3	Пересыщение для газовой фазы
4	Пересыщение для жидких и твердых растворов
5	Основные параметры, определяющие условия фазового превращения при гомогенном образовании центров кристаллизации
6	Образование кристаллических зародышей
7	Стеклование.
8	Зависимость формы зародыша жидкой фазы и изменения свободной энергии системы при гетерогенном зарождении от равновесного угла смачивания

Вариант	Вопрос
9	Какие грани называются сингулярными?
10	Какие грани называются вицинальными?
11	Какие грани называются несингулярными (или диффузными)?
12	Какую межфазную границу называют когерентной, полуккогерентной и некогерентной?
13	Механизмы и кинетика роста кристаллов (послойный рост (зародышевый)).
14	Механизмы и кинетика роста кристаллов спиральный рост (послойный)
15	Механизмы и кинетика роста кристаллов (нормальный рост)

Рекомендуемая литература: [1], стр. 61 – 93; [2], стр. 94 – 123.

Полупроводниковые и диэлектрические материалы широко применяются в современной электронной технике как в кристаллическом (в виде монокристаллов или поликристаллов), так и в стеклообразном состояниях. Разработка технологических процессов требует глубоких знаний основ теории получения материалов в этих состояниях.

Кристаллизация – это фазовый переход первого рода, в результате которого происходит переход атомов (или молекул) из состояния с полностью или частично неупорядоченной конфигурацией (пар, жидкость) в состояние со строгой упорядоченностью.

Движущей силой любого фазового превращения, в том числе кристаллизации, является стремление системы к уменьшению ее свободной энергии. Кристаллизация происходит только в системах с пересыщением (переохлаждением), то есть находящихся в метастабильном состоянии. При этом кристаллизация (например, при затвердевании расплава или конденсации пара) обычно не протекает однородно во всем объеме метастабильной фазы. В начале процесса в разных местах исходной фазы образуются центры кристаллизации, которые затем разрастаются благодаря процессам тепло- и массопередачи. Создание пересыщения (переохлаждения) для кристаллизации исходной фазы необходимо для сообщения системе дополнительной энергии, требуемой для образования поверхности зародышей новой фазы.

Механизм образования зародышей новой фазы может быть **гомогенным**, когда в исходной фазе отсутствуют какие-либо твердые частицы или поверхности, стимулирующие образование на них центров, и **гетерогенным**, когда они присутствуют.

В различных точках газообразной, жидкой или твердой, молекулярной или атомной системы, находящейся в состоянии теплового равновесия, непрерывно возникают **флуктуации**, т.е. отклонения различных величин от их наиболее вероятных значений. Флуктуации плотности или концентрации в исход-

ной фазе могут приводить к изменению фазового состояния (например, образованию зародышей новой фазы). В этом случае говорят о *гетерофазных* флуктуациях. Если изменения фазового состояния в результате флуктуации не происходит, их называют *гомофазными*.

Задание № 4. Физико-химические основы процессов легирования.

Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 4

Вариант	Вопрос
1	Простое и сложное легирование
2	Радиационное легирование
3	Условия, необходимые для получения полупроводниковых материалов с заданными свойствами радиационным легированием
4	Радиационное легирование. Примеры ядерных реакций при облучении нейтронами основных полупроводников.
5	Легирование материалов в процессе выращивания из жидкой фазы.
6	Легирование лигатурой
7	Что называется лигатурой, где она используется?
8	Какое переохлаждение называется концентрационным?
9	Изменение морфологии поверхности кристалла, растущего в условиях концентрационного переохлаждения.
10	Эффект грани.
11	При каких условиях наблюдается эффект грани?
12	Канальная неоднородность.
13	Как избежать возникновения канальной неоднородности?
14	При каких условиях возникает ячеистая субструктура распределения примеси?
15	Какой рост называется дендритным?

Рекомендуемая литература: [1], стр. 94 – 111; [2], стр. 183 – 225.

Легирование осуществляют с целью получения полупроводников с определенными электрическими свойствами: типом электропроводности, удельным электрическим сопротивлением, концентрацией носителей заряда и др. Тип электропроводности определяется характером электрического поведения примеси в полупроводнике. Большинство других свойств является функцией концентрации примеси в кристалле полупроводника.

Во всех полупроводниках конкретная легирующая примесь, а, следовательно, и тип электропроводности, задается разработчиком прибора, формулирующим требования к материалу, необходимому для его изготовления. Это вызвано тем, что различные примеси, создающие в полупроводнике одинаковый тип электропроводности, обладают как правило сильно различающимися физико-химическими свойствами (например, коэффициентом диффузии), что налагает свой отпечаток на технологию изготовления прибора. Другими параметрами, определяемыми легированием, в полупроводниковых соединениях являются концентрация основных носителей заряда, а в элементарных полупроводниках – удельное электрическое сопротивление.

Легирование выращенных кристаллов может быть произведено методом диффузии примеси из внешней фазы, а также **методом радиационного легирования**. Диффузионное легирование является методом технологии приборов; для легирования объемных монокристаллов не используется ввиду того, что примесь проникает на малую глубину.

При облучении кристаллов полупроводников и диэлектриков ядерными частицами (нейтронами, протонами, γ -квантами и др.) в результате протекания ядерных реакций может наблюдаться превращение частиц атомов основных компонентов вещества в атомы других химических элементов, ранее отсутствующих в материале (трансмутационное легирование). Это явление в настоящее время находит все более широкое применение для однородного легирования выращенных кристаллов. Наибольшее практическое применение для радиационного легирования получило использование тепловых нейтронов.

Задание № 5. Физико-химические основы получения монокристаллов.
 Дайте развернутый ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 5

Вариант	Вопрос
1	Получение кристаллов из твердой фазы.
2	Нормальная направленная кристаллизация (вертикальная или метод Бриджмена и горизонтальная).
3	Вытягивание монокристалла из расплава или метод Чохральского.
4	Выращивание кристаллов методом Киропулоса.
5	Зонная плавка (вертикальная – бестигельная и горизонтальная).
6	Метод выращивания монокристаллов с пьедестала (гарнисажный метод Чохральского).
7	Метод плазменного плавления (метод Вернейля).
8	Неоднородности распределения примеси (фундаментальные и технологические) в растущем кристалле.
9	Пассивные методы выравнивания состава (метод целевой загрузки, метод зонного выравнивания).

Вариант	Вопрос
10	Активные методы выравнивания состава (метод Чохральского с использованием плавающего тигля, метод Чохральского с подпиткой, метод Чохральского с промежуточными дозагрузками, программирование кристаллизационного процесса).
11	Выращивание кристаллов из растворов
12	Метод зонной плавки с градиентом температуры
13	Виды эпитаксии. Метод эпитаксии из жидкой фазы. Газофазная эпитаксия
14	Выращивание кристаллов из газовой фазы (метод сублимации – конденсации, метод химических реакций разложения – восстановления, метод химического транспорта)
15	Получение профильных монокристаллов

Рекомендуемая литература: [1], стр. 112 – 170; [2], стр. 112 – 182; [3], стр. 63 – 78.

Твердофазные процессы превращения, протекающие без изменения симметрии решетки, часто объединяют понятием *рекристаллизации*. При фазовых превращениях в твердом состоянии образуются новые структуры с кристаллической решеткой другой симметрии. Процессы перестройки кристаллической решетки, как связанные с фазовыми превращениями, так и протекающие без изменения симметрии решетки (рекристаллизация), объединяют общим понятием *перекристаллизации*.

Можно выделить пять основных методов выращивания кристаллов из твердой фазы:

- 1) рекристаллизация посредством отжига деформации в твердой фазе;
- 2) рекристаллизация при спекании;
- 3) перекристаллизация при полиморфных превращениях;
- 4) перекристаллизация из аморфного состояния;
- 5) перекристаллизация из пересыщенного твердого раствора.

Выращивание монокристаллов из расплава является основным промышленным процессом, обладающим высокой производительностью и обеспечивающим высокую скорость роста, более чем в 100 раз превышающую скорость роста при выращивании другими методами.

Для выращивания монокристаллов из расплава используются различные методы. В основе всех их лежит *направленная кристаллизация* расплава, при которой зарождение и рост кристалла при наличии переохлаждения ΔT в расплаве осуществляется на одной фазовой границе, и теплота от фронта кристаллизации отводится преимущественно в одном направлении. Это позволяет кри-

сталлизовать расплав в виде одного монокристалла. Методы направленной кристаллизации делятся на три группы:

- **нормальная направленная кристаллизация** (вертикальная или метод Бриджмена и горизонтальная), это кристаллизация в тигле или лодочке;
- **вытягивание монокристалла из расплава** или метод Чохральского;
- **зонная плавка** (вертикальная – бестигельная и горизонтальная).

Методы выращивания монокристаллов полупроводников и диэлектриков из растворов в основном различают по способу создания пересыщения кристаллизующего вещества в растворе: **испарением растворителя; созданием перепада температур между источником кристаллизующего вещества и затравкой; кристаллизацией в электрическом поле; медленным охлаждением насыщенного раствора; зонным плавлением при наличии температурного градиента, приложенного ко всему образцу.** Первые три метода являются изотермическими, то есть фронт кристаллизации в течение всего процесса роста кристалла находится при постоянной температуре. Кристаллизация в изотермических условиях позволяет обеспечить лучший контроль параметров выращиваемого кристалла, зависящих от температуры процесса. Так, если коэффициент распределения примесей или компонентов зависит от температуры, то кристаллы, получаемые изотермическими методами, будут более однородными.

Выращивание кристаллов из растворов можно производить без специально вводимых затравок, путем спонтанного образования и роста центров кристаллизации (массовая кристаллизация) или контролируемым ростом на затравке.

Выращивание крупных монокристаллических слитков из растворов на затравках производится методами, аналогичными кристаллизации из собственных расплавов: нормальной направленной кристаллизацией, вытягиванием из раствора, зонной перекристаллизацией.

Задание № 6. Технология получения важнейших материалов электронной техники.

Дайте развернутый ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 6

Вариант	Вопрос
1	Технология получения монокристаллов германия, маркировка
2	Технология получения поликристаллического германия
3	Получение технического кремния
4	Технология получения монокристаллов кремния
5	Технологическая схема производства полупроводникового кремния водородным восстановлением трихлорсилана
6	Технологическая схема получения поликристаллического полупроводникового кремния пиролизом силана
7	Эпитаксия кремния из газовой фазы. Маркировка кремния, эпитактур

Вариант	Вопрос
8	Технология получения монокристаллов соединений A^3B^5 , маркировка
9	Аморфные полупроводники. Методы получения аморфного кремния.
10	Стекла
11	Технология стекловарения и изготовления стеклоизделий.
12	Керамика. Технология получения керамики
13	Какие вещества используются в качестве исходных компонентов в производстве керамики?
14	Ситаллы
15	Технологические стадии получения ситаллов

Рекомендуемая литература: [1], стр. 171 – 216; [2], стр. 169 – 182, 242 – 403; [3], стр. 79 – 163; [4], стр. 95 – 145

Технология получения высокочистого монокристаллического кремния включает в себя следующие этапы:

- 1) получение технического кремния из кремнезема;
- 2) получение и очистку легколетучих соединений кремния;
- 3) получение поликристаллического кремния полупроводниковой чистоты;
- 4) получение нелегированных и легированных монокристаллов кремния.

Технология получения высокочистого германия включает в себя следующие этапы:

- 1) получение технического германия или его соединений;
- 2) получение и очистку легколетучего соединения германия – тетрахлорида германия;
- 3) получение поликристаллического германия полупроводниковой чистоты;
- 4) получение монокристаллов германия.

Технология получения кристаллов высокочистого арсенида галлия включает в себя следующие этапы:

- 1) получение высокочистого галлия;
- 2) получение высокочистого мышьяка;
- 3) синтез поликристаллического арсенида галлия;
- 4) рост монокристаллов арсенида галлия.

Технологические этапы стекловарения – это приготовление шихты, силикатообразование, стеклообразование, осветление (дегазация), гомогенизация (усреднение), студка (охлаждение).

Основными технологическими операциями керамической технологии яв-

ляются: приготовление шихты, формование, сушка и обжиг.

Получение ситаллов осуществляют по видоизмененной и дополненной технологии стекольного производства, а также на основе керамической технологии.

При использовании технологической схемы производства изделий из стекла (получение шихты → варка стекла → формование изделий → отжиг изделий) ее дополняют еще одним технологическим этапом – кристаллизацией изделий, которая может следовать за формованием, минуя отжиг, или осуществляться после отжига.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новокрещенова Е.П. Технология материалов электронной техники: учеб. пособие / Е.П. Новокрещенова. - Воронеж: ВГТУ, 2009. - 222 с.
2. Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов: учебник / Ю.М. Таиров, В.Ф. Цветков. - СПб.: Лань, 2002. - 424 с.
3. Раскин А.А. Технология материалов микро-, опто- и наноэлектроники. [Электронный ресурс]: учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 1 / А. А. Раскин, В. К. Прокофьева. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 164 с.
4. Рощин М.В. Технология материалов микро-, опто- и наноэлектроники [Электронный ресурс]: учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 2 / В. М. Рощин, М. В. Силибин. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 180 с.
5. Александров С.Е. Технология полупроводниковых материалов [Электронный ресурс] / С.Е. Александров, Ф.Ф. Греков. – СПб.: Лань, 2021. - 240 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Содержание контрольной работы, выбор вариантов, порядок выполнения контрольной работы, общие пояснения к тексту заданий.....	3
Контрольная работа.....	5
Задание № 1. Общая характеристика основных процессов технологии материалов электронной техники.	5
Задание № 2. Физико-химические основы процессов переработки сырьевых материалов.....	7
Задание № 3. Физико-химические основы процессов затвердевания ...	9
Задание № 4. Физико-химические основы процессов легирования.....	11
Задание № 5. Физико-химические основы получения монокристаллов	12
Задание № 6. Технология получения важнейших материалов электронной техники.....	14
Библиографический список	16

ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению контрольной работы
для студентов направления
11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»
(профиль «Микroeлектроника и твердотельная электроника»)
заочной формы обучения

Составители:

Свистова Тамара Витальевна
Плотникова Екатерина Юрьевна

В авторской редакции

Подписано к изданию 22.06.2022.
Уч.-изд. л. 0,8.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84