

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Микро- и нанотехника»

Т. В. Колонтаева

ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Учебно-методическое пособие
для специальности 1-41 01 01 «Технология материалов
и компонентов электронной техники»

В 2 частях

Часть 1

МАТЕРИАЛЫ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений по образованию в области
информатики и радиоэлектроники*

Минск
БНТУ
2019

УДК 621.315.5/.61(075.8)

ББК 31.233я7

К61

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра химии, технологии электрохимических производств
и материалов электронной техники УО «Белорусский государственный
технологический университет»

(зав. каф. – доцент, канд. хим. наук *А. А. Черник*);

канд. техн. наук, доцент кафедры технологии стекла
и керамики УО «Белорусский государственный технологический
университет» *Е. М. Дятлова*

Колонтаева, Т. В.

К61 Технология материалов и компонентов электронной техники :
учебно-методическое пособие для специальности 1-41 01 01 «Тех-
нология материалов и компонентов электронной техники»: в 2 ч.
Ч. 1: Материалы / Т. В. Колонтаева. – Минск: БНТУ, 2019. – 101 с.
ISBN 978-985-550-765-0 (Ч. 1).

В учебно-методическом пособии изложены методические указания по выполнению практических и курсовых работ по дисциплине «Технология материалов и компонентов электронной техники» в соответствии с учебной программой для студентов специальности 1-41 01 01 «Технология материалов и компонентов электронной техники». В каждом разделе приведены теоретические основы по каждому практическому занятию, основные формулы для выполнения индивидуальных расчетных заданий. В учебно-методическом пособии также приведены требования к выполнению курсовых проектов.

УДК 621.315.5/.61(075.8)

ББК 31.233я7

ISBN 978-985-550-765-0 (Ч. 1)

ISBN 978-985-550-880-0

© Колонтаева Т. В., 2019

© Белорусский национальный
технический университет, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ | 6 |
| Практическая работа № 1. Расчет процесса нагрева тел | 6 |
| Практическая работа № 2. Расчет равновесного коэффициента распределения «жидкость–пар» и концентрации примеси во фракциях, получаемых в процессе дистилляции | 10 |
| Практическая работа № 3. Расчет процесса непрерывной ректификации | 15 |
| Практическая работа № 4. Расчет равновесного коэффициента распределения «жидкость–твердое» и эффективного коэффициента распределения при выращивании монокристаллов по методу Чохральского | 22 |
| Практическая работа № 5. Расчет распределения летучей примеси по длине монокристалла, выращенного в вакууме | 30 |
| Практическая работа № 6. Расчет газодинамики в трубчатом реакторе | 35 |
| Практическая работа № 7. Расчет скорости роста пленок из паровой фазы в различных режимах протекания процесса и изменения состава пленки по толщине при вакуум-термическом напылении | 42 |
| Практическая работа № 8. Расчет коэффициентов динамической и кинематической вязкости и взаимодиффузии | 51 |
| Практическая работа № 9. Расчет шихты для синтеза стеклообразного материала | 58 |
| Практическая работа № 10. Разработка технологической схемы производства термопластов | 65 |
| Практическая работа № 11. Разработка технологической схемы производства реактопластов | 75 |
| Практическое занятие № 12. Разработка технологической схемы производства слоистых пластмасс для подложек ИМС | 82 |
| 2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ | 88 |
| 2.1. Основные положения | 88 |
| 2.2. Ответственность руководителя и исполнителя | 89 |

| | |
|--|-----|
| 2.3. Требования к организации курсового проектирования | 89 |
| 2.4. Требования к заданию на курсовой проект | 90 |
| 2.5. Состав, содержание и объем курсового проекта | 90 |
| 2.6. Оформление курсовых проектов | 92 |
| 2.7. Порядок защиты курсового проекта | 95 |
| | |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 96 |
| | |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 97 |
| Приложение 1 | 97 |
| Приложение 2 | 98 |
| Приложение 3 | 101 |

ВВЕДЕНИЕ

Конструирование и изготовление электронных приборов базируется на использовании сочетания разнообразных свойств материалов и физико-химических процессов. Поэтому необходимо глубоко понимать используемые процессы и их влияние на свойства приборов, уметь точно управлять этими процессами.

Исключительная важность физико-химических исследований и разработка научных основ технологии обусловлены, во-первых, зависимостью свойств электронных приборов от наличия примесей в материалах и веществ, сорбированных на поверхностях рабочих элементов приборов, а также от состава газа и степени разряжения среды, окружающей эти элементы; во-вторых, зависимостью надежности и долговечности электронных приборов от степени стабильности применяемых исходных материалов и управляемости технологии.

Достижения технологии нередко дают толчок развитию новых направлений в электронике. Общие особенности технологии для всех направлений электроники состоят в исключительно высоких (по сравнению с другими отраслями техники) требованиях, предъявляемых в электронной промышленности к свойствам используемых исходных материалов, степени защиты изделий от загрязнения в процессе производства, геометрической точности изготовления электронных приборов.

С выполнением первого из этих требований связано создание многих материалов, обладающих сверхвысокими чистотой и совершенством структуры, с заранее заданными физико-химическими свойствами: специальных сплавов монокристаллов, керамики, стекол и др.

Создание таких материалов и исследование их свойств составляет предмет дисциплины «Технология материалов и компонентов электронной техники».

Одной из самых острых проблем технологии, связанных с выполнением второго требования, является борьба за уменьшение запыленности газовой среды, в которой проходят наиболее важные технологические процессы. Это требует создания новых, более совершенных методов обработки материалов, новых средств и методов контроля.

1. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Практическая работа № 1

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ТЕЛ

Теоретическая часть

Реальные процессы получения материалов электронной техники являются гетерогенными химико-технологическими процессами. При их анализе наряду с химической реакцией получения заданного продукта необходимо учитывать соответствующие физические явления, связанные с макросостоянием системы и накладывающиеся на основной химический процесс. Наиболее важными из них являются:

- массоперенос исходных реагентов в зону реакции и продуктов реакции из этой зоны;
- теплоперенос между зоной реакции и окружающей средой.

Процессы массопередачи характеризуются переносом вещества из одной фазы в другую. Путем переноса одного или более компонентов из фазы в фазу можно разделять, а также получать как гетерогенные, так и гомогенные системы (газовые смеси, жидкие или твердые растворы и др.).

Массопередача представляет собой сложный процесс, включающий перенос вещества в пределах одной фазы, через поверхность раздела фаз и в пределах другой фазы.

Перенос вещества из фазы к границе раздела фаз или в обратном направлении, то есть в пределах одной из фаз, называют массоотдачей. Распределяемое вещество внутри каждой фазы переносится путем молекулярной и конвективной диффузии, поэтому процессы массопередачи часто называют также диффузионными.

Движущей силой процессов массопередачи является разность химических потенциалов распределяемого вещества, характеризующая степень отклонения системы от состояния равновесия. В простейшем случае диффундирующее в пределах фазы вещество перемещается от точки с большей концентрацией к меньшей; в расчетах движущую силу процессов массопереноса выражают приближенно через разность концентраций.

В реальных условиях проведения технологических процессов для определения направления процессов массопереноса необходим

учет не только разности концентраций переносимого вещества, но и градиента температур и давлений, вызванных внешними силами. Предельным состоянием процесса массопередачи является достижение состояния равновесия системы.

Движущей силой процессов переноса теплоты между телами, или теплообмена, является разность температур более нагретого и менее нагретого тел, при наличии которой теплота самопроизвольно (по второму закону термодинамики) переходит от более нагретого к менее нагретому телу.

Есть три принципиально различных элементарных способа распространения теплоты: за счет теплопроводности, теплового излучения и конвекции. Эти виды теплообмена в реальных условиях редко наблюдаются отдельно: в большинстве случаев они связаны между собой и проявляются одновременно.

Разделение общего процесса передачи теплоты на элементарные процессы производят в основном из методологических соображений. В действительности теплота передается путем одновременного действия каких-либо двух или всех трех видов передачи теплоты.

Конвекция часто сопровождается тепловым излучением, теплопроводность в пористых телах – конвекцией и излучением в порах, а тепловое излучение – теплопроводностью и конвекцией. Такие процессы переноса теплоты носят название сложной теплоотдачи.

Процессы полупроводниковой технологии обычно проводят при повышенной температуре. Расчет процесса нагрева выполняют для определения времени, необходимого для достижения нагреваемым телом требуемой температуры.

«Тонкими» телами с точки зрения тепловых расчетов следует считать такие, перепад температуры по сечению которых намного меньше разности температуры поверхности изделия и среды. Поэтому то или иное тело относится к категории «тонких» или «массивных» в зависимости от соотношения между массой изделия и интенсивностью подвода или отвода теплоты от его поверхности.

Чем менее резко охлаждение или нагрев тела, что характеризуется коэффициентом теплоотдачи, тем большие по сечению тела должны быть отнесены при тепловых расчетах к категории «тонких», и наоборот, чем резче охлаждение или нагрев, тем меньшие по сечению изделия должны быть отнесены к категории «массивных». Это объясняется тем, что при более резком охлаждении опре-

деленный перепад температуры по сечению изделия получается при меньшем сечении, чем в случае менее резкого охлаждения.

Различают процессы нагрева «массивных» и «тонких» тел. В первом случае в процессе нагрева температура внешней теплопринимающей поверхности тела опережает температуру в центре тела, во втором – относительная разность температур между поверхностью и центром меньше 0,05. Поэтому их можно считать одинаковыми, что значительно упрощает расчеты.

Для определения типа процесса нагрева используют безразмерный комплекс – критерий Био:

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda},$$

где α – коэффициент теплоотдачи;

l – характерный размер, который обычно берется в направлении теплового потока;

λ – коэффициент теплопроводности материала тела.

Если нагрев пластины двухсторонний, то $l = \frac{h}{2}$, h – толщина пластины.

Если происходит нагрев цилиндрической поверхности образца, то $l = r$.

По физическому смыслу критерий Био представляет собой отношение внутреннего теплового сопротивления к внешнему.

При $Bi > 0,25$ имеет место процесс нагрева «массивного» тела, если $Bi < 0,25$, то имеет место нагрев «тонкого» тела.

Практическая часть

Задание. Рассчитать процесс двухстороннего нагрева пластины полупроводникового материала диаметром d и толщиной h по следующим исходным данным:

- коэффициент теплоотдачи α ;
- коэффициент теплопроводности λ ;
- T_0 – начальная температура тела, обычно одинаковая для любой его точки;

– T_{∞} – температура нагревательной установки (теплоотдающей поверхности);

– a, b, c – коэффициенты для уравнения теплоемкости.

Представить график зависимости достижения температуры от времени нагрева. Сформулировать вывод.

Порядок расчета

1. Рассчитать значение критерия Био и сделать заключение о типе нагреваемого тела («массивное» или «тонкое»).

2. Рассчитать площадь (m^2) тепловоспринимающей поверхности (2 круга):

$$F = 2\pi r^2.$$

3. Рассчитать объем (m^3) пластины (объем цилиндра):

$$V = h\pi r^2.$$

4. Рассчитать среднюю температуру (К):

$$T_{\text{ср}} = \frac{(T_0 + T_{\infty})}{2}.$$

5. Рассчитать теплоемкость (Дж/(моль·К)) при средней температуре:

$$C = a + bT_{\text{ср}} + cT_{\text{ср}}^{-2}.$$

Температура подставляется в К.

6. Для расчета процесса нагрева «тонкого» тела использовать уравнение

$$t = \frac{C\rho V}{\alpha F} \ln \frac{T_{\infty} - T_0}{T_{\infty} - T},$$

где T – переменная величина;

ρ – плотность материала.

7. Рассчитать значения времени (с) для нагрева до температур T : 100, 200, 300, 400, ... ($T_{\infty} - 25$) (температура подставляется в $^{\circ}\text{C}$).

8. Построить график зависимости температуры от времени.

9. Сформулировать вывод по проведенному расчету.

Практическая работа № 2

РАСЧЕТ РАВНОВЕСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ «ЖИДКОСТЬ–ПАР» И КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ ВО ФРАКЦИЯХ, ПОЛУЧАЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ ДИСТИЛЛЯЦИИ

Теоретическая часть

Процессы перегонки через газовую фазу лежат в основе очистки простых веществ (элементов) и химических соединений, обладающих высокой упругостью паров (фосфор, сурьма, сера, магний, кальций, цинк, жидкий хлорид элементов, то есть GeCl_4 , TiCl_4 , SiCl_4), промежуточных продуктов в производстве полупроводниковых и диэлектрических материалов в форме летучих соединений и т. д.

Сублимация (возгонка) представляет собой процесс непосредственного перехода вещества из твердого состояния в парообразное. Этот метод возможен для тех веществ, которые, будучи нагреты до температуры ниже точки плавления, характеризуются достаточно высокими давлениями паров.

При наличии в веществе набора примесей более летучие по сравнению с основным веществом примеси могут быть отогнаны при низкой температуре, а примеси менее летучие – сосредоточены в остатке после возгонки основного компонента.

Дистилляция (перегонка) – процесс очистки жидкостей и разделения их смесей на отдельные жидкости путем частичного испарения и последующей конденсации образовавшегося пара. Жидкость нагревают в колбе (перегонном кубе) до температуры кипения; пары пропускают через холодильник, где они сгущаются, образуя очищенный от примесей дистиллят (например, дистиллированная вода).

Дробная, или фракционированная, дистилляция служит для разделения жидкостей, кипящих при разной температуре. По мере повышения температуры кипения смеси меняют приемник и получают ряд фракций дистиллята. Повторную дистилляцию для более совершенной очистки называют ректификацией.

Простая перегонка – частичное испарение жидкой смеси путем непрерывного отвода и конденсации образовавшихся паров в холодильнике. Полученный конденсат называется дистиллятом, а неиспарившаяся жидкость – кубовым остатком.

На эффективность и качество процессов разделения и очистки веществ сублимацией–дистилляцией влияет целый ряд факторов. Наиболее важными из них являются примесный состав очищаемого вещества, величина поверхностей испарения и возгонки, температура вещества и конденсатора, давление и состав газов в аппарате для дистилляции и сублимации.

Так как процессы испарения и возгонки происходят с поверхности, то для обеспечения скорости процессов необходимо создать более развитую поверхность у разделяемого вещества.

Большую роль в разделении и очистке играют процессы обмена в веществе и в газовой фазе. Например, при отгонке более легколетучего основного компонента дистилляцией концентрация примесей в остающейся жидкой фазе (вследствие хорошей диффузии или конвекции в ней) равномерна. Они не скапливаются в поверхностном слое, поэтому возможно более глубокое (чем при сублимации) извлечение основного компонента без опасности загрязнения примесями конденсата (дистиллята).

Массообмен в газовой фазе зависит от тепловых режимов испарителя и конденсатора, а также от давления и вида остаточных газов. Разделение компонентов, сильно отличающихся давлением паров, не представляет особых трудностей и позволяет сравнительно просто получить чистый компонент. Если же их давления близки, то очистка основного компонента при перегонке возможна лишь при определенной температуре поверхности конденсатора, при которой скорости конденсации и возгонки для данной примеси будут равны.

При наличии ряда примесей это условие не будет выполняться одновременно для всех примесей. Остаточные газы могут иметь двойное влияние на процессы разделения и очистки. Нейтральные газы в основном только замедляют процесс испарения, уменьшая скорость диффузии паров в направлении конденсатора.

В связи с этим дистилляцию (или сублимацию) стремятся проводить в глубоком вакууме, так как в этом случае скорости испарения (возгонки) достигаются при относительно невысоких температурах.

Химически активные газы могут влиять на коэффициенты активности компонентов в растворе. Обычно для повышения эффективности очистки применяется водород: он восстанавливает многие оксиды, сульфиды, селениды, галогениды. Влажный водород при-

меняется для удаления бора из расплава кремния путем образования летучего гидрида BH_3 .

Повторное проведение процессов как дистилляции, так и сублимации позволяет с помощью этих методов добиваться высоких степеней разделения и очистки веществ. Существенного повышения эффективности и глубины очистки можно достичь в непрерывных процессах, где акты разделения воспроизводятся многократно.

Схема процесса дистилляции для растворов с температурой конденсации меньше температуры охлаждающей воды представлена на рис. 1.2.1.

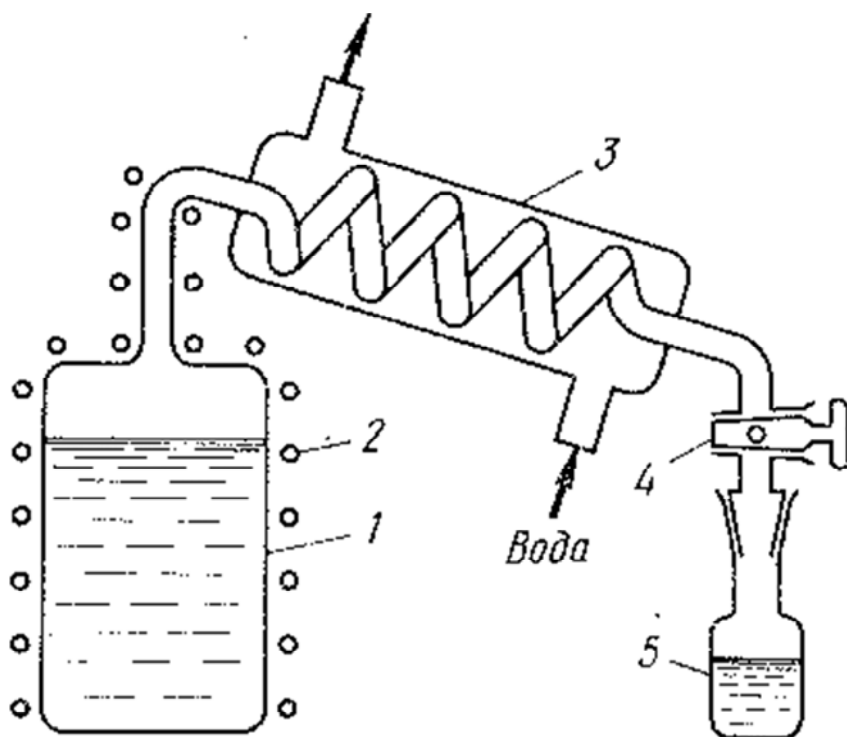


Рис. 1.2.1. Схема процесса дистилляции:
1 – куб-испаритель; 2 – нагреватель куба; 3 – змеевиковый конденсатор;
4 – кран для временного перекрытия стока дистиллята;
5 – сменный приемник фракций дистиллята

Практическая часть

Задание. Рассчитать коэффициент активности и равновесный коэффициент распределения для системы «основной компонент **A** – примесь **B**». Рассчитать молярную долю примеси **B** во фракциях, каждая из которых отбирается при испарении 0,1 молярной доли исходного раствора. Дана молярная доля примеси в исходном растворе. Процесс проводится при внешнем давлении 101 325 Па (P_A^0).

Порядок расчета

1. По справочной таблице, предоставленной преподавателем, найти коэффициенты A_j и B_j для компонента **B** и температуру кипения для компонента **A**.

2. Рассчитать коэффициент активности для компонента **B** по формуле

$$\ln \gamma_B^* = \frac{\vartheta}{RT_{\text{кип. } A}}$$

при $x_A \rightarrow 1$ и при $T \rightarrow T_{\text{кип. } A}$

3. Рассчитать давление насыщенного пара примеси **B** в точке кипения основного компонента **A**:

$$\lg P_B^0 = -A_j T_{\text{кип. } A} + B_j.$$

4. Рассчитать коэффициент распределения компонента **B** в области малых концентраций примесного компонента **B**, когда

$$P_A^0 \gg P_B^0 \text{ и } \gamma_A^{\text{Ж}} = 1.$$

Для расчета равновесного коэффициента распределения использовать уравнение

$$K_0^B = \frac{P_B^0}{P_A^0} \gamma_B^{\text{Ж}}.$$

5. Рассчитать концентрацию компонента **B** для 9 фракций. Концентрацию компонента **B** в *i*-й фракции рассчитывают по уравнению

$$x_{(i)} = \frac{x_0}{g_{\text{исп.}(i)} - g_{\text{исп.}(i-1)}} \left\{ \left[1 - g_{\text{исп.}(i-1)} \right]^{K_0^B} - \left[1 - g_{\text{исп.}(i)} \right]^{K_0^B} \right\},$$

где $g_{\text{исп.}(i-1)}$ – молярная доля испарившегося раствора (*i* – 1)-й фракции;

$g_{\text{исп.}(i)}$ – молярная доля испарившегося раствора *i*-й фракции;

$g_{\text{исп.}(0)} = 0$.

Если коэффициент распределения примеси K_0^B меньше единицы, концентрация примесного компонента во фракциях будет увеличиваться, а если коэффициент распределения больше единицы, то концентрация будет уменьшаться по мере отбора фракций.

6. Построить график зависимости концентрации ($x_{(i)}$) от номера фракции.

7. Сформулировать вывод по результатам расчета.

Практическая работа № 3

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ

Теоретическая часть

Для получения чистых веществ (особенно при глубокой очистке) вместо простой дистилляции предпочитают использовать ректификацию, то есть процесс, при котором происходит автоматическое сочетание процессов дистилляции и конденсации.

В ректификационной колонне пар встречается с различными фракциями конденсата, при этом часть менее летучего компонента конденсируется из пара в жидкость, а часть более летучего компонента переходит из жидкости в пар. Проходя через множество полок («тарелок») ректификационной колонны, пар успевает настолько обогатиться более летучим компонентом, что на выходе из колонны практически содержит только этот компонент (или азеотропную смесь). Степень разделения зависит от того, насколько пар обедняется примесью по сравнению с жидкой фазой.

Ректификация используется для очистки не только жидких препаратов. Общеизвестно применение ректификации для разделения сжиженных газов (кислород, азот, инертные газы и т. д.).

В последние годы с помощью ректификации стали очищать многие твердые вещества, сравнительно легко испаряющиеся. Таким образом, ректификация может быть отнесена к чрезвычайно эффективным методам глубокой очистки.

Особенно эффективно протекают процессы ректификационной очистки при низких температурах. При повышении температуры резко возрастает загрязнение очищаемого вещества материалом аппаратуры.

Тарельчатые ректификационные колонны могут различаться по конструкции тарелок, способу подачи и отбора продуктов. Получили применение колонны без тарелок, заполненные различного рода насадками в виде металлических или керамических спиралей, колец или других тел, имеющих большую постоянно освежаемую поверхность соприкосновения стекающего раствора с поднимающимися парами и обеспечивающих более эффективный

массо- и теплообмен встречных потоков. Чем длиннее разделительная колонна и интенсивнее массо- и теплообмен в ней, тем больший наблюдается эффект разделения или очистки.

На рис. 1.3.1 представлена ректификационная колонна.

Ректификационная колонна имеет ряд горизонтальных полок (тарелок) 5. Раствор, подлежащий ректификации и предварительно подогретый, подается через кран 6 на одну из средних тарелок, заполняет ее и стекает через перелив по трубе 7 на тарелку, расположенную ниже. Через патрубки 8 происходит пробулькивание поднимающихся снизу вверх паров. Колпачки на патрубках способствуют обеспечению хорошего контакта пара с раствором на тарелках.

С помощью дополнительных нагревателей вдоль колонны задается градиент температуры от наивысшей в кубе до наименьшей в конденсаторе, который обеспечивает противоток пара и раствора и непрерывный массо- и теплообмен между ними.

В результате этого из верхней части колонны выходят пары, представляющие собой чистый, более летучий компонент, а в куб стекает жидкость, представляющая собой чистый, менее летучий компонент. Поступающие в конденсатор 4 пары более летучего компонента конденсируются, причем часть конденсата, называемого флегмой, подается через трубу 10 на верхнюю тарелку колонны для обеспечения нормальной работы ее верхней части. Отбор продуктов из конденсатора и куба производится через краны 11 и 9 соответственно.

На рис. 1.3.2 представлена схема непрерывной ректификации с указанием основных потоков.

Уравнения общего материального баланса процесса и баланса примесного компонента имеют вид

$$I_3 = I_D + I_K,$$

$$I_3 x_3 = I_D x_D + I_K x_K.$$

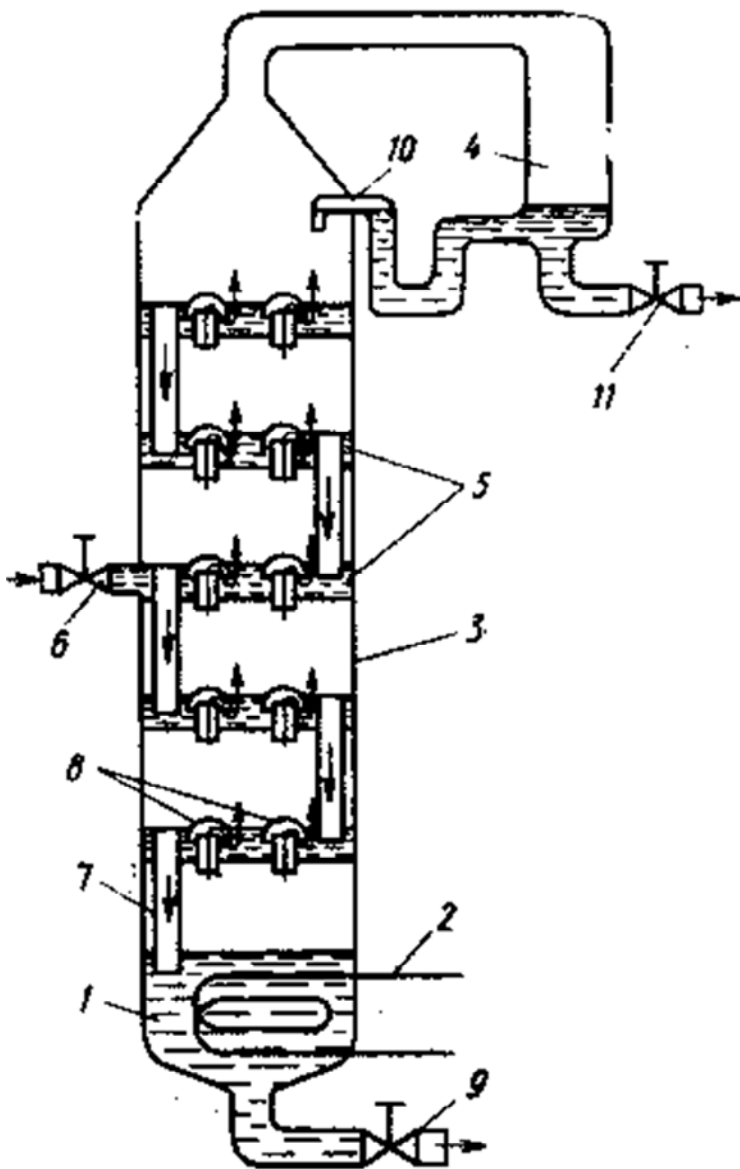


Рис. 1.3.1. Ректификационная колонна:

1 – куб; 2 – нагреватель; 3 – ректификационная колонна; 4 – конденсатор;
5 – тарелки; 6, 9, 11 – краны; 7, 10 – трубы; 8 – патрубки

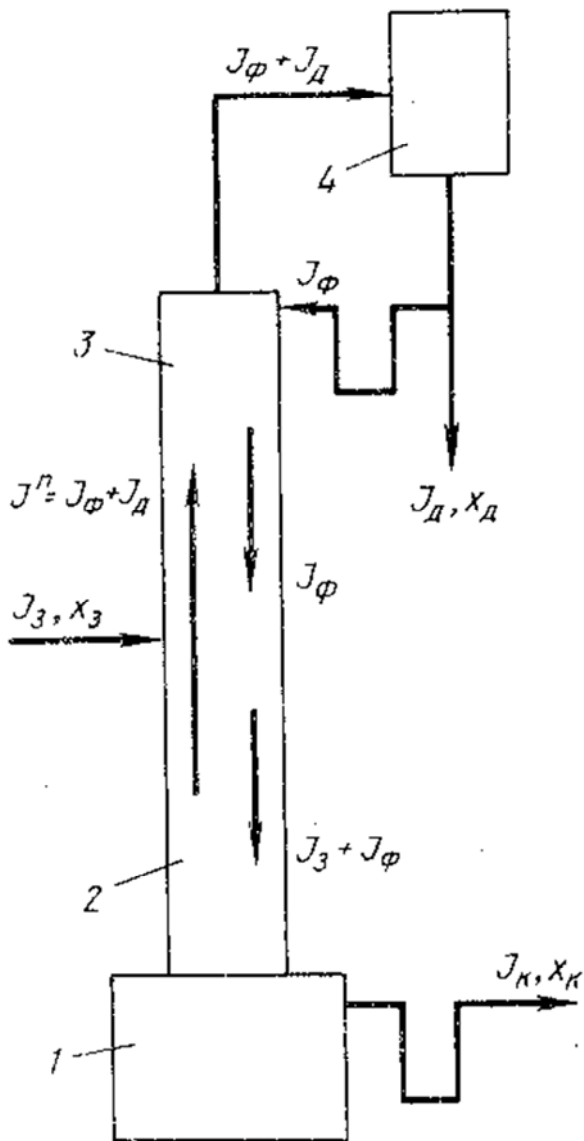


Рис. 1.3.2. Схема ректификации:

J_D – поток дистиллята; J_3 – поток загрузки; J_K – поток кубовой жидкости;

J_Φ – поток флегмы; x – молярная доля примесного компонента;

1 – куб; 2 – нижняя часть колонны; 3 – верхняя часть колонны; 4 – конденсатор

Практическая часть

Задание. В ректификационную колонну непрерывного действия подают основное вещество A , которое содержит определенное количество примеси B (система та же, что и в предыдущем задании).

Рассчитать общий материальный баланс и баланс примесного компонента по исходным данным; рассчитать основные параметры ректификационной колонны.

Порядок расчета

Для расчета использовать коэффициент распределения K_0 из предыдущей расчетной работы.

ВНИМАНИЕ!

Если $K_0 < 1$, то значение x в условии задачи является количеством примеси в дистилляте, то есть $x = x_D$. В этом случае очищенным будет дистиллят, а загрязненным продуктом – кубовая жидкость.

Если $K_0 > 1$, то соответственно значение x является количеством примеси в кубовой жидкости $x = x_K$. В этом случае очищенным будет кубовая жидкость, а загрязненным продуктом – дистиллят.

1. Рассчитать поток (кмоль/сут) дистиллята согласно исходным данным:

$$I_D = \theta I_3.$$

2. Рассчитать поток (кмоль/сут) кубовой жидкости:

$$I_3 = I_D + I_K.$$

3. Рассчитать концентрацию (мол. доли) примесного компонента в загрязненном продукте (x_K или x_D в зависимости от K_0):

$$I_3 x_3 = I_D x_D + I_K x_K.$$

4. Рассчитать минимальное флегмовое отношение:

$$\Phi_{\min} = \frac{x_D - K_0 x_3}{x_3 (K_0 - 1)}.$$

5. Рассчитать рабочее флегмовое соотношение:

$$\Phi = 2,5\Phi_{\min}.$$

6. Рассчитать поток (кмоль/сут) флегмы в верхней части колонны:

$$I_{\Phi} = \Phi I_{\text{Д}}.$$

7. Рассчитать поток (кмоль/сут) флегмы в нижней части колонны:

$$I_{\Phi, \text{Н.}} = I_{\Phi} + I_{\text{З}}.$$

8. Рассчитать поток пара (кмоль/сутки):

$$I_{\Pi} = I_{\Phi} + I_{\text{Д}}.$$

9. Рассчитать число питания:

$$\Pi = \frac{I_{\text{З}}}{I_{\text{Д}}}.$$

10. После расчета всех потоков и всех концентраций составить уравнения рабочих линий верхней части колонны и определить коэффициенты:

$$y = a_{\text{В}}x + b_{\text{В}},$$

$$y = \frac{\Phi}{\Phi + 1}x + \frac{x_{\text{Д}}}{\Phi + 1}$$

и нижней части колонны ($y = a_{\text{Н}}x + b_{\text{Н}}$)

$$y = \frac{\Pi + \Phi}{\Phi + 1}x - \frac{\Pi - 1}{\Phi + 1}x_{\text{К}},$$

где x – переменная.

11. Рассчитать число единиц массопереноса нижней части колонны:

$$m_H = \frac{a_H}{K_0 - a_H} \ln \frac{K_0 x_3 - (a_H x_3 + b_H)}{K_0 x_K - (a_H x_K + b_H)},$$

где a_H и b_H – коэффициенты из уравнения рабочих линий нижней части колонны, определенные в п. 10.

12. Рассчитать число единиц массопереноса верхней части колонны:

$$m_B = \frac{a_B}{K_0 - a_B} \ln \frac{K_0 x_D - (a_B x_D + b_B)}{K_0 x_3 - (a_B x_3 + b_B)},$$

где a_B и b_B – коэффициенты из уравнения рабочих линий верхней части колонны, определенные в п. 10.

13. Рассчитать высоту (м) верхней части колонны:

$$H_B = h_{\Pi} m_B,$$

где h_{Π} – высота единицы массопереноса (в исходных данных).

14. Рассчитать высоту (м) нижней части колонны:

$$H_H = h_{\Pi} m_H.$$

15. Рассчитать минимальное число теоретических тарелок:

$$N_{\min} = \frac{\log \frac{x_D}{x_K}}{\log K_0}.$$

16. Сформулировать вывод по проведенному расчету.

Практическая работа № 4

РАСЧЕТ РАВНОВЕСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ «ЖИДКОСТЬ–ТВЕРДОЕ» И ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПО МЕТОДУ ЧОХРАЛЬСКОГО

Теоретическая часть

Кристаллизационные методы очистки основаны на различии растворимости примеси в жидкой и твердой фазах. При этом наряду с высокой степенью очистки материала от примесей достигается и необходимое совершенство кристаллической структуры (физическая чистота), то есть материал получают в виде высокочистого монокристалла.

Коэффициент распределения используется для оценки эффективности очистки веществ от примесей кристаллизацией из расплава. Он равен отношению концентрации растворенного вещества в твердой фазе к концентрации растворенного вещества в жидкой фазе.

Равновесный коэффициент распределения характеризует эффект разделения компонентов смеси в каждый момент равновесия между кристаллом и расплавом. Расчет возможен на основе фазовых диаграмм.

Одним из методов направленной кристаллизации является вытягивание кристаллов из расплава. На рис. 1.4.1 представлена установка для выращивания монокристаллов по методу Чохральского.

Суть метода: исходный материал (в виде порошка или кусков поликристаллов), прошедший стадию тщательной очистки, загружают в тигель и нагревают до расплавленного состояния.

Процесс проводится в герметичной камере в вакууме или в нейтральной инертной окислительной или восстановительной атмосфере. Затем затравочный кристалл размером в несколько миллиметров, установленный в охлаждаемый кристаллодержатель и ориентированный в нужном кристаллографическом направлении, погружается в расплав.

После частичного оплавления конца затравки и достижения определенного температурного режима начинается вытягивание таким образом, чтобы кристаллизация расплава происходила от за-

травочного кристалла. Диаметр кристалла регулируют подбором скорости вытягивания или нагревом расплава, а также обоими факторами одновременно.

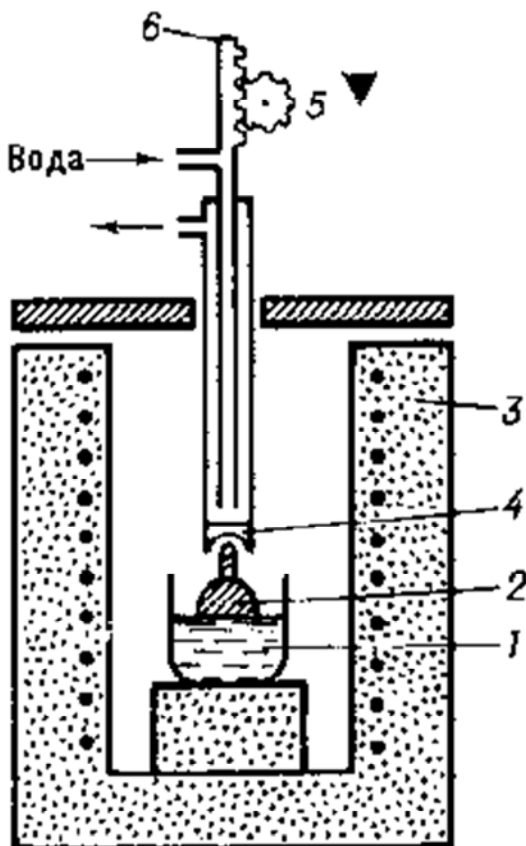


Рис. 1.4.1. Выращивание монокристаллов по методу Чохральского:
1 – тигель с расплавом; 2 – кристалл; 3 – печь; 4 – холодильник;
5, 6 – механизм вытягивания

Для уменьшения возможной радиальной асимметрии теплового и концентрационного полей тигель и растущий кристалл вращаются в противоположных направлениях.

Непосредственно перед началом выращивания кристалла производят выдержку расплава при температуре несколько выше темпе-

ратуры плавления. Такая выдержка необходима для очистки расплава от ряда летучих примесей, которые, испаряясь из расплава, осаждаются на холодных частях камеры. После такой очистки производят прогрев затравки путем выдержки ее над расплавом при возможно более высоких температурах. Эта операция необходима для того, чтобы предотвратить термоудар в момент контакта холодной затравки с поверхностью расплава. Термоудар затравки приводит к существенному увеличению в ней плотности дислокаций, которые прорастают в выращиваемый кристалл, ухудшая его структурное совершенство.

Качеству затравки уделяют особое внимание, поскольку ее структурное совершенство во многом определяет совершенство выращиваемого кристалла. Затравки вырезают из монокристаллов с минимальной плотностью дислокаций. Поверхностные нарушения, возникающие при вырезке, удаляют химическим травлением и полировкой.

Сечение затравки (имеющее форму квадрата или треугольника) должно быть минимальным, поскольку плотность дислокаций, наследуемых выращиваемым монокристаллом, пропорциональна отношению площадей затравки и выращиваемого на ней монокристалла. Кроме того, величина термоудара в затравках малого сечения меньше, чем в затравках большого сечения.

После прогрева затравки конец ее погружают в перегретый расплав и частично оплавливают с целью удаления поверхностных дефектов и загрязнений. При этом граница раздела «расплав–затравка» оказывается расположенной над поверхностью расплава. Высота расположения границы раздела зависит от степени перегрева расплава и условий теплоотвода от затравки.

При сильном перегреве расплава происходит разрыв столба при вытягивании; при слишком низкой температуре расплава вокруг затравки образуется область переохлаждения, вследствие чего даже при отсутствии вытягивания будет происходить заметное наращивание кристалла на затравку. Поэтому вытягивание кристалла необходимо начинать при промежуточной между двумя этими случаями температуре, то есть когда затравка сцеплена с расплавом и рост кристалла не происходит.

На начальной стадии вытягивания после оплавления затравки производят формирование шейки монокристалла, представляющей собой тонкий и длинный монокристалл. При этом диаметр шейки

не должен превышать линейный размер поперечного сечения затравки, а длина должна составлять несколько ее диаметров.

Формирование шейки производят с одновременным понижением температуры расплава с большой линейной скоростью и, соответственно, при больших осевых градиентах температур. Это приводит к большому пересыщению вакансии области монокристалла вблизи фронта кристаллизации, что при соответствующей кристаллографической ориентации затравки облегчает движение и выход на поверхность кристалла дислокаций, проросших из затравки.

Для этого затравка должна быть ориентирована так, чтобы плоскости наиболее легкого движения дислокаций располагались под возможно большими углами к направлению роста кристалла.

После операции формирования шейки осуществляют разращивание монокристалла от размеров шейки до номинального диаметра слитка, то есть осуществляют выход на диаметр. На данной стадии технологического процесса для предотвращения увеличения плотности дислокаций угол разращивания необходимо делать достаточно малым. После выхода на диаметр условия выращивания кристалла стабилизируются с целью получения монокристаллического слитка постоянного диаметра и высокого структурного совершенства.

Ведущая роль на этом этапе принадлежит тепловым условиям процесса. Они определяют градиенты температуры в кристалле и расплаве, от которых зависят форма фронта кристаллизации, размеры переохлажденной области расплава вблизи фронта кристаллизации, диаметр и скорость роста кристалла, термические напряжения в нем. Тепловой поток состоит из потока, поступающего к тиглю от нагревателя и тепловых потоков, отводимых от расплава и кристалла. Соотношение этих потоков определяют градиенты температур в выращиваемом кристалле и расплаве.

При выращивании кристаллов в вакууме теплоотдача осуществляется только путем излучения. В газовой среде основную роль в теплоотдаче играют конвекционные процессы. При увеличении давления газа и его теплоемкости возрастает интенсивность теплопередачи. Тепловые потери с поверхности вытягиваемого кристалла приводят к увеличению градиента температуры в кристалле. Для уменьшения градиента температур растущий кристалл экранируют либо подогревают. С увеличением скорости выращивания градиент температуры уменьшается.

Форма фронта кристаллизации может быть разной. Фронт может быть выпуклым в расплав, плоским и вогнутым в сторону кристалла. Наиболее неблагоприятным для выращивания монокристаллов с низкой плотностью дефектов является вогнутый фронт кристаллизации, а благоприятным – плоский фронт.

Под действием градиента температур в кристалле возникают термические напряжения, приводящие к возникновению дислокаций. С увеличением градиента повышается плотность дислокаций.

На процесс роста вытягиваемого кристалла большое влияние оказывает характер распределения температуры в расплаве. При больших градиентах температуры в расплаве возникают конвективные потоки от горячих стенок тигля к более холодной центральной части расплава.

Это приводит к хаотическим колебаниям и переохлаждению на фронте кристаллизации, вследствие чего наблюдается хаотическое изменение во времени скорости роста кристалла. Колебания скорости роста вызывают образование различных структурных дефектов и полосчатой неоднородности распределения примесей в кристалле. Уменьшить конвекцию в расплаве можно вращением выращиваемого кристалла и снижением градиента температуры.

Уменьшение градиента температуры в расплаве приводит также к увеличению скорости выращивания кристалла.

Любые изменения теплового баланса на границе раздела «кристалл–расплав» нарушают установившиеся условия роста и приводят к изменениям диаметра выращиваемого слитка, а это сопровождается возникновением различных структурных дефектов в кристалле.

Для стабилизации условий роста современные установки оснащены автоматизированными системами поддержания температуры нагревателя, непрерывного контроля диаметра слитка, подъема и вращения тигля и кристалла.

Процесс выращивания кристалла завершается отрывом его от расплава. Перед отрывом диаметр кристалла плавно уменьшают, создавая обратный конус для того, чтобы предотвратить тепловой удар, который приведет к размножению дислокаций в конечной части кристалла. При отрыве полной площади сечения кристалла от поверхности расплава плотность дислокаций в конечной части слитка может возрасти в 100 раз.

Охлаждение выращенного кристалла производят достаточно медленно для того, чтобы предотвратить образование в нем термических напряжений и дислокаций. Для этого после отрыва монокристалл поднимают на небольшое расстояние над расплавом и производят медленное снижение температуры нагревателя.

Для выращивания монокристаллов разлагающихся полупроводниковых и диэлектрических соединений расплавы покрывают слоем герметизирующей жидкости (толщиной 10–15 мм), которая препятствует испарению летучего компонента.

Вытягивание кристалла производят из-под слоя этой жидкости, над которой дополнительно создают повышенное давление инертного газа. Величина этого давления должна в 2 раза превышать равновесное давление пара летучего компонента при температуре плавления соединения.

Герметизирующая жидкость должна иметь плотность меньше, чем плотность расплава, и не должна реагировать с материалом тигля и расплавом выращиваемого кристалла. Желательно, чтобы жидкость была прозрачной и можно было следить за фронтом кристаллизации растущего кристалла.

В качестве такой жидкости используют борный ангидрид, в расплавленном состоянии он прозрачен.

Практическая часть

Задание. Рассчитать коэффициент взаимодиффузии, толщину диффузионного слоя, равновесный и эффективный коэффициенты распределения примеси **B** в основном компоненте **A** и провести сравнительный анализ.

Порядок расчета

1. Для расчета равновесного коэффициента распределения используется нижеприведенное уравнение. Коэффициент выражен в мольных долях.

$$\ln K_{0B}^I = \frac{\Delta H_{\text{пл. } B}}{R} \left[\frac{1}{T_{\text{пл. } A}} - \frac{1}{T_{\text{пл. } B}} \right] + \frac{a^{\text{ж}} - b^{\text{ж}} T_{\text{пл. } A} - \vartheta^{\text{TB}}}{RT_{\text{пл. } A}},$$

где $\Delta H_{\text{пл. } B}$ – энтальпия плавления чистого компонента **B**;

$T_{\text{пл. } A}$ – температура плавления чистого компонента **A**;

$T_{\text{пл. } B}$ – температура плавления чистого компонента **B**;

$a^{\text{ж}}$, $b^{\text{ж}}$ – константы;

g^{TB} – параметр взаимодействия (энергия смешения).

2. В литературе обычно приводятся значения равновесных коэффициентов распределения, концентрации в которых выражены в атомах/см³.

Связь между двумя коэффициентами выражается

$$K_{0B} = K'_{0B} \frac{\rho_A^{\text{TB}}}{\rho_A^{\text{ж}}}.$$

3. Рассчитать указанный коэффициент K_{0B} и сравнить его с табличными данными у преподавателя.

4. Рассчитать коэффициент динамической вязкости η (Н·с/м²) при температуре плавления основного вещества по уравнению

$$\eta = \nu \rho^{\text{ж}},$$

где ν – коэффициент динамической вязкости (табличное значение);

$\rho^{\text{ж}}$ – плотность жидкой фазы.

5. Рассчитать коэффициент взаимодиффузии (см²/с) по уравнению

$$D = 10^{13} \frac{kT_{\text{пл. } A}}{B\pi\eta r_i},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

r_i – металлический радиус (нм) примесного элемента;

B – числовой коэффициент.

6. Рассчитать угловую скорость вращения монокристалла (с⁻¹):

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}.$$

7. Рассчитать значение критерия Шмидта (D подставляется в $\text{м}^2/\text{с}$):

$$S_C = \frac{v}{D}.$$

8. Рассчитать толщину диффузионного слоя (м):

$$\delta = 2,2 \left(\frac{v}{\varpi_K} \right)^{0,5} S_C^{-0,33}.$$

9. Рассчитать эффективный коэффициент распределения:

$$K_{\text{эфф}} = \frac{K_{0B}}{K_{0B} + (1 - K_{0B}) \exp\left(-\frac{f\delta}{D}\right)},$$

где f – скорость выращивания.

10. Сформулировать вывод по проведенным расчетам.

11. Разработать технологическую схему процесса выращивания монокристаллов методом Чохральского.

Практическая работа № 5

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕТУЧЕЙ ПРИМЕСИ ПО ДЛИНЕ МОНОКРИСТАЛЛА, ВЫРАЩЕННОГО В ВАКУУМЕ

Теоретическая часть

Легирование – введение в состав твердых веществ легирующих элементов для придания им определенных физических, химических или механических свойств.

Введение легирующих примесей может существенным образом изменить свойства твердых тел. От характера взаимодействия атомов легирующих элементов и атомов основного вещества, от типа образованных дефектов структуры, характера взаимодействия легирующих и фоновых примесей, легирующих примесей и дефектов структуры, от способности легирующей примеси образовывать соединения в матрице вещества и так далее зависят свойства (электрические, магнитные, тепловые) легируемого вещества.

Легирование широко применяется в технологии получения металлов и сплавов, полупроводниковых кристаллов и пленок, а также диэлектрических материалов с заданными свойствами.

Условия роста кристаллов из легированных расплавов и характер процессов на фронте кристаллизации отличаются от процессов, протекающих при кристаллизации чистых расплавов. Примесь влияет на кинетику поверхностных процессов при кристаллизации, добавление примеси к чистому веществу приводит к изменению его температуры плавления.

Так как диффузия примесей в твердой фазе пренебрежимо мала, слои твердой фазы, закристаллизовавшиеся по мере охлаждения расплава при различных температурах, будут иметь различный состав, что приведет к неоднородности распределения примеси в твердой фазе. Это закономерное нарушение однородности состава называют сегрегационным нарушением постоянства состава.

Как следует из представлений об адсорбции, концентрация примеси в поверхностном слое может превышать соответствующие концентрации в фазах (в кристалле и расплаве). Считается, что поверхностный слой имеет толщину в несколько атомных плоскостей.

По мере роста кристалла эти плоскости уходят внутрь твердой фазы, при этом концентрация примеси в них уже не будет являться равновесной.

Начинается процесс диффузионной релаксации избыточных или недостаточных атомов примеси в расплав или из него. Достаточно четкое и надежное математическое описание распределения компонентов при процессах направленной кристаллизации и зонной плавке может быть дано только в некотором приближении.

Допущения сформулированы Пфанном (пфанновское приближение):

1. Процессами диффузионного перераспределения компонентов в твердой фазе можно пренебречь, то есть предполагается, что коэффициент диффузии компонентов в твердой фазе равен нулю.

2. Перераспределение компонентов и, соответственно, выравнивание состава в жидкой фазе происходит мгновенно, то есть эффективный коэффициент диффузии в жидкой фазе равен ∞ . Это условие обычно называют условием полного перемешивания жидкой фазы.

3. Величина эффективного коэффициента распределения, через который учитывается фазовая диаграмма кристаллизующей бинарной системы, постоянна. Условие подразумевает постоянство скорости роста в течение всего процесса, $v = \text{const}$.

4. При плавлении и затвердевании объем кристаллизующего материала не изменяется, плотности жидкой и твердой фаз равны.

5. Отсутствует обмен материалом между конденсированными (жидкой или твердой) и газовой фазами, в системе нет летучих и диссоциирующих компонентов.

Есть много факторов, вызывающих появление неоднородностей по длине и поперечному сечению в растущем кристалле. Неоднородности можно разделить по причинам их возникновения на фундаментальные и технологические.

Фундаментальные неоднородности связаны с закономерными изменениями состава растущего кристалла, обусловленными основными законами фазовых превращений в многокомпонентных системах.

Закономерные неоднородности охватывают весь объем выращенного кристалла, их называют сегрегационными нарушениями постоянного состава. На них по мере роста кристалла накладываются технологические неоднородности, имеющие незакономерный характер и связанные с нарушениями стабильности условий роста кристаллов,

вызываемыми несовершенством применяемых на практике технологических процессов и аппаратуры. Такие неоднородности называют локальными, они охватывают небольшие объемы кристалла.

В связи с этим главной задачей при получении однородных по составу и свойствам кристаллов является разработка методов борьбы с фундаментальными неоднородностями; в отличие от технологических они не могут быть уменьшены путем технологического усовершенствования аппаратуры и процессов, поэтому для этого разрабатывают специальные методы.

Сегрегационные методы выравнивания состава кристаллов делятся на пассивные и активные.

При пассивных методах монокристаллы с заданной однородностью распределения примеси получают без внесения каких-либо изменений в кристаллизационный процесс, то есть используют приблизительно равномерную часть монокристалла, выращенного из расплава обычным методом направленной кристаллизации.

Активные методы позволяют активно влиять на ход процесса легирования во время роста и программировать процесс изменения состава.

Практическая часть

Задание. Монокристалл германия (кремния) выращен методом Чохральского в вакууме. В состав добавлена легирующая примесь (фосфор, мышьяк, сурьма). Рассчитать по исходным данным относительное изменение концентрации примеси по длине с учетом испарения и без него. Построить сравнительный график.

Порядок расчета

1. Рассчитать коэффициент динамической вязкости η (Н·с/м²) при температуре плавления основного вещества по уравнению:

$$\eta = \nu \rho^{\text{ж}},$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости (табличное значение);

$\rho^{\text{ж}}$ – плотность жидкой фазы.

2. Рассчитать коэффициент взаимодиффузии ($\text{см}^2/\text{с}$) по уравнению:

$$D = 10^{13} \frac{kT}{B\pi\eta r_i},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

r_i – металлический радиус примесного элемента;

B – числовой коэффициент.

3. Рассчитать угловую скорость вращения монокристалла (с^{-1}):

$$\omega_K = \frac{2\pi n}{60}.$$

4. Рассчитать толщину диффузионного слоя (м):

$$\delta = 2,2\nu^{0,17} D^{0,33} \omega_K^{0,5}.$$

5. Рассчитать эффективный коэффициент распределения:

$$K = \frac{K_{0B}}{K_{0B} + (1 - K_{0B}) \exp\left(-\frac{f\delta}{D}\right)},$$

где f – скорость выращивания.

6. Рассчитать площадь поперечного сечения кристалла (см^2):

$$F = \frac{\pi d_k^2}{4}.$$

7. Рассчитать поверхность испарения расплава в тигле (см^2):

$$F_{\text{И}} = \frac{\pi(d_T^2 - d_k^2)}{4}.$$

8. Рассчитать величину K_{Π} – коэффициент, учитывающий вклад испарения примеси из расплава в процессе выращивания монокристалла:

$$K_{\Pi} = \frac{k_{\text{И}} F_{\text{И}}}{fF}.$$

9. Рассчитать распределение (отношение) примеси в случае ее испарения при $g = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ (g – доля закристаллизовавшегося расплава):

$$\frac{N_{\text{ТВ}(x)}}{KN_{\text{ж}(t_0)}} = (1 - g)^{K + K_{\Pi} - 1}.$$

10. Расчет распределения примеси в случае, если она не испаряется при $g = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ производится по формуле:

$$\frac{N_{\text{ТВ}(x)}}{KN_{\text{ж}(t_0)}} = (1 - g)^{K - 1}.$$

11. Построить графики зависимости распределения примеси (с испарением и без испарения примеси) от величины g .

12. Сформулировать вывод о равномерности распределения примеси и влиянии на это испарения (способствует или не способствует равномерности).

Практическая работа № 6

РАСЧЕТ ГАЗОДИНАМИКИ В ТРУБЧАТОМ РЕАКТОРЕ

Теоретическая часть

Благодаря высоким электрофизическим характеристикам эпитаксиальные слои по сравнению с объемными кристаллами позволяют повысить выход годных приборов, снизить их стоимость, сократить продолжительность операций. Эпитаксиальная технология открывает широкие перспективы для создания многослойных структур.

Термин эпитаксия происходит от греческих слов «эпи» – на и «такис» – расположение в порядке. Было предложено для описания процесса ориентированного нарастания кристаллов друг на друге.

Эпитаксия – процесс ориентированного нарастания одного кристаллического вещества на другом.

Эпитаксия протекает с образованием переходного эпитаксиального слоя (ПЭС), способствующего срастанию двух решеток по плоскостям и направлениям со сходной плотностью упаковки атомов. Считается, что через ПЭС передается основная информация о кристаллической структуре подложки в нарастающую фазу.

Переходный эпитаксиальный слой – промежуточная область между двумя срастающимися фазами, структура и химический состав которой определяется характером физико-химического взаимодействия в данной системе.

Гомоэпитаксия (автоэпитаксия) – процесс ориентированного нарастания кристаллического вещества на кристаллической подложке из того же вещества, отличающегося от основного лишь содержанием примесей. По существу это обычный рост монокристаллов.

Гетероэпитаксия – процесс ориентированного нарастания вещества на инородной кристаллической поверхности. При этом имеет место кристаллохимическое взаимодействие срастающихся фаз с образованием ПЭС.

Хемиэпитаксия – процесс ориентированного нарастания, при котором происходит образование новой фазы (хемиэпитаксиального слоя (ХЭС)) в результате химического взаимодействия подложки с веществом, поступающим из внешней среды. Полученное соединение отличается по химическому составу как от вещества подложки, так и от вещества, поступающего из внешней среды на ее поверхность.

Образующаяся фаза закономерно продолжает кристаллическую решетку подложки. Реакторы установок эпитаксиального наращивания можно разделить на два типа: горизонтальные и вертикальные.

Реакторы горизонтального типа не имеют внутренних движущихся частей. Поток парогазовой смеси подается в реактор параллельно его оси. Реактор изготавливают из трубы круглой или квадратной формы.

Внутри реактора находится подложкодержатель из графита, установленный на подставках с определенным углом наклона для выравнивания состава парогазовой смеси вдоль длины подложкодержателя, на котором размещаются подложки. Для нагрева подложек используют индукционный, резистивный или лучистый нагрев.

На разброс параметров наращиваемого слоя оказывает значительное влияние газодинамическая обстановка в реакторе. Для реактора горизонтального типа естественная конвекция направлена перпендикулярно вынужденной конвекции. В этих условиях наблюдается течение в виде вихрей и спиралей.

В случае только вынужденной конвекции наблюдается ламинарное течение газовых потоков. Переход от реакторов круглой формы к прямоугольно-эллиптической позволяет увеличить производительность установки и снизить разброс параметров выращиваемого слоя.

Вертикальные реакторы предназначены для массового производства эпитаксиальных структур с высокой точностью распределения температур по подложке. На структуру потока влияет его скорость, условия нагрева, площадь подложкодержателя, геометрия реакционных камер и ориентация их в пространстве, организация ввода парогазовой смеси и удаления из камер продукта реакции.

Проточные реакторы трубчатого типа широко используются в технологии эпитаксиальных слоев элементарных полупроводников, полупроводниковых соединений и твердых растворов на их основе. Для расчета скорости роста эпитаксиальных слоев необходимо иметь данные по скорости движения парогазовой смеси, распределению скорости по сечению реактора, влиянию естественной конвекции, то есть уметь рассчитывать газодинамику в трубчатом реакторе.

При средней линейной скорости движения парогазовой смеси менее 100 м/с относительное изменение плотности среды вследствие перепада давления по длине реактора (движение среды происходит из области более высокого давления в область более низкого давления) не превышает 0,05 (5 %). Такая среда относится к несжимаемой.

Различают два режима течения газа (рис. 1.6.1): ламинарный и турбулентный.

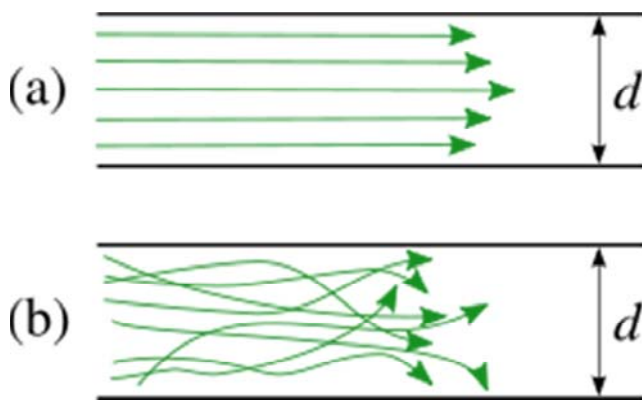


Рис. 1.6.1. Режимы течения газа:
 a – ламинарное течение; b – турбулентное течение

Ламинарное течение – течение, при котором жидкость или газ перемещается слоями без перемешивания и пульсаций. Все пограничные слои начинаются как ламинарные. На них могут воздействовать различные факторы, дестабилизирующие ламинарный пограничный слой, что приводит к переходу в состояние турбулентности.

Побочные градиенты давления, шероховатость поверхности, тепловая и акустическая энергия – примеры дестабилизирующих воздействий. После перехода пограничного слоя в состояние турбулентности, поверхностное трение возрастает. Это основной результат турбулентности пограничного слоя.

В реальных технологических процессах температура парогазовой смеси по мере ее движения по реактору обычно неодинакова. Это значительно усложняет расчеты, так как меняются физические свойства движущейся среды. Поэтому используют понятие средней температуры.

Наличие сил вязкости приводит к неодинаковой скорости газа в поперечном сечении реактора: на стенках реактора она равна нулю, а на оси достигает максимального значения. Эпюры распределения скорости при ламинарном и турбулентном потоке представлены на рис. 1.6.2.

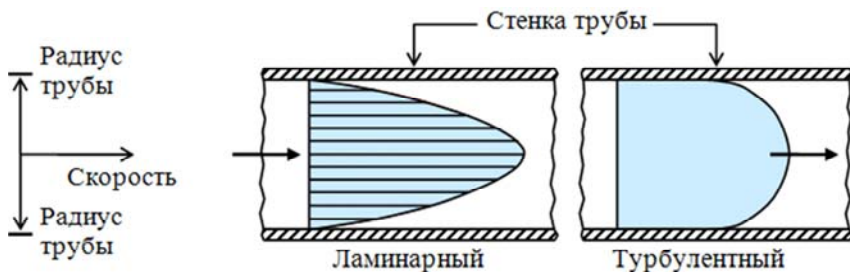


Рис. 1.6.2. Эпюры распределения скорости

Практическая часть

Задание. Рассчитать газодинамику в трубчатом реакторе горизонтального или вертикального типа по исходным данным. Построить эпюру распределения скоростей по сечению реактора.

Порядок расчета

1. Рассчитать площадь поперечного сечения реактора F (м^2):

$$F = \frac{\pi d^2}{4}.$$

2. Рассчитать среднюю температуру (К):

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_{\text{Н}} + T_{\text{В}}}{2}.$$

3. Рассчитать расход газа при средней температуре ($\text{м}^3/\text{с}$):

$$Q = \frac{Q_0 T_{\text{ср}} P_0}{T_0 P},$$

где $P_0 = 101,3$ кПа и $T_0 = 273$ К – нормальные условия (по условию $P = P_0$).

4. Рассчитать среднюю скорость течения газа (м/с):

$$u = \frac{Q}{F}.$$

5. Рассчитать коэффициент динамической вязкости η (Н·с/м²):

$$\eta = \eta_0 \frac{T_0 + C}{T_{cp} + C} \left[\frac{T_{cp}}{T_0} \right]^{1,5},$$

где C – величина, зависящая от рода газа.

6. Рассчитать плотность газа (кг/м³):

$$\rho = \frac{\rho_0 T_0 P}{T_{cp} P_0},$$

где ρ_0 – плотность при нормальных условиях (табличное значение).

7. Рассчитать коэффициент кинематической вязкости (м²/с):

$$\vartheta = \frac{\eta}{\rho}.$$

8. Рассчитать критерий Рейнольдса для определения режима течения:

$$Re = \frac{ud}{\vartheta},$$

где d – диаметр реактора.

В зависимости от величины критерия Рейнольдса различают два режима течения газа:

при $Re < 2100$ имеет место ламинарный режим течения газа (все слои движутся в параллельных направлениях);

при $Re > 2300$ – турбулентный режим течения.

Каждый из указанных режимов имеет свои математические закономерности. В данном пункте по величине критерия сделать вывод о режиме течения газа.

9. Рассчитать максимальную скорость (м/с):

– для установившегося ламинарного течения по формуле

$$u_{\max} = 2u;$$

– для установившегося турбулентного течения по формуле

$$u_{\max} = 1,22u.$$

10. Рассчитать величину A ($\text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) для ламинарного потока:

$$A = \frac{u_{\max}}{R^2},$$

где R – радиус реактора.

11. Рассчитать распределение скорости по сечению реактора:

– для ламинарного потока

$$u = A(R^2 - r^2);$$

– для турбулентного потока

$$u = u_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{7}},$$

где r – расстояние от оси реактора в метрах до сечения (задается ряд значений от 0 до R).

Например, если $R = 30$ мм, то $r = 0; 5; 10; 15; 20; 25; 28; 30$.

12. Построить эпюру скорости или график распределения скорости по сечению реактора с учетом типа реактора.

13. Рассчитать коэффициент потерь давления на трение (безразмерная величина):

– для ламинарного течения $\lambda_{\text{тр}} = \frac{64}{\text{Re}};$

– для турбулентного течения $\lambda_{\text{тр}} = \frac{0,32}{\text{Re}^{0,25}}.$

14. Рассчитать потери давления (Па) на трение:

$$\Delta P = \lambda_{\text{тр}} \frac{\rho u^2}{2} \frac{l}{d}.$$

15. Рассчитать критерий Грасгоффа:

$$\text{Gr} = \left(\frac{gl^3}{g^2} \right) \beta_0 \Delta T,$$

где g – ускорение свободного падения;

l – высота или длина реактора, на котором температура изменяется на ΔT ;

$\beta_0 = 1/273 \text{ K}^{-1}$ – температурный коэффициент объемного расширения газа.

16. Рассчитать критерий Грасгоффа для вертикального реактора. Критерий Грасгоффа служит для определения возможности возникновения естественной конвекции. Если в реакторе в вертикальном направлении существует разность температуры, причем внизу температура больше, чем наверху, то на искусственно создаваемое движение газа накладывается дополнительно движение за счет естественной конвекции.

Если $\text{Gr} \geq 0,3 \text{Re}^2$, то возникает естественная конвекция.

17. Сформулировать выводы по проведенному расчету.

Практическая работа № 7

РАСЧЕТ СКОРОСТИ РОСТА ПЛЕНОК ИЗ ПАРОВОЙ ФАЗЫ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССА И ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ПЛЕНКИ ПО ТОЛЩИНЕ ПРИ ВАКУУМ-ТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ

Теоретическая часть

Классификация методов, применяемых для выращивания монокристаллов, является в известной мере условной. По признаку фазового перехода, в результате которого происходит рост кристаллов, существующие методы можно разделить на три основные группы:

- выращивание из расплава;
- выращивание из раствора;
- выращивание из газовой фазы.

Существующие способы выращивания монокристаллов из газовой фазы можно разделить на две группы: кристаллизация без участия химической реакции и кристаллизация с участием химической реакции. В такой последовательности мы их и рассмотрим.

Кристаллизация без участия химической реакции. В этом случае вещество переносится к растущему кристаллу в результате возгонки. Поэтому процесс можно успешно вести лишь в том случае, если вещество ниже температуры плавления обладает заметной упругостью паров, которая к тому же достаточно сильно зависит от температуры. Таким образом можно выращивать монокристаллы многих сульфидов, селенидов, теллуридов, галогенидов, а также органических веществ и даже таких тугоплавких соединений, как карбиды кремния и бора.

Для получения пленок часто применяется и метод катодного напыления. Благодаря прямолинейности молекулярного пучка он позволяет использовать так называемые «маски» для получения единой пленки заданной, иногда довольно сложной конфигурации. Методом сублимации могут быть выращены и нитевидные кристаллы таких тугоплавких соединений, как окись магния и карбида кремния. Метод сублимации позволяет получать кристаллы, не загрязненные посторонними примесями.

Однако широкое применение этого метода для получения полупроводниковых монокристаллов и пленок сталкивается с определенными трудностями, связанными с необходимостью создания глубокого вакуума, предохраняющего от вредного воздействия следов кислорода. Кроме того в процессе испарения в той или иной мере нарушается стехиометрия кристаллов полупроводниковых соединений.

Кристаллизация с участием химической реакции. Эта группа методов применяется для выращивания кристаллов веществ, не обладающих заметной упругостью пара ниже температуры плавления или нарушающих свою стехиометрию в процессе испарения. В нее входят методы, основанные на химических транспортных реакциях в замкнутой или открытой (проточной) системе и кристаллизация с применением так называемых парофазных реакций.

Рост кристаллов данного вещества происходит при температурах значительно более низких, чем в случае кристаллизации из расплава. Это позволяет снизить равновесную концентрацию вакансий и получать кристаллы с весьма малой плотностью дислокаций. С помощью необходимой аппаратуры можно успешно регулировать стехиометрический состав кристаллизующего вещества. Из газовой фазы можно выращивать кристаллы тугоплавких веществ и веществ, разлагающихся при плавлении.

Вместе с тем указанные методы имеют и известные ограничения. Прежде всего следует отметить малую скорость роста, не позволяющую вырастить достаточно крупные кристаллы. Однако этот недостаток обращается в достоинство, позволяя очень точно контролировать толщину тонких пленок, создавать *p-n*-переходы, меняя состав газа, а также успешно выращивать нитевидные монокристаллы, обладающие огромной механической прочностью.

Термическое напыление использует два физических процесса: испарение нагретого исходного материала и конденсацию его на подложке. Тем не менее ключевым для процесса напыления является то, что он происходит в вакууме.

В высоком вакууме длина свободного пробега испаренных частиц больше расстояния до подложки; они могут попадать на нее без рассеяния на молекулах остаточного газа. При обычно используемом давлении 10^{-4} Па частица диаметром 0,4 нм имеет длину свободного пробега 60 м. За счет отсутствия столкновений частицы испаренного материала сохраняют высокую температуру, что обес-

печивает их необходимую подвижность для формирования на подложке плотного слоя. Вакуум также является защитной средой, позволяющей производить испарение химически активных материалов без нарушения их химического состава.

Испаренный материал осаждается неравномерно, если подложка имеет неровную поверхность, как это часто бывает с интегральными схемами. Поскольку испаренные частицы попадают на подложку преимущественно с одного направления, выступающие детали рельефа препятствуют попаданию материала на некоторые участки поверхности. Это явление называется маскированием или затенением.

Если попытаться произвести процесс напыления при плохом вакууме, полученное покрытие будет, как правило, неоднородным, пористым из-за газовых включений и несплошным. Цвет покрытия будет отличаться от чистого материала и поверхность будет матовой (шероховатой) вне зависимости от гладкости подложки. Химический состав будет также отличаться от исходного за счет образования оксидов, гидроксидов и нитридов.

Недостатком метода является сложность напыления материалов сложного состава из-за фракционирования, происходящего благодаря разнице в давлениях пара компонентов. Этого недостатка лишен, например, метод магнетронного распыления.

Система термического напыления включает в себя, как минимум, вакуумную камеру, в которой поддерживается высокий вакуум специальной откачной системой, подложку и источник тепла, передаваемого испаряемому материалу. В качестве источника тепла могут использоваться:

– резистивные испарители, представляющие собой выполненную из проводящей керамики или тугоплавкого металла «лодочку» (называемую так благодаря своей форме), сквозь которую пропускается электрический ток, разогревающий ее. Испаряемый материал помещается в углубление лодочки, где и испаряется (не обязательно из жидкой фазы). Недостаток этого метода – ограниченный запас материала, лимитированный размерами лодочки. Частный случай – напыление с проволочных нагревателей, на которых испаряемый материал удерживается за счет сил поверхностного натяжения. Применяется для напыления алюминия;

– тигель с косвенным нагревом, электронным или индукционным. В первом случае нагрев осуществляется электронным пото-

ком, поступающим на тигель с кольцевого катода, расположенного вокруг тигля, во втором – вихревыми токами в самом тигле, возбуждаемыми индуктором;

– электронный луч. В этом случае материал может нагреваться и испаряться локально, оставаясь в основной своей массе холодным, что позволяет иметь очень большой запас материала в тигле. Разновидность этого метода – испарение из «автотигля», когда материал помещается в охлаждаемый тигель, вдоль стенок формируется слой твердой фазы, защищающей тигель от воздействия жидкого металла. Такой метод используется, например, для испарения алюминия, в жидком виде чрезвычайно агрессивного к большинству материалов;

– лазерная абляция. Материал испаряется за счет нагрева в фокусе лазерного луча большой мгновенной мощности. Температура в пятне нагрева может быть достаточно высокой для образования изотермической плазмы, то есть испаренные частицы материала ионизируются. Метод позволяет испарять тугоплавкие металлы и материалы сложного состава.

Разновидностью резистивного метода является взрывное испарение (испарение «вспышкой»), применяемое для испарения материалов сложного состава. Температуру лодочки поддерживают существенно выше необходимой для испарения компонента с наименьшим давлением пара, а материал подают в виде порошка или гранул при помощи специального дозирующего устройства. В результате мелкие крупинки порошка испаряются практически мгновенно, и все компоненты достигают подложки одновременно, сохраняя исходную стехиометрию.

Для обеспечения равномерности напыления используют различные варианты вращающихся подложкодержателей. Обычно установка оснащается системой ионной очистки подложек или нагревателем для обеспечения требуемой чистоты поверхности и адгезии.

Особенности проведения процесса:

– чистота осажденного покрытия зависит от качества вакуума и состава исходного материала;

– при данном давлении чистота пленки будет выше при большей скорости напыления, поскольку выше отношение потоков испаряемого материала и остаточных газов;

– толщина пленки зависит от геометрии напылительной системы;

– проволочные испарители не могут применяться для напыления толстых пленок, поскольку существует ограничение на количество материала, которое способно удержаться на них. Лодочки позволяют иметь большой запас материала, а электронно-лучевой метод – практически неограниченный;

– метод испарения является наиболее быстрым и обладает наибольшим КПД из всех методов напыления;

– не все материалы могут напыляться методом термического испарения. Тугоплавкие металлы имеют слишком низкое давление пара и требуют очень высокой температуры для испарения. Многие соединения разлагаются при меньшей температуре, чем начинают испаряться, даже при низких давлениях;

– наибольшей гибкостью обладает электронно-лучевой метод, позволяющий гибко распределять тепловую мощность по нескольким объектам нагрева и получать таким образом пленки управляемого состава.

Конденсация из паровой фазы в вакууме широко используется для получения пленок и эпитаксиальных слоев полупроводников, пленочных металлических межсоединений, контактных площадок, диэлектриков, резисторов и обкладок конденсаторов.

Процессу конденсации из паровой фазы в вакууме предшествуют две последовательно протекающие стадии: испарение или сублимация конденсированной (жидкой или твердой) фазы с поверхности испарителя и массоперенос в паровой фазе от испарителя до подложки (поверхность конденсации). Процесс конденсации является третьей стадией при получении пленок. Эта стадия при низкой температуре подложек (обычно температура подложки существенно ниже температуры испарителя) не лимитирует общую скорость процесса. Лимитирующими являются либо стадия испарения (сублимации) с поверхности испарителя, либо массоперенос в паровой фазе.

Если испаряется чистый компонент ***B***, то образующиеся при этом атомы (молекулы) пара распространяются с поверхности источника в пределах определенного телесного угла и движутся первоначально прямолинейно с энергией, соответствующей температуре $T_{и}$. На некотором расстоянии от поверхности источника начинают происходить их столкновения с молекулами воздуха (компонент ***A***), оставшегося после откачки вакуумными насосами в технологической камере вакуумной установки. Оставшийся воз-

дух обычно называется остаточным, а его давление – давлением остаточных газов. Такие столкновения нарушают прямолинейное движение молекул пара компонента **B** и приводят к соударениям между собой. При большом числе столкновений и соударений перенос компонента **B** в направлении подложки возможен только диффузионным путем за счет разницы давлений при температуре источника и температуре у поверхности подложки. При вакуум-термическом нанесении более равномерную толщину пленки можно получить при использовании кольцевого испарителя. Такой испаритель располагается осесимметрично с подложкой. При испарении расплавов, содержащих два и более компонентов, возникают значительные трудности получения однородных по толщине пленок в молекулярном режиме.

Для расчета плотности потока компонента в диффузионном режиме кроме диффузионного потока учитывают поток Стефана – конвективный поток компонента **B**, возникающий вследствие уменьшения объема паровой фазы при конденсации компонента **B** и направленный нормально к поверхности конденсации.

Практическая часть

Задание. Рассчитать плотность потока конденсирующегося компонента в центре и у края подложки, расположенной осесимметрично и параллельно поверхности испарителя по приведенным данным. Расчет провести при трех значениях $P_{\text{ост}}$ (0,0005; 0,4 и 10 Па).

Порядок расчета

1. Рассчитать величину давления насыщенного пара $P_{(B)И}^0$ компонента при температуре испарителя ($T_{и} > T_{пл}$) по следующей формуле:

$$\log P_{(B)И}^0 = A - BT^{-1} + CT + D \log T.$$

2. Рассчитать величину давления насыщенного пара $P_{(B)К}^0$ компонента при температуре подложки ($T_{к} < T_{пл}$) по следующей формуле:

$$\log P_{(B)К}^0 = A - BT^{-1} + CT + D \log T.$$

3. Рассчитать максимальное давление остаточных газов (воздуха) $P_{\text{ост}}^{\text{max}}$, при котором и ниже которого наблюдается молекулярный режим ($T_{\text{В}} = T_{\text{И}}$):

$$P_{\text{ост}}^{\text{max}} = \frac{2,62 \cdot 10^{-2}}{L(0,37 + \sigma_{\text{В}})^2 (1 + 10,28 \frac{M_{\text{В}}}{T_{\text{В}}})^{0,5}}.$$

4. Сравнить значения максимального давления $P_{\text{ост}}^{\text{max}}$ и $P_{\text{ост}}$. Если $P_{\text{ост}}$ меньше, то режим наблюдается молекулярный.

5. Рассчитать площадь поверхности (см^2) испарения по формуле

$$F = \frac{\pi d_{\text{И}}^2}{4}.$$

6. Рассчитать плотность потока (моль/ $\text{см}^2 \cdot \text{с}$) испаряющегося компонента по уравнению:

$$j_{\text{И}} = 3,16 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_{\text{И}} \frac{P_{(\text{В})\text{И}}^0}{(2\pi RT_{\text{И}} M_{\text{В}})^{0,5}},$$

где $\alpha_{\text{И}}$ – коэффициенты испарения.

7. Рассчитать плотность потока, конденсирующегося в центре подложки по следующему уравнению:

$$j_{\text{к. ц.}} = \frac{\alpha_{\text{К}} j_{\text{И}} F_{\text{И}}}{\pi L^2}.$$

8. Рассчитать плотность потока, конденсирующегося у края подложки радиусом r , по следующему уравнению:

$$j_{\text{к}} = \frac{\alpha_{\text{К}} j_{\text{И}} F_{\text{И}}}{\pi L^2} \left(1 + \frac{r^2}{L^2} \right)^{-2}.$$

9. Для расчета процесса в других режимах (при больших остаточных давлениях) определить среднее значение температуры \bar{T} по уравнению

$$\bar{T} = 0,5(T_{И} + T_{К}).$$

10. Рассчитать параметр C :

$$C = 6,58 \cdot 10^2 \frac{\alpha_{К} \alpha_{И} P_{(B)И}^0 L}{(T_{И} M_{В})^{0,5} D_0 \bar{T}^{0,75}}.$$

11. По мере уменьшения $P_{ост}$ может оказаться, что поток испарения будет меньше диффузионного, то есть произойдет переход от диффузионного режима в режим, лимитируемый испарением компонента при его диффузионной доставке к поверхности конденсации. Рассчитать минимальное значение давления $P_{ост}^*$, при котором произойдет этот переход:

$$P_{ост}^* = \frac{(P_{(B)И}^0 - P_{(B)К}^0) \exp C}{\exp C - 1}.$$

12. В интервале значений давления остаточного газа лимитирующим будет процесс испарения при диффузионной доставке компонента:

$$P_{ост}^{\max} < P_{ост} < P_{ост}^*.$$

13. Рассчитать плотность потока конденсирующегося компонента при остаточном давлении 0,4 Па по уравнению:

$$j_{К} = \frac{\alpha_{К} j_{И} F_{И}}{2\pi L^2}.$$

14. При

$$P_{\text{ост}} > P_{\text{ост}}^*$$

наблюдается диффузионный режим протекания процесса.

Рассчитать усредненное значение коэффициента диффузии ($\text{см}^2/\text{с}$) по уравнению

$$\bar{D} = 0,57 \frac{\bar{T}^{1,75} \cdot 101\,325}{273^{1,75} P_{\text{ост}}}.$$

15. Рассчитать плотность потока в объеме технологической камеры:

$$j_{\text{Д}} = 10^{-6} \frac{\bar{D} P_{\text{ост}}}{L R \bar{T}} \ln \frac{P_{\text{ост}}}{P_{\text{ост}} + P_{(B)k}^0 + P_{(B)И}^0}.$$

16. Рассчитать плотность потока, конденсирующегося в диффузионном режиме компонента:

$$j_{\text{к}} = \frac{\alpha_{\text{к}} j_{\text{Д}} F_{\text{И}}}{2\pi L^2}.$$

17. Сформулировать вывод по проведенному расчету.

Практическая работа № 8

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ И КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ И ВЗАИМОДИФФУЗИИ

Теоретическая часть

Вязкость – свойство газов и жидкостей оказывать сопротивление необратимому перемещению одной их части относительно другой при сдвиге, растяжении и других видах деформации. В результате работа, затрачиваемая на это перемещение, рассеивается в виде тепла.

Механизм внутреннего трения в жидкостях и газах заключается в том, что хаотически движущиеся молекулы переносят импульс из одного слоя в другой, что приводит к выравниванию скоростей – это описывается введением силы трения. Вязкость твердых тел обладает рядом специфических особенностей и рассматривается обычно отдельно.

Динамическая (абсолютная) вязкость η – сила, действующая на единичную площадь плоской поверхности, которая перемещается с единичной скоростью относительно другой плоской поверхности, находящейся от первой на единичном расстоянии.

Внутреннее трение жидкостей, как и газов, возникает при движении жидкости вследствие переноса импульса в направлении, перпендикулярном к направлению движения. Справедлив общий закон внутреннего трения – закон Ньютона:

$$\tau = -\eta \frac{\partial v}{\partial n}.$$

Коэффициент вязкости η (коэффициент динамической вязкости, динамическая вязкость) может быть получен на основе соображений о движениях молекул. Очевидно, что η будет тем меньше, чем меньше время t «оседлости» молекул. Эти соображения приводят к выражению для коэффициента вязкости, называемому уравнением Френкеля–Андрате:

$$\eta = C e^{\frac{\sigma}{kT}}.$$

Иная формула, представляющая коэффициент вязкости, была предложена Бачинским. Как показано, коэффициент вязкости определяется межмолекулярными силами, зависящими от среднего расстояния между молекулами; последнее определяется молярным объемом вещества V_M . Многочисленные эксперименты показали, что между молярным объемом и коэффициентом вязкости существует соотношение:

$$\eta = \frac{c}{V_M - b},$$

где c и b – константы.

Это эмпирическое соотношение называется формулой Бачинского.

Динамическая вязкость жидкостей уменьшается с увеличением температуры и растет с увеличением давления.

Кинематическая вязкость ν – отношение динамической вязкости η к плотности жидкости ρ , определяется формулой

$$\nu = \frac{\eta}{\rho},$$

где η – динамическая вязкость;

ρ – плотность жидкости.

Диффузия – взаимное проникновение соприкасающихся веществ вследствие теплового движения частиц вещества. Диффузия имеет место в газах, жидкостях и твердых телах, причем диффундировать могут как находящиеся в них частицы посторонних веществ, так и собственные частицы (самодиффузия).

Взаимодиффузия характеризует процесс взаимообмена массы между телами, когда имеет место неоднородность в распределении концентрации. Характерной особенностью взаимодиффузии является направленность в перемещении диффундирующих частиц в пространстве, чего нет в случае самодиффузии, при которой движение носит хаотический, броуновский характер.

Коэффициент диффузии – количественная характеристика скорости диффузии, равная количеству вещества (в массовых единицах), проходящего в единицу времени через участок единичной площади (например, 1 м^2) при градиенте концентрации, равном единице.

Коэффициент диффузии определяется свойствами среды и типом диффундирующих частиц.

Зависимость коэффициента диффузии от температуры в простейшем случае выражается законом Аррениуса:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_\alpha}{RT}\right),$$

где D – коэффициент диффузии;

E_α – энергия активации;

R – универсальная газовая постоянная;

T – температура.

Диффузией называется самопроизвольное выравнивание концентраций компонентов в смеси различных веществ, обусловленное тепловым движением частиц. Выравнивание концентраций сопровождается переносом молекул каждого из компонентов из области с большей их концентрацией в область с меньшей концентрацией.

В большинстве расчетов процессов полупроводниковой технологии используют кинетические коэффициенты динамической и кинематической вязкости и взаимодиффузии. Очень часто табличные данные по этим величинам отсутствуют. Поэтому важно уметь проводить расчет этих величин на основе модельных представлений с использованием молекулярных характеристик, а также пересчитывать величины, известные, например, для определенных значений температуры и давления, на другие значения указанных параметров.

Коэффициент динамической вязкости газов при средней длине свободного пробега молекул l , меньшей размеров реактора, не зависит от давления. В отличие от коэффициента динамической вязкости газов коэффициент кинематической вязкости зависит от давления.

Задание. Рассчитать коэффициенты динамической и кинематической вязкости, теплопроводности газа B , смеси компонента B (молярная доля 0,15) и компонента A , а также коэффициент взаимодиффузии при указанной температуре и давлении 101,3 кПа.

Порядок расчета

1. Рассчитать значение динамической вязкости ($\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$) для компонента B по уравнению

$$\eta = 2,669 \cdot 10^{-8} \frac{(MT)^{0,5}}{\sigma^2 \varpi_1},$$

где M – молекулярная масса газа;
 σ – диаметр сферы молекулы;
 ϖ_1 – интеграл столкновений;
 T – температура.

Интеграл столкновений рассчитать по уравнению

$$\varpi_1 = \frac{1,16145}{(T^*)^{0,14874}} + \frac{0,52487}{\exp(0,7732T^*)}.$$

Параметр T^* для компонента \mathbf{B} рассчитать по уравнению

$$T^* = \frac{T}{\varepsilon/k},$$

где ε – параметр потенциала Ленарда–Джона;
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

После вычисления коэффициента динамической вязкости оцениваем ошибку расчета, пользуясь справочными данными, предоставляемыми преподавателем.

2. Рассчитать коэффициент кинематической вязкости газа \mathbf{B} по уравнению

$$\nu = \frac{\eta}{\rho},$$

где ρ – плотность газа или смеси газов.

3. Рассчитать величину T^* для компонента \mathbf{A} по уравнению

$$T^* = \frac{T}{\varepsilon/k}.$$

4. Рассчитать интеграл столкновений для компонента \mathbf{A} по уравнению

$$\varpi_1 = \frac{1,16145}{(T^*)^{0,14874}} + \frac{0,52487}{\exp(0,7732T^*)}.$$

5. Рассчитать значение динамической вязкости для компонента **A** по уравнению

$$\eta = 2,669 \cdot 10^{-8} \frac{(MT)^{0,5}}{\sigma^2 \varpi_1}.$$

После вычисления коэффициента динамической вязкости оценить ошибку расчета, пользуясь справочными данными.

6. Рассчитать коэффициент динамической вязкости смеси газов **A** и **B** по уравнению

$$\eta_{\text{см}} = \frac{\sum (M_i x_i)}{\sum \left(\frac{M_i x_i}{\eta_i} \right)},$$

где η_i – коэффициент динамической вязкости компонента смеси;

M_i – молекулярная масса компонента смеси;

x_i – молярная доля компонента.

7. Рассчитать плотность смеси газов по уравнению

$$\rho_{\text{см}} = \frac{\sum (M_i x_i)}{V_0},$$

где $V_0 = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$.

8. Рассчитать коэффициент кинематической вязкости газа **B** по уравнению

$$\nu_{\text{см}} = \frac{\eta}{\rho},$$

где ρ – плотность смеси газов.

9. Рассчитать коэффициент взаимодиффузии по уравнению

$$D = 1,883T^{1,5} \frac{[(M_A + M_B)/(M_A M_B)]^{0,5}}{P \sigma_{AB}^2 \varpi_3},$$

где M – молекулярная масса;

P – давление;

σ_{AB}^2 – характеристическое состояние;

ϖ_3 – интеграл столкновений.

Для этого рассчитаем значение ε/k для смеси газов по формуле

$$\frac{\varepsilon}{k} = \left[\frac{\varepsilon_A}{k} \cdot \frac{\varepsilon_B}{k} \right]^{0,5}.$$

Параметр T^* рассчитывают по уравнению

$$T^* = \frac{T}{\varepsilon/k}.$$

Рассчитать интеграл столкновений для компонента A по уравнению

$$\varpi_3 = \frac{1,06036}{(T^*)^{0,1561}} + \frac{0,19300}{\exp(0,47635T^*)} + \frac{1,03587}{\exp(1,52996T^*)}.$$

Рассчитать характеристическое расстояние по уравнению

$$\sigma_{AB} = 0,5(\sigma_A + \sigma_B).$$

После вычисления коэффициента взаимодиффузии оценить ошибку расчета, пользуясь справочными данными, предоставляемыми преподавателем.

10. Рассчитать коэффициент теплопроводности λ газа B , состоящего из атомов или неполярных и слабополярных молекул, по следующим уравнениям:

$$\lambda = 1,32 \cdot 10^3 \frac{11,17 + (C_p - R)}{M};$$

$$\lambda = 10^3 \eta \frac{18,71 + (C_p - R)}{M}.$$

Обычно λ имеет значение среднее между рассчитанными по уравнениям.

Сравнить полученное значение с табличным.

11. Рассчитать коэффициент теплопроводности λ газа A , состоящего из атомов или неполярных и слабополярных молекул, по следующим уравнениям:

$$\lambda = 1,32 \cdot 10^3 \frac{11,17 + (C_p - R)}{M};$$

$$\lambda = 10^3 \eta \frac{18,71 + (C_p - R)}{M}.$$

Обычно λ имеет значение среднее между рассчитанными по уравнениям.

Сравнить полученное значение с табличным.

12. Рассчитать коэффициент теплопроводности газовой смеси по уравнению

$$\lambda_{\text{см}} = \frac{\sum \lambda_i y_i}{\sum A_{ij} y_j},$$

где

$$A_{ij} = \frac{\left[1 + (\lambda_i \lambda_j)^{0,5} \cdot \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{0,25} \right]^2}{\left[8 \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right) \right]^{0,5}}.$$

Из уравнения следует, что если $i = j$, то величина $A_{ij} = 1$.

13. Сформулировать выводы по проведенному расчету.

Практическая работа № 9

РАСЧЕТ ШИХТЫ ДЛЯ СИНТЕЗА СТЕКЛООБРАЗНОГО МАТЕРИАЛА

Теоретическая часть

Стеклом называются аморфные тела, получаемые путем переохладения расплава независимо от их состава и температурной области затвердевания и обладающие в результате постепенного увеличения вязкости механическими свойствами твердых тел.

Шихта – это однородная смесь предварительно подготовленных и отвешенных по заданному рецепту компонентов. Шихта должна быть однородной, соотношение сырьевых материалов в ней должно быть одинаковым и соответствовать заданному составу. Основными условиями получения правильно подготовленной шихты являются: применение обогащенных и подготовленных материалов, точная дозировка, тщательное перемешивание до полной однородности, подача и загрузка, исключающая возможность ее расслаивания. Сырьевые материалы подразделяются на две группы: главные и вспомогательные.

К главным сырьевым материалам относятся вещества, с которыми в стекломассу вводятся кислотные, щелочные и щелочноземельные окислы. Они образуют основу стекла и определяют его основные свойства.

К вспомогательным сырьевым материалам относятся вещества, способствующие ускорению варки стекла, улучшению качества стекломассы, изменению характеристик стекла – это ускорители варки, окислители и восстановители, глушители, красители и обесцвечиватели.

К сырьевым материалам предъявляется ряд требований, касающихся постоянства химического и зернового состава, однородности, влажности и содержания в них нежелательных примесей. Колебания химического состава сырья негативно сказываются на однородности стекла, поэтому в таких случаях необходимо корректировать состав шихты.

Сырьевые материалы, взвешенные в определенном количестве в соответствии с расчетом шихты, подлежат дальнейшему смешиванию до однородного состояния. Для этого предназначены различные мельницы или смесители.

Подготовленная шихта загружается в тигли и помещается в печь для варки стекла.

Термический процесс, в результате которого смесь разнородных компонентов образует однородный расплав, называется стекловарением.

Сыпучую или гранулированную шихту нагревают в ваннах или других печах, в результате чего она превращается в жидкую стекломассу, претерпевая сложные физико-химические взаимодействия компонентов, происходящие на протяжении значительного температурного интервала. Именно поэтому нельзя к процессу получения стекла применить термин «плавление», поскольку компоненты шихты плавятся при разных температурах и, взаимодействуя друг с другом при повышенных температурах, образуют в конечном счете особое состояние вещества в расплаве – стекло. Это особое состояние стекла подчеркивается и тем, что у него нет точки плавления подобно другим соединениям и простым веществам, у него есть только «интервал размягчения».

Различают пять этапов стекловарения: силикатообразование, стеклообразование, осветление (дегазация), гомогенизация (усреднение), студка (охлаждение).

Силикатообразование. На этой стадии происходит начало взаимодействия компонентов шихты и образование силикатов – соединений компонентов шихты с кремнием.

Стеклообразование. Образовавшийся на первом этапе спек с повышением температуры плавится, завершаются реакции силикатообразования, происходит взаимное растворение силикатов. В расплаве силикатов идет весьма медленное, постепенное растворение избыточного кварца, составляющее главное содержание этого этапа. К концу этапа появляется прозрачный не однородный по составу расплав, включающий много пузырей. Для обычных стекол этот этап завершается при 1200–1250 °С.

Осветление. В течение этого сложного этапа из расплава удаляются видимые газовые включения: крупные и мелкие пузыри. Для обычных стекол этот этап завершается при 1500–1600 °С.

Гомогенизация. На этом этапе происходит усреднение расплава по составу, он становится химически однородным. Гомогенизация и осветление протекают одновременно при одних и тех же температурах.

Студка. На данном этапе происходит подготовка стекломассы к формованию, для чего равномерно снижают температуру на 300–400 °С и добиваются необходимой для выработки вязкости стекла.

Разделение процесса стекловарения на пять этапов является условным. Это деление можно наблюдать только в микрообъемах шихты, превращающихся в стекло при нагревании, например, с помощью нагревательного микроскопа. В реальных промышленных условиях этапы стекловарения накладываются друг на друга и разделить их не всегда возможно. Практически только первый и пятый этапы разделены в ваннных печах временем и пространством. Этапы второй, третий и четвертый начинаются одновременно и совмещаются до завершения этапа стеклообразования, а третий и четвертый идут нераздельно.

Известный английский ученый В. Тернер дал следующую классификацию явлений, происходящих при стекловарении:

– физические процессы: нагревание шихты, испарение влаги, плавление компонентов шихты, растворение компонентов в образовавшейся жидкости, полиморфные превращения, улетучивание некоторых компонентов;

– химические процессы: диссоциация гидратов, удаление химически связанной воды, диссоциация карбонатов, сульфатов, нитратов и перекисей, взаимодействие разных компонентов и образование силикатов.

Следует заметить, что эти изменения происходят одновременно и их разделение является условным, так же как условно разделение процесса варки на пять этапов. Однако такое разделение позволяет дифференцировать различные воздействия на смесь стеклообразующих компонентов и полнее оценить изменения, происходящие при нагревании шихты. Процессы, в результате которых шихта превращается в стекло, являются процессами физико-химическими, поскольку физические воздействия влекут за собой химические изменения и наоборот, например нагревание и диссоциация, реакции силикатообразования и повышение температуры и т. п.

В общем виде процессы, протекающие при нагревании шихты, можно представить следующим образом. На ранних стадиях нагревания между компонентами шихты начинаются реакции в твердой фазе, приводящие к появлению новых образований и слабому спеканию зерен шихты. С повышением температуры в зонах контакта зерен появляется эвтектическая жидкость, идет термическая диссоциация компо-

нентов, начинается силикатообразование и возрастает степень спекания зерен шихты (стадия спека). При дальнейшем нагревании количество жидкости увеличивается за счет легкоплавких компонентов, идут прямые реакции силикатообразования, жидкая фаза становится преобладающей и начинается растворение избыточного кварца. При анализе изменений, происходящих в ограниченном объеме шихты (2–3 мм³) по мере увеличения температуры и выдержки, например в нагревательном микроскопе, можно с помощью соответствующих методов исследования установить изменения в шихте.

При еще более высокой температуре завершается растворение кварца, происходит освобождение расплава от газовых включений и он усредняется по составу (стадия жидкости). Далее идет формирование заготовок или изделий из стекломассы тем или иным методом. Существующие разновидности технологических способов формирования стекла подразделяются по характеру внешнего воздействия на стекломассу, виду производимых из стекла изделий и принципу взаимодействия стекломассы с формирующими органами и устройствами. Наиболее распространенные способы формирования: вытягивание, прокатка, прессование, выдувание, прессовывдувание и флоат-способ, основанный на свободном растекании стекломассы на подложке (расплаве олова).

Превращение стекломассы в стеклянные изделия (формование, или выработка) может осуществляться разнообразными способами. Нет другого материала, который допускал бы такое многообразие способов формирования, как промышленное стекло. Из стекла можно изготавливать мельчайшие изделия (бисер, миниатюрные электронные лампочки, тончайшее стекловолокно диаметром в доли микрона) и изделия весьма больших размеров и веса (витринные стекла площадью в 15–20 м², диски для телескопов диаметром в несколько метров, высокие стеклянные колонны). Для изготовления каждого изделия можно выбрать наиболее производительный, дешевый и обеспечивающий заданное качество изделий способ выработки.

Возможность формирования стекломассы в пластичном состоянии связана прежде всего с особенностями изменения ее вязкости в зависимости от температуры. По окончании провара стекломасса становится текучей, а по мере охлаждения – пластичной. Пластичность позволяет расплаву принять заданную форму, после чего изделие охлаждается и затвердевает, сохраняя приданную ему форму.

Интервал температур, при которых стекло может быть отформовано, называется интервалом формования или выработки. В этом интервале вязкость стекла изменяется в пределах 10^2 – 10^8 Па·с, а при полном отвердевании становится равной 10^{12} Па·с.

Температуры и вязкости, соответствующие выработке, зависят от состава стекла и способа формования.

Формование протекает в две стадии. Формообразование – придание пластичной стекломассе конфигурации формуемого изделия в результате приложения внешних сил, характер действия которых обусловлен видом изделия и способом формования. Определяющие факторы: вязкость, поверхностное натяжение, пластичность, упругость и характер температурного изменения этих свойств.

Фиксация формы – закрепление конфигурации отформованного изделия в результате твердения стекломассы, характер которого обусловлен составом стекла, видом изделия и способом охлаждения. Определяющие факторы: скорость твердения стекла, изменение вязкости стекломассы при изменении температуры (влияние состава стекла) и температуры во времени (условия охлаждения).

Практически формообразование изделия осуществляется значительно быстрее, чем фиксация его формы, поэтому в ходе процесса формования обычно часть времени затрачивается непосредственно на охлаждение и твердение изделий, и, соответственно, в общем цикле формования помимо указанных стадий выделяется особый технологический этап – охлаждение изделия.

В практических условиях для регулирования в нужном направлении продолжительности всего процесса формования и отдельных его этапов необходимо знать скорость твердения стекломассы и возможные технологические способы изменения этого параметра.

Для расчета шихты принимают, что из сырьевых материалов шихты в стекломассу переходят только оксиды, а влага и газы, образующиеся при химических реакциях в шихте, удаляются с продуктами горения топлива, сжигаемого в печи. Многие компоненты при температуре варки стекла частично улетучиваются, и для получения требуемого содержания в составе стекла в шихту их вводят в некотором избытке.

Двуокись кремния (кремнезем SiO_2) является главной составной частью большинства оптических стекол, для его введения исполь-

зуют природный кристаллический кварц (горный хрусталь), кварцевый песок (98 % основного вещества).

Борный ангидрид (B_2O_3) вводят в шихту в виде борной кислоты (улетучивается в процессе варки, поэтому берут в 2 раза больше).

Оксид алюминия (Al_2O_3) вводят глиноземом (98 % основного вещества).

Двуокись циркония (ZrO_2) чаще всего вводят чистым оксидом циркония (100 % основного вещества).

Оксид натрия (Na_2O) – важнейшая составная часть большинства стекол; вводят в шихту посредством соды Na_2CO_3 .

Оксид калия (K_2O) вводят в шихту в виде углекислого калия K_2CO_3 .

Оксид лития (Li_2O) вводят в виде углекислого лития Li_2CO_3 .

Оксид кальция (CaO) вводится в шихту посредством углекислого кальция (мела) $CaCO_3$.

Оксид магния (MgO) вводят в шихту карбонатом магния $MgCO_3$.

Оксид бария (BaO) вводят в шихту в виде углекислого бария $BaCO_3$.

Оксид свинца (PbO) вводят в шихту в виде свинцового глета или свинцового сурика.

Оксид бериллия (BeO) вводят чистым оксидом бериллия.

Оксид цинка (ZnO) вводят цинковыми белилами (100 % основного вещества).

В процессе варки состав шихты претерпевает изменения. Часть компонентов улетучивается, а другая – прибавляется. При расчете шихты это учитывается использованием так называемых шихтных множителей, значения которых найдены опытным путем и имеются в справочной литературе.

Например, кварцевый песок содержит 98 % основного вещества SiO_2 . В этом случае шихтный множитель вычисляется по формуле

$$K = \frac{100}{98} = 1,02.$$

Для карбонатов (солей) необходимо рассчитать коэффициенты следующим образом:

$$K = \frac{M_{\text{соли}}}{M_{\text{оксида}}}.$$

При расчете состава шихты исходят из заданного химического состава стекла, выраженного в массовых % (масс. %), молярных % (мол. %), молекулярной форме (числе молей), массовых частях (масс. ч.), а также химического состава сырьевых материалов, применяемых для варки стекла.

Обычно шихту рассчитывают на 100 масс. ч. песка или на 100 масс. ч. стекломассы. Второй метод предпочтителен, так как дает более ясное представление о составе стекла, а в условиях производства значительно упрощает калькуляцию себестоимости готовой стекломассы.

Задание. Рассчитать шихту для синтеза стеклообразного материала указанного состава. Подобрать сырье. Составить технологическую схему получения стекла по приведенному в теоретической части технологическому процессу.

Рассчитать формулу Зегера стекла по заданному химическому составу.

Порядок расчета

1. Перевести содержание компонента из молярных % в массовые части. Для этого молярные % необходимо поделить на молекулярную массу оксида и умножить на 100 %. Повторить операцию для всех оксидов.

2. Вычислить сумму массовых частей всех оксидов.

3. Перевести массовые части в массовые %. Для этого массовую часть каждого оксида необходимо поделить на сумму массовых частей и умножить на 100 %.

4. Вычислить сумму массовых % всех оксидов. Сумма в массовых % должна быть равна 100 %.

5. Определить шихтные коэффициенты для всех оксидов с учетом выбранных сырьевых материалов.

6. Составить рецепт шихты в граммах. Для этого необходимо умножить количество в массовых % на шихтные коэффициенты.

7. Вычислить общее количество шихты (г) и пересчитать состав шихты на 100 грамм. Для этого необходимо поделить количество каждого материала (г) на общее количество шихты (г) и умножить на 100.

8. Составить технологическую схему процесса синтеза оксидного стекла.

9. Сформулировать вывод по проведенной работе.

10. Составить формулу Зегера по указаниям преподавателя.

Практическая работа № 10

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ТЕРМОПЛАСТОВ

Теоретическая часть

Полимеры – неорганические и органические, аморфные и кристаллические вещества, состоящие из «мономерных звеньев», соединенных в длинные макромолекулы химическими или координационными связями.

Полимер – это высокомолекулярное соединение. Количество мономерных звеньев в полимере (степень полимеризации) должно быть достаточно велико, в ином случае соединение будет называться олигомером. Во многих случаях количество звеньев может считаться достаточным, чтобы отнести молекулу к полимерам, если при добавлении очередного мономерного звена молекулярные свойства не изменяются. Полимеры – вещества с молекулярной массой от нескольких тысяч до нескольких миллионов.

Если связь между макромолекулами осуществляется с помощью слабых сил Ван-Дер-Ваальса, они называются термопластами, если с помощью химических связей – реактопластами. К линейным полимерам относится, например, целлюлоза, к разветвленным амилопектин. Есть полимеры со сложными пространственными трехмерными структурами.

В строении полимера можно выделить мономерное звено – повторяющийся структурный фрагмент, включающий несколько атомов. Полимеры состоят из большого числа повторяющихся группировок (звеньев) одинакового строения, например поливинилхлорид $(-\text{CH}_2-\text{CHCl}-)_n$. Высокомолекулярные соединения, молекулы которых содержат несколько типов повторяющихся группировок, называют сополимерами или гетерополимерами.

Полимер образуется из мономеров в результате реакций полимеризации или поликонденсации. К полимерам относятся многочисленные природные соединения: белки, нуклеиновые кислоты, полисахариды, каучук и другие органические вещества. В большинстве случаев понятие относят к органическим соединениям, однако существует и множество неорганических. Большое число полимеров

получают синтетически на основе простейших соединений элементов природного происхождения путем реакций полимеризации, поликонденсации и химических превращений. Названия полимеров образуются из названия мономера с приставкой поли-: полиэтилен, полипропилен, поливинилацетат.

Особые механические свойства:

- эластичность – способность к высоким обратимым деформациям при относительно небольшой нагрузке (каучуки);
- малая хрупкость стеклообразных и кристаллических полимеров (пластмассы, органическое стекло);
- способность макромолекул к ориентации под действием направленного механического поля (используется при изготовлении волокон и пленок).

Особенности растворов полимеров:

- высокая вязкость раствора при малой концентрации полимера;
- растворение полимера происходит через стадию набухания.

К особому химическому свойству полимеров относится способность резко изменять свои физико-механические свойства под действием малых количеств реагента (вулканизация каучука).

Вышеперечисленные свойства объясняются не только большой молекулярной массой, но и тем, что макромолекулы имеют цепное строение и обладают гибкостью.

По химическому составу все полимеры подразделяются на органические, элементоорганические, неорганические.

Следует отметить, что в технике полимеры часто используются как компоненты композиционных материалов, например стеклопластиков. Возможны композиционные материалы, все компоненты которых полимеры (с разным составом и свойствами).

По форме макромолекул полимеры делят на линейные, разветвленные (иногда звездообразные), ленточные, плоские, гребнеобразные, полимерные сетки и т. д.

Полимеры подразделяют по полярности, влияющей на растворимость в различных жидкостях. Полярность звеньев полимера определяется наличием в их составе диполей – молекул с разбросанным распределением положительных и отрицательных зарядов. В неполярных звеньях дипольные моменты связей атомов взаимно компенсируются. Полимеры, звенья которых обладают значительной полярностью, называют гидрофильными или полярными; по-

лимеры с неполярными звеньями – неполярными или гидрофобными. Полимеры, содержащие как полярные, так и неполярные звенья, называются амфифильными. Гомополимеры, каждое звено которых содержит как полярные, так и неполярные крупные группы, предложено называть амфифильными гомополимерами.

По отношению к нагреву полимеры подразделяют на термопластичные и терморезистивные. Термопластичные полимеры (полиэтилен, полипропилен, полистирол) при нагреве размягчаются, даже плавятся, а при охлаждении затвердевают. Этот процесс обратим. Терморезистивные полимеры при нагреве подвергаются необратимому химическому разрушению без плавления. Молекулы терморезистивных полимеров имеют нелинейную структуру, полученную путем сшивки (например, вулканизация) цепных полимерных молекул. Упругие свойства терморезистивных полимеров выше, чем у термопластов, однако терморезистивные полимеры практически не обладают текучестью, вследствие чего имеют более низкое напряжение разрушения.

Термопласты – полимерные материалы, способные обратимо переходить при нагревании в высокоэластичное либо вязкотекучее состояние.

При обычной температуре термопласты находятся в твердом состоянии. При повышении температуры они переходят в высокоэластичное и далее в вязкотекучее состояние, что обеспечивает возможность формования их различными методами. Эти переходы обратимы и могут повторяться многократно, что позволяет производить переработку бытовых и производственных отходов из термопластов в новые изделия.

Переработка термопластов в изделия не сопровождается необратимой химической реакцией, то есть они пригодны для повторной обработки (формования).

Термопласты могут иметь линейное или разветвленное строение, быть аморфными (полистирол, полиметилметакрилат) либо кристаллическими (полиэтилен, полипропилен). В отличие от реактопластов для термопластов характерно отсутствие трехмерной сшитой структуры и переход в текучее состояние, что делает возможным термоформовку, литье и экструзию изделий из них.

Некоторые линейные полимеры не являются термопластами, так как температура разложения у них ниже температуры текучести (целлюлоза).

Практическая часть

Изучение технологии получения полиэтилена высокого давления

Полиэтилен, полученный при высоком давлении, называют полиэтиленом высокого давления (ПЭВД, ПВД) или низкой плотности (ПЭНП, LDPE). Полиэтилен низкой плотности (LDPE) – ПЭ со сравнительно сильно разветвленной макромолекулой и низкой плотностью (0,916–0,935 г/см³). Процесс его изготовления протекает при высоком давлении порядка 100–300 МПа и температуре 100–300 °С, поэтому обозначается так же, как полиэтилен высокого давления (ПЭВД).

Макромолекулы полиэтилена высокого давления содержат боковые углеводородные цепи. Молекулы полиэтилена среднего давления практически неразветвленные, в нем больше доля кристаллической фазы, поэтому этот материал более плотный. Молекулы полиэтилена низкого давления занимают промежуточное положение. Большим количеством боковых ответвлений объясняется более низкая кристалличность и, соответственно, более низкая плотность ПЭВД по сравнению с ПЭНД и ПЭСД.

Структура полиэтилена представлена на рис. 1.10.1.

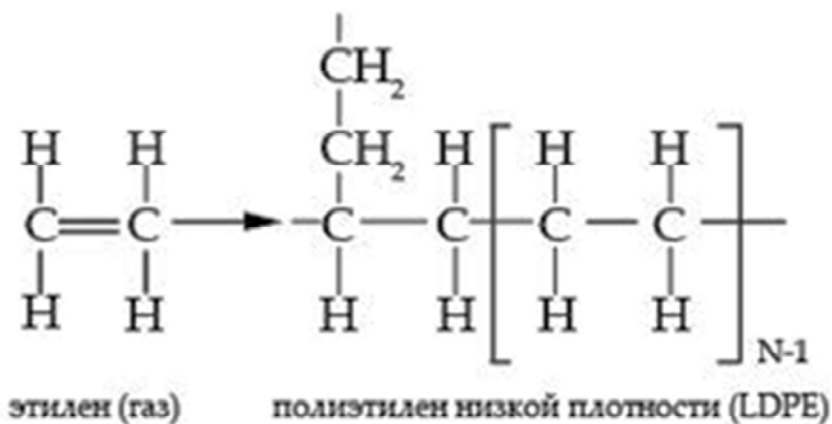


Рис. 1.10.1. Структура полиэтилена высокого давления

ПЭВД по объему производства и применения занимает ведущее место в мире. Впервые был использован в электротехнической промышленности, главным образом в качестве изоляционного материала для подводных кабелей и позднее для радаров. Кристалличность ПЭВД обычно колеблется в интервале 55–70 % (по сравнению с 75–90 % ПЭНД).

Материалом для получения полиэтилена выступает непредельный углеводород – этилен. Для того чтобы из газообразного вещества получился ПВД, его необходимо полимеризовать, то есть создать ковалентные связи между молекулами углеводорода. Однако сделать это нужно при определенных условиях: нагреть базовое вещество до температуры 200–260 °С, сжать газ под давлением не меньше 150 МПа (но и не больше 300 МПа) и инициировать реакцию с помощью активатора. Такими активаторами–инициаторами могут являться кислород, перекись или нитросоединения.

Во время нагрева молекулы активатора распадаются на свободные радикалы, которые вступают в реакцию с C_2H_4 (этилен). За счет нагревания и присоединения активатора инициированная молекула этилена начинает активно присоединять к себе все больше и больше новых молекул C_2H_4 , то есть начинается полимеризация этилена. ПВД базовых марок имеет нелинейную структуру с множественными боковыми ответвлениями цепи от центра начала реакции. Иногда боковая цепь равна или даже превосходит длину основной цепи.

Получение полиэтилена высокого давления осуществляется на установке, принципиальная схема которой изображена на рис. 1.10.2.

Очищенный газообразный этилен с добавкой небольшого количества кислорода (катализатора) вместе с непрореагировавшим этиленом сжимают в компрессоре 1 до 1500 атм.

Из компрессора этилен направляется в маслоотделитель 2, где отделяется (освобождается) от смазочного масла, которое попадает в сжатый этилен при смазке компрессора. Далее этилен поступает в реактор 3, где происходит полимеризация. Температура верхней части реактора 100 °С, нижней 200 °С.

Реактор представляет собой систему наклонно расположенных толстостенных труб с внутренним диаметром 25 мм и длиной до 300 м.

Степень полимеризации (степень превращения) этилена за один проход через реактор составляет 10–12 %.

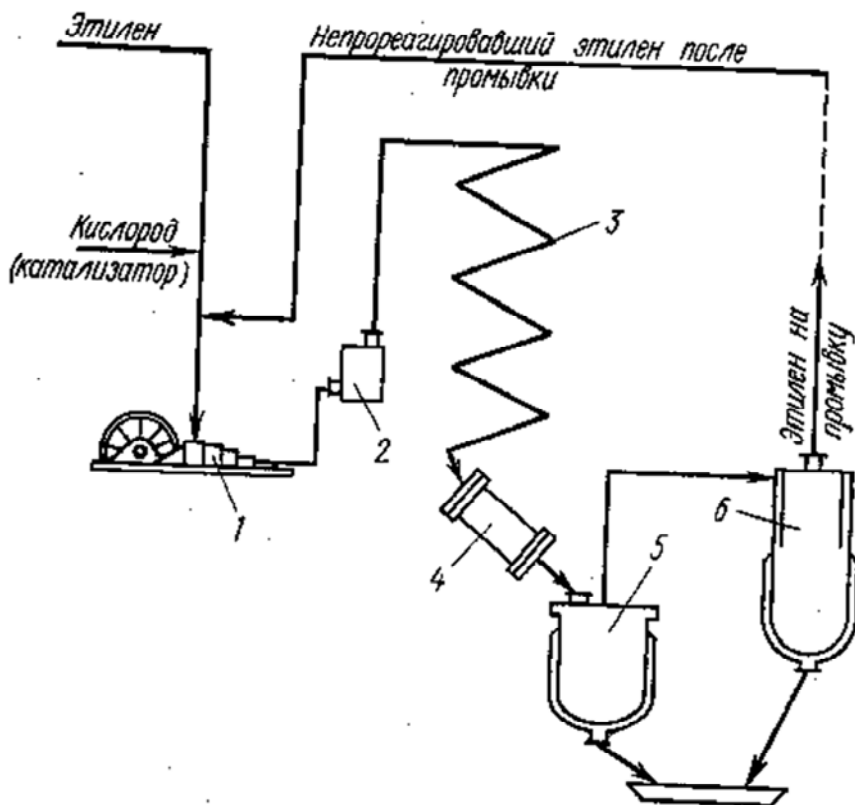


Рис. 1.10.2. Установка для синтеза полиэтилена высокого давления

После реактора 3 полученный полиэтилен и непрореагировавший этилен проходят сепаратор 4, где отделяется полиэтилен, который собирается в приемнике 5.

После снижения давления от полиэтилена отделяют непрореагировавший этилен, который направляют через ловушку 6 на промывку и затем подают в компрессор 1. При многократной циркуляции этилена степень его превращения в полиэтилен достигает 95–97%. Эта схема циклическая.

Полиэтилен из приемника 5 и ловушки 6 подвергают стабилизации и, если необходимо, окрашивают, гранулируют и перерабатывают в изделия.

Область применения: изоляция гибких и эластичных кабелей в радиолокационных, радиометрических, телемеханических устройствах.

Применение полиэтиленовых гранул высокого давления существенно удешевляет производство материалов для упаковки, медицинских препаратов, труб ирригации, хозяйственной тары, продукции приборостроения и машиностроения.

Полиэтилен высокого давления имеет высокие диэлектрические характеристики и высокую степень устойчивости к химическим веществам, но не имеет устойчивости к ультрафиолетовым лучам, однако обладает повышенной стойкостью к воздействию радиации. Применяется в качестве электроизоляционного материала в электротехнике и радиоэлектронике, кабельной промышленности, в качестве антикоррозионных покрытий и т. д.

Изучение технологии получения блочного полистирола

Полистирол (ПС) – синтетический полимер класса термопластов, продукт полимеризации стирола (винилбензола), твердое стеклообразное вещество.

Имеет химическую формулу следующего вида:
$$-[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-]_n-$$

Полистирол – синтетический термопластичный твердый, жесткий, аморфный полимер.

Полистирол общего назначения весьма хрупок, имеет низкую ударную прочность и малую теплостойкость: температура размягчения полистирола составляет 90–95 °С. Лучшими эксплуатационными свойствами обладают различные сополимеры стирола.

Ударопрочный полистирол отличается повышенными показателями ударной вязкости в широком диапазоне температур (до –30 ... –40 °С). Основной недостаток – низкая термо- и светостойкость, связанная с наличием каучуковой фазы.

Структура представлена на рис. 1.10.3.

Фенольные группы препятствуют упорядоченному расположению макромолекул и формированию кристаллических образований. Полистирол – полимер с высокой степенью оптического светопропускания, невысокой механической прочностью, выпускается в виде прозрачных гранул цилиндрической формы, из которых экструзионным способом получают листы и прочую продукцию.

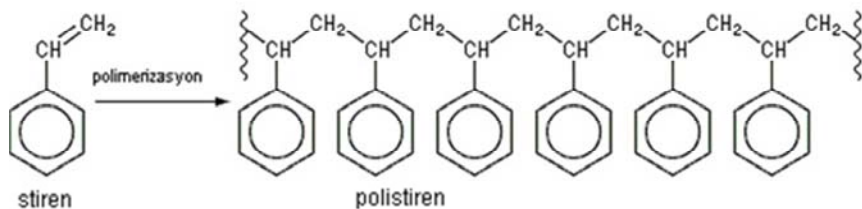


Рис. 1.10.3. Структура стирола и полистирола

Полистирол имеет низкую плотность (1060 кг/м^3), термическую стойкость (до $105 \text{ }^\circ\text{C}$), степень полимеризации $n = 600\text{--}2500$, усадку при литьевой переработке $0,4\text{--}0,8 \%$. Полистирол обладает высокими диэлектрическими свойствами, морозостойкостью до $-40 \text{ }^\circ\text{C}$, легко растворим в собственном мономере, ароматических углеводородах, сложных эфирах, ацетоне, не растворим в низших спиртах, алифатических углеводородах, фенолах и простых эфирах.

Для улучшения свойств полистирола его смешивают с различными полимерами: подвергают сшиванию, получая сополимеры стирола. Обладает низким влагопоглощением, устойчив к радиоактивному облучению, к кислотам и щелочам, однако разрушается концентрированной азотной и ледяной уксусной кислотами; легко склеивается.

На воздухе при ультрафиолетовом облучении полистирол портится: появляются желтизна и микротрещины, увеличивается хрупкость. Разлагаться начинает при $200 \text{ }^\circ\text{C}$, процесс сопровождается выделением мономера. При обычной температуре полистирол не токсичен. При температуре выше $60 \text{ }^\circ\text{C}$ начинает терять форму.

Недостатком полистирола, ограничивающим его применение в электротехнике, является невысокая нагревостойкость и склонность к быстрому старению. Старение выражается в появлении на поверхности сетки мелких трещин из-за удаления присутствовавшего мономера и из-за неравномерных напряжений при неодинаковой степени полимеризации.

Рассмотрим процесс получения блочного полистирола. Аппаратурная схема представлена на рис. 1.10.4.

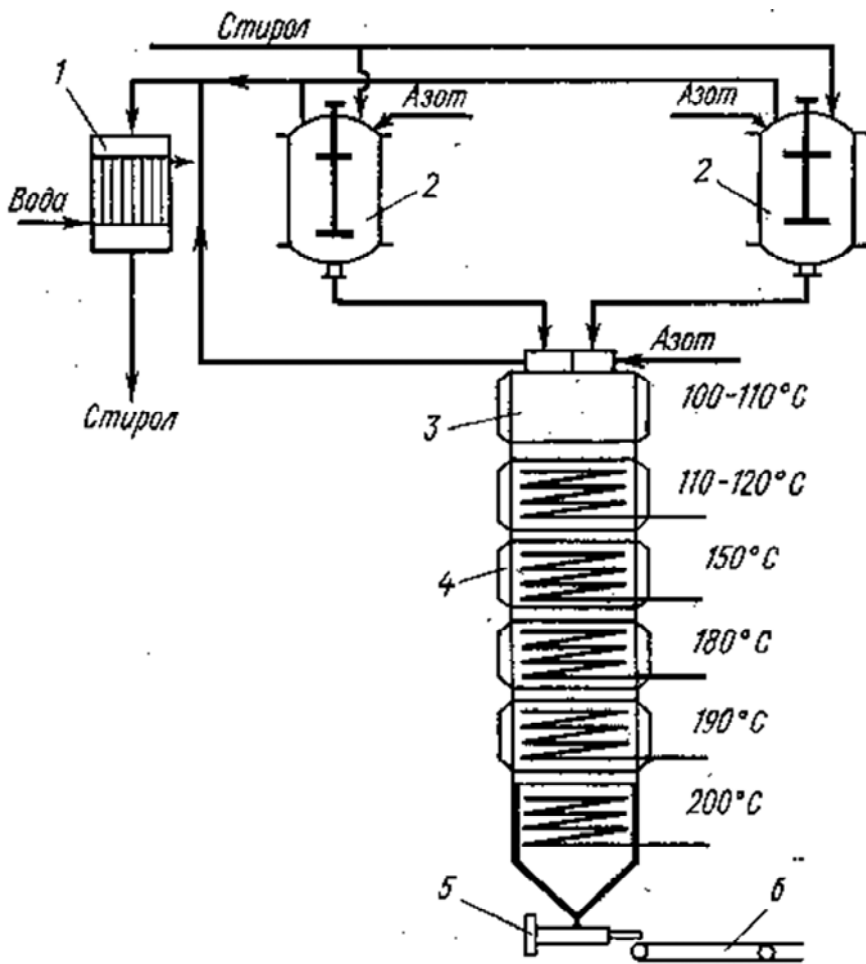


Рис. 1.10.4. Аппаратурная схема получения полистирола

Очищенный стирол подается в реакторы 2 с мешалками.

В этих реакторах находятся змеевики (не представлены на рисунке), по которым протекает горячая вода. В реакторах при температуре 80 °С начинается полимеризация стирола.

Из реакторов жидкая смесь полистирола и непрореагировавшего стирола поступает в верхнюю часть полимеризационной колонны 3 для окончательной полимеризации в атмосфере азота N_2 .

Колонна 3 состоит из шести секций, причем в каждой секции поддерживается строго определенная температура 100–200 °С, что достигается обогревом при помощи пара, который подается в паровую рубашку 4, и электрическим обогревом нижней части колонны 3.

По мере движения стирола сверху в низ колонны заканчивается его полимеризация. При этом он частично испаряется, пары поступают в холодильник 1, где конденсируются и возвращаются в процесс.

Расплавленный полистирол, выходящий из колонны, поступает в обогреваемый шнек-пресс 5, откуда в виде вязкой непрерывной струи выходит на охлаждаемый водой или воздухом рольтанг 6; здесь он затвердевает и после охлаждения передается на переработку.

Реактор и колонна выполнены из алюминия или эмалированной стали.

Блочный полистирол прозрачен, бесцветен, пропускает 90 % видимой части света. Высокий показатель преломления обуславливает применение блочного полистирола для изготовления оптических стекол. Температура стеклования 80–82 °С, а температура эксплуатации изделий из него не должна превышать 60 °С.

Задание

1. Изучить технологический процесс получения полиэтилена высокого давления. Разработать технологическую схему производства, используя аппаратную схему. Предусмотреть контроль параметров материала при производстве.

2. Изучить технологический процесс получения блочного полистирола. Разработать технологическую схему производства, используя аппаратную схему. Предусмотреть контроль параметров материала при производстве.

Практическая работа № 11

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА РЕАКТОПЛАСТОВ

Теоретическая часть

Реактопласты (термореактивные пластмассы) – класс полимеров, которые (обычно это происходит на стадии формования изделия) при однократном нагреве переходят в вязкотекучее состояние, при этом происходит реакция «сшивки» исходной смеси. Готовый полимер более не способен плавиться при нагреве.

После окончания формования изделий из реактопластов полимерная фаза приобретает сетчатую (трехмерную) структуру. Благодаря этому отвержденные реактопласты имеют более высокие, чем термопласты, показатели по твердости, модулю упругости, теплостойкости, усталостной прочности, более низкий коэффициент термического расширения, при этом свойства отвержденных реактопластов не столь резко зависят от температуры. Однако неспособность отвержденных реактопластов переходить в вязкотекучее состояние вынуждает проводить синтез полимера в несколько стадий.

Основу всякого реактопласта составляет химически затвердевающая термореактивная смола – связующее вещество. В состав реактопластов входят наполнители, пластификаторы, отвердители, ускорители или замедлители и растворители. Наполнителями могут быть порошковые, волокнистые и гибкие листовые материалы. В качестве порошковых наполнителей используют молотый кварц, тальк, графит, древесную муку, целлюлозу.

К пластмассам с порошковыми наполнителями относятся: фенопласты и аминопласты. Из них изготавливают несилевые конструкционные и электроизоляционные детали (рукоятки, детали приборов, кнопки и т. д.), различные вытяжные и формовочные штампы, корпуса сборочных и контрольных приспособлений, литейные модели и другую оснастку.

Фенопласты (бакелиты, фенолоформальдегидные смолы) являются термоупрочняемыми пластмассами. Неупрочненные смолы получают при поликонденсации фенола с формальдегидом. Существует два основных типа фенолоформальдегидных смол: новولاки и резолы.

Для получения пластмассы с хорошими потребительскими свойствами в новолаки добавляют субстанцию (обычно уротропин), которая при нагревании разлагается с выделением формальдегида. Формальдегид, добавляемый к новолаковой смоле, образует упрочняющиеся гидроксиметильные группы.

Упрочнение термопластов в основном проводится в интервале температур 140–180 °С, но благодаря соответствующим добавкам кислот некоторые резолы можно отвердить уже при 25 °С и выше.

Резолы получают в спиртовых средах, применяя избыток формальдегида. Продукт содержит гидроксиметиленовые группы. Во время нагревания происходит необратимое упрочнение (реакция образования сетчатой структуры), поэтому резолы прессуют в формах.

Упрочненные фенолоформальдегидные смолы чаще носят название бакелитов. Эта пластмасса хорошо обрабатывается механически инструментами для обработки металла и может подвергаться полированию. Бакелит из новолаки имеет большую термостойкость (100–150 °С), чем бакелит из резолы, но худшие диэлектрические свойства. Бакелит трудногорюч, а после извлечения из пламени сразу гаснет. Горящий бакелит дает желтый цвет пламени, коптящий в зависимости от вида наполнителя. Остаток, извлеченный из пламени, твердый, разбухший, потрескавшийся и обугленный. В процессе горения выделяются фенол и формальдегид с характерным запахом.

Бакелит стоек к воздействию разбавленных кислот и щелочей, а также большинства органических растворителей. Для склеивания треснувших бакелитовых изделий можно применять нитроцеллюлозные клеи или жидкие фенольные смолы.

Из бакелита изготавливают электротехнические элементы (вилки, розетки), корпуса радио- и телефонных аппаратов, детали стиральных машин, защитные шлемы, корпуса аккумуляторов, плиты, лаки, клеи.

Аминопласты являются термоупрочняемыми пластмассами. К ним относятся карбамидоформальдегидные смолы и меламиноформальдегидные смолы.

Неупрочненная смола получается при поликонденсации формальдегида с карбамидом (смола карбамидо-формальдегидная) или меламином (смола меламино-формальдегидная). Эти смолы имеют реактивные группы $-\text{CH}_2\text{OH}$, которые под влиянием нагрева (или

кислотных катализаторов) способны к конденсации, в результате которой смолы упрочняются (приобретают пространственную сетчатую структуру).

Упрочненные аминопласты твердые и жесткие. Их можно полировать и механически обрабатывать инструментами по металлу, они имеют хорошие электроизоляционные свойства, легко окрашиваются.

Теплостойкость упрочненных аминопластов около 100–120 °С. Образец, внесенный в огонь, начинает гореть не более чем через 1 минуту. Вынутый из пламени, он не гаснет, но горит медленно (в действительности горят наполнители, сама смола негорюча). Огонь имеет желтый цвет (меламиновая смола) или желтый с зеленовато-голубой каймой (карбамидная смола). Остаток после горения растрескавшийся, разбухший и покрыт по краям характерным белым налетом. Во время горения отчетливо чувствуется запах формальдегида и карбамида.

Упрочненные аминопласты стойки к воздействию воды, кислот (в том числе серной и азотной), щелочей и органических растворителей. Для склеивания таких аминопластов можно применять фенолоформальдегидные или карбамидоформальдегидные клеи.

Из аминопластов изготавливают клеи для дерева, электротехнические детали (розетки, выключатели) и галантерею, тонкие покрытия для украшения, лаки (так называемые печные), пенистые материалы.

Реактопласты с волокнистыми наполнителями представляют собой композиции, состоящие из связующего (смолы) и волокнистого наполнителя в виде очесов хлопка (волокниты), асбеста (асбоволокниты), стекловолокна (стекловолокниты).

Волокниты применяют для изготовления деталей с повышенной устойчивостью к ударным нагрузкам, работающих на изгиб и кручение (втулок, шкивов, маховиков и др.).

Асбоволокниты обладают хорошими фрикционными (тормозными) свойствами и теплостойкостью, но по водостойкости и диэлектрической проницаемости уступают пластмассам с порошковым наполнителем.

Стекловолокниты негорючи, стойки к действию ультрафиолетовых лучей, химически стойки, имеют стабильные размеры. Некоторые марки стекловолокнитов применяются для изготовления силовых электротехнических деталей в машиностроении. Стекловолокниты имеют высокие физико-механические характеристики и

применяются для изготовления деталей высокого класса точности и сложной конфигурации. Стекловолокниты могут работать при температуре $-60 \dots +200$ °С, имеют прочность при разрыве 80–500 МПа.

В качестве связующих смол волокнитов и стекловолокнитов применяются полиэстеровые и эпоксидные смолы.

Полиэстры (полиэстеровые или полиэфирные смолы) являются полимерами, полученными из полиосновных кислот и полигидроксильных спиртов путем поликонденсации.

Перед отверждением смола имеет вид густого сиропа золотистого цвета. Отверждение проводят в форме при комнатной температуре после добавления инициатора (обычно перекись бензоила) в количестве около 4 %. Механические свойства отвержденного продукта зависят от строения исходной смолы и способа ее отверждения. Изделие может быть гибким, эластичным или твердым и хрупким. Твердые изделия можно подвергать механической обработке инструментами по дереву, а также полировать.

Термическая стойкость под напряжением отвержденных смол лежит в пределах 55–60 °С, а без нагрузки превышает 150 °С. Образец ламината (полиэстеровая смола со стеклотканью), помещенный в пламя, горит очень плохо. После извлечения из пламени чаще всего гаснет. После сгорания остается обугленный скелет стекловолокна.

Отвержденные полиэстры нерастворимы в органических кислотах, в ацетоне легко растрескиваются.

Из полиэстров, упрочненных стекловолокном, изготавливают спасательные лодки, части автомобилей, мебель, корпуса планеров и вертолетов, гофрированные плиты для крыш, плафоны ламп, мачты для антенн, лыжи и палки, удочки, защитные каски и т. п. В виде текучих смол полиэстры применяют для заливки частей электронной аппаратуры, мумификации анатомических препаратов, изготовления лаков и т. п.

Неотвержденные эпоксидные смолы получают реакцией поликонденсации эпоксида (эпихлоргидрина) с дифенилолпропаном (дианом). Процесс отверждения является реакцией суммирования (полиприсоединения), в которой роль отвердителя играет полиамин.

Характерной чертой эпоксидных смол является совершенная прилипаемость почти ко всем пластмассам, металлам. Они имеют хорошие механические и электрические свойства.

Термостойкость под напряжением упрочненных эпидианов лежит в пределах 55–120 °С в зависимости от вида упрочнителя, а без нагрузки превышает 150 °С. Упрочненная эпоксидная смола горит в огне так же, как и полиэстровые ламинаты: она трудно загорается, после чего начинает коптить. В отличие от полиэстра эпоксидная смола сильно пахнет во время горения. Данные смолы служат для изготовления лаков, клеев.

Фенолоформальдегидные смолы (новолачные и резольные смолы – бакелиты) – синтетические смолы из группы фенолоформальдегидных смол со свойствами реактопластов или терморектопластов. Являются жидкими или твердыми олигомерными продуктами поликонденсации фенола с формальдегидом в щелочной или кислой среде, что влияет на их свойства.

Исходным сырьем для получения фенолоформальдегидных смол являются фенолы и формальдегид. Формальдегид (CH_2O) получается путем окисления метилового спирта кислородом воздуха и представляет собой бесцветный газ с резким неприятным запахом. Выпускается он в виде 40 %-го водного раствора формалина. Фенолами называются соединения типа $R\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, где R – органический радикал или водород. Эти соединения представляют собой бесцветные игольчатые кристаллы с характерным запахом карболовой кислоты. Основными источниками фенола служат каменноугольный деготь и продукты крекинга нефти.

Фенолоформальдегидная смола образуется при реакции между фенолом и формальдегидом в присутствии катализаторов. В зависимости от количества формальдегида, введенного в реакцию, и природы катализатора получают терморективные или термопластичные смолы. При недостатке формальдегида в присутствии кислого катализатора образуются плавкие термопластичные смолы – новолаки. При использовании щелочных катализаторов и избытка формальдегида получают смолы резольного типа.

Из фенолоформальдегидного полимера, добавляя различные наполнители, получают фенолоформальдегидные пластмассы – фенопласты. Их применение очень широко: шарикоподшипники, шестерни и тормозные накладки для машин; хороший электроизоляционный материал в радио- и электротехнике. Изготавливают детали больших размеров, телефонные аппараты, электрические контактные платы.

Практическая часть

Рассмотрим процесс получения поликонденсационной смолы. Аппаратурная схема представлена на рис. 1.11.1. В реактор с мешалкой 1 загружают фенол, формальдегид и катализатор.

Смесь перемешивают и нагревают до 70–75 °С с подачей пара в рубашку реактора. После этого нагрев прекращают. За счет тепла реакции температура повышается до 90 °С.

Для устранения дальнейшего повышения температуры в рубашку реактора подают холодную воду. Пары воды, выходящие из реактора 1, охлаждаются в холодильнике-конденсаторе 2, и конденсат возвращается в реактор.

В реакторе образуется смесь, состоящая из воды, непрореагировавших фенола и формальдегида и образовавшейся смолы.

Для получения сухой фенолоформальдегидной смолы в реакторе создают разрежение и в рубашку реактора подают в обогрев пар. Получаемый в аппарате 2 конденсат собирают в вакуум-приемнике 3.

Приготовленную смолу выпускают из реактора в противень 4, где ее охлаждают и затем направляют на склад.

Задание. Изучить технологический процесс получения поликонденсационной смолы. Разработать технологическую схему производства, используя аппаратурную схему. Предусмотреть контроль параметров материала при производстве.

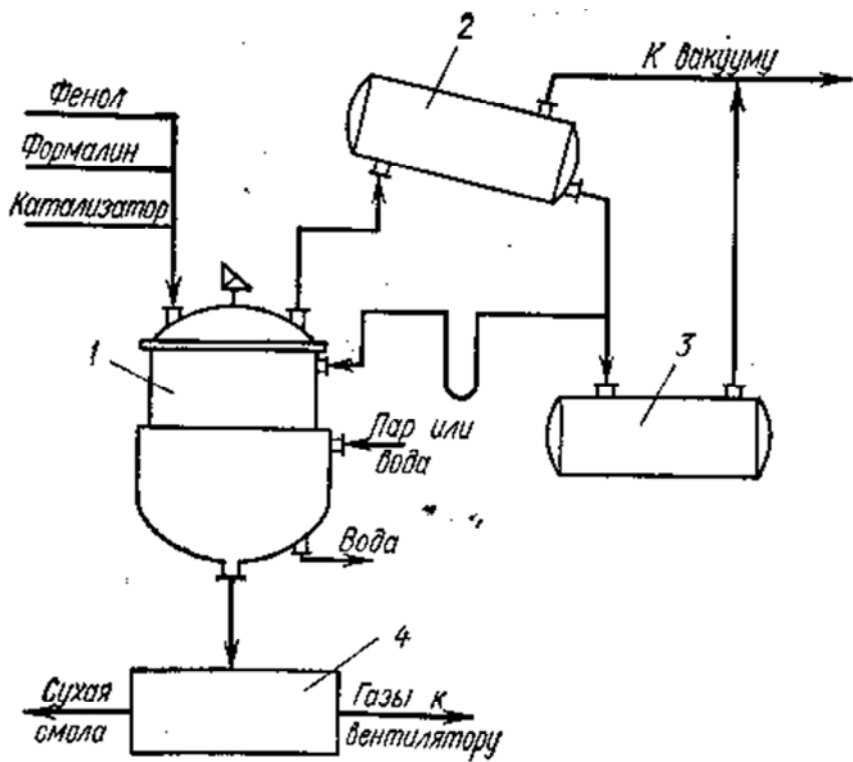


Рис. 1.11.1. Аппаратурная схема получения поликонденсационной смолы

Практическое занятие № 12

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА СЛОИСТЫХ ПЛАСТМАСС ДЛЯ ПОДЛОЖЕК ИМС

Теоретическая часть

Печатные схемы элементов электронных схем производят из ламинатов. Первый контур получают путем травления медной фольги, находящейся на пластине из фенол-текстиля. В настоящее время существуют ламинаты из бумаги, хлопка, стекла и смол (фенольные, меламиновые, эпоксидные), медной фольги, а иногда и никеля или специальных сплавов. В зависимости от типа ткани, смолы и толщины получают ламинаты различной жесткости. Очень тонкие (10 нм) печатные платы получают из термопластичной пленки с покрытием из меди. В большинстве из них используется для этой цели полиэфирная пленка (насыщенная), но также можно найти пленки из ПВХ и полиамидов.

Прессуя травленные ламинаты, получают многослойные печатные платы. Двухслойные пленки являются важным сырьем для производства таких основных элементов, как конденсаторы. Полистирольные пленки стали использоваться в конденсаторах в 30-х годах XX столетия, и сегодня они широко распространены, уступая количественно только полиэстерам, термически более устойчивым и более тонким (до 2 нм), но имеющим худшие диэлектрические характеристики. При производстве конденсаторов применяют также эпоксидные составы, полиэфирные, силиконовые и др.

Большую группу реактопластов составляют слоистые пластмассы, которые содержат листовые наполнители, уложенные слоями. В качестве наполнителей для слоистых пластиков используют материалы органического (бумагу, картон, хлопчатобумажные ткани, древесный шпон, ткани из синтетических волокон) и неорганического (асбестовую бумагу, стеклянную ткань, ткань из кварцевых или кремнеземных волокон) происхождения.

В зависимости от вида наполнителя различают следующие слоистые пластики: гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, древесно-слоистые пластики. Связующими при производстве слоистых пла-

стиков служат фенолоформальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические и некоторые другие смолы.

Свойства слоистых пластиков зависят от соотношения компонентов (наполнителя и связующего), характера подготовки наполнителя, режимов прессования и термообработки и других технологических факторов. Благодаря слоистому расположению армирующего наполнителя слоистые пластики обладают анизотропией механических, физических и диэлектрических свойств.

Механические свойства слоистых пластиков определяются прежде всего видом используемого наполнителя. Наибольшей механической прочностью обладают слоистые пластики на основе стеклянной ткани или стеклянных жгутов. Эти материалы, а также слоистые пластики на основе асболоволоконистых наполнителей, имеют более высокую теплостойкость по сравнению с теплостойкостью пластиков на основе органических наполнителей.

Слоистые пластмассы выпускают: в виде полуфабриката, представляющего собой листы наполнителя, пропитанные смолой; в виде отпрессованных заготовок (листы, плиты различной толщины, трубы различных диаметров, стержни, диски); в виде фасонных изделий. Плиты изготавливают, пропитывая наполнитель смолой и раскраивая его на листы, которые складывают друг с другом в пакеты заранее установленной толщины. Пакет прессуют при давлении 8–10 МПа и температуре 140–160 °С.

Необходимость предварительно раскраивать листы наполнителя, пропитанного смолой, и собирать пакеты приводит к тому, что из слоистых пластмасс преимущественно формуют заготовки. Поэтому для слоистых пластмасс механическая обработка является одним из основных методов переработки в изделия. Слоистые пластмассы отличаются анизотропией свойств, особенно это касается механической прочности. Наиболее прочен материал вдоль нитей основы ткани или волокон шпона.

Промышленность выпускает следующие виды слоистых пластмасс: гетинакс, текстолит, асботекстолит, ДСП, стеклотекстолит и др.

Гетинакс – слоистая пластмасса на основе фенолоформальдегидной смолы и листов бумаги. Гетинакс выпускают марок А, Б, В, Г. Гетинакс марок Д и В имеет повышенные электрические свойства, марок Б и Г – повышенную механическую прочность. Гетинакс выпускают в виде листов толщиной 0,5–50 мм, стержней диаметром

до 25 мм и трубок различных диаметров. Гетинакс применяют главным образом как электроизоляционный материал.

Текстолит – слоистая пластмасса, где в качестве наполнителя используется хлопчатобумажная ткань, в качестве связующего – фенолоформальдегидная смола. Текстолит обладает относительно высокой механической прочностью, малой плотностью и высокими антифрикционными свойствами, высокой стойкостью к вибрационным нагрузкам и хорошими диэлектрическими свойствами. Теплоустойчивость текстолита 120–125 °С. Текстолит нашел широкое применение как заменитель цветных металлов для вкладышей подшипников прокатных станков, как конструкционный и поделочный материал в машиностроении для изготовления направляющих роликов в самолетах, шестерен в автомобилях и др. Текстолитовые шестерни в отличие от металлических работают бесшумно.

Электротехнический текстолит применяют для изготовления электроизоляционных изделий повышенной прочности для работы на воздухе и в трансформаторном масле.

Стеклотекстолит изготавливают прессованием пакета стеклоткани, пропитанной смолой. Выбор связующего определяется назначением стеклотекстолита и способом изготовления изделия. Стеклотекстолит КАСТ получают при использовании смеси фенолоформальдегидной смолы с поливинилацетатами, стеклотекстолит ВФГ – полисилоксана и полиацеталя, стеклотекстолит ЭФ–32–301 – при использовании эпоксидной смолы.

Диаметр стекловолокна в стеклоткани составляет 3,5–5 мкм. Связующее в стеклотекстолите выполняет роль клея, и его содержание не превышает 25–30 %, иначе прочность изделия снижается.

Из пакета пропитанной стеклоткани прессуют листы, плиты, трубы. Стеклотекстолит применяют для изготовления сильно нагруженных конструкционных изделий, работающих в сухих и влажных средах при температурах до 350 °С, стойких к растворам электролитов, маслам и жидким топливам, а также изделий, которые должны обладать высокими диэлектрическими свойствами и радиопрозрачностью.

Практическая часть

Изучение технологии получения текстолита

Ткани являются наиболее распространенными текстильными материалами, используемыми для получения слоистых пластиков типа текстолитов в виде листовых, намотанных и формованных полуфабрикатов. Они применяются также для изготовления прессованных изделий с умеренным радиусом кривизны. Для получения текстолитов применяют ткани полотняного, саржевого, сатинового и других простых переплетений, причем наличие в рапорте длинных перекрытий способствует получению композитов с более высоким уровнем механических свойств. Для изготовления текстолитов используются ткани различной поверхностной плотности: легкие (до 150 г/м^2), средние (до 300 г/м^2) и тяжелые (свыше 300 г/м^2). Из хлопчатобумажных тканей чаще всего используют бязь, шифон, миткаль, бельтинг. В последнее время в производстве текстолитов все большее применение находят плоские плетеные текстильные структуры с заданным углом расположения наполнителей и рапортом переплетений, обеспечивающих максимально высокие механические характеристики в направлении действия внешних нагрузок. Обычно рапорт выбирается с достаточно длинными перекрытиями нитей, поскольку в этом случае обеспечивается достижение большей прочности и жесткости структуры в заданном направлении. Кроме того используются плетеные ленты и шнуры, применение которых диктуется особенностями профиля и механических свойств композиционных деталей и изделий. В большинстве случаев плетеные структуры изготавливаются на основе оптимизационных расчетов по предварительным заказам целевого назначения.

Процесс изготовления текстолита состоит из следующих стадий: приготовления смолы и лака, подготовки, пропитки и сушки ткани, сборки и прессования пакетов, обрезки кромок и дополнительной тепловой обработки.

Для пропитки тканей применяют спиртовые растворы твердых фенолоформальдегидных смол. Концентрация лака устанавливается в зависимости от типа ткани и назначения текстолита.

Стадия подготовки ткани заключается в сшивке отдельных листов и наматывании рулонов. Пропитка тканей осуществляется

на горизонтальных или на вертикальных пропиточно-сушильных машинах. Пропитка происходит следующим образом: ткань погружается в ванну с лаком, на выходе из нее ткань отжимается валиками и поступает на сушку в шахту, расположенную над ванной. Для того чтобы понизить вязкость лака, его подогревают до 30 °С горячей водой через рубашку с ванны. В процессе отжима смола лучше распределяется по ткани, глубже ее пропитывает, а избыток смолы удаляется.

Процесс сушки заключается в удалении летучих веществ (влаги, спирт, фенол) из сырой пропитанной ткани и происходит при температуре 120 °С. Ткань нагревается паровыми калориферами, находящимися в шахте, и горячим воздухом. Время сушки определяется толщиной ткани и ее структурой.

После сушки пропитанную ткань разрезают и собирают в пакеты, которые загружают в пресс.

Прессование проводят в многоэтажных прессах с нижним давлением. Процесс складывается из стадии прогрева пакетов до необходимой температуры, стадии выдержки для осуществления процесса отверждения и стадии охлаждения без снятия давления, которая необходима для предотвращения коробления листов.

Далее края отпрессованных листов обрезают дисковыми пилами и отправляют в отдел технического контроля для испытаний показателей качества, после чего перемещают на склад готовой продукции.

Изучение технологии изготовления стеклотекстолита

Производство стеклопластов и изделий на их основе осуществляется различными технологическими методами. Технология изготовления стеклотекстолита мало отличается от технологии, принятой в производстве текстолитов.

Процесс изготовления стеклотекстолита заключается в пропитке стеклянной ткани на пропиточных машинах, последующей ее сушке, раскрое и сборке пакетов, прессовании и в некоторых случаях термообработке отпрессованного стеклотекстолита.

Стекловолокна для изготовления стеклоткани производят по следующей схеме. Из исходных компонентов путем смешения приготавливают шихту, которая отправляется на стекловарение для получения расплава стекла. Из расплава формуют стеклянные шарики,

которые загружают в платиновый тигель, имеющий в дне до 1200 отверстий малого диаметра. После расплавления шариков из нее через фильеры вытягивают непрерывные волокна, собирающиеся в пучок, который наматывается на бобину. Перед намоткой производят замасливание, чтобы нити имели необходимое сцепление между собой. Для этого используют замасливающее устройство, например наклонный лоток.

Полученные комплексные нити складывают друг с другом в нужном числе сложений и подвергают кручению для получения нитей, из которых на ткацких станках изготавливают стеклоткани.

Режим сушки стеклянной ткани, пропитанной смолой, играет особенно важную роль, так как повышенное содержание летучих веществ может быть причиной появления вздутий, растрескивания и других дефектов в стеклотекстолите. Малое содержание летучих веществ является причиной непроклеев, то есть мест с недостаточной склейкой отдельных листов ткани.

Задание

1. Изучить технологический процесс получения текстолита. Разработать технологическую схему производства. Предусмотреть контроль параметров материала при производстве.

2. Изучить технологический процесс получения стеклотекстолита. Разработать технологическую схему производства. Предусмотреть контроль параметров материала при производстве.

2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ

2.1. Основные положения

Настоящие методические указания подготовлены в соответствии со стандартом предприятия СТП БНТУ 3.01–2003, утвержденным 14.01.2003 ректором БНТУ Б. М. Хрусталевым.

Курсовое проектирование – вид учебного процесса по изучаемой дисциплине, результатом которого является курсовая работа, предусмотренная учебным планом и выполняемая студентом самостоятельно под руководством преподавателя.

Курсовой проект – самостоятельная учебная работа, имеющая целью закрепление теоретического материала и выработку навыков самостоятельной творческой деятельности, решения физико-математических, технических и инженерно-экономических задач, а также приобретение исследовательских навыков, углубленное изучение вопроса, темы, раздела учебной дисциплины.

Основными задачами курсового проектирования являются:

- выработка навыков творческого мышления и умения применять обоснованные в технико-экономическом отношении решения инженерных задач, воспитание ответственности за качество принятых решений;

- закрепление знаний, полученных ранее;

- формирование профессиональных навыков, связанных с самостоятельной деятельностью будущего специалиста;

- приобщение к работе со специальной и нормативной литературой;

- применение современных расчетно-графических и экономико-математических методов;

- самостоятельное выполнение расчетов конструктивного, технологического характера с использованием математических методов и современных информационных технологий;

- оформление проектных материалов: четкое, ясное, технически грамотное и качественное литературное изложение пояснительной записки и оформление графического материала проекта.

Тематика курсовых проектов определяется и утверждается решением кафедры, ведущей курсовое проектирование. Проектирование

должно отвечать учебным задачам дисциплины «Технология материалов и компонентов электронной техники» и практическим требованиям отрасли и актуальности научных исследований. Тематика должна быть реальной, современной и направленной на получение студентами навыков самостоятельной творческой работы.

Объектами курсового проектирования должны быть материалы электронной техники, а также элементы исследований технологического процесса по тематике данного предмета.

Курсовой проект должен выполняться с применением современных информационных технологий.

2.2. Ответственность руководителя и исполнителя

Ответственность за принятые в проекте решения, качество исполнения презентационной части и пояснительной записки несет автор проекта, о чем необходимо известить при выдаче задания. Руководитель курсового проектирования несет ответственность за организацию и обеспеченность процесса проектирования, полноту решения поставленных перед студентом задач, обеспечение контроля ритмичности работы, своевременности завершения ее этапов.

2.3. Требования к организации курсового проектирования

Состав руководителей курсового проектирования определяется кафедрой.

Организуемые кафедрой вводные групповые консультации (занятия) обязательны для посещения. Занятия проводятся по вопросам общего характера, возникающим в процессе выполнения курсовых проектов, по анализу типовых ошибок, методике использования рекомендованной литературы, справочных материалов и пособий.

Индивидуальные консультации должны проводиться регулярно, в соответствии с учебным планом, по расписанию кафедры. График индивидуальных консультаций определяется руководителем курсового проектирования, исходя из степени подготовленности студента к самостоятельной работе.

Курсовой проект должен выполняться студентами в соответствии с графиком проектирования, разрабатываемым руководителем. Трудоемкость каждого этапа работы должна быть оценена в процентах от общего объема работ, предварительно определяются также сроки процентовки проекта.

2.4. Требования к заданию на курсовой проект

Задание на курсовой проект должно содержать наименование темы проекта и предусматривать по возможности комплексное решение инженерных задач. В задании на курсовой проект указываются:

- наименование работы;
- содержание курсового проекта и рекомендуемый объем отдельных частей;
- исходные данные;
- рекомендуемая литература;
- календарный план работы студента над проектом.

Каждое задание должно быть достаточно индивидуальным, а его тематика комплексной, охватывающей несколько взаимосвязанных задач. Варианты заданий на курсовые проекты должны по возможности обладать равным уровнем сложности и трудоемкости.

Выдача заданий студентам должна производиться персонально с соответствующими пояснениями всей группе одновременно. Задания на курсовой проект оформляются на соответствующем бланке, подписываются руководителем и утверждаются заведующим кафедрой.

2.5. Состав, содержание и объем курсового проекта

Курсовой проект состоит из пояснительной записки и презентационной (графической) части. Пояснительная записка представляет собой текстовый документ, который должен состоять из перечисленных в таблице разделов.

Раздел 1. Цель литературного обзора: изучение состояния исследуемого вопроса в современной литературе. Литературный обзор должен состоять из подразделов, в которых даны основные понятия исследуемого процесса, описание физических и химических явлений, сопутствующих синтезу конкретного материала электронной техники. Особое внимание должно быть уделено методам получения материала. Для этой цели необходимо использовать не только учебную литературу, но и научные статьи, патенты, справочники и материалы конференций. Раздел должен заканчиваться анализом обзора литературы, постановкой цели и задач курсового проекта.

Содержание пояснительной записки

| Название раздела | Содержание раздела, рекомендуемый объем |
|--|--|
| Титульный лист | Образец приведен в прил. 1, 1 лист |
| Задание на выполнение курсовой работы | Выдается руководителем работы, 1 лист двухсторонний включает: название работы, исходные данные, список рекомендуемой литературы, основные разделы, календарный график выполнения работы |
| Содержание | Перечень разделов с указанием номера страницы, 1 лист |
| Реферат | Краткое содержание проекта с ключевыми словами. Образец приведен в прил. 2, 1 лист |
| Введение | Актуальность темы задания, характеристика области применения, 1 лист |
| Теоретическая часть (обзор литературы) | Анализ предметной области по 10–20 литературным источникам и выбор направления исследования, отвечающего требованиям задания. Приводимые по тексту сведения должны сопровождаться ссылками на источник, 20–25 листов |
| Технологическая часть | Подробное описание технологического процесса получения материалов электронной техники. Построение технологической и аппаратурной схемы. Описание факторов, влияющих на технологический процесс, 20–25 листов |
| Контроль параметров материала | Описание параметров и свойств, подлежащих контролю при производстве материалов электронной техники и методов контроля, 5–10 листов |
| Техника безопасности | Разработка мероприятий по технике безопасности при производстве материалов электронной техники, 3–5 листа |
| Заключение | Анализ проведенной работы по всем разделам с указанием практического применения, 1–2 листа |
| Список использованных источников | Перечень использованных источников оформляется в соответствии с прил. 3, 1–2 листа |
| Приложения | Приводятся при необходимости. В качестве приложений могут быть приведены химические составы, таблицы свойств, схемы измерения и т. д. |

Раздел 2. Технологическая часть курсового проекта по дисциплине должна включать в себя подробное описание процесса получения заданного материала: выбор сырья, подготовка и очистка сырья; расчет шихты (при необходимости); изучение диаграммы состояния (если речь идет о сплаве); технологический процесс синтеза материала; аппаратурное исполнение процесса, технологическая схема; описание факторов, влияющих на протекание технологического процесса.

Раздел 3. Анализируя два предыдущих раздела, необходимо установить определяющие физико-химические и эксплуатационные свойства разрабатываемого материала. Привести их описание. Особое внимание должно быть уделено методам контроля свойств с приведением приборов и методик контроля.

Раздел 4. Любой технологический процесс в условиях производства требует разработки мероприятий по технике безопасности и производственной санитарии. В разделе необходимо привести перечень опасных производственных факторов и методы защиты от них или методы их устранения. Внимание также следует уделить и экологическим аспектам производства.

Заключение по курсовому проекту должно содержать аргументированные выводы по каждому разделу проекта.

Презентационная (графическая) часть работы – это совокупность документации, выполненной в виде чертежей, эскизов, схем, диаграмм, таблиц и форм, обеспечивающих наглядность проектного решения и необходимую иллюстративность. Допускается подготовка слайдовой презентации.

2.6. Оформление курсовых проектов

Пояснительная записка должна оформляться в соответствии с нижеприведенными требованиями.

1. При компьютерном наборе печать производится шрифтом Times New Roman кеглем 14 пунктов (заглавия – жирным шрифтом, по центру страницы). Формат листа пояснительной записки А4: 210 × 297 мм.

2. Поля: правое 10 мм, левое – 30 мм, верхнее и нижнее – по 20 мм.

3. Межстрочный интервал 1,5 (полуторный).

4. Абзацы в тексте начинают отступом, равным 1,25 см.

5. Пояснительная записка должна быть представлена в виде разделов.

6. Разделы первого уровня обозначаются одной цифрой и начинаются с нового листа. Набор производят жирным шрифтом, заглавными буквами, расположение – по центру страницы. Заглавие должно быть отделено от последующего текста одной строкой.

7. Разделы второго уровня (подразделы) обозначаются двумя цифрами через точку (например, 1.2). Набор производят жирным шрифтом строчными буквами, расположение – по центру страницы.

8. Разделы третьего и так далее уровней обозначаются соответственно тремя и так далее цифрами (пункты, например 1.2.1). Набор производят обычным шрифтом строчными буквами, расположение – с отступа 1,25 см.

Материал пояснительной записки должен быть изложен технически грамотно и логично.

9. Расчеты иллюстрируются эскизами, схемами, эпюрами, графиками, которые могут быть выполнены с применением компьютерных средств, а также исполнены вручную черными чернилами, аккуратно.

10. Каждый рисунок должен иметь ссылку в тексте и располагаться после нее (например, «схема представлена на рисунке 1.2»).

11. Рисунки нумеруются в пределах каждого раздела первого уровня двумя цифрами через точку. Первая цифра обозначает номер раздела, вторая – порядковый номер рисунка в этом разделе.

12. Рисунок следует располагать по центру страницы. Под рисунком через строку должны быть приведены пояснения к нему и подпись (например, **Рисунок 1.2 – Диаграмма состояния**). Набор жирным шрифтом, расположение подписи – по центру страницы.

13. Справочные и расчетные данные можно предоставлять в виде таблиц, которые располагаются после ссылки в тексте (например, «...данные представлены в таблице 1.2»).

14. Таблицы нумеруются в пределах каждого раздела первого уровня. Первая цифра обозначает номер раздела, вторая – порядковый номер рисунка в этом разделе.

15. Таблицу следует располагать по центру страницы. Над таблицей приводится название (например, **Таблица 1.2 – Экспериментальные данные**). Набор жирным шрифтом, расположение – слева от абзаца.

16. Формулы выполняются с помощью редактора формул. Они выносятся в отдельную строку и отделяются от текста с двух сторон одной строкой.

17. Формулы могут не иметь нумерации и иметь ее, если на формулы будут ссылки в последующем тексте.

18. Формулы нумеруются в пределах раздела первого уровня (аналогично рисункам и таблицам). Номер располагается справа от формулы в круглых скобках и выравнивается по правому полю.

19. По тексту пояснительной записки должны быть проставлены ссылки на источники литературы, которые использовались в процессе работы. Ссылка приводится в квадратных скобках в конце предложения, после нее ставится точка (например, [2]).

20. В конце пояснительной записки приводится список использованных источников, который оформляется в соответствии с примерами, приведенными в прил. 3.

21. Разделы **РЕФЕРАТ**, **ВВЕДЕНИЕ**, **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**, **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ** не нумеруются. Они располагаются с новой страницы. Набор производят жирным шрифтом, расположение – по центру страницы.

22. В заключении необходимо отразить основные результаты работы по каждому разделу. Заключение может выполняться в виде отдельных пунктов или виде единого текста.

23. Приложения, если таковые имеются в работе, располагаются после списка литературы и нумеруются буквами русского алфавита (например, **ПРИЛОЖЕНИЕ А**).

24. Листы пояснительной записки должны иметь сквозную нумерацию. Номер проставляется в правом верхнем углу страницы. Титульный лист не нумеруется, но учитывается в нумерации.

25. Пояснительная записка должна быть сброшюрована, иметь обложку.

26. Презентационная часть может быть выполнена в виде слайдов с применением компьютерных средств. Количество слайдов не ограничивается. Они должны содержать рисунки, схемы, фотоснимки, формулы и минимальное количество текста. Последовательность слайдов должна предусматривать логичность изложения материала.

2.7. Порядок защиты курсового проекта

Защита курсового проекта проводится в следующей последовательности.

1. Выполненный курсовой проект допускается к защите решением руководителя проектирования, о чем он делает соответствующую надпись («К защите») на обложке пояснительной записки. Перед этим пояснительная записка должна быть подписана студентом.

2. Защита курсового проекта проводится перед комиссией, в состав которой входят руководитель курсового проекта и один–два преподавателя кафедры, назначенные заведующим кафедрой. Допускается открытая защита в присутствии всей учебной группы.

3. При защите курсового проекта студент в устном докладе должен раскрыть основные вопросы, рассмотренные в курсовом проекте. Время, отведенное студенту на доклад, ограничено (5–8 мин).

4. Вопросы, задаваемые студенту членами комиссии, не должны выходить за рамки тематики курсового проекта и тех конкретных задач, которые решались студентом в процессе курсового проектирования.

5. Оценка курсового проекта осуществляется согласно действующему положению о курсовых, экзаменах и зачетах в высших учебных заведениях по десятибалльной системе в соответствии с критериями оценок, утвержденными приказом Министерства образования от 12.01.04 № 11–2–3/1. Оценка за курсовой проект выставляется в ведомость и в зачетную книжку (при положительном результате).

6. Студент, не представивший в установленный срок курсовой проект или не защитивший его, считается имеющим академическую задолженность. Продление срока защиты устанавливается деканом факультета по согласованию с кафедрой.

7. После защиты всех работ руководителю проектирования рекомендуется провести со студентами заключительную беседу с анализом лучших инженерных решений, выявленных типовых ошибок и др.

8. Курсовые проекты, имеющие теоретический и практический интерес, следует представлять на конкурс, отмечать приказом по БНТУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Немчинский, А. Л. Тепловые расчеты термической обработки / А. Л. Немчинский. – Л.: Судпром, 1953. – 106 с.
2. Соколов, И. А. Расчеты процессов полупроводниковой технологии: учебное пособие для вузов / И. А. Соколов. – Москва: Металлургия, 1994. – 176 с.
3. Жигальский, А. А. Технология материалов электронной техники: учебное пособие / А. А. Жигальский. – Томск: ТУСУР, 2006. – 143 с.
4. Таиров, Ю. М. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов: учебник / Ю. М. Таиров, В. Ф. Цветков. – Москва: Высшая школа, 1990. – 423 с.
5. Бабич, Э. А. Технология производства ферритов и радиокерамики: учебное пособие / Э. А. Бабич, Б. М. Улановский. – Москва: Высшая школа, 1984. – 223 с.
6. Нашельский, А. Я. Технология полупроводниковых материалов: учебное пособие для повышения квалификации ИТР / А. Я. Нашельский. – Москва: Металлургия, 1989. – 336 с.
7. Балкевич, В. Л. Техническая керамика: учебное пособие / В. Л. Балкевич. – Москва: Стройиздат, 1984. – 256 с.
8. Поляков, А. А. Технология керамических радиоэлектронных материалов: учебное пособие / А. А. Поляков. – Москва: Радио и связь, 1989. – 199 с.
9. Химическая технология стекла и ситаллов: учебное для вузов / М. В. Артамонова [и др.]; под ред. Н. М. Павлушкина. – Москва: Стройиздат, 1983. – 432 с.
10. Коршан, В. В. Технология пластических масс: учебник / В. В. Коршан. – Москва: Химия, 1989. – 350 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Приборостроительный факультет

Кафедра «Микро- и нанотехника»

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине

«Технология материалов и компонентов электронной техники»

на тему

«НАЗВАНИЕ ТЕМЫ КУРСОВОГО ПРОЕКТА»

Исполнитель: студент группы 113XXXXX
(ФИО студента)

Руководитель: доцент, к.т.н.
(ФИО преподавателя)

Минск
20__

Образец оформления использованных источников литературы

| Характеристика источника | Пример оформления |
|--------------------------|--|
| Один, два или три автора | Котаў, А. І. Гісторыя Беларусі і сусветная цывілізацыя / А. І. Котаў. – 2-е выд. – Мінск : Энцыклапедыкс, 2003. – 168 с. |
| | Шотт, А. В. Курс лекций по частной хирургии / А. В. Шотт, В. А. Шотт. – Минск : Асар, 2004. – 525 с. |
| | Чикатуева, Л. А. Маркетинг : учеб. пособие / Л. А. Чикатуева, Н. В. Третьякова ; под ред. В. П. Федько. – Ростов н/Д : Феникс, 2004. – 413 с. |
| | Дайнеко, А. Е. Экономика Беларуси в системе всемирной торговой организации / А. Е. Дайнеко, Г. В. Забавский, М. В. Василевская ; под ред. А. Е. Дайнеко. – Минск : ин-т аграр. экономики, 2004. – 323 с. |
| Четыре и более авторов | Культурология : учеб. пособие для вузов / С. В. Лапина [и др.] ; под общ. ред. С. В. Лапиной. – 2-е изд. – Минск : ТетраСистемс, 2004. – 495 с. |
| | Основы геологии Беларуси / А. С. Махнач [и др.] ; НАН Беларуси, ин-т геол. наук ; под общ. ред. А. С. Махнача. – Минск, 2004. – 391 с. |
| Коллективный автор | Сборник нормативно-технических материалов по энергосбережению / Ком. по энергоэффективности при Совете Министров Респ. Беларусь ; сост. А. В. Филипович. – Минск : Лоранж-2, 2004. – 393 с. |
| | Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2020 г. / Нац. комис. по устойчивому развитию Респ. Беларусь ; редкол. : Л. М. Александрович [и др.]. – Минск : Юнипак, 2004. – 202 с. |
| Многотомное издание | Гісторыя Беларусі : у 6 т. / рэдкал.: М. Касцюк (гал. рэд.) [і інш.]. – Мінск : Экаперспектыва, 2000–2005. – 6 т. |
| | Багдановіч, М. Поўны збор твораў : у 3 т. / М. Багдановіч. – 2-е выд. – Мінск : Беларус. навука, 2001. – 3 т. |

| Характеристика источника | Пример оформления |
|-------------------------------------|--|
| Отдельный том в многотомном издании | Гісторыя Беларусі : у 6 т. / рэдкал. : М. Касцюк (гал. рэд.) [і інш.]. – Мінск : Экаперспектыва, 2000–2005. – Т. 3 : Беларусь у часы Рэчы Паспалітай (XVII–XVIII ст.) / Ю. Бохан [і інш.]. – 2004. – 343 с. |
| | Российский государственный архив древних актов : путеводитель : в 4 т. / сост.: М. В. Бабич, Ю. М. Эскин. – Москва: Археогр. центр, 1997. – Т. 3, ч. 1. – 720 с. |
| Сборник статей, трудов | Информационное обеспечение науки Беларуси : к 80-летию со дня основания ЦНБ им. Я. Коласа НАН Беларуси : сб. науч. ст. / НАН Беларуси, Центр. науч. б-ка ; редкол.: Н. Ю. Березкина (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2004. – 174 с. |
| | Современные аспекты изучения алкогольной и наркотической зависимости : сб. науч. ст. / НАН Беларуси, Ин-т биохимии ; науч. ред. В. В. Лелевич. – Гродно, 2004. – 223 с. |
| Сборники без общего заглавия | Певзнер, Н. Английское в английском искусстве / Н. Певзнер ; пер. О. Р. Демидовой. Идеологические источники радиатора «роллс-ройса» / Э. Панофский; пер. Л. Н. Житковой. – СПб. : Азбука-классика, 2004. – 318 с. |
| Материалы конференций | Глобализация, новая экономика и окружающая среда: проблемы общества и бизнеса на пути к устойчивому развитию : материалы 7 Междунар. конф. Рос. о-ва экол. экономики, Санкт-Петербург, 23–25 июня 2005 г. / С.-Петерб. гос. ун-т ; под ред. И. П. Бойко [и др.]. – СПб., 2005. – 395 с. |
| Учебно-методические материалы | Горбатов, Н. А. Общая теория государства и права в вопросах и ответах : учеб. пособие / Н. А. Горбатов; М-во внутр. дел Респ. Беларусь, Акад. МВД. – Минск, 2005. – 183 с. |
| Патент | Способ получения сульфокатионита : пат. 6210 Респ. Беларусь, МПК7 С 08 J 5/20, С 08 G 2/30 / Л. М. Ляхнович, С. В. Покровская, И. В. Волкова, С. М. Ткачев; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 0000011 ; заявл. 04.01.00 ; опубл. 30.06.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 2. – С. 174. |

| Характеристика источника | Пример оформления |
|----------------------------|--|
| Стандарт | Безопасность оборудования. Термины и определения: ГОСТ ЕН 1070–2003. – Введ. 01.09.04. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2004. – 21 с. |
| Электронные ресурсы | Театр [Электронный ресурс] : энциклопедия : по материалам изд-ва «Большая российская энциклопедия»: в 3 т. – Электрон. дан. (486 Мб). – Москва: Кордис & Медиа, 2003. – Электрон. опт. диски (CD-ROM) : зв., цв. – Т. 1 : Балет. – 1 диск ; Т. 2 : Опера. – 1 диск ; Т. 3 : Драма. – 1 диск. |
| Ресурсы удаленного доступа | Национальный Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2005. – Режим доступа : http://www.pravo.by . – Дата доступа : 25.01.2006 |

РЕФЕРАТ

Курсовой проект содержит: страниц 56, рисунков 8, источников литературы 7.

ФЕРРИТ, ЦИНК, НИКЕЛЬ, НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ПОРОШОК, АВТОКЛАВ, СВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА, СВЕРХКРИТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ, ФЛЮИДНЫЙ РАСТВОР, ШПИНЕЛЬ.

Цель работы: изучить технологический процесс нанокристаллических порошков феррита цинка и феррита никеля методом сверхкритических флюидных растворов (RESS).

Объект исследования: нанокристаллические порошки феррита цинка и никеля.

В работе проведен обзор литературы, приведены технологическая и аппаратурная схемы, изучены методы контроля свойств и разработаны мероприятия по технике безопасности при производстве ферритовых материалов.

Область применения: современные устройства связи используют много деталей с ферритовыми сердечниками. Ферриты удовлетворяют серьезным требованиям, предъявляемым к современным элементам устройств связи, а также находят себе другие применения. Это, например, ферритовые антенны, однонаправленные изоляторы волноводов, модуляторы микроволн и т. д.

Учебное издание

КОЛОНТАЕВА Татьяна Владимировна

**ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ
И КОМПОНЕНТОВ
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

Учебно-методическое пособие
для специальности 1-41 01 01 «Технология материалов
и компонентов электронной техники»

В 2 частях

Часть 1

МАТЕРИАЛЫ

Редактор *Ю. В. Ходочинская*

Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 17.05.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 5,93. Уч.-изд. л. 4,64. Тираж 300. Заказ 970.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.