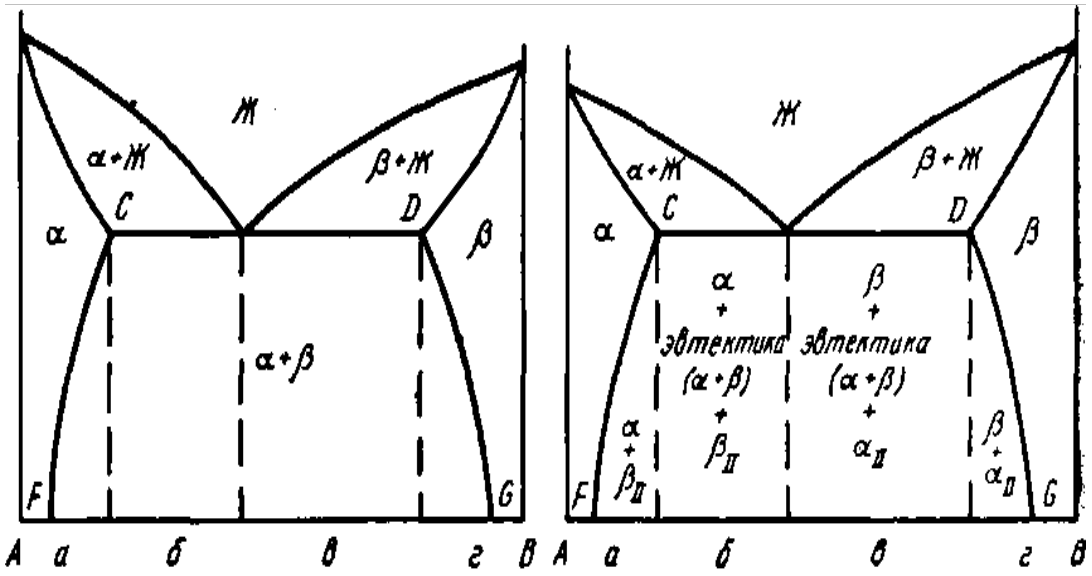
**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Т.А.ХОЛОМИНА, М.В.ЗУБКОВ**

# СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ




Рязань 2014

Министерство образования и науки Российской Федерации
Рязанский государственный радиотехнический университет

**Т.А.ХОЛОМИНА, М.В.ЗУБКОВ**

# СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Учебное пособие

Рязань 2014

УДК 621.38+615.83

Свойства и применение металлов и сплавов: учеб. пособие/ Т.А. Холомина, М.В.Зубков; Рязан. гос. радиотехн. университет. - Рязань, 2014. - 84 с.

В краткой и доступной форме излагается учебный материал, предусмотренный действующими образовательными стандартами. Содержатся краткие теоретические сведения, методические рекомендации, а также задачи по каждому разделу. Рассмотрены особенности основных типов диаграмм состояния сплавов. Особое внимание уделено анализу диаграммы состояния системы железо - углерод, а также влиянию термической и химико-термической обработки на свойства сталей. Проанализированы свойства, классификация и маркировка сталей и чугунов, а также их применение в технике.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 080200.62, 210400.62 заочной и очной форм обучения, а также направлениям 140400.62, 210601.65, 210100.62, 201000.62, 201000.62, 200100.62 дневного отделения при проведении практических занятий и для самостоятельной работы.

Ил. 8. Библиогр.: 8 назв.

*Металлы, сплавы, диаграмма состояния сплава, маркировка, электрические свойства, практическое применение*

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

Рецензент: кафедра теоретических основ электротехники (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. О.Н.Крютченко)

© Рязанский государственный радиотехнический университет, 2014

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Совершенствование учебного процесса подготовки инженерных кадров должно сопровождаться повышением роли самостоятельной работы студентов в процессе обучения. Как показывает опыт преподавания, успешное выполнение студентами поставленных перед ними учебных целей достигается в случае, если при аудиторном или самостоятельном изучении теоретического материала студенты одновременно осваивают серию контрольных вопросов и задач, касающихся материала конкретной темы.

Основная цель таких задач заключается в том, чтобы сделать самостоятельное изучение учебной информации более конкретным и целенаправленным; ориентировать на усвоение важнейших положений изучаемой темы, что в ряде случаев трудно выполнить студенту самостоятельно, особенно при большом объеме теоретического материала.

Авторы полагают, что решение задач параллельно с изучением теоретического материала должно содействовать приобретению требуемых знаний при оптимальном расходе времени студента за счет улучшения организации самостоятельной работы. Некоторые задачи снабжены методическими указаниями к решению.

Цель настоящего учебного пособия - формирование у обучающихся систематических знаний о свойствах и особенностях применения материалов, используемых в приборостроении, медицине и электронной технике, подготовка студента к решению типовых задач, связанных с проектной, научно-исследовательской и производственно-технологической деятельностью.

При составлении задач, а также последовательности изложения материала в настоящем учебном пособии авторы учитывали необходимость поэтапного формирования у студентов навыков и компетенций, предусмотренных государственными стандартами.

Учебное пособие посвящено изучению практического использования материалов в приборостроении и электронной технике, которое определяется их свойствами, зависящими от состава, структуры и воздействия внешних факторов.

Учебное пособие рекомендуется для проведения аудиторных практических занятий и самостоятельной работы студентов.

# 1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

## 1.1. Диаграммы состояния сплавов

Металлы и сплавы относятся к наиболее широко применяемым в технике материалам. Диаграммы состояния сплавов показывают фазовый состав сплава данных компонентов при любой концентрации и при любой температуре. Диаграммы строят при медленном охлаждении, поэтому структуры на диаграмме соответствуют равновесному состоянию. Критические точки сплавов - это температуры фазовых превращений.

В зависимости от характера строения двухкомпонентных сплавов (в жидком состоянии оба компонента неограниченно растворяются друг в друге, образуя однородный жидкий раствор) различают следующие основные типы диаграмм состояния:

1) при образовании компонентами механической смеси;

2) при неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;

3) при ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;

4) при образовании компонентами химического соединения.

Диаграммы состояния реальных сплавов могут содержать элементы диаграмм состояния разных типов [1-5].

Образование сплавов происходит из компонентов, кристаллизующихся в твердом состоянии в **механическую смесь,** когда

элементы обладают ограниченной растворимостью, а также из компонентов, не участвующих в образовании сплава - химического соединения. Механические смеси, таким образом, могут состоять из кристаллов чистых компонентов, твердых растворов и химических соединений. При образовании механической смеси кристаллические решетки отдельных фаз не меняются.

При изучении диаграмм состояния сплавов, компоненты которых в твердом состоянии не растворяются друг в друге (например, свинец—сурьма, олово—цинк), необходимо четко представлять, что такое **эвтектика.** Эвтектический сплав образуется в результате того, что компоненты друг в друге не растворяются, и представляет собой очень тонкую механическую смесь двух фаз. Так как обе фазы кристаллизуются одновременно при одной и той же температуре, то отдельные кристаллы обеих фаз не успевают вырасти до значительных размеров и образуют настолько мелкую механическую смесь, что практически их нельзя разделить. Поэтому эвтектика обладает специфическими, только ей присущими свойствами, которые резко отличаются от свойств входящих в нее компонентов. Необходимо обратить внимание на то, что температура окончательного затвердевания сплавов, образующих эвтектику, от состава сплава не зависит, и на диаграмме образование эвтектики характеризуется горизонтальной линией, при этом состав жидкого сплава при температуре окончательного затвердевания всегда одинаковый, значит, и состав эвтектики во всех сплавах один и тот же, количество же эвтектики в разных сплавах разное. Сплавы, состав которых соответствует минимальной температуре кристаллизации (плавления), называются эвтектическими. Сплавы, состав которых соответствует концентрациям компонентов до эвтектического и после

эвтектического состояния, называются соответственно до- и заэвтектическими. [1-3].

Сплавы – **твердые растворы** могут обладать как ограниченной, так и неограниченной растворимостью компонентов. Существуют сплавы – твердые растворы, создаваемые замещением компонентов или внедрением одного из компонентов в кристаллическую решетку другого [1-3].

Особенности диаграмм состояния сплавов с неограниченной и ограниченной растворимостью компонентов подробно рассмотрены в [1,2].

Твердые растворы — это сложные, но однородные вещества, поэтому под микроскопом твердые растворы, подобно чистому металлу, представляют собой однородные кристаллические зерна. В сплавах, образующих твердые растворы, в отличие от сплавов с эвтектикой, температуры и начала, и конца затвердевания зависят от состава, и все сплавы затвердевают в определенном интервале температур. Если вещества обладают неограниченной растворимостью, то ни в одном сплаве не будет кристаллов свободных компонентов, т.е. все сплавы данной системы однофазны и представляют собой однородный твердый раствор .

Подавляющее большинство сплавов обладают ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии, причем предел растворимости уменьшается с уменьшением температуры (например, сплавы свинец—олово, медь—серебро, алюминий—$CuAl_2$). В этих случаях эвтектика появляется только в тех сплавах, в которых концентрация растворимого компонента меньше предела растворимости.

В сплавах, у которых концентрация растворимого компонента меньше предела растворимости, после окончательного затвердевания структура представляет собой однородный твердый

раствор. Уже в твердом состоянии в связи с уменьшением предела растворимости при понижении температуры из твердого раствора начинает выделяться вторая фаза. Например, в сплавах свинец—олово, содержащих менее 19,5 % олова, в сплавах медь—серебро, содержащих менее 7 % серебра, и в сплавах алюминий—$CuA1_2$, содержащих менее 5,67 % меди, при охлаждении ниже кривой растворимости начинает образовываться вторая фаза, и при комнатной температуре сплавы получаются двухфазными.

Отметим, что процессы кристаллизации из одного твердого состояния в другое происходят по тем же законам, что и из жидкого, т.е. путем зарождения центров кристаллизации и последующего их роста, поэтому для образования второй фазы охлаждение должно быть медленным. Следует иметь в виду, что продукты вторичной кристаллизации всегда мельче, чем первичной. Важно помнить, что у сплавов, у которых есть превращения в твердом состоянии, можно менять структуру, а значит, и свойства путем нагрева и охлаждения с различной скоростью, т.е. путем термической обработки.

Диаграммы состояния сплавов, образующих устойчивое **химическое соединение** (магний—кальций, цинк—магний), можно рассматривать как состоящие из двух самостоятельных диаграмм, у которых вторым компонентом является химическое соединение [1-4].

Элементы сплавов, образующие химические соединения, обычно резко отличаются по размерам атомов, строению электронных оболочек и параметрам кристаллических решеток. К образованию химических соединений склонны элементы, далеко расположенные друг от друга в периодической таблице Д.И. Менделеева.

В отличие от обычных химических соединений многие металлические соединения имеют переменный состав, который может

изменяться в широких пределах. Получение химического соединения $A_mB_n$ с образованием однородного кристаллического вещества возможно только при строго определенных соотношениях концентраций компонентов. При этом образуется кристаллическая решетка, не похожая на решетки сплавляемых компонентов. Примером может служить сплав Cu–Mg при содержании 17 % Mg. Свойства сплава – химического соединения резко отличаются от свойств элементов, образующих его.

Сплавы – химические соединения не всегда встречаются в чистом виде. Например, при избытке растворимого компонента возможно образование химического соединения в комбинации с твердым раствором.

Физические, механические и технологические свойства сплава зависят от его структуры. Зависимость между типом диаграммы состояния сплава и его свойствами установили Н.С.Курнаков и А.А.Бочвар. Диаграммы состав—свойства для сплавов разных типов приведены в [1-4].

## Задачи

1.1.1. Каковы основные области применения металлов и сплавов в приборостроении?

**Ответ:** 1) изоляция компонентов; 2) создание электронно-дырочных переходов; 3) изготовление деталей, конструкций, машин; коммутация, контактирование, создание резистивных элементов.

1.1.2. Каковы основные отличия проводниковых материалов от непроводниковых?

**Ответ:** 1) наличие электропроводности при температуре абсолютного нуля и увеличение удельного сопротивления с ростом температуры;
2) низкие плотность и температура плавления; 3) возможность применения в качестве изолятора.

1.1.3. При увеличении частоты внешнего электрического поля как изменяются свойства материалов ?

**Ответ:** 1) не изменяются; 2) изменяются в сторону усиления проводящих свойств; 3) изменяются в сторону усиления диэлектрических свойств.

1.1.4. Какая структура наиболее характерна для металлов и сплавов?

**Ответ:** 1) стеклообразная; 2) стеклокристаллическая;
3) поликристаллическая; 4) монокристаллическая.

1.1.5. Какой тип химической связи характерен для металлов?

**Ответ:** 1) ковалентная; 2) металлическая; 3) ионная.

1.1.6. Какие типы пространственных кристаллических решеток наиболее характерны для металлов и сплавов?

**Ответ:** 1) тригональная, тетрагональная, ромбическая;
2) объемноцентрированная кубическая, гранецентрированная кубическая и гексагональная плотноупакованная; 3) гранецентрированная тетрагональная, триклинная и моноклинная.

1.1.7. Чем обусловлен горизонтальный участок на кривых охлаждения металлов и сплавов?

**Ответ:** 1) неравномерным изменением температуры; 2) выпадением осадка в химической реакции; 3) равенством теплоты, отводимой в окружающую среду, выделяющейся при скрытой теплоте кристаллизации.

1.1.8. Что такое критическая точка на кривых охлаждения или нагревания металлов и сплавов?

**Ответ:** 1) минимальная точка кривой; 2) температура, соответствующая каким-либо фазовым превращениям; 3) температура, максимально допустимая для данного материала.

1.1.9. Какой физический процесс является основой процесса получения сплава?

**Ответ:** 1) дробление и спекание компонентов; 2) измельчение и растворение; 3) взаимная диффузия компонентов после расплавления.

1.1.10. На какие группы сплавы подразделяются по составу?

**Ответ:** 1) механическая смесь, твердый раствор, химическое соединение компонентов; 2) однородные и неоднородные; 3) простые и сложные.

1.1.11. По каким признакам легированный металл отличается от сплава?

**Ответ:** 1) легированный металл обладает более высокими твердостью и ударной прочностью; 2) в легированном металле сохраняется исходный тип кристаллической решетки; 3) легированный металл обладает более высокими пластичностью и температурой плавления.

1.1.12.Многие элементы при различных температурах имеют различное кристаллическое строение. Как называют это явление?

**Ответ:** 1) политипия; 2) полиморфизм; 3) изоморфизм.

1.1.13. Что происходит при перекристаллизации металлов в твердом состоянии?

**Ответ:** 1) образование центров новых кристаллов; 2) рост новых кристаллов за счет ранее существовавших; 3) образование новой кристаллической структуры.

1.1.14. Какой системой с точки зрения количества фаз является поликристаллическое железо?

**Ответ:** 1) однофазной; 2) многофазной.

1.1.15. Какие основные фазы могут иметься в сплавах?

**Ответ:** 1) жидкая и твердая фазы; 2) твердые растворы и кристаллы почти чистых компонентов; 3) химические соединения.

1.1.16. Какой процесс называется термическим анализом?

**Ответ:** 1) изучение строения и химических свойств металла или сплава; 2) построение кривых охлаждения (нагревания) на основе экспериментальных данных; 3) изучение температурной зависимости удельного электрического сопротивления металла или сплава.

1.1.17. Что такое диаграмма состояния сплава?

**Ответ:** 1) графическое изображение зависимости предела прочности сплава при растяжении от его состава и температуры окружающей среды в условиях равновесия; 2) графическое изображение фазового состояния сплава и критических точек в зависимости от температуры и концентрации компонентов в условиях равновесия; 3) графическое изображение агрегатного состояния сплава и его механических или электрических свойств в зависимости от температуры и концентрации компонентов в условиях равновесия.

1.1.18. Какие условия при проведении термического анализа считаются равновесными?

**Ответ:** 1) такие, при которых процессы, протекающие в системе, являются обратимыми; 2) такие, при которых обеспечивается минимально возможная температура; 3) такие, при которых обеспечивается максимальная скорость процессов.

1.1.19. В какой системе координат изображают диаграмму состояния сплава?

**Ответ:** 1) скорость нагревания – концентрация компонентов;
2) температура – концентрация компонентов; 3) удельное сопротивление сплава – температура.

1.1.20. Что такое линия ликвидуса?

**Ответ:** 1) граница зерна поликристаллического материала; 2) линия на диаграмме состояния сплава, ниже которой сплав находится в твердом состоянии; 3) линия на диаграмме состояния сплава, выше которой сплав находится в жидком состоянии.

1.1.21. Что такое линия солидуса?

**Ответ:** 1) линия на диаграмме состояния сплава, ниже которой сплав находится в твердом состоянии; 2) линия на диаграмме состояния сплава, выше которой сплав находится в жидком состоянии; 3) граница раздела фаз в неоднородном материале.

1.1.22. Какие свойства характерны для эвтектического сплава?

**Ответ:** 1) мелкодисперсная структура; 2) крупнодисперсная структура; 3) температура плавления, более низкая, чем у исходных компонентов и сплавов этих же элементов любого другого состава.

1.1.23. Какие сплавы называются заэвтектическими?

**Ответ:** 1) составы которых расположены на диаграмме состояния сплава слева от эвтектики; 2) составы которых расположены на диаграмме состояния сплава справа от эвтектики; 3) совпадающие по составу с концентрацией компонентов сплава, соответствующей эвтектоидному состоянию.

1.1.24. Что такое твердая эвтектика?

**Ответ:** 1) расплавленное состояние материала; 2) механическая смесь кристаллов двух или более твердых веществ, одновременно закристаллизовавшихся из жидкого сплава при температуре ниже температуры плавления отдельных компонентов или любых других их смесей;

3) сплав типа «твердый раствор замещения», состоящий из двух или более твердых веществ, одновременно закристаллизовавшихся из жидкого сплава при температуре выше температуры плавления отдельных компонентов или любых других их смесей.

1.1.27. Что такое эвтектоид?

**Ответ:** 1) сплав типа «твердый раствор замещения», состоящий из двух или более твердых веществ, одновременно закристаллизовавшихся из жидкого сплава при температуре выше температуры плавления отдельных компонентов или любых других их смесей; 2) механическая смесь компонентов сплава, содержащая значительную концентрацию их

химического соединения; 3) сплав типа «механическая смесь компонентов», состоящий из двух или более твердых веществ, одновременно закристаллизовавшихся из твердой фазы при температуре ниже температуры плавления отдельных компонентов или любых других их смесей.

1.1.28. Существуют ли среди сплавов с неограниченной растворимостью компонентов эвтектические?

**Ответ:** 1) нет, ни при каких условиях; 2) да, при определенной температуре; 3) да, при определенных концентрациях компонентов.

1.1.29. Какие фазы содержит сплав с ограниченной растворимостью компонентов А и В в твердом состоянии (по диаграмме состояния)?

**Ответ:** 1) жидкий сплав и химическое соединение компонентов;
2) жидкий сплав, твердый раствор компонента А в компоненте В и твердый раствор компонента В в компоненте А; 3) жидкий сплав, эвтектику и эвтектоид.

1.1.30. Какие фазовые состояния сплава типа «механическая смесь компонентов» иллюстрирует диаграмма состояния?

**Ответ:** 1) жидкий сплав, твердые растворы компонентов;
2) жидкий сплав, смесь исходных компонентов; 3) жидкий сплав, химическое соединение компонентов.

1.1.31.В чем сущность процесса модифицирования?

**Ответ:** модифицирование есть искусственное 1) изменение условий кристаллизации; 2) увеличение числа центров кристаллизации введением в расплав затравок; 3) ускорение процесса кристаллизации.

1.1.32.Объясните значение всех критических точек и линий на диаграмме состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии.

1.1.34.Почему в качестве конструкционных материалов наибольшее применение нашли сплавы, у которых есть фазовые превращения в твердом состоянии?

## 1.2. Сплав железо - углерод

Углерод — элемент, содержание которого определяет структуру и свойства так называемых «черных» сплавов - сталей и чугунов. Известно, что объем производства таких сплавов составляет 95 % мирового выпуска металлопродукции [1-5].

Детальный разбор диаграммы состояния железо - углерод, точнее железо - цементит (Fe – $Fe_3C$) приведен в [1,2]. Необходимо обратить внимание на то, чем характерны все критические точки и линии диаграммы состояния, приведенной на рис.1.1, соответствующие им температуры и концентрация углерода.

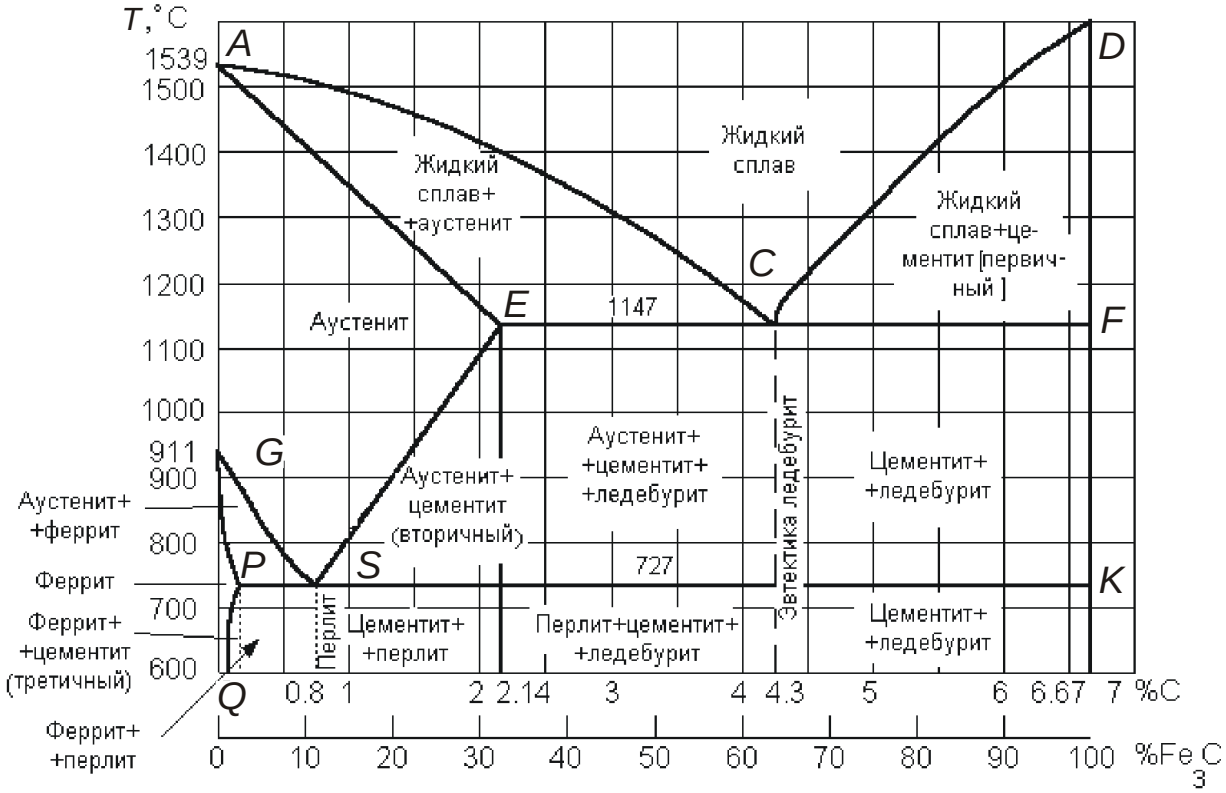



Рис. 1.1. Диаграмма состояния Fe – $Fe_3C$ (в упрощенном виде)

Отметим некоторые особенности. В результате вторичной кристаллизации по линии GS при охлаждении начинается превращение аустенита в феррит вследствие аллотропического превращения γ-железа в α-железо. Так как в феррите максимально растворяется 0,025 % углерода (точка Р), то в аустените количество углерода все время увеличивается и при температуре 1147 °С достигает 2,14 %. Каждая точка линии GS показывает содержание углерода в аустените при данной температуре. Критические точки, образующие линию GS, принято обозначать при нагреве $Ac_3$, а при охлаждении—$Ar_3$. По линии ES при охлаждении из аустенита начинает выделяться вторичный цементит вследствие уменьшения растворимости углерода в аустените при понижении температуры. Цементит содержит 6,67 % углерода, поэтому в остающемся аустените количество углерода уменьшается. Каждая точка линии ES показывает содержание углерода в аустените при данной температуре.

Критические точки, образующие линию ES, принято обозначать $Ac_m$. По линии PSK происходит окончательный распад аустенита на перлит во всех сплавах системы. Из аустенита образуется мелкая механическая смесь — эвтектоид, так как в равновесном состоянии γ -железо при температуре ниже 727 °С существовать не может, а α -железо практически углерод не растворяет (точка Р).

При температуре 727 °С во всех сплавах в аустените содержится около 0,8 % С (точка S, куда сходятся линии GS и ES), значит, состав перлита также постоянен и содержит 0,8 % углерода. Критические точки, образующие линию PSK при нагреве обозначают $Ac_1$, а при охлаждении $Ar_1$

Отметим, что температура, при которой из аустенита начинает выделяться феррит или цементит (линии GS и ES), зависит от состава

сплава, а превращение аустенита в перлит происходит во всех сплавах при одной и той же температуре (727 °С).

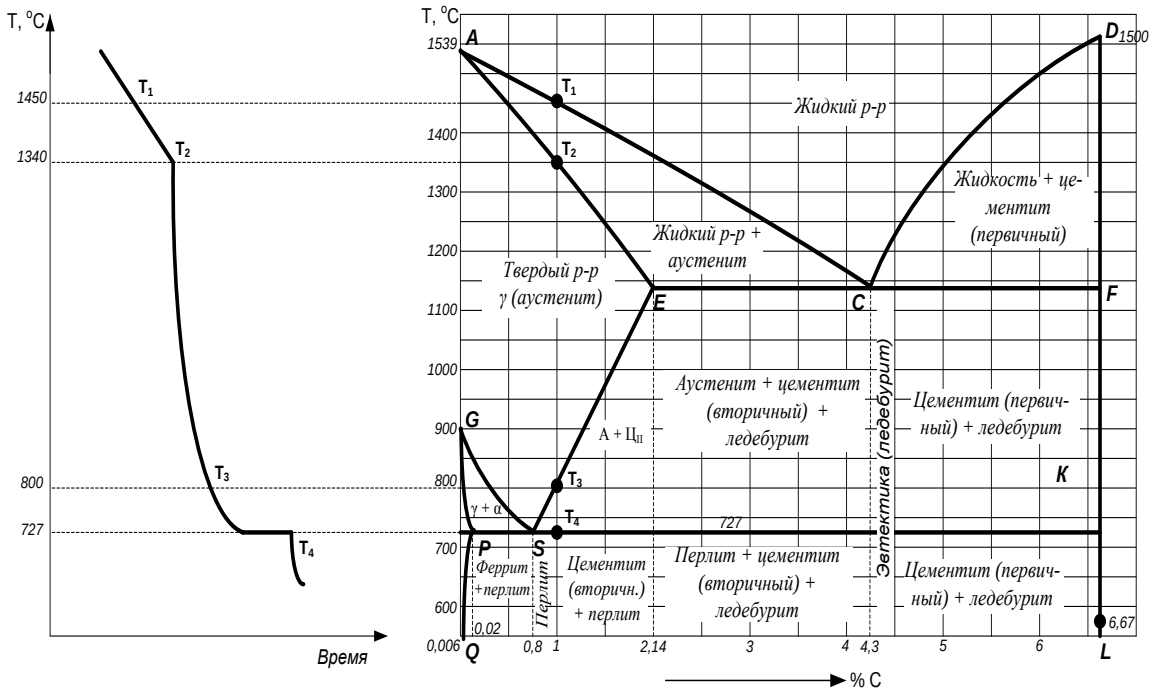
Необходимо отметить, что в простых углеродистых сплавах в равновесном состоянии при температуре ниже 727 °С аустенит существовать не может, он превращается в перлит (эвтектоидную смесь феррита и цементита вторичного). Равновесные структуры железоуглеродистых сплавов: аустенит, феррит, перлит, цементит, ледебурит[1-5].

Существенна разница между эвтектикой и эвтектоидом: и то и другое представляют собой сплав — мелкую механическую смесь, но эвтектика — продукт первичной кристаллизации, она получается при одновременной кристаллизации двух или нескольких фаз из жидкого раствора, а эвтектоид — продукт вторичной кристаллизации, он образуется при распаде сплава— твердого раствора, т.е. в результате перекристаллизации из одного твердого состояния в другое. И эвтектика, и эвтектоид образуются в том случае, если вещества друг в друге не растворяются в твердом состоянии.

Эвтектика — ледебурит является характерным признаком белых чугунов [1-3]. Содержание углерода может быть одинаковым и у белых и у серых чугунов; отличаются они состоянием углерода. В серых чугунах углерод имеет форму пластинок. Металлическая основа может быть перлитной или ферритной.

При ответе на вопрос о превращениях в стали, например содержащей 1 % углерода, происходящих при медленном охлаждении от 1600 до 20°С, следует провести вертикаль на диаграмме состояния, отвечающую заданному сплаву. Рядом с диаграммой необходимо вычертить кривую охлаждения данного сплава, указать на ней температуры, соответствующие каждой критической точке. Далее следует описать структурные превращения в каждой критической точке, происходящие в сплаве заданного состава.

Таким образом, при охлаждении сплава до температуры $T_1$=1450 °С (рис.1.2) идет охлаждение жидкого раствора. Из жидкого раствора выделяются кристаллы аустенита - твердого раствора углерода в γ-железе. В интервале между температурами $T_1$=1450 и $T_2$=1340 ° С количество кристаллов аустенита увеличивается, а количество жидкой фазы уменьшается. В точке $T_2$=1340 °С происходит окончательное затвердевание аустенита. В интервале температур между температурами точками $T_2$=1340 °С и $T_3$=800 °С никаких превращений не происходит, идет охлаждение аустенита. В точке $T_3$=800 °С начинается вторичная кристаллизация: из аустенита начинает выделяться вторичный цементит, так как растворимость углерода в железе с уменьшением температуры уменьшается.




а б

Рис.1.2. Кривая охлаждения (а) и иллюстрация на диаграмме состояния изменений фазового состояния стали, содержащей 1% углерода, происходящих при медленном охлаждении от 1600 до 20°С (б)

Цементит — это химическое соединение железа с углеродом — карбид железа ($Fe_3C$). При дальнейшем понижении температуры количество цементита увеличивается. Поскольку цементит содержит 6,67 % углерода, в остающемся аустените количество углерода уменьшается в соответствии с точками линии ES. В точке T = 727 °C оставшийся аустенит, содержащий 0,8 % углерода (точка S), окончательно распадается на перлит. Перлит — это эвтектоид (сплав в виде мелкой механической смеси феррита и цементита вторичного). Окончательная структура сплава - перлит и цементит вторичный.

## Задачи

1.2.1. Какие фазы входят в структуры сплавов железа с углеродом в соответствии с диаграммой состояния (рис. 1.1) при нормальной температуре?

**Ответ:** 1) феррит, аустенит, перлит, ледебурит, цементит; 2) феррит, перлит, ледебурит; 3) феррит, перлит, ледебурит,чв цементит;
4) феррит, перлит; 5) феррит, цементит.

1.2.2. Какой сплав называется ферритом?

**Ответ:** 1) твердый раствор замещения углерода и других элементов в α –железе с неограниченной растворимостью компонентов;
2) твердый раствор внедрения углерода и других элементов в α–железе;
3) сплав - химическое соединение железа с углеродом.

1.2.3. Какой сплав называется аустенитом?

**Ответ:** 1) твердый раствор внедрения углерода и других элементов в γ-железе; 2) твердый раствор внедрения углерода и других элементов в α–железе; 3) сплав - химическое соединение железа с углеродом.

1.2.4. Какой сплав называется цементитом?

**Ответ:** 1) сплав - химическое соединение железа с углеродом;
2) твердый раствор замещения железа с углеродом; 3) твердый раствор внедрения углерода и других элементов в γ-железе.

1.2.5. По диаграмме Fe—$Fe_3C$ определите максимальное содержание углерода в аустените при 800 °С.

**Ответ:** 1) 1 %; 2) 1,5 %; 3) 0,8 %.

1.2.6.При исследовании структуры стали установлено, что в ней содержится примерно 30 % перлита. Каков состав этой стали по углероду?

**Ответ:** 1) 0,3%; 2) 30%; 3) 0,25%.

1.2.7. Какая группа материалов называется сталями?

**Ответ:** 1) сплавы железо – углерод, содержащие вредные примеси, технологические добавки с содержанием углерода менее 2,14 % , в которых при кристаллизации образуется аустенит; 2) сплавы железо – углерод, содержащие легирующие элементы, с содержанием более 2,14 % углерода, в которых при кристаллизации образуется троостит;
3) сплавы железо – углерод, содержащие технологические добавки, с содержанием 0,8 % углерода, в которых при кристаллизации образуется ледебурит.

1.2.8. Какие стали называются доэвтектоидными?

**Ответ:** 1) стали, содержащие более 0,8% углерода, – аустенит + перлит; 2) стали, содержащие менее 0,8% углерода, – феррит + перлит;
3) стали, содержащие 0,8 % углерода, – феррит + перлит.

1.2.9. Какие стали называются эвтектоидными?

**Ответ:** 1) стали, содержащие более 0,8 % углерода, – аустенит + перлит; 2) стали, содержащие 0,8 % углерода, –перлит; 3) стали, содержащие менее 0,8 % углерода, – феррит + перлит.

1.2.10. Из каких компонентов состоит структура заэвтектоидной стали?

**Ответ:** 1) из перлита; 2) из перлита и цементита; 3) из цементита и феррита; 4) из цементита.

1.2.11. Какие фазы входят в структуру доэвтектоидной стали при температуре 20° С?

**Ответ:** 1) перлит; 2) перлит + феррит; 3) феррит + аустенит;
4) феррит + цементит.

1.2.12. Из каких фаз состоит перлит?

**Ответ:** 1) аустенит+ цементит 2) феррит + аустенит; 3) феррит + цементит.

1.2.13. При какой концентрации углерода находится условная граница между сталями и чугунами?

**Ответ:** 1) 0,8 % ; 2) 2,14 % ; 3) 4,3 % ;4) 6,67 % С.

1.2.14. Какая группа материалов называется чугунами?

**Ответ:** 1) сплавы железо – углерод с содержанием более 2,14 % углерода, в которых при кристаллизации образуется ледебурит;
2) сплавы железо – углерод с содержанием менее 2,14 % углерода, в которых при кристаллизации образуется троостит; 3) сплавы железо – углерод с содержанием 0,8 % углерода, в которых при кристаллизации образуется аустенит.

1.2.15. Какой характер превращений отражают линии EF и РК диаграммы Fe—$Fe_3C$ (рис. 1.1)?

**Ответ:** 1) EF — эвтектическое, РК — перитектическое; 2) EF эвтектическое, РК — эвтектоидное; 3) EF — перитектическое, РК— эвтектоидное ; 4) EF — перитектическое, РК— эвтектическое.

1.2.16. Какие компоненты входят в структуру доэвтектического белого чугуна при нормальной температуре?

**Ответ:** 1) перлит + цементит; 2) перлит + феррит; 3) феррит + аустенит + ледебурит; 4) перлит + цементит + ледебурит.

1.2.17. Что отличает ледебурит при температурах выше и ниже 727 °С?

**Ответ:** 1) химический состав; 2) фазовый состав; 3) различия нет.

1.2.18. В соответствии с диаграммой Fe—$Fe_3C$ (рис.1.1) эвтектика (ледебурит) образуется в структуре сплавов, содержащих углерода больше 2,14 %. Возможно ли на практике наличие ледебурита в

структуре сплавов с меньшим содержанием углерода? Если возможно, то при каких условиях и из-за какого эффекта?

**Ответ:** 1) невозможно; 2) возможно при очень медленном охлаждении сплавов с содержанием углерода, близким к 2 %;

3) возможно при быстром охлаждении сплавов с содержанием углерода, меньшим 2,14 % из-за большой склонности к ликвации железоуглеродистых сплавов.

1.2.19. Изобразите схему охлаждения сплава Fe—$Fe_3C$ с 3 % С, отметив на ней структурные состояния сплава.

1.2.20. Из какой фазы и при каких температурных условиях образуется цементитная составляющая в структуре стали с 1 % углерода ?

### 1.3. Термическая и химико-термическая обработки стали

Современная техника предъявляет все возрастающие требования к механическим свойствам металлов, которые в значительной степени можно улучшить путем термической и химико-термической обработки. Увеличение прочности деталей во многих случаях позволяет уменьшить их габариты и массу, что дает экономию металла.

Любая ***термическая обработка*** состоит из нагрева до заданной температуры, выдержки и охлаждения с заданной скоростью, поэтому процесс термической обработки обычно выражают графически в координатах температура—время. В зависимости от температуры нагрева и скорости охлаждения различают следующие основные виды термической обработки: отжиг, нормализацию, закалку и отпуск. Цель и сущность, технология, а также особенности структуры и свойств, которые приобретает сталь в результате проведения каждого вида термической обработки, рассмотрены в [1-3].

При изучении процесса ***отжига*** необходимо различать, в каких случаях какой метод отжига наиболее целесообразно применять, каким сталям дают полный отжиг, а каким— неполный. Легированные стали и

крупные поковки требуют очень медленного охлаждения, поэтому применение для них изотермического отжига значительно увеличивает производительность.

Цель отжига — получение максимальной вязкости и пластичности, а так как у разных сталей время устойчивости аустенита разное, то и скорость охлаждения при отжиге для разных сталей должна различаться. Она зависит от устойчивости аустенита в области перлитного превращения.

При изучении процесса нормализации следует уяснить разницу между назначением отжига и нормализации, а также между условиями их проведения. При отжиге скорость охлаждения должна быть разной для разных сталей, так как в структуре необходимо наличие перлита. При нормализации же скорость охлаждения для всех сталей одна и та же — на воздухе. Поэтому после нормализации у разных сталей получается разная структура, она зависит от критической скорости закалки.

В углеродистой стали после нормализации структура практически получается такая же, как и после отжига, но более мелкая, поэтому прочность нормализованных сталей несколько выше, чем отожженных. В ряде случаев для углеродистой стали вместо отжига можно производить нормализацию.

***Закалка*** является одним из наиболее важных видов термической обработки [1-5]. Температура нагрева при закалке выбирается в зависимости от содержания углерода в стали. Охлаждение аустенита с различной скоростью сопровождается образованием структур перлита, сорбита и троостита [1,2,5]. Это двухфазные структуры, представляющие собой ферритно-цементитную смесь различной степени дисперсности (размельченности); они имеют пластинчатое строение.

При большой скорости охлаждения диффузия углерода не успевает произойти, происходит только аллотропическое превращение железа, поэтому из аустенита получается однофазная структура — мартенсит,

который представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в γ-железе, он имеет игольчатое строение. Чем больше скорость охлаждения аустенита, тем более высокую твердость имеют получающиеся структуры.

Мартенситной точкой называется температура, при которой начинается превращение аустенита в мартенсит. В углеродистых сталях начало мартенситного превращения происходит около 200 °С. В отличие от перлитного мартенситное превращение никогда не идет до конца, поэтому в стали всегда остается определенное количество остаточного аустенита; на мартенситную точку скорость охлаждения не влияет, она практически зависит только от состава стали.

*Критической скоростью закалки* называется скорость охлаждения, обеспечивающая получение структуры – мартенсит или мартенсит и остаточный аустенит. *Прокаливаемостью* называется способность стали приобретать при закалке мартенситную структуру в слое той или иной глубины. Прокаливаемость зависит от состава стали, условий нагрева и охлаждения и других факторов, но в первую очередь определяется кинетикой превращений аустенита [1-3].

Критическая скорость закалки уменьшается (прокаливаемость увеличивается) с увеличением размера зерна аустенита. Поэтому повышение температуры нагрева под закалку и времени выдержки, приводящее к увеличению размера зерна аустенита, связано и с увеличением прокаливаемости. Введение примесей, препятствующих росту зерна аустенита, приводит к увеличению критической скорости закалки и уменьшению прокаливаемости.

Критическая скорость закалки имеет очень важное значение, она зависит от стабильности аустенита, которая, в свою очередь, определяется количеством растворенных в нем углерода и легирующих элементов. Критическая скорость закалки в сильной степени зависит от химического состава аустенита.

Критическая скорость закалки легированных сталей тем меньше, чем больше в них содержится легирующих элементов. Следовательно, чем выше степень легированности, тем более глубокой прокаливаемостью обладают эти стали.

Для доэвтектоидной стали всегда производят полную закалку, так как при неполной остается феррит, который создает в структуре включения пониженной твердости. Для заэвтектоидной стали можно провести неполную закалку, так как остающийся цементит твердости не снижает. Существенную роль при закалке играют охлаждающие среды (вода, 10%-е растворы NaCl, $H_2SO_3$, $Na_2CO_3$ в воде, машинное масло, трансформаторное масло, эмульсия масла в воде, мыльная вода, керосин, воздух).

Углеродистые стали, имеющие высокую критическую скорость закалки, охлаждают (закаливают) в воде, а легированные стали, имеющие более низкую критическую скорость закалки, охлаждают в масле, где охлаждение происходит медленнее. Недостатком масла как охлаждающей среды являются его легкая воспламеняемость и относительно высокая стоимость. С понижением температуры охлаждающей среды закалка стали становится более резкой.

Существуют следующие способы закалки: в одном охладителе; в двух средах; с подстуживанием (перед погружением в охладитель материал некоторое время выдерживают на воздухе); ступенчатая; изотермическая закалка и др.

Отметим, что при чрезмерном увеличении скорости охлаждения получаются большие внутренние напряжения, коробления и могут возникнуть трещины.

При ступенчатой и изотермической закалке температура горячей среды, в которой происходит выдержка, может быть одинаковой (вблизи мартенситной точки), но при ступенчатой закалке время выдержки должно быть меньше времени устойчивости аустенита

при данной температуре, что обеспечивает формирование окончательной структуры—мартенсита. При изотермической закалке время выдержки должно обеспечить полный распад аустенита на игольчатый троостит. Игольчатый троостит обладает значительно меньшей твердостью, чем мартенсит, поэтому изотермическую закалку нельзя применять для режущего инструмента, но она обеспечивает большую прочность при минимальных внутренних напряжениях, так как отсутствует мартенситное превращение. Ее наиболее целесообразно применять для тех деталей, которые работают с временными перегрузками и при работе которых отсутствует пластическая деформация, например для пружин [4-6].

В сталях, у которых мартенситная точка лежит ниже 0 °С, после закалки может появиться большое количество остаточного аустенита. Такие стали, например, легированные инструментальные или постоянные магниты, для уменьшения количества остаточного аустенита после закалки обрабатывают холодом, т.е. охлаждают ниже 0 °С [4].

В результате закалки в деталях всегда возникают внутренние напряжения в связи с резким охлаждением и фазовыми превращениями.

Для уменьшения напряжений, увеличения вязкости, иногда снижения твердости после закалки всегда следует отпуск — окончательная термическая обработка, которая определяет конечную структуру, а значит, свойства и качество деталей. После каждого вида отпуска деталей (низкого, среднего или высокого) формируется определенная структура [1-3]. Наилучшим сочетанием между прочностью и вязкостью обладает сорбит отпуска, поэтому термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска,

называется улучшением стали. Эту операцию применяют для среднеуглеродистых сталей (0,35 – 0,60 % С).

Например, если необходимо выбрать и обосновать режим термической обработки для резца из стали У10А, нужно учитывать следующие рекомендации.

Заготовка для резца подвергается предварительной термической обработке — отжигу на зернистый цементит для получения мягкой однородной структуры. Температура отжига 770—790 °С, охлаждение в печи. После окончательной механической обработки, кроме шлифования, резец подвергается закалке и низкому отпуску. Поскольку сталь У10А является заэвтектоидной, закалка производится неполная, температура нагрева 770—780 °С, время выдержки назначается в зависимости от сечения, обычно 1—2 ч. Средой охлаждения является вода, так как углеродистая сталь имеет большую критическую скорость закалки. Лучшие результаты дает закалка в двух средах: в воде, а затем в масле. Так как резец должен иметь высокую твердость, то он подвергается низкому отпуску при температуре 150—200 °С.

Детали, которые должны иметь твердость только на поверхности, подвергают поверхностной закалке, в результате чего увеличивается общая прочность деталей, так как увеличивается предел выносливости. Одним из распространенных методов является нагревание за счет теплового действия тока, индуцируемого в поверхностных слоях материала при помещении его в электромагнитное поле высокой частоты. Закалка токами высокой частоты (ТВЧ) обычно автоматизирована и позволяет получить наилучшие результаты. Поверхностная закалка газовым пламенем для крупных деталей в ряде случаев является единственным методом поверхностного упрочнения.

Существует ряд прогрессивных методов упрочнения деталей: термомеханическая, ультразвуковая, термомагнитная обработка. Высокотемпературной термомеханической обработке (ВТМО) можно подвергать любые стали, а низкотемпературной (НТМО)— только те, у которых переохлажденный аустенит обладает повышенной устойчивостью, т.е. легированные.

При ***химико-термической обработке*** стальных деталей имеют значение температура процесса, химический состав стали (особенно процентное содержание углерода), а также необходимость термической обработки до или после того или иного вида химико-термической обработки. Каждый вид химико-термической обработки имеет свою область применения, определенные достоинства и недостатки.

Газовая цементация является прогрессивным методом, который позволяет наиболее полно осуществить механизацию и автоматизацию процесса. Необходимая твердость поверхностного слоя после цементации достигается только при последующей закалке, сердцевина при этом остается вязкой, так как стали с малым содержанием углерода практически не закаливаются.

Достоинства азотирования состоят в том, что твердость не снижается при повторных нагревах до 500—600 °С и увеличивается коррозионная стойкость. Однако азотирование — процесс очень дорогой и непроизводительный, поэтому применять его следует только в тех случаях, когда никакая другая обработка не обеспечивает нужных свойств, например, для деталей, которые подвергаются истиранию и работают в условиях коррозии, или для деталей, которые истираются и во время работы могут периодически нагреваться до 500—600 °С. Обратим внимание, что не следует путать детали, которые периодически нагреваются во время работы, например штампы для горячей штамповки во время

соприкосновения с заготовкой, с деталями, которые постоянно нагреты во время работы, например лопатки газовых турбин.

При проведении цианирования свойства подвергающегося обработке слоя в значительной степени зависят от температуры, при которой происходит цианирование [1,2,4]. Температурный диапазон разделяется на области низко-, средне- и высокотемпературного цианирования. Высокотемпературное цианирование обычно производится в газовой среде. Этот процесс называется нитроцементацией.

Диффузионная металлизация может проводиться хромом, алюминием и другими элементами и принципиально отличается от метода нанесения гальванических покрытий как технологией, так и назначением.

Использование при термической и химико-термической обработке оборудования с автоматическим регулированием температуры и с контролируемой атмосферой в печи практически исключает такие виды брака, как перегрев, пережог, обезуглероживание и т.п. Качество деталей повышается при широком применении автоматизированных агрегатов для термической и химико-термической обработки, состоящих из печей непрерывного действия, соляных ванн, закалочного и другого оборудования, в которых непрерывно производятся все виды термической обработки стальных деталей.

## Задачи

1.3.1. Какие технологические операции включает процесс термической обработки стали?

**Ответ:** 1) плавление и последующую кристаллизацию путем литья в форму; 2) нагрев до определенной температуры; выдержку в течение необходимого времени; охлаждение с заданной скоростью; 3) плавление;

выдержку в течение определенного времени в электромагнитном поле; охлаждение на воздухе.

1.3.2. Какова цель термической обработки стали?

**Ответ:** 1) улучшение внешнего вида детали или заготовки;
2) изменение удельного электрического сопротивления; 3) изменения физических, механических и других свойств сплава, обусловленные изменением его внутреннего строения.

1.3.3. Какие параметры характеризуют режим термообработки?

**Ответ:** 1) температура и скорость нагрева, время выдержки и скорость охлаждения; 2) температура нагрева, скорость охлаждения;
3) скорость нагрева, температура нагрева, длительность выдержки при температуре нагрева, скорость охлаждения; 4) степень перегрева.

1.3.4. Какая термическая обработка изделий применяется после предварительной холодной пластической деформации для устранения наклепа?

**Ответ:** 1) диффузионный отжиг; 2) рекристаллизационный отжиг;
3) отпуск.

1.3.5. Каковы основные виды термообработки стали?

**Ответ:** 1) закалка, охлаждение и отжиг; 2) отжиг 1-го и 2-го рода, нормализация, закалка и отпуск; 3) отжиг, нормализация и закалка.

1.3.6. От чего зависит температура превращения перлита в аустенит железо-углеродистых сплавов в реальных условиях нагрева?

**Ответ:** 1) от содержания углерода в стали; 2) от скорости нагрева;
3) от структуры стали; 4) от величины зерна стали.

1.3.7. Какие элементы уменьшают склонность к росту аустенитного зерна стали при нагреве?

**Ответ:** 1) Мп; 2) Si и Mn; 3) Ti, V; 4) W, Mo.

1.3.8. В чем проявляется основное влияние легирующих элементов на превращение аустенита?

**Ответ:** 1) ускоряют распад аустенита; 2) стабилизируют аустенит;

3) снижают критическую температуру закалки стали.

1.3.9. Температура нагрева эвтектоидной стали 750 °С, далее - охлаждение в воде. Какой это вид термообработки?

**Ответ:** 1) отжиг; 2) неполная закалка; 3) полная закалка; 4) отпуск.

1.3.10. Какой процесс термообработки стали называется отжигом?

**Ответ:** 1) процесс, включающий нагрев до определенной температуры, выдержку и быстрое охлаждение в воде, масле, керосине; 2) процесс, включающий нагрев до определенной температуры, выдержку и медленное охлаждение в печи; 3) процесс, включающий нагрев до определенной температуры, выдержку и охлаждение на воздухе.

1.3.11. Какова цель отжига как метода термической обработки стали?

**Ответ:** 1) улучшение внешнего вида детали или заготовки;

2) повышение твердости вследствие приобретения поликристаллическими зернами более крупных размеров и вытянутой формы; 3) повышение пластичности, обусловленное получением более равновесной структуры вследствие устранения внутренних напряжений и измельчения зерна.

1.3.12. Какова цель отжига 1-го рода как метода термической обработки стали?

**Ответ:** 1) подготовка стали к отжигу 2-го рода; 2) устранение неоднородностей физических свойств и химического состава сплава, созданных предшествующими обработками; 3) эвтектоидные фазовые изменения состава стали – перекристаллизация из одного твердого состояния сплава в другое.

1.3.13. Какова цель диффузионного отжига как метода термической обработки стали?

**Ответ:** 1) выравнивание химического состава и устранение дендритной структуры кристаллов сплава в деталях и заготовках из легированной стали; 2) введение дополнительного количества

легирующих примесных элементов методом диффузии; 3) повышение твердости вследствие фазовых переходов.

1.3.14. Для чего применяется рекристаллизационный отжиг?

**Ответ:** 1) для устранения внутренних напряжений; 2) для восстановления исходной структуры и свойств металла после холодной пластической деформации; 3) для проведения фазовых переходов.

1.3.15. Какие факторы влияют на размер зерна после рекристаллизационного отжига?

**Ответ:** 1) степень деформации; 2) температура рекристаллизационного отжига; 3) размер зерна перед деформацией; 4) длительность процесса отжига.

1.3.16. Укажите необходимое условие для того, чтобы сплав подвергнуть рекристаллизационному отжигу.

**Ответ:** 1) наличие у сплава фазовых превращений в твердом состоянии; 2) изменение растворимости компонентов сплава в твердом состоянии; 3) изменение растворимости компонентов сплава в твердом состоянии с изменением температуры; 4) наличие предварительной холодной пластической деформации сплава.

1.3.17. Какова цель рекристаллизационного отжига как метода термической обработки стали?

**Ответ:** 1) повышение твердости вследствие приобретения поликристаллическими зернами более крупных размеров и вытянутой формы; 2) устранение наклепа, возникающего вследствие холодной пластической деформации поверхностных слоев сплава после обработки давлением, получение исходной формы и размера зерна; 3) эвтектоидные фазовые изменения состава стали – перекристаллизация из одного твердого состояния сплава в другое.

1.3.18. Какова цель отжига 2-го рода как метода термической обработки стали?

**Ответ:** 1) повышение твердости стали вследствие приобретения поликристаллическими зернами более крупных размеров и вытянутой формы; 2) повышение пластичности стали вследствие фазовых превращений (перекристаллизации) и достижения равновесного состояния структуры сплава; 3) устранение возникших неблагоприятных последствий отжига 1-го рода.

1.3.19. Какова цель полного отжига стали?

**Ответ:** 1) повышение однородности структуры, физических и химических свойств; 2) повышение твердости и прочности сплава вследствие превращения мелкозернистой аустенитной структуры сплава в крупнозернистую ферритно-перлитную; 3) повышение вязкости и пластичности сплава вследствие превращения крупнозернистой ферритно-перлитной структуры в мелкозернистую аустенитную.

1.3.20. Каковы преимущества изотермического отжига стали по сравнению с полным?

**Ответ:** 1) преимуществ нет, полный отжиг обеспечивает получение лучших свойств стали; 2) изотермический отжиг позволяет снизить продолжительность процесса, получить однородный по структуре и свойствам материал; 3) изотермический отжиг позволяет, хотя и за более продолжительное время, получить более твердую и прочную сталь.

1.3.21. Какие явления в металле сопутствуют наклепу **?**

**Ответ:** 1) измельчение блоков и зерен; 2) движение и рост плотности дислокации; 3) возникновение напряжений второго и третьего рода; 4) упрочнение металла и понижение его пластичности; 5) образование текстуры.

1.3.22. Какие процессы происходят при нагреве наклепанного металла, когда температура нагрева выше температуры рекристаллизации?

**Ответ:** 1) возврат или отдых; 2) рекристаллизация;
3) рекристаллизация обработки, собирательная рекристаллизация;

4) восстановление исходных структур и свойств металла.

1.3.23. В чем состоит различие между полиморфизмом и рекристаллизацией?

**Ответ:** 1) в температуре протекания этих процессов; 2) в механизме образования новой кристаллической структуры; 3) в типах решетки, образующихся при этих процессах.

1.3.24. Каковы особенности нормализации как метода термической обработки стали?

**Ответ:** 1) процесс охлаждения проводится на воздухе, поэтому продолжительность термообработки меньше, чем при полном отжиге;
2) процесс охлаждения проводится в печи, поэтому продолжительность процесса термообработки больше, чем при закалке; 3) нормализация обеспечивает более высокую пластичность по сравнению со сталью, подвергнутой полному отжигу.

1.3.25. Какова цель нормализации?

**Ответ:** 1) устранение внутренних напряжений в стали, возникших в результате закалки; 2) исправление структуры перегретой стали, измельчение зерна, подготовка к закалке; 3) повышение прочности и твердости стали.

1.3.26. Отливки из малоуглеродистой стали в литом состоянии характеризуются наличием ликвации, что ухудшает механические свойства отливок. Каким способом можно существенно снизить эффект ликвации в отливках.

**Ответ:** подвергнуть отливки 1) полному отжигу; 2) отжигу;

3) рекристаллизационному отжигу; 4) диффузионному отжигу.

1.3.27. Рекомендуйте режим нормализации стали с 0,4 % С.

**Ответ:** 1) 700 ° С - охлаждение в печи; 2) 820 ° С - охлаждение на воздухе; 3) 900 ° С - охлаждение на воздухе.

1.3.28. Для каких сталей отжиг можно заменить более дешевой обработкой — нормализацией?

**Ответ:** 1) для малоуглеродистых; 2) для среднеуглеродистых; 3) для высокоуглеродистых.

1.3.29. Какова цель закалки стали?

**Ответ:** 1) повышение мягкости и пластичности стали; 2) измельчение зерна, устранение сетки вторичного цементита в заэвтектоидной стали; 3) повышение твердости и прочности стали.

1.3.30. Из каких основных операций состоит процесс закалки стали?

**Ответ:** 1) нагрев до температуры, применяемой при полном отжиге, выдержка в течение необходимого времени и охлаждение в печи;
2) нагрев до температуры, применяемой при изотермическом отжиге; выдержка в течение необходимого времени и охлаждение на воздухе;
3) нагрев до температуры, на 30-50 градусов превышающей линию температур аустенитного превращения; выдержка в течение необходимого времени и охлаждение с высокой скоростью в воде, масле или других охладителях.

1.3.31.Какие нежелательные свойства приобретает сталь после закалки?

**Ответ:** 1) повышенные вязкость и пластичность; 2) повышенную хрупкость вследствие внутренних механических напряжений; 3) наклеп поверхностных слоев.

1.3.32.Каково содержание углерода в мартенсите стали с 0,5 % углерода?

**Ответ:** 1) 0,2 %; 2) 0,5 %; 3) 0,3 %; 4) 0,8 %.

1.3.33. На рис. 1.3 представлены микроструктуры стали с содержанием С 0,45 % после закалки и отпуска при различных температурах Какие компоненты стали присутствуют при всех указанных режимах термообработки?

**Ответ:** 1) мартенсит; 2) мартенсит и троостит; 3) мартенсит и остаточный аустенит.

1.3.34. Какой сплав называется мартенситом?

**Ответ:** 1) твердый раствор углерода в γ-железе; 2) твердый раствор углерода в α-железе ; 3) пересыщенный твердый раствор углерода в α-железе.

1.3.35. Содержится ли в структуре закаленной доэвтектоидной стали с 0,5 % С остаточный аустенит? Почему?

**Ответ:** 1) содержится; 2) не содержится, так как критическая температура закалки этой стали выше 20 ° С.

1.3.36. На какие фазы разлагается мартенсит при отпуске?

**Ответ:** 1) на феррит; 2) на феррит и аустенит; 3) на цементит; 4) на феррит и цементит.

1.3.37. На рис.1.4 показана структура стали с содержанием углерода 1,2 % после полной закалки. Из чего состоит эта структура?

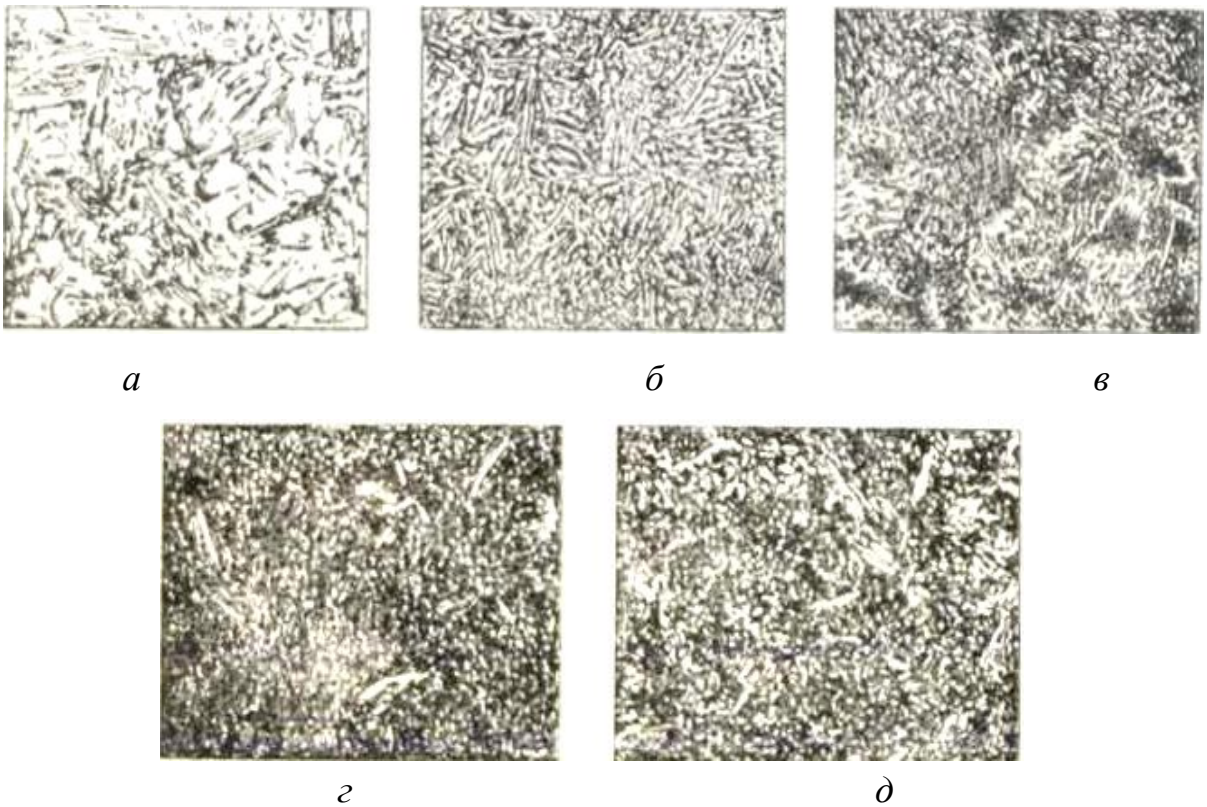



Рис. 1.3. К задаче 1.3.33. Микроструктуры стали с 0,45 % С после различных режимов термообработки:
*а* — закалка от 900 ° С в воде**;** *б* — закалка от 900 ° С в воде + нагрев 1 ч при 100 ° С; *в* —закалка от 900 ° С в воде + нагрев 1 ч при 200 ° С**;** *г* — закалка от 900 ° С в воде + нагрев 1 ч при 350 ° С*;* *д* — закалка от 900 ° С в воде + нагрев 1 ч при 350 ° С

**Ответ:** 1) из мартенсита; 2) из мартенсита и троостита; 3) из мартенсита и остаточного аустенита.

1.3.38. Какова структура стали с 1,1 % С после полной закалки?

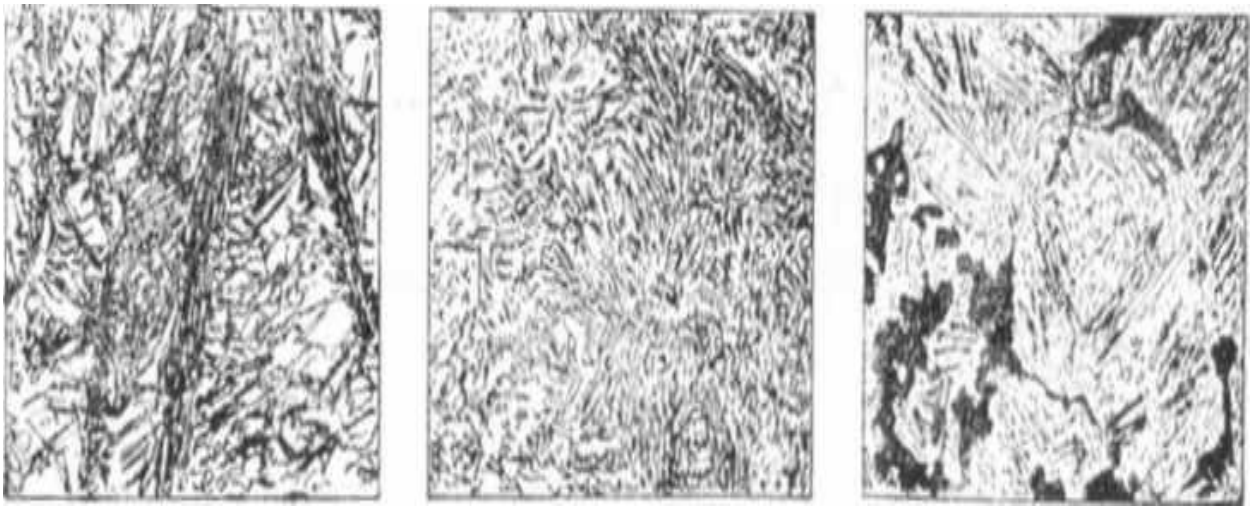
**Ответ:** 1) аустенит; 2) мартенсит; 3) троостит; 4) бейнит.

1.3.39. Каков основной тип структуры закаленной стали?

**Ответ:** 1) троостит; 2) мартенсит; 3) сорбит.

1.3.40. Какие технологические преимущества имеют детали из легированных сталей по сравнению с деталями из углеродистых сталей при закалке?

**Ответ:** 1) эти детали можно закаливать в масле; 2) меньше брака после закалки; 3) менее подвержены росту зерна аустенита при нагреве.



*а* *б* *в*

Рис. 1.4. К задаче 1.3.37. Микроструктуры сталей после различных режимов закалки: *а* —сталь с 1,2 % С при температуре 1000 ° С в воде; *б* — сталь с 0,86 % С при температуре 860 ° С в воде; *в* — сталь с 0,6 % С при температуре 900 ° С в масле

1.3.41. В чем технологические недостатки стали 40 для изготовления ответственных деталей?

**Ответ:** 1) заготовки плохо обрабатываются резанием; 2) детали требуют охлаждения в воде при закалке; 3) детали имеют

недостаточную конструктивную прочность (надежность) из-за низкой прокаливаемости стали.

1.3.42. Как влияет перегрев аустенита на прокаливаемость стали?

**Ответ:** 1) прокаливаемость увеличивается; 2) прокаливаемость уменьшается; 3) перегрев не оказывает влияния на прокаливаемость.

1.3.43. Можно ли в целях увеличения прокаливаемости рекомендовать высокие температуры нагрева для закалки? Почему?

**Ответ:** 1) можно — улучшаются свойства стали; 2) нельзя — возможно ухудшение свойств стали из-за увеличения размера зерна после закалки.

1.3.44. При каких температурах отпуска заканчивается распад мартенсита в углеродистых сталях?

**Ответ:** 1) при 200—300 ° С; 2) при 400—450 ° С; 3) при 600—650 ° С; 4) при 100—200 ° С.

1.3.45. Чем объясняется понижение твердости закаленной стали по мере повышения температуры отпуска выше 450 ° С?

**Ответ:** 1) снижением внутренних напряжений; 2) укрупнением частиц цементита и мозаичной структуры твердого раствора;
3) выделением углерода из кристаллической решетки мартенсита.

1.3.46. По диаграмме состояния Fe—$Fe_3C$ (рис. 1.1) установите, какова оптимальная температура закалки стали с содержанием углерода 0,4 %.

**Ответ:** температура закалки: 1) 800 °С; 2) 850 °С; 3) 900 °С; 4) 750 °С.

1.3.47. Какова оптимальная температура закалки стали с 1,2% С?

**Ответ:** 1) 730 °С; 2) 770 °С; 3) 680 °С; 4) 900 °С.

1.3.48. Какие недостатки имеет инструмент, изготовленный из стали с содержанием углерода 1,2 % после закалки от температуры 900 ° С?

**Ответ:** инструмент 1) недостаточно тверд, быстро изнашивается;
2) слишком тверд и хрупок; 3) недостаточно износостоек и пластичен.

1.3.49. В чем различие сорбита и троостита отпуска?

**Ответ:** 1) в составе фаз; 2) в степени дисперсности феррита и цементита; 3) в форме включений феррита и цементита.

1.3.50. Чем отличаются этапы отпуска среднеуглеродистой стали от высокоуглеродистой?

**Ответ:** 1) отсутствует этап превращения остаточного аустенита в мартенсит отпуска; 2) распад мартенсита происходит с меньшей скоростью; 3) меньше углерода в мартенсите; 4) образуются карбиды другого состава.

1.3.51. Какова цель отпуска стали?

**Ответ:** 1) устранение внутренних напряжений, возникших в сплаве после закалки, снижение твердости и повышение вязкости;
2) измельчение зерна, устранение сетки вторичного цементита в заэвтектоидной стали; 3) снижение плотности стали.

1.3.52. Из каких операций состоит технологический процесс отпуска стали?

**Ответ:** 1) нагрев стали до температуры плавления; выдержка в течение необходимого времени; охлаждение вместе с печью; 2) нагрев закаленной стали до температуры ниже первой критической;3) нагрев стали до температуры выше точки аустенитного превращения, выдержка в течение необходимого времени, охлаждение на воздухе.

1.3.53. От каких факторов зависят свойства отпущенной углеродистой стали?

**Ответ:** 1) от температуры, времени отпуска и скорости охлаждения;
2) от температуры, времени отпуска; 3) от температуры отпуска и скорости охлаждения; 4) от температуры отпуска.

1.3.54. Для каких сталей целесообразно проведение обработки холодом?

**Ответ:** 1) для низкоуглеродистых; 2) для среднеуглеродистых; 3) для высокоуглеродистых; 4) для легированных.

1.3.55. В чем заключается сущность термической обработки, именуемой улучшением?

**Ответ:** улучшение заключается 1) в закалке стали; 2) в закалке и отпуске стали; 3) в закалке и высоком отпуске стали; 4) в высоком отпуске стали.

1.3.56. Как влияет легирование на процесс отпуска стали?

**Ответ:** 1) замедляется распад мартенсита; 2) уменьшается скорость коагуляции карбидов; 3) повышается стойкость против отпуска.

1.3.57. Какие преимущества имеют легированные стали в состоянии низкого отпуска?

**Ответ**: эти стали имеют 1) более однородный состав мартенсита отпуска; 2) меньшие внутренние напряжения; 3) большую хрупкую прочность; 4) большую твердость.

1.3.58. Применяется ли отпуск как самостоятельная операция термической обработки?

**Ответ**: 1) да; 2) нет; 3) только для легированных сталей.

1.3.59. Какова основная цель проведения отпуска?

**Ответ:** 1) снижение закалочных напряжений; 2) уменьшение твердости после закалки; 3) уменьшение внутренних напряжений и повышение вязкости термически обработанной детали.

1.3.60. Как осуществляется охлаждение углеродистой стали при отпуске?

**Ответ:** 1) вместе с печью; 2) на воздухе; 3) в воде.

1.3.61. Нагруженные конструкционные детали изготовляют из среднеуглеродистой стали. Какой вид термообработки для таких деталей можно рекомендовать и какая при этом образуется структура?

**Ответ:** 1) закалку, образуется мартенсит; 2) закалку и низкотемпературный отпуск, образуется мартенсит отпуска;
3) нормализацию, образуется сорбит закалки; 4) закалку и высокий отпуск, образуется сорбит отпуска.

1.3.62. Что отличает структуру сорбита отпуска и структуру зернистого перлита?

**Ответ:** 1) фазовый состав; 2) степень дисперсности частиц цементита; 3) форма цементитных частиц; 4) различия нет.

1.3.63. Чем отличается структура сорбита отпуска от структуры сорбита, полученного при распаде аустенита?

**Ответ:** 1) степенью дисперсности цементитных частиц; 2) составом фаз; 3) формой цементитных частиц; 4) ничем не отличается.

1.3.64. Чем обусловлены более высокие механические свойства стали со структурой сорбита отпуска по сравнению со сталью, имеющей структуру сорбита закалки?

**Ответ:** 1) округлой формой цементитных частиц; 2) степенью дисперсности цементитных частиц; 3) меньшими внутренними напряжениями; 4) составом цементитных частиц и феррита.

1.3.65. Каким методом нагрева обычно пользуются при поверхностной закалке деталей приборов? Почему?

**Ответ:** 1) машинными генераторами токов высокой частоты (т. в. ч.)— достигается большая скорость нагрева; 2) кислородно-ацетиленовыми горелками — дешевы и доступны; 3) ламповыми генераторами т. в. ч. —достигается прогрев деталей на незначительную глубину.

1.3.66. Чем объясняется необходимость в более высокой температуре нагрева т. в. ч. для закалки по сравнению с обычной закалкой?

**Ответ:** 1) высокой скоростью нагрева при т. в. ч., что приводит к превращению перлита в аустенит при более высоких температурах перегрева; 2) тем, что при нагреве т. в. ч. превращение перлита в аустенит происходит при более высоких температурах; 3) различным механизмом превращения перлита в аустенит при нагреве т. в. ч.

1.3.67. Что влияет главным образом на толщину закаленного слоя при нагреве т. в. ч.?

**Ответ:** 1) состав стали; 2) частота тока; 3) структура стали;

4) электросопротивление стали.

1.3.68. Какова цель химико-термической обработки стали?

**Ответ:** 1) повышение пластичности стали; 2) повышение блеска поверхности и улучшение внешнего вида детали или заготовки;

3) изменение состава, структуры и свойств поверхностного слоя стали – получение детали с твердым поверхностным слоем и мягкой сердцевиной.

1.3.69. Какие виды химико-термической обработки стали вам известны?

**Ответ:** 1) обработка поваренной солью, фосфорной кислотой, азотнокислым серебром при повышенной температуре; 2) цементация, азотирование, нитроцементация, цианирование, борирование, диффузионная металлизация; 3) обработка в атмосфере водорода или инертных газов при повышенной температуре.

1.3.70. Какова цель азотирования как метода химико-термической обработки стали?

**Ответ:** 1) повышение пластичности поверхности стали; 2) повышение твердости, износоустойчивости детали или устойчивости против коррозии; 3) измельчение зерна всего объема материала детали или заготовки.

1.3.71. Какова цель борирования как метода химико-термической обработки стали?

**Ответ:** 1) повышение износоустойчивости детали; 2) измельчение зерна всего объема материала детали или заготовки; 3) повышение отражательной способности поверхности.

1.3.72. Какова цель диффузионной металлизации как метода химико-термической обработки стали?

**Ответ:** 1) повышение отражательной способности поверхности;

2) снижение твердости и хрупкости; 3) повышение твердости, коррозионной стойкости, жаростойкости и износостойкости.

1.3.73. От каких факторов зависят свойства отпущенной углеродистой стали?

**Ответ:** 1) от температуры, времени отпуска и скорости охлаждения; 2) от температуры, времени отпуска; 3) от температуры отпуска и скорости охлаждения; 4) от температуры отпуска.

1.3.74. Какие процессы происходят при химико-термической обработке стали?

**Ответ:** 1) диффузия; 2) диссоциация; 3) абсорбция; 4) распад химических соединений.

1.3.75. Чем определяется интенсивность процесса диффузионного насыщения при химико-термической обработке?

**Ответ:** 1) температурой, при которой проводится процесс; 2) теплотой активации процесса диффузии; 3) скоростью нагрева.

1.3.76. Проводится цементация и диффузионное хромирование стали. В каком случае процесс протекает более интенсивно? Чем это можно объяснить?

1.3.77. Что представляет собой процесс цианирования?

**Ответ:** 1) насыщение поверхностных слоев стальной детали цианидами металлов; 2) насыщение поверхностных слоев стальной детали азотом; 3) насыщение поверхностных слоев стальной детали азотом и углеродом.

1.3.78. Каким способом помимо поверхностной закалки и ХТО можно повысить усталостную прочность деталей машин?

**Ответ:** I) увеличением чистоты поверхности деталей; 2) дробеструйным наклепом; 3) закалкой от более высокой температуры.

## 1.4. Выбор конструкционного материала для конкретного назначения

При конструировании выбор материала является одним из важнейших вопросов. При выборе материала учитывают следующие основные требования: материал должен обеспечить необходимую прочность и надежность детали в работе (конструктивную прочность), обладать оптимальными технологическими свойствами и обеспечивать минимальную стоимость конструкции [1-5].

Основой для правильного выбора материала являются показатели, определяющие прочность и технологические свойства материала, условия работы детали, влияющие на поведение материала в работе. Сведения о материалах обычно берут из справочников, где приводятся механические характеристики материала, которые получают при испытании стандартных образцов в стандартных условиях. Используя эти данные, их необходимо дополнять знаниями теоретического материаловедения для учета конкретных реальных условий работы детали.

На свойства стали значительное влияние оказывают постоянные (нежелательные) примеси (сера, фосфор, газы), а также технологические добавки (кремний, марганец и др.). Примеси могут попадать в сплав из природных соединений и руд, а также при переработке металлолома. Основным элементом сплава, по отношению к которому все остальные элементы – примеси, является тот, чья атомная решетка определяет кристаллографическое строение всего сплава. Пока содержание элементов в стали таково, что кристаллографическое строение сплава определяется решеткой железа, сплав называется легированной сталью. Когда содержание элементов достигает таких значений, что строение сплава определяется решеткой добавочных элементов, а не железа, то говорят уже о сплаве (титановом, никелевом и др.).

Если сталь имеет в своем составе железо, углерод и некоторое количество постоянных примесей (S, P, Si, Mn, газы), то такую сталь называют ***углеродистой***. Если в процессе выплавки углеродистой стали к ней добавляют легирующие элементы (Cr, Ni, W, Mo и др.), а также Mn и Si в повышенном количестве (более 0,8 – 1,0 %), то такую сталь называют ***легированной***.

*Углерод* оказывает основное влияние на свойства углеродистой стали, находится в ее составе главным образом в связанном состоянии в виде цементита. В свободном состоянии в виде графита содержится в чугунах. С увеличением содержания углерода в стали повышаются ее твердость и прочность, уменьшаются пластичность и вязкость.

*Сера* является нежелательной примесью, образует с железом сульфид железа FeS, который находится в стали в виде эвтектики Fe – FeS с температурой плавления 985 °С.

При нагреве стали до температуры 1000 – 1200 °С для горячей обработки давлением эвтектика плавится, сера кристаллизуется на границах зерен, что приводит к нарушению связи между зернами, повышению хрупкости, разрушению при деформации вследствие образования внутренних трещин и надрывов. Это явление называют *красноломкостью*. Содержание серы в стали не должно превышать 0,06 %.

*Фосфор* растворяется в $\alpha$- и $\gamma$-Fe, искажает кристаллическую решетку и ухудшает пластичность стали. Фосфор вызывает явление *хладноломкости*, является нежелательной примесью, содержание которой в сталях должно быть менее 0,08 %.

*Азот, кислород* присутствуют в сплавах в составе оксидов, нитридов – хрупких неметаллических соединений (включений), которые создают дефекты кристаллической структуры. Они являются концентраторами напряжений и могут понизить механические свойства (прочность, пластичность).

*Водород* поглощается сталью в атомарном состоянии. При охлаждении сплава растворимость водорода снижается, он накапливается в микропорах под высоким давлением. Это может привести к образованию в материале внутренних надрывов (флокенов).

*Марганец и кремний* – полезные примеси. Их добавляют в сталь при выплавке. Марганец существенно снижает красноломкость стали, образует пластичный MnS с температурой плавления 1620 °С. Марганец увеличивает твердость, прочность и износостойкость стали, при его содержании более 1,5 % снижается пластичность стали.

Кремний связывает закись железа (FeO) с образованием силикатов ($FeO \cdot SiO_2$), которые удаляются вместе со шлаками. Кроме того, кремний понижает склонность стали к хладноломкости, способствует получению более однородной структуры, положительно сказывается на упругих характеристиках. Кремний способствует изменению магнитных свойств стали, а при содержании его в количестве 15 – 20 % придает материалу кислотоупорность. Обычное содержание кремния в углеродистой стали – не более 0,4 %, марганца – 0,8 %.

Стали ***классифицируют*** (рис.1.5) по химическому составу, качеству и назначению. По ***назначению*** стали подразделяются на конструкционные, инструментальные, стали с особыми физико-химическими свойствами. По ***химическому составу*** различают стали углеродистые и легированные.

***Конструкционные*** стали применяют для изготовления деталей машин и конструкций; ***инструментальные*** – для режущих, измерительных инструментов, штампов и т.д. К сталям и сплавам ***с особыми свойствами*** относят жаропрочные, коррозионно-стойкие, магнитные и др. Они нашли широкое применение в приборостроении, в том числе в медицинской технике.

По ***качеству*** различают стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные. При

этом учитываются способ выплавки и содержание серы и фосфора. Стали *обыкновенного* качества имеют повышенное содержание нежелательных примесей – до 0,06 % серы и до 0,08 % фосфора, их механические свойства ниже, чем у сталей других групп. *Качественные* стали содержат серу и фосфор в концентрации менее 0,035 % каждого элемента. *Высококачественные* стали, выплавляемые в электропечах, содержат менее 0,025 % и серы, и фосфора. *Особо высококачественные* стали, подвергнутые электрошлаковому переплаву с вакуумированием, содержат серу и фосфор в концентрации, не превышающей 0,015 %.

.

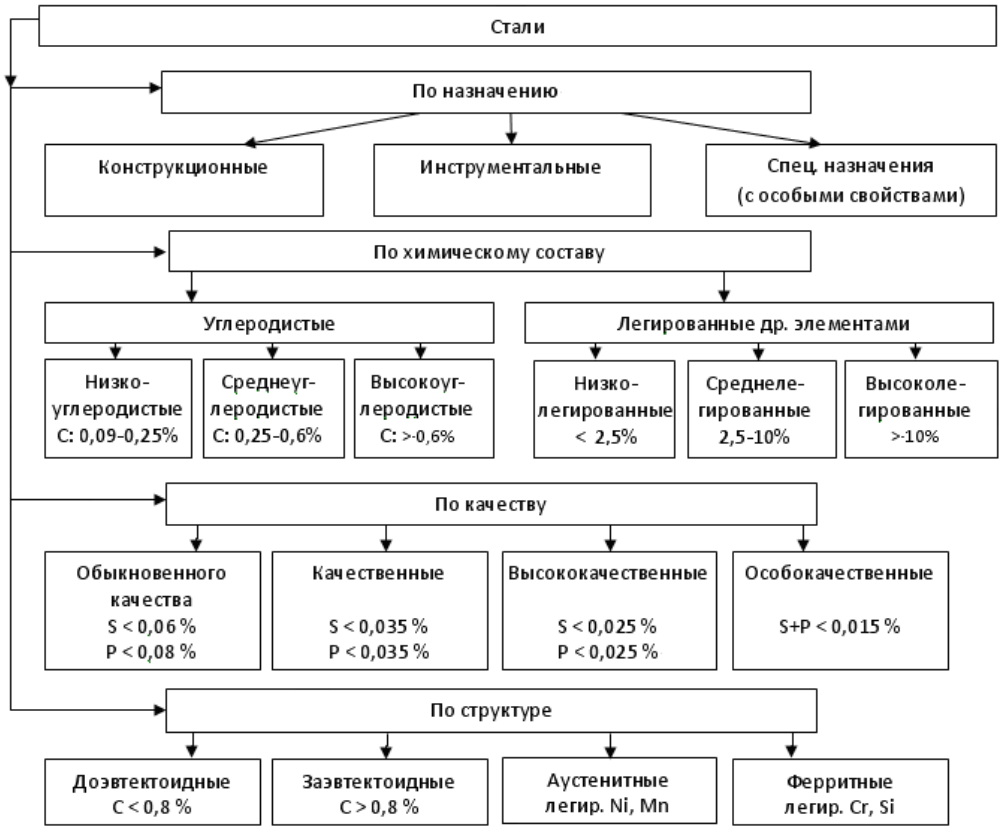



Рис. 1.5. Классификация сталей

Наиболее опасным является хрупкое разрушение деталей механизмов. Хрупкая прочность материала косвенно выражается через температурный порог хладноломкости, однако в справочниках этих данных о материалах обычно не приводится. Поэтому при

конструировании необходимо учитывать, какие факторы влияют на температурный порог хладноломкости материалов

Основными из многочисленных факторов являются: состав и строение материала, характер нагружения, условия работы, конструкция детали (наличие и виды концентраторов напряжения) [5]. Рассмотрим некоторые соображения, которые следует иметь в виду при выборе материала, обеспечивающего необходимую конструктивную прочность детали конструкций.

*Строение материала*. Металлы с решеткой гранецентрированного куба (ГЦК) имеют низкий порог хладноломкости и поэтому более успешно могут работать в условиях, когда хрупкое разрушение наиболее вероятно (низкие температуры, динамическое действие нагрузок). Металлы с решетками объемно центрированного куба (ОЦК) и гексагональной плотно упакованной (ГПУ) имеют более высокий порог хладноломкости. Так как большинство деталей конструкций изготовляют из углеродистой и легированной сталей, имеющих решетку ОЦК, то необходимо знать, как можно понизить температурный порог хладноломкости этих материалов.

С уменьшением величины зерна порог хладноломкости понижается. Установлено, что увеличение содержания углерода в стали на каждую 0,1 % повышает порог хладноломкости на 20—30 ° С.

Элементы Ti, Nb, V при содержании в стали до 0,1 % измельчают зерно аустенита и содействуют понижению порога хладноломкости; увеличение содержания Mo до 0,4—0,5 % понижает порог хладноломкости на 80—100 ° С; при содержании Ni в стали около 1 % понижается порог хладноломкости на 60—80 ° С; повышение содержания Ni до 3—4 % вызывает менее интенсивное понижение порога хладноломкости. Повышенное количество Ni целесообразно для увеличения прокаливаемости, что повышает конструктивную прочность в деталях крупных сечений. Содержание Cr до 1 % не влияет

на порог хладноломкости, но Cr, повышая прокаливаемость. увеличивает конструктивную прочность. Введение Мп содействует росту зерна аустенита и поэтому, если не принять меры противодействия, может повыситься температурный порог хладноломкости. В сочетании с элементами, предотвращающими рост аустенитного зерна, Мп в количестве до 1 % не влияет на порог хладноломкости; Si до 0,4—0,7 % незначительно (на 20—30 ° С) понижает порог хладноломкости; при большем содержании Si порог хладноломкости повышается. Стали, подвергаемые среднему отпуску, могут иметь 1 —1,8 % Si.

Однако не следует стремиться к использованию чрезмерно легированных сталей, что может привести к понижению хрупкой прочности. Степень легирования должна быть такой, чтобы обеспечить достижение полной прокаливаемости стали по сечению детали.

*Учет прокаливаемости при выборе стали*. Наивысшими прочностными свойствами обладают детали, имеющие по всему сечению после закалки мартенситную структуру.

Для деталей, работающих в условиях циклического действия нагрузок, следует учесть, что предел выносливости существенно зависит от микроструктуры. Усталостные характеристики значительно снижаются при увеличении в структуре закаленной стали остаточного аустенита выше 10 %. Усталостные характеристики снижаются с уменьшением чистоты поверхности и повышаются при наличии в поверхностных слоях детали остаточных напряжений сжатия, создаваемых наклепом, закалкой и нагревом т. в. ч., химико-термической обработкой.

Часто детали машин и механизмы выходят из строя не из-за их полного разрушения или деформации, а, например, вследствие повышенного износа или местной коррозии. Повышение износостойкости трущихся стальных деталей достигается различными видами химико-термической обработки, благодаря чему достигается

высокая твердость поверхностного слоя деталей. Однако такие виды упрочняющей обработки малопроизводительны и часто связаны с технологическими трудностями. Поэтому в ряде случаев цементацию и закалку деталей из малоуглеродистых сталей заменяют закалкой и низким отпуском деталей из легированных среднеуглеродистых сталей.

Необходимые износостойкость и прочность достигаются структурой мартенсита отпуска и более однородным по углероду составом мартенсита отпуска у легированных сталей.

***Углеродистые стали*** содержат железо, углерод, вредные примеси и технологические добавки. Вредное влияние фосфора проявляется при работе стальных деталей, сера же главным образом затрудняет горячую обработку давлением. На работу деталей она практически не влияет, так как детали из углеродистых сталей при высоких температурах не работают. Отметим, что в конструкционных сталях содержание углерода не превышает 0,65 %, так как при большем содержании углерода детали становятся хрупкими. В инструментальных сталях, наоборот, содержание углерода должно быть выше 0,7 %, так как инструмент в первую очередь должен быть твердым (кроме штампов, деформирующих металл в горячем состоянии).

***Легированные стали.*** Одними из основных задач, которые необходимо решать при конструировании, являются уменьшение габаритов и металлоемкости машин и оборудования, снижение их стоимости. Большое значение имеет применение низколегированных сталей [4,5]. Добавка к стали небольшого количества (до 1—2 %) недорогих легирующих элементов (кремния, марганца и некоторых других) незначительно удорожает сталь, но позволяет уменьшить размеры, увеличить долговечность и надежность деталей машин и инструмента, так как у

легированных сталей повышенная прочность, что в конечном итоге снижает расход металла и дает экономический эффект.

Свойства сталей зависят от их внутреннего строения, а также от влияния легирующих элементов, которое было частично рассмотрено выше. Свойства легированных сталей отличаются от свойств углеродистых при одном и том же содержании углерода: легирующие элементы оказывают влияние на положение критических точек и линий диаграммы железо—цементит. При небольшом содержании легирующих элементов (2—5 %) критические линии диаграммы сдвинуты незначительно, поэтому структура низколегированных сталей, а значит, и их свойства в отожженном состоянии мало отличаются от свойств углеродистой стали.

Все преимущества низколегированных сталей проявляются только после закалки, поэтому эти стали следует применять только для таких деталей, которые по условиям работы должны подвергаться упрочняющей термической обработке. При большом содержании легирующих элементов (до 10—15 %) критические точки $A_1$ и $A_3$ значительно повышаются или понижаются, структура таких сталей при комнатной температуре может получиться однофазной — ферритной или аустенитной, в ферритных сталях при повышенном содержании углерода наряду с ферритом могут быть карбиды. Ферритные и аустенитные стали, как правило, обладают какими-либо ярко выраженными физико-химическими свойствами (нержавеющие, немагнитные и др.). Поскольку они однофазны, их нельзя упрочнять закалкой, они обычно упрочняются пластической деформацией (наклепом) [4,5].

Процессы, протекающие при термической обработке легированных сталей, те же, что и у углеродистых, но при назначении режима термической обработки необходимо учитывать

ряд факторов. Легированные стали можно закаливать в масле, расплавленных солях и т.п.; у них меньше критическая скорость закалки (так как почти все легирующие элементы сдвигают кривые изотермического распада аустенита вправо). Это является их большим достоинством, так как при такой же прочности получается повышенная вязкость. Следует помнить, что чем меньше критическая скорость закалки, тем больше прокаливаемость стали, а при одной и той же скорости охлаждения, например, в масле будет больше глубина закаленного слоя. Поэтому у легированных сталей в большом сечении можно получить прочную структуру.

Почти все легирующие элементы понижают мартенситную точку, поэтому после закалки у них получается больше остаточного аустенита, чем содержится в углеродистых. Легированные инструментальные стали и постоянные магниты целесообразно после закалки обрабатывать холодом.

Легирующие элементы оказывают влияние на отпускную хрупкость 1-го и 2-го рода. Для предупреждения отпускной хрупкости 2-го рода стали с вольфрамом или молибденом применяют только для крупных деталей или для деталей, которые во время работы могут периодически нагреваться.

Легирование создает и дугие преимущества легированных сталей перед углеродистыми. Основная цель легирования конструкционных сталей — увеличение их прокаливаемости. Сталь должна обеспечить прокаливаемость в рабочем сечении детали, т.е. в том сечении, на которое действуют нагрузки. Обычно чем больше действующие нагрузки и чем больше сечение детали, тем более легирована сталь.

Как правило, стали, содержащие до 0,25 % углерода, подвергают цементации или нитроцементации с последующей закалкой и низким отпуском. Их так и называют — цементируемые.

Их используют для деталей, которые работают с ударными нагрузками и подвергаются истиранию. Детали из сталей, содержащих 0,35—0,5 % углерода, под действием больших нагрузок, подвергают улучшению, т.е. закалке и высокому отпуску. Такие стали называются улучшаемыми. Если детали подвергаются также истиранию, то проводится поверхностное упрочнение (чаще всего закалка токами высокой частоты). Стали, содержащие 0,55—0,65 % углерода, идут обычно на изготовление пружин и рессор. Их подвергают закалке и среднему отпуску или изотермической закалке.

Основное достоинство ***легированных инструментальных сталей*** — возможность их закалки в масле или расплавленных солях, так как при этом возникают меньшие напряжения и коробления, меньшая хрупкость. Выбор инструментальных сталей делается с учетом термической обработки и в соответствии с областью их применения.

Инструмент из низколегированных сталей не может работать при большой скорости резания, так как при нагреве свыше 200—250 °С резко падает твердость. Сохраняют твердость при нагреве до 500—600 °С только быстрорежущие стали.

***Быстрорежущие стали*** маркируют по основному легирующему элементу — вольфраму. Например, в марке Р18 цифра показывает его процентное содержание. Процесс термической обработки быстрорежущей стали имеет ряд особенностей. Если правильно провести термическую обработку, то во время работы твердость инструмента начинает падать при температурах значительно ниже 600 °С. После высокого отпуска твердость быстрорежущей стали повышается, так как в результате отпуска остаточный аустенит переходит в мартенсит [5].

При выборе стали для режущих инструментов руководствуются следующими соображениями. Инструмент, который при работе не подвергается ударным нагрузкам, можно изготовить из стали с повышенным содержанием углерода. Такие стали после закалки и низкого отпуска имеют максимальную твердость и износостойкость. Если инструмент в процессе работы подвергается действию ударных нагрузок, то выбирают сталь с пониженным содержанием углерода (0,6—0,7 %).

После закалки необходимо несколько повысить температуру отпуска. Очень часто для изготовления инструмента применяется быстрорежущая сталь. Однако при этом необходимо учитывать, что эти стали могут иметь значительную карбидную неоднородность, если заготовки из них не подвергнуты достаточной степени деформации. Карбидная неоднородность повышается также с увеличением содержания углерода и вольфрама в стали. Чем выше карбидная неоднородность, тем ниже прочность инструмента. Меньшей карбидной неоднородностью обладают инструменты, изготовленные из заготовок стали Р18 малых сечений (сталь Р18 имеет высокую стоимость).

Важным технологическим свойством быстрорежущих сталей является шлифуемость, которая сильно ухудшена в сталях, содержащих повышенное количество ванадия (сталь Р9). Более благоприятными эксплуатационными и технологическими свойствами обладает быстрорежущая сталь Р12, Р6М5.

Для изготовления рабочих органов (пуансонов) вырубных штампов небольшого сечения рекомендуется использование сталей с несквозной прокаливаемостью, что обеспечивает повышенную прочность штампа в работе. Пуансоны и матрицы крупных и сложных по форме штампов холодной штамповки изготовляют из высокохромистых сталей типа Х12, которые имеют высокую износостойкость и прокаливаемость. После закалки эти стали имеют повышенное количество остаточного

аустенита, что уменьшает деформацию штампа при закалке и необходимость последующей механической доводки размеров штампа.

Стали для штампов горячего деформирования металлов должны наряду с износостойкостью и прочностью обладать достаточной жаростойкостью. Молотовые штампы, контакт которых с обрабатываемым металлом кратковременный, могут изготовляться из среднеуглеродистых хромоникелевых сталей, дополнительно легированных молибденом или вольфрамом (сталь 5ХНВ). После закалки и отпуска при температуре примерно 500 °С эти стали имеют высокую твердость [4,5].

Для высадочных штампов необходимы стали более высокой теплостойкости, что достигается легированием вольфрамом. Однако среднеуглеродистые стали с повышенным (примерно 8 %) содержанием вольфрама дороги. Поэтому следует выбирать стали с содержанием вольфрама примерно 2 % при дополнительном легировании хромом и кремнием. Эти стали в меньшей степени обладают недостатками, присущими сталям типа 3Х2В8Ф. В последнее время рекомендуются стали 4Х5В2ФС, 4ХВМФ, обеспечивающие повышенную стойкость штампов. Для пресс-форм, предназначенных для литья под давлением, используют стали, аналогичные сталям для штампов горячей штамповки.

При выборе сталей для изготовления измерительного инструмента необходимо иметь в виду, что для таких деталей не допускается изменение размеров с течением времени. Изменение размеров, кроме износа, может происходить из-за перераспределения внутренних напряжений, частичного превращения остаточного аустенита или мартенсита. Исходя из этих соображений, необходимо выбрать марку стали и назначить режим термообработки, чтобы по возможности устранить причины, которые могут вызвать изменение размеров инструмента.

Если, например, требуется обосновать выбор марки стали для измерительного инструмента (калибра), то следует отметить, что калибр непосредственно соприкасается с поверхностью деталей, поэтому он должен быть твердым и износоустойчивым. Инструмент должен сохранять точный профиль и размеры после термической обработки, поэтому сталь должна мало деформироваться при закалке. Кроме того, инструмент должен длительное время сохранять свои размеры, значит, в стали с течением времени не должно происходить естественного старения. Этим требованиям удовлетворяет сталь ХГ, содержащая примерно по 1 % углерода, хрома и марганца. Она мало деформируется при закалке и длительное время сохраняет свои размеры после закалки и низкого отпуска.

Свойства ***нержавеющих сталей*** зависят от содержания углерода и структуры. Однофазные сплавы значительно лучше сопротивляются коррозии, чем многофазные, поэтому чем меньше в стали углерода, тем выше ее коррозионная стойкость. Цель закалки ряда низкоуглеродистых нержавеющих сталей — увеличение коррозионной стойкости, а не прочности. Твердость у них при закалке не увеличивается, так как нет превращений в твердом состоянии, но при нагреве карбиды переходят в твердый раствор, а при резком охлаждении не успевают выделиться и поэтому получается однофазная структура. Прочность сталей типа 08Х18Н10Т достигается нагартовкой, т.е. в результате пластической деформации.

***Жаростойкие и жаропрочные стали*** всегда являются сложнолегированными: содержат много элементов и в большом количестве.

Сплавы железа с углеродом, содержащие > 2,14 % С, называют ***чугунами***. Присутствие эвтектики в структуре чугуна (см. рис.1.1)

обусловливает его использование исключительно в качестве литейного сплава для деталей, применяемых при относительно невысоких напряжениях и малых динамических нагрузках. Преимущества чугуна – высокие литейные свойства и небольшая стоимость (по сравнению со сталью). Температуры плавления чугунов ниже, чем у сталей, что облегчает процесс литья. Например, температура плавления серого чугуна составляет 1100-1250 $^{o}$C в зависимости от содержания углерода, что в среднем на 300 $^{o}$C ниже, чем температура плавления железа и на 250-300 $^{o}$C ниже, чем температура плавления сталей. С повышением содержания углерода температура плавления уменьшается, а жидкотекучесть увеличивается. Ликвация в чугунах также меньше, чем у стали. Кроме того, чугуны, в структуре которых при затвердевании образуется графит (фаза с большим удельным объемом, чем у металлической основы), имеют низкий коэффициент усадки, приближающийся к аналогичной характеристике оловянных бронз.

Чугуны с графитом как мягкой и хрупкой составляющей хорошо обрабатываются резанием (с образованием ломкой стружки) и образуют более чистую поверхность, чем стали (кроме автоматных). Чугуны имеют повышенное содержание углерода (2,2-4 %) и кремния (0,8-2 %) – элементов, способствующих графитизации. Однако в марках чугуна химический состав не указывается, так как (в отличие от большинства других металлических сплавов) этот признак не характеризует в достаточной степени их свойства, а следовательно и область применения. Структура и свойства чугунов зависят главным образом от условий получения отливки (температуры жидкого металла, введения модификаторов и особенно значительно от условий охлаждения при литье). Поэтому при одинаковом химическом составе чугун может иметь сильно отличающиеся структуру и свойства (например, белый и серый чугуны).

Механические свойства чугуна, определяющие область его применения, в значительно большей степени характеризуются его структурой: формой и размерами выделения графита; строением металлической основы.

Углерод в чугуне может находиться в виде цементита или графита или одновременно в виде цементита и графита. Цементит придает излому чугуна специфический светлый блеск. Поэтому чугун, в котором весь углерод находится в виде цементита, называют белым. Графит придает излому чугуна серый цвет, поэтому такой чугун называют серым чугуном. В зависимости от формы графита и условий его образования различают следующие группы чугунов: серый, высокопрочный с шаровидным графитом и ковкий [2].

## Задачи

1.4.1. Какие элементы присутствуют в составе любой стали?

**Ответ:** l) Fe, C; 2) Fe, C, Mn, S, P, Si; 3) Fe, Mn, P, S, C; 4) Fe, Mn, Si, P, Cr, S, C.

1.4.2. Какие элементы являются важнейшими и определяют основные свойства стали?

**Ответ:** 1) Fe, C; 2) Fe, C, Si, Mn; 3) Fe, C, P, S; 4) Fe, C, Mn.

1.4.3. Какие примеси в стали являются вредными и в чем заключается их вредное влияние?

**Ответ:** 1) P — увеличивает хрупкость; 2) S — вызывает красноломкость; 3) Si — повышает хрупкость, уменьшает пластичность; 4) Mn — понижает пластичность.

1.4.4. Каким способом производится основное количество углеродистой стали?

**Ответ:** 1) в конверторах; 2) в электропечах; 3) в кислых мартеновских печах; 4) в основных мартеновских печах.

1.4.5. Какие стали имеют более высокие прочностные свойства?

**Ответ:** 1) кипящие; 2) спокойные; 3) полуспокойные.

1.4.6.Какие конструкционные углеродистые стали поставляются металлургическими заводами с гарантированным химическим составом?

**Ответ:** 1) стали группы А; 2) стали группы Б; 3) стали группы В.

1.4.7. Какое влияние на свойства стали оказывает рост содержания углерода?

**Ответ:** 1) повышается пластичность стали; 2) повышается коррозионная стойкость стали; 3) повышаются твердость и хрупкость стали; 4) влияния не оказывает.

1.4.8. Какое влияние на свойства стали оказывает рост содержания примеси серы?

**Ответ:** 1) повышаются хрупкость и склонность к образованию трещин и надрывов, возникает явление красноломкости; 2) повышается пластичность стали; 3) повышаются прочность и износостойкость стали; 4) влияния не оказывает.

1.4.9. Какое влияние на свойства стали оказывает рост содержания примеси фосфора?

**Ответ:** 1) повышаются прочность и износостойкость стали;
2) понижается пластичность стали за счет искажения кристаллической решетки, возникает явление хладноломкости; 3) повышается пластичность стали.

1.4.10. Какие постоянные нежелательные примеси оказывают влияние на свойства стали?

**Ответ:** 1) медь, алюминий, калий, кальций, окись азота; 2) никель, хром, молибден, вольфрам, двуокись углерода; 3) сера, фосфор, азот, кислород, водород.

1.4.11. Какие постоянные примеси – технологические добавки оказывают влияние на свойства стали?

**Ответ:** 1) двуокись кремния, азот, кислород; 2) кремний и марганец.;3) сера, фосфор, азот, водород.

1.4.12. Каково предельно допустимое содержание примеси серы в стали?

**Ответ:** 1)1,1 %;.2) 0,06 % 3) 0,1 %.

1.4.13. Каково предельно допустимое содержание примеси фосфора в стали?

**Ответ:** 1) 1,1 %; 2) 0,1 %; 3) 0,08 %.

1.4.14. Какое влияние на свойства стали оказывает технологическая добавка - примесь марганца?

**Ответ:** 1) возникает явление красноломкости; 2) повышаются твердость, прочность и износостойкость стали; 3) повышается пластичность стали;

1.4.15. Каково предельно допустимое содержание примеси марганца в стали?

**Ответ:** 1) 1,1 %; 2) 0,4 %; 3) 0,8 %.

1.4.16. Каково предельно допустимое содержание примеси кремния в стали?

**Ответ:** 1) 0,4 %.2) 1,0 %.3) 0,01 %.

1.4.17. Какое влияние на свойства стали оказывает технологическая добавка - примесь кремния?

**Ответ:** 1) повышает хрупкость стали, создает явление хладноломкости; 2) связывает закись железа с образованием силикатов, которые удаляются вместе со шлаками, понижает склонность стали к хладноломкости;3) образует легкоплавкую эвтектику с железом, при кристаллизации осаждается на границах зерен, что приводит к образованию трещин и надрывов при деформациях; 4) влияния не оказывает.

1.4.18. Какое функциональное свойство приобретает сталь при содержании примеси кремния в количестве 15-20 %?

**Ответ:** 1) повышенную электропроводность; 2) повышенную твердость; 3) повышенную кислотоупорность.

1.4.19. По каким признакам классифицируются стали?

**Ответ:** 1) по химическому составу, назначению и качеству; 2) по типу кристаллической решетки; 3) по величине магнитной восприимчивости.

1.4.20. Какова классификация сталей по функциональному назначению?

**Ответ:** 1) сильно-, средне- и слабомагнитные; 2) конструкционные, инструментальные и с особыми физико-химическими свойствами; 3)корозионностойкие , теплостойкие, жаропрочные.

1.4.21. Какова классификация сталей по химическому составу?

**Ответ:** 1) углеродистые и легированные; 2) легированные и нелегированные; 3) конструкционные, инструментальные и с особыми физико-химическими свойствами.

1.4.22. Какова классификация сталей по качеству?

**Ответ:** 1) качественные и некачественные; 2) некачественные, среднего качества и высококачественные; 3) обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные.

1.4.23. Какие параметры лежат в основе классификации сталей по качеству?

**Ответ:** 1) размер и форма зерна поликристаллического материала; 2) способ выплавки; содержание серы и фосфора; 3) особенности процесса химико-термической обработки.

1.4.24. Приведите характеристику сталей обыкновенного качества.

**Ответ:** 1) допустимо наличие 5 внутренних трещин в объеме 1 $см^3$; 2) механические свойства ниже, чем у сталей других групп качества, допустимо содержание примеси серы до 0,06 %, фосфора – до 0,08 %; 3) механические свойства ниже, чем у сталей других групп по качеству, допустимо содержание примеси серы до 0,6%, фосфора – до 0,8%.

1.4.25. Каково допустимое содержание вредных примесей в качественных сталях?

**Ответ:** 1) содержание и серы, и фосфора не выше 0,035 %;
2) содержание и серы, и фосфора не выше 0,0035 %; 3) содержание и серы, и фосфора не выше 0,35 %.

1.4.26. Каковы особенности выплавки и допустимое содержание вредных примесей в высококачественных сталях?

**Ответ:** 1) содержание и серы, и фосфора не выше 0,05 % выплавка в мартеновских печах; 2) содержание и серы, и фосфора не выше 0,035 %, электрошлаковый переплав; 3) содержание и серы, и фосфора не выше 0,025 %, выплавка в электропечах.

1.4.27. Приведите характеристики особо высококачественных сталей.

**Ответ:** 1) содержание и серы, и фосфора не выше 0,025 %;
2) содержание и серы, и фосфора не выше 0,015 %, электрошлаковый переплав с вакуумированием; 3) содержание и серы, и фосфора не выше 0,025 %, выплавка в электропечах.

1.4.28. На какие группы по содержанию углерода подразделяются углеродистые стали?

**Ответ:** 1) низкоуглеродистые с содержанием углерода 0,25-0,35 %, среднеуглеродистые с содержанием углерода 0,35-0,80 %, высокоуглеродистые с содержанием углерода 0,80 -2,6 %;
2) низкоуглеродистые с содержанием углерода 0,009-0,25 %, среднеуглеродистые с содержанием углерода 0,25-2,14 %, высокоуглеродистые с содержанием углерода более 2,14 %;
3) низкоуглеродистые с содержанием углерода 0,09-0,25 %, среднеуглеродистые с содержанием углерода 0,25-0,60 %, высокоуглеродистые с содержанием углерода более 0,60 %.

1.4.29. Какие характеристики положены в основу деления на группы А,Б и В углеродистых сталей обыкновенного качества?

**Ответ:** 1) гарантируемые производителем химический состав и механические свойства; 2) гарантируемый производителем химический состав стали, величина удельного электрического сопротивления, рекомендуемые для изготовления изделия; 3) величина относительного удлинения перед разрывом.

1.4.30. Приведите описание состава, назначения и качества сталей марок Ст0…Ст6.

**Ответ:** 1) 1. сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, группы А, содержание углерода понижается от Ст0 к Ст6;
2) сталь углеродистая, конструкционная, обыкновенного качества, группы А, содержание углерода повышается от Ст0 к Ст6; 3) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, группы Б, содержание углерода повышается от Ст0 к Ст6.

1.4.31. Приведите описание состава, назначения и качества сталей марок БСт0…БСт6.

**Ответ:** 1) сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, группы Б, содержание углерода понижается от БСт0 к БСт6;
2) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, группы А, содержание углерода повышается от БСт0 к БСт6; 3) сталь углеродистая, конструкционная, обыкновенного качества, группы Б, содержание углерода повышается от БСт0 к БСт6.

1.4.32. Приведите описание состава, назначения и качества сталей марок ВСт0…ВСт6.

**Ответ:** 1) сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, группы В, содержание углерода понижается от ВСт0 к ВСт6;
2) сталь углеродистая, конструкционная, обыкновенного качества, группы В, содержание углерода повышается от ВСт0 к ВСт6; 3) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, группы В, содержание углерода повышается от ВСт0 к ВСт6.

1.4.33. Приведите описание состава, назначения и качества стали марки 05.

**Ответ:** 1) сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, группы А, с содержанием углерода 0,5 %, высокоуглеродистая, может подвергаться термической обработке; 2) сталь углеродистая, конструкционная, обыкновенного качества, с содержанием углерода 0,05 %, среднеуглеродистая, может подвергаться термической обработке; 3) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, с содержанием углерода 0,05 %, низкоуглеродистая, не может подвергаться термической обработке.

1.4.34. Приведите описание состава, назначения и качества стали марки 25.

**Ответ:** 1) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, с содержанием углерода 0,25 %, низкоуглеродистая; 2) сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, группы А, с содержанием углерода 2,5 %; 3) сталь углеродистая, конструкционная, обыкновенного качества, с содержанием углерода 0,25 %, высокоуглеродистая.

1.4.35. Приведите описание состава, назначения и качества стали марки 55.

**Ответ:** 1) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, с содержанием углерода 0,55 %, среднеуглеродистая, может подвергаться термической обработке; 2) сталь углеродистая, конструкционная, высококачественная, с содержанием углерода 0,55 % среднеуглеродистая, может подвергаться термической обработке;
3) сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, группы В, с содержанием углерода 5,5 %, быстрорежущая.

1.4.36. Приведите описание назначения, состава и качества стали марки 75.

**Ответ:** 1) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, с содержанием углерода 0,75 %, высокоуглеродистая, может подвергаться термической обработке и применяться для изготовления пружин, рессор, замковых шайб и др.; 2) сталь углеродистая, высококачественная, инструментальная с содержанием углерода 7,5 %, не может подвергаться термической обработке, применяется для изготовления малонагруженных деталей и конструкций; 3) такой марки стали не существует.

1.4.37. Приведите описание назначения, состава и качества стали марки 88.

**Ответ:** 1) сталь углеродистая, высококачественная, инструментальная с содержанием углерода 0,88 % , не может подвергаться термической обработке, применяется для изготовления малонагруженных деталей и конструкций; 2) такой марки стали не существует; 3) сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, с содержанием углерода 8,8 %, быстрорежущая.

1.4.38. Какую из нижеприводимых марок сталей следует использовать для изготовления сварных металлоконструкций, предусматриваемых для работы в условиях Севера?

**Ответ:** 1) СтЗ; 2) МСтЗ; 3) МСтЗ кп; 4) ВСтЗ.

1.4.39. Какую из нижеприведенных марок сталей следует выбрать для изготовления вала механической обработкой?

**Ответ:** 1) МСт5; 2) ВСт5; 3) Ст5; 4) МСт4 кп.

1.4.40. Болты изготовляются из прутка путем механической обработки. Какую из приводимых в ответах сталь следует использовать?

**Ответ:** 1) СтЗ; 2) МСтЗ; 3) ВСтЗ.

1.4.41. Методом глубокой вытяжки из стального листа изготовляют кузова автомашин. Какую сталь можно рекомендовать для этой цели?

**Ответ:** 1) СтЗ; 2) Ст01 кп; 3) МСтЗ кп; 4) Мст1.

1.4.42. Рекомендуйте материал для изготовления мелких винтов для крепежа электроарматуры при массовом изготовлении на станках-автоматах.

**Ответ:** 1) Ст1; 2) МСт1; 3) ВСт3; 4) А12.

1.4.43. Какие примеси в составе стали улучшают ее обрабатываемость на металлорежущих станках?

**Ответ:** 1) С и Mn; 2) Mn и Si; 3) S и P; 4) P.

1.4.44. Какими способами изготовляют стальные детали?

**Ответ:** 1) литьем; 2) обработкой давлением; 3) механической обработкой; 4) ковкой.

1.4.45. Что ограничивает производство литых стальных деталей?

**Ответ:** 1) низкая жидкотекучесть; 2) большой пригар; 3) большая линейная и объемная усадка.

1.4.46. В виде каких основных фаз находятся легирующие элементы в стали?

**Ответ:** 1) в виде химических соединений, окислов, сульфидов, твердого раствора; 2) в виде твердого раствора; 3) в виде карбидов.

1.4.47. Какие из приводимых элементов образуют с железом только твердые растворы?

**Ответ:** 1) Си, Ni; 2) Cr, Mn, Si; 3) Si, Al, Co; 4) Mo, Cr, W.

1.4.48. В какой фазе железа преимущественно растворяется Сг и Ni (решетки ОЦК И ГЦК соответственно)?

Ответ: 1) Ni — в Fe, Cr — в Fe; 2) Cr и Ni — в Fe; 3) Ni — в Fe-, Cr образует карбиды.

1.4.49. Какие фазы легирующих элементов особенно сильно упрочняют сплавы железа?

**Ответ:** 1) твердые растворы; 2) карбиды; 3) фазы внедрения.

1.4.50. Каково основное назначение элементов типа Ti, Nb, V в легированных конструкционных сталях?

**Ответ:** 1) упрочняют сталь; 2) измельчают зерно стали;

3) повышают конструктивную прочность.

1.4.51. В каких фазах стали при нормальной температуре находятся Si, Ni, Cr, Ti при одновременном легировании ими малоуглеродистой конструкционной стали?

**Ответ:** 1) Si, Ni — в феррите, Cr, Ti — в аустените: 2) Si, Ni, Cr — в феррите, Ti — в карбидной фазе; 3) Si, Ni — в феррите, Cr, Ti — в карбидной фазе.

1.4.52. Как влияют большинство легирующих элементов на температуру перлитного превращения и содержание углерода в перлите?

**Ответ:** 1) повышают температуру; 2) повышают температуру перлитного превращения и понижают количество углерода в перлите; 3) понижают температуру перлитного превращения и содержание углерода в перлите.

1.4.53. В каком состоянии рационально использование легированных сталей?

**Ответ:** 1) в отожженном; 2) в закаленном; 3) в закаленном и отпущенном.

1.4.54. Какими основными качествами должен обладать инструмент?

**Ответ:** 1) высокой твердостью; 2) высокой износостойкостью и прочностью; 3) высокой теплостойкостью; 4) высокой прочностью и вязкостью.

1.4.55. Наличие каких элементов в составе инструментальных сталей обеспечивает высокую твердость инструмента после закалки.

**Ответ:** 1) карбидообразующих элементов; 2) легирующих элементов; 3) углерода.

1.4.56. В состав многих легированных инструментальных сталей входят в незначительных количествах хром, марганец, вольфрам, кремний. Какое основное назначение этих элементов?

**Ответ:** 1) улучшают прокаливаемость стали; 2) повышают теплостойкость стали; 3) повышают износостойкость инструмента; 4) улучшают технологические свойства стали.

1.4.57. Какие имеются группы инструментальных сталей по теплостойкости?

**Ответ:** 1) нетеплостойкие; 2) полутеплостойкие; 3) теплостойкие; 4) высокотеплостойкие.

1.4.58. Что понимают под теплостойкостью стали?

**Ответ:** 1) температуру отпуска стали; 2) температуру нагрева стали при закалке; 3) температуру нагрева, при которой твердость закаленной стали начинает резко понижаться; 4) температуру нагрева, при которой начинается снижение прочности инструмента.

1.4.59. К какой группе по теплостойкости относятся низколегированные инструментальные стали?

**Ответ:** 1) теплостойких; 2) полутеплостойких; 3) нетеплостойких.

1.4.60. Какие инструменты требуют сплошной прокаливаемости?

**Ответ:** 1) напильники; 2) лерки; измерительный инструмент; 3) молотковые штампы; 4) все инструменты; 5) режущие инструменты.

1.4.61. Какой заключительной механической обработке после термообработки подвергается большинство инструментов?

**Ответ:** 1) токарной обработке; 2) шлифовке; 3) поверхностному упрочнению; 4) доводке.

1.4.62. Какие дефекты могут иметься при шлифовании инструмента?

**Ответ:** 1) снижение твердости поверхностного слоя от разогрева поверхностных слоев при шлифовании; 2) образование шлифовочных трещин; 3) недостаточная чистота поверхности после шлифования; 4) коробление изделия.

1.4.63. Какая фаза в структуре термически обработанной инструментальной стали содействует образованию шлифовочных трещин?

**Ответ:** 1) мартенсит; 2) остаточный аустенит; 3) троостит; 4) мартенсит отпуска.

1.4.64. Инструмент изготовлен из стали У7, ХВГ и Р18. В какой стали наиболее вероятно образование шлифовочных трещин?

**Ответ:** 1) в стали У7; 2) в стали ХВГ; 3) в стали Р18.

1.4.65. Какую сталь можно рекомендовать для изготовления пресс-форм для литья под давлением алюминиевых сплавов. По каким причинам?

**Ответ:** 1) сталь 3Х2В8Ф — имеет повышенную теплостойкость; 2) сталь 4Х5В2ФС — имеет достаточную теплостойкость и высокую разгаростойкость; она дешевле стали 3Х2В8Ф; 3) сталь Р18 — имеет высокую теплостойкость после термообработки.

1.4.66. Ниже приводятся материалы и способ их термообработки для изготовления крупных шаблонов. Какому материалу и какой обработке следует отдать предпочтение?

**Ответ**: 1) сталь У7, закалка + очень длительный низкий отпуск; 2) сталь Х12Ф1, закалка + низкий отпуск; 3) сталь 38ХМЮА, отжиг + низкотемпературное азотирование; 4) сталь 55, закалка с нагревом т. в. ч.+ длительный низкий отпуск.

1.4.67. Перечислите основные требования, предъявляемые к сталям для изготовления измерительных инструментов.

**Ответ**: 1) максимальные жаропрочность и кислотоупорность; 2) минимальное содержание углерода; 3) максимальные твердость и износостойкость.

1.4.68. Какие основные классы чугунов используются в качестве конструкционного материала?

**Ответ**: 1) белые; 2) серые, высокопрочные; 3) ковкие.

1.4.69. Из каких фаз в железоуглеродистых сплавах может образовываться графит в структуре чугунов?

**Ответ:** 1) из жидкой фазы; 2) из аустенита; 3) из цементита.

1.4.70. Какие факторы главным образом влияют на интенсивность графитообразования в чугуне?

**Ответ**: 1) количество C, Mn, Si в сплаве; 2) скорость охлаждения; 3) содержание углерода и кремния в чугуне.

1.4.71. Какова форма графитовых включений в белых чугунах?

**Ответ:** 1) пластическая; 2) хлопьевидная; 3) шаровидная; 4) в этих чугунах нет графита.

1.4.72. В одной и той же отливке в участках, имеющих разную толщину, обнаружена различная структура — от белого чугуна в тонких частях до ферритного серого в массивных частях. Чем это обусловлено?

Ответ: 1) разным составом металла в различных частях отливки; 2) различным составом чугуна и разной скоростью охлаждения различных частей отливки; 3) различной скоростью охлаждения разных частей отливки.

1.4.73. Какая структура металлической основы серого чугуна обеспечивает оптимальные механические свойства отливок?

**Ответ:** 1) ферритная; 2) ферритно-перлитная; 3) перлитная.

1.4.74. Изменение количества каких составляющих в химическом составе обычных серых чугунов влияет на получение чугуна с требуемой структурой и с нужным комплексом механических свойств?

**Ответ:** 1) Mn; 2) Si; 3) Si + C; 4) C.

1.4.75. Можно ли влиять на свойства серого чугуна путем изменения величины и количества графитовых включений? Если можно, то как называется такой процесс?

**Ответ:** 1) можно, графитизацией; 2) нельзя; 3) можно, модифицированием; 4) можно, отжигом.

1.4.76. Сколько имеется связанного углерода в перлитном сером чугуне?

**Ответ:** 1) 0 %; 2) 2,14 %; 3) 0,8 %: 4) 4,3 %.

1.4.77.Можно ли по микроструктуре чугуна определить: является чугун серым, ковким или высокопрочным? По какому признаку?

**Ответ:** 1) можно — по количеству графита; 2) нельзя; 3) можно — по характеру металлической основы; 4) можно — по форме графитовых включений.

1.4.78. Какая структура серого чугуна обладает наиболее низкими механическими свойствами?

**Ответ:** 1) перлитная; 2) феррито-перлитная; 3) ферритная.

1.4.79. По каким показателям чугуны имеют преимущества перед сталью?

**Ответ:** 1) по прочности; 2) по циклической вязкости и меньшей чувствительностью к дефектам поверхности деталей; 3) по стоимости.

1.4.80. Какие чугуны образуются при модифицировании жидкого чугуна магнием или церием?

**Ответ:** 1) ковкие; 2) белые; 3) высокопрочные; 4) серые.

1.4.81. Чем объясняются высокая прочность и значительная пластичность высокопрочных чугунов?

**Ответ:** 1) более качественной структурой металлической основы; 2) химическим составом металла; 3) количеством графита в структуре; 4) формой графитовых включений.

1.4.82. Чем объясняется прочность и пластичность высокопрочных чугунов?

**Ответ:** 1) формой графитовых включений; 2) количеством графита в структуре; 3) характером металлической основы; 4) химическим составом.

1.4.83. Какой материал следует использовать для изготовления заднего моста автомобиля?

**Ответ:** 1) стальные поковки; 2) стальное литье; 3) серый чугун; 4) ковкий чугун.

1.4.84. Какой материал следует использовать для изготовления блока цилиндров грузовой автомашины?

**Ответ:** 1) стальное литье; 2) ковкий чугун; 3) серый чугун; 4) высокопрочный чугун.

1.4.85. Какие материалы обладают наилучшими литейными свойствами?

**Ответ:** 1) сталь; 2) высокопрочный чугун; 3) ковкий чугун; 4) серый чугун.

1.4.86. Какой из литейных сплавов является наиболее дешевым?

**Ответ:** 1) серый чугун; 2) ковкий чугун; 3) сталь; 4) высокопрочный чугун.

1.4.87. Какой материал обычно используют для изготовления коленчатых валов?

**Ответ:** 1) сталь; 2) ковкий чугун; 3) высокопрочный чугун; 4) серый чугун.

## 2. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

К металлам относятся вещества, обладающие высокими теплопроводностью и электрической проводимостью, ковкостью, блеском и другими характерными свойствами, которые обусловлены наличием в их кристаллической решетке большого числа свободных электронов.

Единственными объективными критериями, позволяющими отнести материал к металлам, считаются наличие электропроводности при T = 0 К и положительный температурный коэффициент удельного сопротивления. Указанными выше свойствами обладают свыше 80 простых веществ (элементов) и множество металлических сплавов.

Высокая электропроводность металлов связана с тем, что в них имеется большое количество носителей тока — *электронов*

*проводимости*, образующихся из валентных электронов атомов металла, которые не принадлежат определённому атому. Электрический ток в металле возникает под действием внешнего электрического поля, которое вызывает упорядоченное движение электронов. Движущиеся под действием поля электроны рассеиваются на неоднородностях и дефектах ионной решётки, а также на нарушениях периодической структуры, связанной с тепловыми колебаниями ионов. При этом электроны теряют импульс, а энергия их движения преобразуются во внутреннюю энергию кристаллической решётки, что и приводит к нагреванию проводника при прохождении по нему электрического тока.

Сопротивление проводника при прочих равных условиях зависит от его геометрии и от *удельного электрического сопротивления* материала, из которого он состоит. Сопротивление однородного проводника постоянного сечения зависит от свойств вещества проводника, его длины, сечения и вычисляется по формуле:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \tag{2.1}$$

где ρ — *удельное сопротивление* вещества проводника, Ом·м, $l$ — длина проводника, м, а $S$ — площадь сечения, м².

Удельное сопротивление — скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади сечения.

В соответствии с квантово–механическими представлениями причиной наличия электрического сопротивления твердых тел является не столкновение свободных электронов с атомами решетки (как в классической теории Друде), а рассеяние их, как указано выше, на дефектах решетки, вызывающих нарушение периодичности потенциала [1,2,8]. Идеально правильная, бездефектная неподвижная решетка не способна рассеивать свободные носители заряда и поэтому должна обладать нулевым сопротивлением.

Подвижность $\mu$ и длина свободного пробега $\lambda$ электронов в твердом теле зависят от структуры материала. Чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления $\rho$. Примеси, искажая решетку, приводят к увеличению $\rho$. С позиций квантовой механики рассеяние электронных волн происходит на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с расстоянием порядка четверти длины волны электрона; нарушения меньших размеров не вызывают заметного рассеяния волн де Бройля. В металлическом проводнике, где длина волны электрона порядка 5 Å, микродефекты создают значительное рассеяние, уменьшающее подвижность электронов и длину свободного пробега и, следовательно, приводят к росту $\rho$. Величину, обратную удельному сопротивлению, называют **удельной проводимостью** вещества и обозначают $\sigma$:

$$\sigma = e\, n\, \mu, \qquad (2.2)$$

где e - заряд электрона, $n$ – концентрация.

Так как в металлах концентрация электронного газа практически не зависит от температуры ($T$), то зависимость удельного сопротивления $\rho$ (и обратной величины удельной электропроводности $\sigma$) от температуры полностью определяется температурной зависимостью подвижности ($\mu$) и пропорциональной ей длины свободного пробега электронов ($\lambda$).

Вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т.е. уменьшается среднестатистическая длина свободного пробега $\lambda$, уменьшается подвижность электронов и, как следствие, уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление (рис. 2.1).

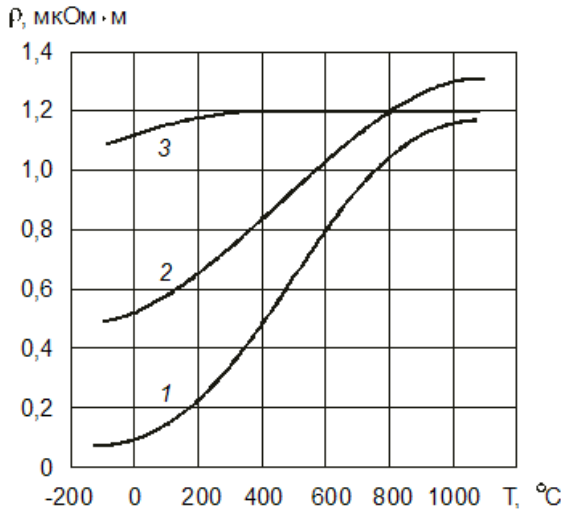



Рис. 2.1. Зависимость удельного сопротивления металлов и сплавов от температуры: 1 – железо; 2 – электротехническая сталь с содержанием 4 % Si; 3 – сплав Fe-Ni-Cr

Сопротивление металлов снижается при понижении температуры; при температурах порядка нескольких кельвинов сопротивление ряда металлов и сплавов стремится или становится равным нулю (эффект сверхпроводимости).

*Удельное сопротивление сплавов.* Как указывалось, примеси и нарушения правильной структуры металлов ведут к увеличению их удельного сопротивления. Значительное возрастание $\rho$ наблюдается при сплавлении двух металлов в том случае, если они образуют твердый раствор, т.е. создают при отвердевании совместную кристаллизацию, и атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого.

Зависимость удельного сопротивления сплава двух металлов, образующих твердый раствор с неограниченной растворимостью компонентов, от процентного содержания каждого из них представлена на рис. 2.2 (кривая а). Кривая имеет максимум, соответствующий некоторому соотношению содержания компонентов в сплаве; при уменьшении содержания каждого из них $\rho$ падает, приближаясь к

соответствующим значениям $\rho$ чистых металлов. Обычно наблюдается определенная закономерность и в изменении $TK\rho$ ($TK$ – температурный коэффициент): относительно высокими значениями ТКρ обладают чистые металлы, а у сплавов $TK$ρ меньше и даже может приобретать небольшие по абсолютной величине отрицательные значения (рис.2.2, кривая б). Это объясняется тем, что у сплавов изменение $\rho$ вызывается не только изменением подвижности носителей заряда, но в некоторых случаях и возрастанием концентрации носителей при повышении температуры.

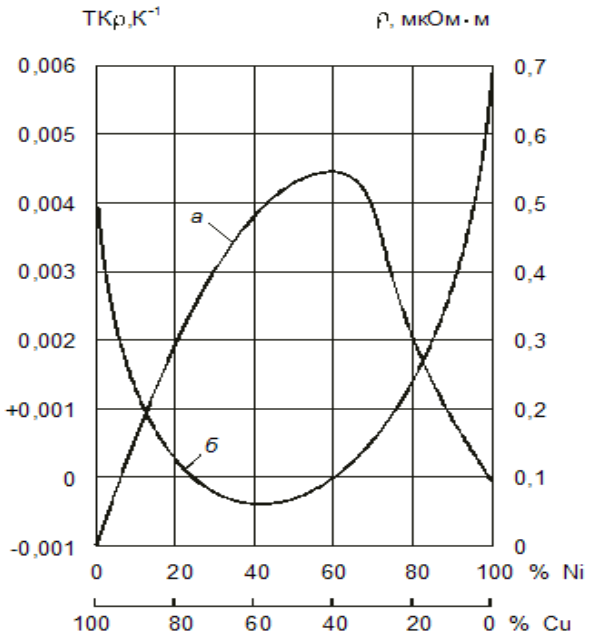



Рис.2.2. Зависимость $\rho$ (а) и $TK\rho$ (б) сплавов системы Cu-Ni от состава (в процентах по массе)

## Задачи

2.1. Удельное сопротивление серебра при комнатной температуре равно 0,015 мкОм · м, а температурный коэффициент удельного сопротивления составляет $4{,}1 \cdot 10^{-3}$ $К^{-1}$. Определить, как и во сколько раз изменится длина свободного пробега электронов при нагревании проводника от 300 до 1000 К.

2.2. Удельное сопротивление чистой меди возрастает на $10^{-8}$ Ом·м при добавлении 1 ат. % одновалентной примеси в твердом растворе. Предполагая распределение примесей случайным и считая, что они представляют собой сферические рассеивающие центры с эффективным диаметром в несколько ангстрем, оценить из этих данных длину свободного пробега электронов и найти приближенно сечение рассеяния примесей.

2.3. В медном проводнике под действием электрической поля проходит электрический ток плотностью 1 А/мм$^2$. Определить скорость дрейфа и отношение ее к средней суммарной скорости движения электронов при температуре 300 К.

2.4. По проводнику с площадью сечения 30 мм$^2$ течет ток. Средняя скорость дрейфа свободных электронов 0,28 мм/с, а их концентрация $7{,}9 \cdot 10^{27}$ м$^{-3}$. Найти силу и плотность тока в проводнике.

2.5. По проводнику сопротивлением 10 Ом за 1 мин прошел электрический заряд 50 Кл. Найти напряжение, приложенное к концам проводника.

2.6. По проводнику с площадью поперечного сечения 1 мм$^2$ течет ток силой 5 А. Найти среднюю скорость направленного движения электронов, если в 1 см$^3$ металла содержится $4 \cdot 10^{22}$ свободных электронов.

2.7. Определить время, в течение которого электрон пройдет расстояние 1 км по медному проводу, если удельное сопротивление меди 0,017 мкОм·м, а разность потенциалов на концах проводника U=220 В. За какое время электрон пролетит это же расстояние, двигаясь без соударений, при той же разности потенциалов? Каково время передачи сигнала?

2.8. При включении в электрическую цепь проводника диаметром 0,5 мм и длиной 43 мм разность потенциалов на концах проводника

составила 2,4 В при токе 2 А. Определить удельное сопротивление материала проводника.

2.9. Медный провод длиной 1м имеет поперечное сечение 0,1 мм$^2$. Сопротивление провода при комнатной температуре равно 0,172 Ом. Определить удельное объемное сопротивление меди.

2.10. По никелиновому проводнику с поперечным сечением 1 мм$^2$ течет ток силой 0,5 А. Приложенное напряжение составляет 2 В. Определить массу проводника.

2.11. Из никелевой ленты шириной 1 см и толщиной 1 мм необходимо изготовить шунт сопротивлением 0,4 Ом. Какой длины должна быть никелевая лента, если удельное сопротивление никеля 0,068 мкОм·м?

2.12. Пленочный резистор состоит из трех участков, имеющих различные сопротивления квадрата пленки $R_1$ = 10 Ом; $R_2$ = 20 Ом; $R_3$=30 Ом (рис. 2.3). Определить сопротивление резистора.

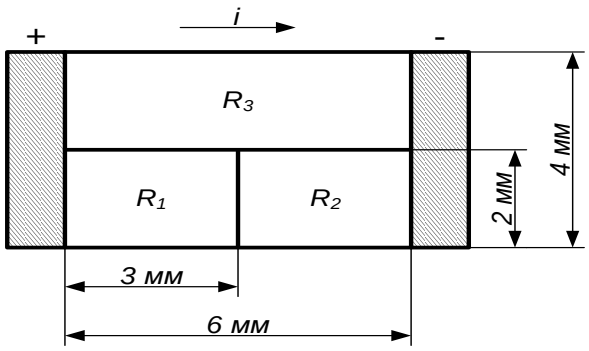



Рис.2.3. К задаче 2.12

2.13. Проволочный резистор марки ПЭТВ создан намоткой нихромового провода Х15Н60 с удельным сопротивлением $\rho$= 1,1 мкОм·м. Диаметр намотки составляет 1 см, длина провода – 5 см. Определить сопротивление резистора.

2.14. Углеродистый резистор и проволочный резистор, изготовленный из нихрома, имеют одинаковое номинальное сопротивление $R_{ном}$ = 100 Ом. Резисторы соединены параллельно и включены под напряжение U=50 В. Одинаковая ли мощность будет выделяться на этих резисторах?

2.15. Удельное сопротивление $\rho_1$ алюминиевого провода при Т=300 К составляет $2\cdot10^{-8}$ Ом·м. Найти $\rho_2$ при Т=700 К, если $TK\rho$ алюминия равен $4{,}2\cdot10^{-3}К^{-1}$.

2.16. Определить сопротивление нихромового провода длиной 10 м и сечением 0,1 мм$^2$ при комнатной температуре $T_1$=300 К, а также при $T_2$= 500 К, если при $T_1$ удельное объемное сопротивление $\rho_1$= $1{,}1\cdot10^{-6}$ Ом·м., $TK\rho$= $10^{-4}$ К$^{-1}$, $TKl$= $10^{-5}$ К$^{-1}$.

2.17.Удельное объемное сопротивление медного провода при комнатной температуре $T_1$=300 К равно $\rho_1$= $1{,}8\cdot10^{-8}$ Ом·м. Найти $\rho_2$ при Т=700 К, если $TK\rho$ меди равен $4{,}3\cdot10^{-3}$ К$^{-1}$.

2.18. Вычислить сопротивление алюминиевого провода длиной 10 м и сечением 0,1 мм$^2$ при температуре $T_1$=300 К и его $\rho_2$ при Т=500 К, если известно, что $\rho_1$ алюминиевого провода при Т=300 К составляет $2\cdot10^{-8}$ Ом·м , а $TK\rho$ алюминия равен $4{,}3\cdot10^{-3}$ К$^{-1}$.

2.19. Определить $TKR$ медного провода, если его $TK\rho$ равен $4{,}3\cdot10^{-3}$ К$^{-1}$, а $TKl$=$1{,}6\cdot10^{-5}$ К$^{-1}$.

2.20. Определить температуру нити лампочки, если при включении в сеть напряжением 220 В по ней течет ток силой 0,68 А. Сопротивление вольфрамовой нити при 300 К равно 36 Ом, а температурный коэффициент сопротивления вольфрама составляет $5{,}1\cdot10^{-3}$ К$^{-1}$.

2.21. Вольфрамовая нить электрической лампы при температуре 2600 К имеет сопротивление 260 Ом. Чему равно ее сопротивление при комнатной температуре? Температурный коэффициент сопротивления вольфрама составляет $5{,}1\cdot10^{-3}$ К$^{-1}$.

2.22. Какова классификация материалов приборостроения по электрическим свойствам?

**Ответ:** 1) сильнопроводящие и слабопроводящие;

2) проводники, полупроводники, диэлектрики; 3) металлы, сплавы и непроводники.

2.23. Какова физическая природа расщепления энергетических уровней атомов в энергетические зоны при образовании твердого тела?

**Ответ:** 1) выполнение принципа Паули и снятие вырождения путем расщепления дискретных энергетических уровней изолированного атома в зоны при сближении атомов и образовании твердого тела;
2) корпускулярно-волновой дуализм микрочастиц; 3) слабое потенциальное взаимодействие между атомами.

2.24. Процессы возникновения свободных электронов в твердом теле обусловлены взаимодействием между:

**Ответ:** 1) валентной и запрещенной энергетическими зонами;
2) валентной зоной и зоной проводимости; 3) запрещенной зоной и зоной проводимости.

2.25. При увеличении частоты внешнего электрического поля свойства материалов:

**Ответ:** 1) не изменяются; 2) изменяются в сторону усиления проводящих свойств; 3) изменяются в сторону усиления диэлектрических свойств.

2.26. Какой тип химической связи характерен для металлов?

**Ответ:** 1) ковалентная; 2) металлическая; 3) ионная.

2.27. Какой тип структуры наиболее характерен для металлов и сплавов?

**Ответ:** 1) стеклообразный; 2) монокристаллический;
3) поликристаллический.

2.28. Каковы основные области применения металлов и сплавов в электронике и приборостроении?

**Ответ:** 1) изоляция компонентов; 2) создание электронно-дырочных переходов; 3) коммутация, создание резистивных элементов, изготовление деталей, конструкций, машин.

2.29. Каковы основные отличия проводниковых материалов от непроводниковых?

**Ответ:** 1) наличие электропроводности при температуре абсолютного нуля и увеличение удельного сопротивления с ростом температуры;
2) высокие плотность и температура плавления; 3) отсутствие электропроводности при температуре абсолютного нуля и снижение удельного сопротивления с ростом температуры.

2.30. Чем отличаются зонные энергетические диаграммы проводника, полупроводника и диэлектрика?

**Ответ:** 1) шириной разрешенных энергетических зон;
2) наличием примесных уровней в запрещенной зоне;
3) отсутствием запрещенной зоны у проводников; меньшей 3 эВ запрещенной зоной у полупроводников и большей 3 эВ запрещенной зоной у диэлектриков.

2.31. От чего зависят ширина разрешенной зоны и число энергетических уровней в ней?

**Ответ:** 1) от расстояния между атомами в твердом теле;
2) от концентрации атомов в твердом теле; 3) от величины энергии химической связи и концентрации атомов в твердом теле.

2.32. Как изменяется концентрация свободных электронов в металле при повышении температуры?

**Ответ:** 1) увеличивается; 2) уменьшается; 3) не изменяется.

2.33. Справедливо ли утверждение, что при высоких температурах (выше характеристической температуры Дебая) молярная теплоемкость металлов незначительно отличается от молярной теплоемкости кристаллических диэлектриков?

**Ответ:** 1) нет, отличается значительно; 2) справедливо; 3) не всегда, зависит от вида металла.

2.34. Почему удельное сопротивление металлов увеличивается с повышением температуры?

**Ответ:** 1) растет концентрация свободных электронов;
2) уменьшается концентрация свободных электронов;

3) уменьшаются длина свободного пробега и подвижность свободных электронов.

2.35. Как меняется средняя длина свободного пробега электронов в идеально чистом металле при увеличении температуры (от абсолютного нуля)?

**Ответ:** 1) не изменяется; 2) не изменяется, затем уменьшается; 3) вначале увеличивается, затем уменьшается.

2.36. Почему металлические сплавы типа твердых растворов обладают более высоким удельным сопротивлением, чем чистые компоненты, образующие сплав?

**Ответ:** 1) в чистых компонентах концентрация электронов проводимости выше; 2) в чистых компонентах подвижность носителей заряда выше, поскольку атомы каждого компонента в сплавах типа твердых растворов по отношению к другому являются дефектами структуры и снижают подвижность; 3) из-за влияния высокой температуры при сплавлении чистых веществ.

2.37. Почему при термической закалке удельное сопротивление металлов возрастает, а при термическом отжиге - уменьшается?

**Ответ:** 1) при закалке уменьшается концентрация дефектов структуры (подвижность носителей заряда растет), а при отжиге увеличивается (подвижность носителей заряда снижается); 2) при закалке возникают дополнительные дефекты структуры (подвижность носителей снижается), а при отжиге дефекты устраняются, структура становится более однородной (подвижность носителей растет); 3) при закалке снижается концентрация электронов проводимости, а при отжиге – увеличивается.

2.38. Какими преимуществами и недостатками по сравнению с медью обладает алюминий как проводниковый материал.

**Ответ:** 1) более низкая стоимость и более высокое удельное сопротивление; 2) более высокая стоимость и более высокая рабочая

температура; 3) более низкая стоимость и более низкое удельное сопротивление.

2.39. Назовите неметаллические проводниковые материалы.

**Ответ:** 1) окисел бария; 2) полоний; 3) графит.

2.40. Каким образом обеспечиваются прочность и формоустойчивость вольфрамовых нитей и спиралей при высоких температурах эксплуатации?

**Ответ:** 1) созданием окислительной среды в баллоне;
2) отсутствием кислорода в баллоне с целью предотвращения окисления; 3) покрытием медью.

2.41. При каких условиях может быть нарушено состояние сверхпроводимости проводника?

**Ответ:** 1) при повышении температуры выше критической; 2) при воздействии электромагнитного поля с частотой выше критического значения; 3) при превышении напряженности постоянного магнитного поля критического значения.

## ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ

Постоянная Планка $h = 6{,}623 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Приведенная постоянная Планка $\hbar = h/2\pi = 1{,}054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Постоянная Больцмана $k = 1{,}380 \cdot 10^{-23}$ Дж/град $= 8{,}63 \cdot 10^{-5}$ эВ/град

Тепловая энергия при $T = 300$ К $kT = 0{,}0256$ эВ

Газовая постоянная $R = 8{,}31$ Дж/моль·град

Скорость света $c = 3 \cdot 10^{8}$ м/с

Число Авогадро $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ молекул/моль

Масса покоя электрона $m_0 = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг

Масса протона $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг

Заряд электрона $e = -1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Кл

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вихров С.П., Холомина Т.А. Свойства и применение металлов и полупроводников. учеб. пособие. – Рязань: РГРТА, 2004. – 84 с.

2. Вихров С.П., Холомина Т.А. Металлы и сплавы: свойства и применение: учеб. пособие. – Рязань: РГРТА, 2013. – 96 с.

3. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2004. – 519 с.

4. Мозберг Р.К. Материаловедение. Пособие для самостоятельной работы и контроля текущей успеваемости : учеб. пособие для вузов. – М. : Высш. шк., 1976. – 126 с.

5. Марцинковская Е.С. Контрольные задания по технологии металлов и конструкционным материалам. – М.: Высш шк., 1989. – 79 с.

6. Технология металлов и конструкционных материалов / Б.А. Кузьмин, Ю.Е. Абраменко, В.К. Ефремов и др.; под ред. Б.А. Кузьмина. - М.: Машиностроение, 1981. - 351 с.

7. Материаловедение. учеб. пособие/ сост. С.П.Вихров, Т.А.Холомина; под ред. Ю.М.Солдака. - Рязань: РГРТУ, 2006. - 160 с.

8. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения: пер. с англ. К.М. Зотовой, Д.О.Чаркина; под ред. В.П.Зломанова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 400 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ…….. .. 3
1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ
1.1. Диаграммы состояния сплавов…….. 4
Задачи…… 8
1.2. Сплав железо - углерод…….. 14
Задачи…… 18
1.3. Термическая и химико-термическая обработки стали….. 21
Задачи…….. 28
1.4. Выбор конструкционного материала для конкретного назначения……..... 43
Задачи…….. 57
2. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ..... 71
Задачи……. 75
ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ 82
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК…….. 83

Х о л о м и н а Татьяна Андреевна

З у б к о в Михаил Владимирович

Свойства и применение металлов и сплавов

Редактор Р.К.Мангутова

Корректор С.В.Макушина

Подписано в печать 30.06.14. Формат бумаги 60х84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл печ. л. 5,25.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

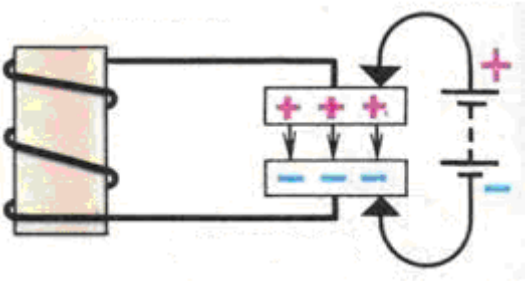
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Т.А. ХОЛОМИНА, М.В. ЗУБКОВ**

# СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ И МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ



Рязань 2015

Министерство образования и науки Российской Федерации
Рязанский государственный радиотехнический университет

Т.А. ХОЛОМИНА, М.В. ЗУБКОВ

# СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ И МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие

Рязань 2015

УДК 621.38+615.83

Свойства и применение диэлектриков и магнитных материалов: учеб. пособие/ Т.А. Холомина, М.В.Зубков; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. - Рязань, 2015. - 48 с.

В краткой и доступной форме излагается учебный материал, предусмотренный действующими образовательными стандартами. Содержатся краткие теоретические сведения, а также задачи по каждому разделу. Рассмотрены основные физические процессы – поляризация, диэлектрические потери, пробой диэлектриков, классификация и свойства магнитных материалов, а также применение указанных групп материалов в радиоэлектронике.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 38.03.02, 11.03.01 заочной и очной форм обучения, а также направлениям 09.03.02, 11.03.03, 11.03.04, 12.03.04, 13.03.02 дневного отделения при проведении практических занятий и для самостоятельной работы.

Ил. 15. Библиогр.: 6 назв.

*Электрические свойства, диэлектрики, магнитные материалы, поляризация, потери энергии, пробой, практическое применение*

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

Рецензент: кафедра электронных приборов (зав. кафедрой, д-р физ.-мат. наук, проф. М.В. Чиркин)

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2015

# 1. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

## 1.1. Классификация диэлектриков

К диэлектрикам относится чрезвычайно широкий круг материалов как органического (синтетические смолы, каучуки, волокнистые материалы), так и неорганического (стекла, керамика) происхождения. Синтетическими называют материалы, полученные с помощью синтеза – реакции полимеризации из веществ-мономеров. Эти материалы носят также названия: полимеры, пластические массы, синтетические смолы. К искусственным относятся материалы, полученные химической переработкой сырья природного происхождения (целлофан, бумага, вискоза, ацетат). Существует также множество композиционных материалов самого разнообразного состава, включающие в себя как синтетические, так и искусственные компоненты (целлулоид, слоистые пластики, фенопласты, аминопласты).

Выделим ряд основных групп диэлектрических материалов, применяемых в радиотехнике и электронике:

– синтетические смолы (пластмассы, полимеры);
– эластомеры;
– волокнистые материалы;
– слоистые пластики;
– стекла;
– керамика.

Рассмотрим основные физические свойства диэлектрических материалов, определяющие их применение.

## 1.2. Электропроводность диэлектриков

Основными свойствами, определяющими применение диэлектриков в радиотехнике и электронике, являются их изолирующие качества, а также способность создавать электрическую емкость за счет существования внутреннего электрического поля, т. е. поляризации.

Для выполнения функции электрической изоляции диэлектрические материалы должны препятствовать прохождению электрического тока путями, нежелательными для работы прибора. С этой точки зрения основной характеристикой диэлектриков является величина удельной электропроводности или удельного сопротивления.

Особенностью электропроводности твердых диэлектриков является то, что ввиду их большого удельного сопротивления ток через

объем диэлектрика $I_V$ сравним с током по поверхности $I_S$ (рис. 1.1), поэтому общий ток изоляции равен

$$I = I_v + I_s. \qquad (1.1)$$

При характеристике диэлектрика различают объемную и поверхностную удельные электропроводности ($\sigma_v$ и $\sigma_s$). Величины, обратные электропроводности, называются удельными объемным и поверхностным сопротивлениями ($\rho_v$ и $\rho_s$).

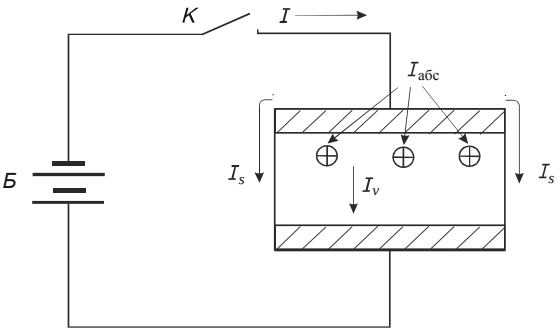



Рис. 1.1. Виды электрического тока в образце диэлектрика:
$I$ – общий ток изоляции; $I_{абс}$ – ток абсорбции; $I_V$ – объемный ток;
$I_S$ – поверхностный ток

Удельное объемное сопротивление ($\rho_v$) определяется как сопротивление куба диэлектрика с ребром, равным единице длины, если ток протекает через две противоположные грани. Значения $\rho_v$ большинства диэлектриков находятся в пределах $10^6$ - $10^{16}$ Ом·м.

Удельное поверхностное сопротивление ($\rho_s$) определяется как сопротивление квадрата поверхности диэлектрика со стороной любого размера, если ток протекает через две противоположные стороны. Значение удельного поверхностного сопротивления, как правило, на порядок выше объемного, т.е. находится в пределах $10^7$ - $10^{17}$ Ом, но оно в сильной степени зависит от величины и состояния поверхности (наличия влаги, проводящих веществ) и не является характеристикой материала.

Сопротивление изоляции диэлектрика определяется как результирующее двух сопротивлений ($R_v$ и $R_S$), включенных параллельно:

$$R = \frac{R_v R_s}{R_v + R_s}. \qquad (1.2)$$

Для диэлектрика с сечением $S$ и толщиной $h$ величина объемного сопротивления находится по формуле

$$R_v = \rho_v \frac{h}{S}, \qquad (1.3)$$

откуда можно определить $\rho_v$.

Второй характерной особенностью электропроводности диэлектриков является постепенное уменьшение тока со временем (рис. 1.2), после включения постоянного напряжения (замыкания контакта $K$ на рис. 1.1). С течением времени ток достигает некоторой постоянной величины, называемой током сквозной проводимости ($I_{скв}$), величина которого определяется наличием в диэлектрике свободных носителей заряда. Снижающаяся со временем часть тока (рис. 1.2) называется током абсорбции ($I_{абс}$), обусловленным наличием в диэлектрике замедленных видов поляризации. Этот ток также условно показан на рис. 1.1.

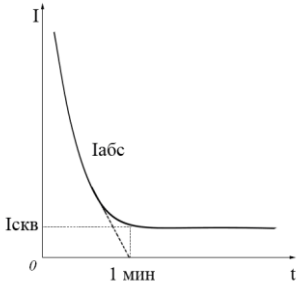



Рис. 1.2. Зависимость тока в диэлектрике от времени

Объемное сопротивление определяется по формуле

$$R_v = \frac{U}{I_{скв}}. \qquad (1.4)$$

Электропроводность диэлектриков определяется зарядом свободных носителей ($q$), их концентрацией ($n$), подвижностью ($\mu$) и чаще всего носит не электронный, а ионный характер. Это связано с тем, что ширина запрещенной зоны $\Delta E$ в диэлектриках велика и лишь ничтожное количество электронов может покидать свои атомы за счет теплового движения. Ионы же часто оказываются слабо связанными в узлах решетки (особенно примесные) и под действием тепловой энергии становятся свободными. Например, в кристалле $NaCl$ имеем $\Delta E = 6$ эВ и, несмотря на то, что $\mu$ иона < $\mu$ электрона, $\sigma$ ионная > $\sigma$ электронной за счет значительно большей концентрации свободных ионов.

Удельная электропроводность твердых диэлектриков увеличивается с ростом температуры по экспоненциальному закону:

$$\sigma = qn\mu = \sigma_o \exp\left(-\frac{W_0}{kT}\right), \qquad (1.5)$$

где $W_0$ – энергия активации ионной проводимости; $q$ – заряд; $n$ – концентрация; $\mu$ – подвижность ионов.

Дрейфовая подвижность ионов мала и их движение осуществляется путем перескока с ловушки на ловушку, которые разделены потенциальным барьером высотой $W_0$, соответствующим энергии активации ионов (так называемая прыжковая проводимость).

В качестве ловушек для ионов могут выступать различные дефекты структуры, например вакансии, характеризующиеся незавершенными химическими связями вследствие отсутствия атома на "положенном" месте в структуре. Вероятность таких перескоков под действием тепловой энергии прямо пропорциональна $\exp(W_0/kT)$ (рис. 1.3).

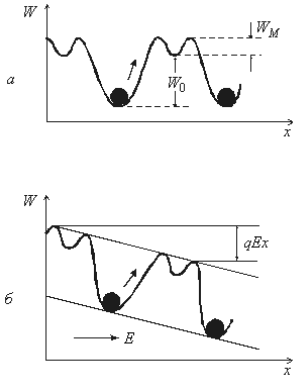



Рис. 1.3. Модель ионной проводимости твердых диэлектриков: *а* – без внешнего поля; *б* – понижение потенциального барьера $W_0$ на величину $qEx$ при наложении электрического поля напряженностью $E$ ($W_м$ – глубина междоузельной потенциальной ямы)

В широком диапазоне температур зависимость $ln\sigma = f(1/T)$ состоит из двух прямолинейных участков (рис. 1.4) с различными углами наклона к оси абсцисс. При температуре выше точки перегиба $A$ электропроводность определяется в основном собственными ионами (собственная электропроводность). Ниже перегиба, в низкотемпературной области, зависимость более пологая и определяется наличием в диэлектрике ионов примеси (примесная электропроводность). По углам

наклона участков прямых зависимости $ln\sigma = f(1/T)$ можно определить энергию активации носителей заряда и их природу.

Некоторые твердые диэлектрики, особенно в области высоких температур, обладают электронной или дырочной проводимостью (титаносодержащие керамические материалы). Однако носителями часто являются электроны не основного вещества, а атомов примесей.

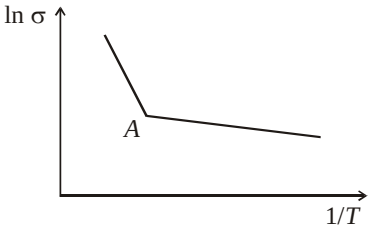



Рис. 1.4. Температурная зависимость электропроводности диэлектриков

Задачи

1.2.1. Капельки воды находятся во взвешенном состоянии в трансформаторном масле. Что с ними произойдет, если масло поместить в постоянное электрическое поле?

1.2.2. Назовите носители зарядов, создающих токи утечки в газовых, жидких и твердых диэлектриках. Каков механизм электропроводности твердых диэлектриков? Как влияет температура на их удельную проводимость? В каких случаях можно пренебречь поверхностной электропроводностью?

1.2.3. В каких единицах выражают удельное объемное и поверхностное сопротивления диэлектриков? Дайте определения этих физических величин. Почему их экспериментальное определение рекомендуют проводить при постоянном, а не при переменном напряжении, а также через 1 мин после подачи напряжения на диэлектрик?

1.2.4. Что делают с обкладками высоковольтного конденсатора после выключения приложенного к нему напряжения во избежание опасности для человека? Объясните, какие процессы в диэлектрике создают эту опасность.

1.2.5. Почему в диэлектриках не обнаруживается эффект Холла?

1.2.6. Как объяснить, что неполярные диэлектрики обладают гидрофобными свойствами?

1.2.7. При каких условиях для электроизоляционных материалов соблюдается закон Ома?

1.2.8. Почему диэлектрические свойства газа не характеризуют значением удельного электрического сопротивления?

1.2.9. Почему диэлектрики не используют в качестве датчиков температуры, несмотря на сильную зависимость их проводимости?

1.2.10. В каких условиях металлы являются электроизоляционными материалами?

1.2.11. Изобразите (качественно) температурные зависимости удельной проводимости твердых ионных диэлектриков в координатах $ln\gamma=f(1/T)$ при различном содержании примесей.

1.2.12. Объясните, почему полимеры с повышенной диэлектрической проницаемостью имеют, как правило, пониженное удельное сопротивление.

1.2.13. Удельное объемное сопротивление диэлектрика экспоненциально зависит от температуры: $\rho_v = Ae^{W/kT}$, где $W$ – энергия активации диэлектрика; $A$ и $k$ – постоянные. Определите температурный коэффициент удельного сопротивления диэлектрика.

1.2.14. Почему удельное поверхностное сопротивление ионных и полярных диэлектриков существенно зависит от влажности окружающей среды?

1.2.15. Две противоположные грани куба с ребром $a$ =10 мм из диэлектрического материала с удельным объемным сопротивлением $\rho_v = 10^{10}$ *Ом·м* и удельным поверхностным сопротивлением $\rho_s = 10^{11}$ Ом покрыты металлическими электродами. Определите ток, протекающий через эти грани куба при постоянном напряжении $U_0$=2 кВ.

1.2.16. Сопротивление изоляции двухжильного кабеля длиной 2 м равно 300 МОм. Чему равно сопротивление изоляции такого же кабеля длиной 6 м?

1.2.17. Цилиндрический стержень диаметром 10 мм и длиной 20 мм из диэлектрика с удельным объемным сопротивлением $10^{13}$ Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением $10^{14}$ Ом покрыт с торцов металлическими электродами. Чему равно сопротивление между электродами?

1.2.18. Пленочный конденсатор из поликарбоната с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon$=3 теряет за время 30 мин половину сообщенного ему заряда. Полагая, что утечка заряда происходит только через пленку диэлектрика, определите его удельное сопротивление.

1.2.19. Диэлектрик в форме прямоугольного параллелепипеда длиной $l$=5 см и площадью поперечного сечения $b{\cdot}h$=2·0,5 см$^2$ с торцов покрыт металлическими электродами. При напряжении $U_0$=1500 В через диэлектрик проходит ток $I_0=10^{-9}$ А. Найдите удельное сопротив-

ление диэлектрика, если его удельное объемное сопротивление $\rho_v = 10^{10}$ Ом·м

1.2.20. На поверхности диэлектрика параллельно друг другу расположены два плоских электрода. Расстояние между электродами $b$=2 мм, их ширина $h$=10 мм. Чему равно удельное поверхностное сопротивление диэлектрика, если сопротивление между электродами 5 МОм?

1.2.21. Между плоскими электродами площадью $S=2\cdot10^{-4}$ м$^2$ размещены соединенные последовательно две пластины из различных диэлектрических материалов. Один из них имеет: диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_1$=2; удельную проводимость $\gamma_1=10^{-6}$ Ом$^{-1}$·м$^{-1}$; толщину $h_1$= 1 см; другой имеет: $\varepsilon_2$=3; $\gamma_2=10^{-10}$ Ом$^{-1}$·м$^{-1}$; $h_2$= 2 см. В момент времени $t$=0 к электродам подключено постоянное напряжение $U$=5 кВ. Определите напряженность электрического поля в обоих диэлектриках в моменты времени $t=0$ и $t\to\infty$. Найдите напряженность электрического поля в этих диэлектриках при $t\to\infty$, если к электродам приложено переменное напряжение $U$=20 В частотой $f$=50 МГц.

1.2.22. Площадь каждого электрода ионизационной камеры $S=100$ *см*$^2$, расстояние между электродами $l=6{,}2$ см. Какой ток установить между электродами при напряжении $U=20$ В, если известно, что ионизатор ежесекундно образует в 1 см$^3$ газа $N=10^9$ одновалентных ионов каждого знака? Подвижность положительных и отрицательных ионов $\mu_+=\mu_-=10^{-4}$ м$^2$/(В·с) , коэффициент рекомбинации $\nu=10^{-12}$ м$^3$/с. Какую долю тока насыщения составляет найденный ток?

1.2.23. Какой состав неорганического стекла характеризуется минимальным значением удельного объемного сопротивления: а) 100 % $SiO_2$; б) 90 % $SiO_2$ + 10 % $K_2O$; в) 90 % $SiO_2$ + 5 % $Na_2O$ + 5 % $K_2O$; г) 90 % $SiO_2$ + 10 % $Na_2O$?

1.2.24. Кубик из диэлектрика с ребром 0,06 м имеет удельное объемное сопротивление $10^{12}$ Ом·м и удельное поверхностное сопротивление $5\cdot10^{12}$ Ом. На противоположной грани кубика нанесены электроды, к которым приложено напряжение частотой 1 МГц. Определите модуль комплексной проводимости кубика на этой частоте, если его диэлектрическая проницаемость ε=60.

1.2.25. При изменении температуры от 60 до 127 ºС удельное сопротивление радиофарфора уменьшается от $\rho_1=10^{13}$ Ом·м до $\rho_2=10^{11}$ Ом·м. Определите температурный коэффициент удельного сопротивления $\alpha_\rho$ радиофарфора, считая его постоянным в рассматриваемом диапазоне температур. При этом же допущении найдите удельное сопротивление материала при комнатной температуре.

1.2.26. На рис.1.5 изображена температурная зависимость удельной проводимости кристаллического диэлектрика, имеющего примесь с концентрацией $N_{пр1}$. Определить: а) энергию ионизации примесных атомов; б) энергию образования собственных дефектов в этом диэлектрике.

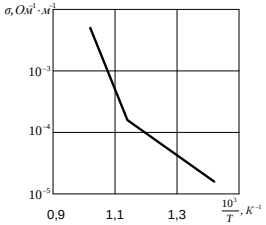



Рис 1.5. К задаче 1.2.26

## 1.3. Поляризация диэлектриков

Фундаментальное явление, определяющее возможность использования диэлектрика для создания емкости конденсаторов электронной аппаратуры, – это поляризация диэлектриков.

Электрическая поляризация при воздействии поля проявляется в ограниченном упругом смещении связанных зарядов, ориентации дипольных молекул, в результате чего некоторый объем или поверхность диэлектрика приобретает электрический момент. После снятия электрического поля связанные заряды возвращаются в первоначальное состояние.

Для сравнения диэлектриков, имеющих различную степень поляризации, пользуются понятием относительной диэлектрической проницаемости ε. Эта величина представляет собой отношение заряда $Q$ конденсатора с конкретным диэлектриком к заряду $Q_0$ конденсатора тех же размеров и при том же напряжении, между обкладками которого находится вакуум:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0}. \qquad (1.6)$$

ε – величина безразмерная и всегда больше единицы, поскольку реальные диэлектрики, в отличие от вакуума, всегда содержат электрические заряды.

Диэлектрики делятся на два класса: полярные и неполярные. У молекул неполярных веществ центры тяжести суммарных положительных и отрицательных зарядов совпадают. Молекулы полярных материалов имеют вид электрических диполей, способных ориентироваться в электрическом поле.Все виды поляризации делятся на две

группы: мгновеннные и релаксационные. Мгновенная поляризация (электронная, ионная) происходит практически без потерь энергии. Замедленная поляризация (электронно-, ионно-, дипольно-релаксационная, структурная, спонтанная) сопровождается потерями электрической энергии.

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Время установления электронной поляризации ничтожно мало (около $10^{-15}$ с), процесс происходит практически без потерь энергии. Электронная поляризация наблюдается у всех диэлектриков без исключения, поскольку у всех диэлектриков имеются электроны, находящиеся в связанном состоянии.

Ионная поляризация характерна для твердых диэлектриков с ионным строением (слюда, корунд, каменная соль) и проявляется в упругом смещении связанных ионов под действием электрического поля. При этом смещение ионов происходит на расстояния, меньшие постоянной кристаллической решетки (минимального расстояния между одинаковыми ионами). Время установления поляризации около $10^{-13}$ с, потерь энергии не происходит.

Электронно- и ионно-релаксационная поляризации сопровождаются диэлектрическими потерями. Электронно-релаксационная поляризация возникает вследствие возбуждения тепловой энергией избыточных (дефектных) электронов или дырок. Ионно-релаксационная поляризация характерна для материалов ионного строения с неплотной упаковкой ионов (например, в неорганических стеклах). При этом виде поляризации слабо связанные ионы под действием поля перемещаются на одно или несколько атомных расстояний и закрепляются в новом положении, что создает асимметрию распределения зарядов и, следовательно, электрический момент единицы объема. Время релаксации составляет $10^{-11} – 10^{-8}$ с.

Дипольно-релаксационная поляризация обычно наблюдается в полярных органических диэлектриках (полиметилметакрилат, поливинилхлорид и т.д.) и заключается в ориентации, повороте дипольных молекул, дипольных групп под действием электрического поля. Этот вид поляризации сопровождается потерями энергии. Чем ниже температура и крупнее диполи, тем больше время релаксации, изменяющееся в пределах $10^{-10} – 10^{-6}$ с.

Структурная (междуслойная, миграционная) поляризация обусловлена движением свободных зарядов (положительных и отрицательных ионов, электронов) и их закреплением на дефектах и поверхностях раздела различных компонентов электроизоляционного мате-

риала. Этот вид поляризации наблюдается в неоднородных диэлектриках (композиционные пластмассы, гетинаксы, текстолиты, керамика и т.д.), компоненты которых обладают разными электрическими свойствами. Время релаксации может достигать десятков минут, поляризация сопровождается диэлектрическими потерями.

Рассмотренные выше механизмы поляризации свойственны так называемым линейным диэлектрикам, зависимость заряда (поляризованности) которых от напряженности электрического поля является линейной функцией, а величина ε от поля не зависит. Особую группу диэлектриков, называемых нелинейными или активными, составляют сегнетоэлектрики, которые обладают самопроизвольной или спонтанной поляризацией.

При температуре, характерной для материала и называемой точкой Кюри, отдельные элементарные ячейки кристалла сегнетоэлектрика приобретают дипольный электрический момент за счет смещения катиона к аниону, т. е. создания несимметричного распределения разноименных зарядов. Совокупность соседних элементарных ячеек представляет собой область с разделенными положительным и отрицательным зарядами, т. е. обладающую внутренним дипольным электрическим моментом. Такие области имеют размер ~ 0,1–1 мм$^3$ и называются доменами. Таким образом, при определенных условиях материал оказывается спонтанно (самопроизвольно) поляризованным.

До воздействия внешнего электрического поля направления дипольных моментов отдельных доменных областей хаотичны и их сумма равна нулю, поэтому сегнетоэлектрик в целом нейтрален, неполяризован. Под действием внешнего электрического поля в сегнетоэлектрике происходят процессы смещения границ доменов, ориентации векторов электрических моментов доменов преимущественно в направлении внешнего поля, т. е. усиливается поляризованность. Зависимость заряда (поляризованности) сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля имеет нелинейный характер, и в переменном поле представляет собой петлю диэлектрического гистерезиса. Поэтому при спонтанной поляризации и относительная диэлектрическая проницаемость материала нелинейно зависит от напряженности поля (рис. 1.5).

Спонтанная поляризация находит широкое применение в радиоэлектронике. Благодаря форме петли гистерезиса (два устойчивых состояния +1 и -1), сегнетоэлектрики можно применять в запоминающих устройствах ЭВМ. Основное требование в этом случае – наличие как можно более прямоугольной петли гистерезиса. Существование в сегнетоэлектриках зависимости ε от напряженности электрического

поля (рис. 1.6) приводит к аналогичной зависимости емкости сегнетоэлектрических конденсаторов от напряжения.

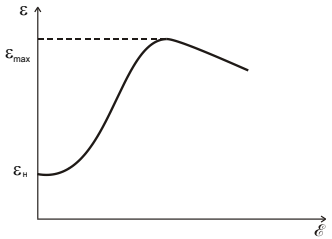



Рис. 1.6. Зависимость ε сегнетоэлектрика
от напряженности электрического поля

Такие конденсаторы называют варикондами и применяют в устройствах стабилизации частоты. Наличие доменной структуры и диэлектрического гистерезиса приводит к аномально высоким значениям ε в сегнетоэлектриках. Это делает возможным создание малогабаритных конденсаторов большой удельной емкости. Зависимость ε сегнетоэлектриков от температуры (рис. 1.7) позволяет использовать их в качестве датчиков температуры.

Спонтанная поляризация сопровождается диэлектрическими потерями, при этом площадь петли диэлектрического гистерезиса пропорциональна мощности потерь. Поэтому практическое применение сегнетоэлектриков возможно только в диапазоне низких частот и в ограниченном интервале температур.

Характер зависимости ε(*T*) конкретного диэлектрика обусловлен преобладающим видом поляризации. У неполярных материалов (полиэтилен, парафин) ε с ростом температуры снижается из-за уменьшения плотности и соответственно концентрации объектов поляризации (рис. 1.7, кривая *1*).

Зависимость ε полярных диэлектриков (с доминирующей дипольно-релаксационной поляризацией) от температуры имеет максимум при определенной температуре $T_1$ (рис. 1.7, кривая *2*). При увеличении температуры до $T_1$ диэлектрическая проницаемость ε увеличивается за счет уменьшения вязкости и облегчения ориентации диполей; далее, при $T > T_1$ (определенной для каждого диэлектрика), ε уменьшается, так как тепловое движение нарушает ориентацию диполя в направлении поля. У большинства неорганических стеклообразных и кристаллических материалов ионного строения ε увеличивается с рос-

том температуры, а у некоторых уменьшается (рис. 1.7, кривые *3*). Это объясняется наличием у таких диэлектриков как электронной (снижение ε с ростом *T*), так и ионной поляризации. Вследствие уменьшения связи между ионами ε при ионной поляризации с ростом температуры увеличивается.

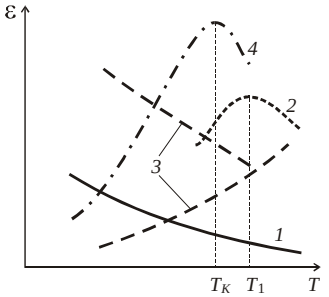



Рис. 1.7. Зависимость ε от температуры для диэлектриков с электронной (*1*), дипольно-релаксационной (*2*), ионной и ионно-релаксационной (*3*) и спонтанной (*4*) поляризацией

При повышении температуры до точки Кюри ($T_K$ на рис. 1.7, кривая *4*) ε сегнетоэлектриков увеличивается вследствие облегчения поляризации доменов, а выше точки Кюри уменьшается из-за того, что нарушается доменное строение.

Относительная диэлектрическая проницаемость ε неполярных диэлектриков не зависит от частоты электрического поля, как показано на рис. 1.8 (кривая *1*), так как им свойственна только мгновенная поляризация, время релаксации которой мало по сравнению с полупериодом действия напряжения. В полярных материалах с дипольно-релаксационной или ионно-релаксационной поляризацией величина ε до определенной частоты $f'$ не меняется (рис. 1.8, кривая *2*). Когда поляризация не будет успевать полностью устанавливаться за один полупериод действия напряжения ($f'$ – величина, обратная времени релаксации), ε будет снижаться, приближаясь к значению, обусловленному всегда имеющейся электронной поляризацией. Некоторые полярные полимеры имеют ступенчатую зависимость ε($f$), аналогичную кривой *3* на рис. 1.8, обусловленную наличием набора разных релаксаторов (диполей; групп, сегментов атомов или ионов материала) с соответствующими характеристическими частотами "выбывания" $f_1$, $f_2$ и временами релаксации поляризационных процессов.

Зависимость характеристической частоты $f_x$ от ряда факторов описывается следующим соотношением:

$$f_x = \frac{kT}{8\pi^2 \eta r^3}, \qquad (1.7)$$

где $k$ – постоянная Больцмана, $T$ – температура, η – вязкость среды, $r$ – радиус поляризующегося элемента (макромолекулы, диполя и т.п.).

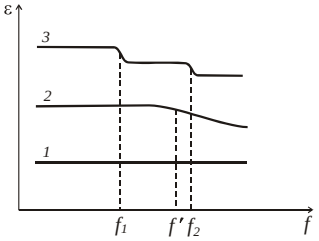



Рис. 1.8. Частотная зависимость ε диэлектриков с мгновенной (*1*) и релаксационными (*2*, *3*) видами поляризации

Применительно к диполям, т.е. полярным молекулам, $f_x$ соответствует максимальной частоте внешнего электромагнитного поля, которую они способны воспроизвести своими поворотами в нем. За счет таких поворотов (ориентации) достигается максимально возможная компенсация внешнего поля собственным электрическим полем диэлектрика. Важно, что полярные молекулы одинаковых размеров, пребывая в средах с разной вязкостью, обладают неодинаковой характеристической частотой. Поскольку емкость любого конденсатора пропорциональна величине ε, зависимости $C(T)$ и $C(f)$ полностью определяются зависимостями $\varepsilon(T)$ и $\varepsilon(f)$ конкретного диэлектрика.

Задачи

1.3.1. Какое явление называют поляризацией диэлектриков? Какие виды поляризации можно считать мгновенными, а какие замедленными?

1.3.2. В чем различие между ионной и ионно-релаксационной поляризациями? Что характеризует время релаксации и от каких факторов оно зависят?

1.3.3. Какая электрическая упорядоченность свойственна сегнетоэлектрикам? Как объяснить явление диэлектрического гистерезиса и нелинейность зависимости заряда от напряжения у сегнетоэлектриков?

1.3.4. Какую температуру называют сегнетоэлектрической точкой Кюри? Как ее можно определить экспериментально?

1.3.5. Что такое начальная, реверсивная и эффективная диэлектрическая проницаемости? Можно ли их определить, если известна основная кривая поляризации сегнетоэлектрика?

1.3.6. Что такое пироэлектрический эффект? Как его можно охарактеризовать количественно? Где применяют пироэлектрики?

1.3.7. Какова природа электретного состояния в диэлектриках? Что такое гомо- и гетерозаряд? Приведите типичные временные зависимости заряда электретов на различных диэлектриках. Как влияет напряженность поля поляризации на характер этих зависимостей?

1.3.8. Что такое прямой и обратный пьезоэффекты? В каких диэлектриках можно наблюдать это явление? Приведите примеры практического использования пьезоэффекта.

1.3.9. От каких факторов зависит резонансная частота кварцевых пьезорезонаторов? Какое практическое применение находят кварцевые пьезоэлементы высокой добротности?

1.3.10. Какова диэлектрическая проницаемость кварца на частоте рентгеновского излучения?

1.3.11. Что понимают под линейными и нелинейными, полярными и неполярными диэлектриками? Какие из перечисленных видов диэлектриков могут быть использованы на высоких частотах?

1.3.12. Дайте определения смолы, пластмассы, лака и компаунда. Приведите примеры использования этих веществ при изготовлении радиоэлектронной аппаратуры.

1.3.13. Назовите основные преимущества эпоксидных компаундов. Каков механизм их отверждения?

1.3.14. Какими специфическими свойствами должны обладать электроизоляционные материалы, применяемые в радиоэлектронной аппаратуре, предназначенной для эксплуатации в тропических условиях?

1.3.15. Почему применение корпусов и покрытий из органических электроизоляционных материалов обеспечивает лишь временную влагозащиту изделий электронной техники? Как обеспечить длительную влагозащиту?

1.3.16. Почему для изоляции обмоточных проводов трансформаторов и электродвигателей используют термореактивные, а не термопластичные лаки?

1.3.17. С какой целью производят пропитку пористых диэлектриков? Можно ли использовать для пропитки твердые диэлектрики? Какими свойствами должны обладать твердые пропитывающие вещества?

1.3.18. Какие требования предъявляют к связующему диэлектрику стеклотекстолита?

1.3.19. Какими способами и для каких целей производят изделия из композиционных пластмасс?

1.3.20. Приведите примеры установочных высокочастотных керамических диэлектриков. Назовите наиболее характерные области их применения.

1.3.21. Как и почему изменится напряжение поверхностного пробоя, если керамический изолятор поместить в трансформаторное масло?

1.3.22. На каких принципах основано создание термостабильной конденсаторной керамики?

1.3.23. Что понимают под температурой стеклования и температурой текучести стекломассы? При какой температуре производят формовку изделий? Каким образом управляют технологическими характеристиками стекломассы?

1.3.24. Каким образом изготовляют тонкие стеклянные волокна? Какие стекла используют для производства стекловолокна?

1.3.25. Укажите, какие требования предъявляются к диэлектрическим материалам, применяемым в высокочастотных конденсаторах. Какие из перечисленных материалов могут быть использованы для этих целей: кварцевое стекло, поливинилхлорид, сегнетокерамика, слюда, полистирол, лавсан, политетрафторэтилен, цельзиановая керамика?

1.3.26. Нормально к вектору напряженности однородного электрического поля $E_0$=100 В/м расположена пластина изотропного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon$=2. Определите: а)напряженность поля $E$ и электрическое смещение (электрическую индукцию) $D$ внутри пластины; б) поляризованность диэлектрика $P$ и поверхностную плотность связанных зарядов $\sigma$.

1.3.27. Вычислите поляризованность монокристалла каменной соли, считая, что смещение ионов под действием электрического поля от положения равновесия составляет 1 % расстояния между ближайшими соседними ионами. Элементарная ячейка кристалла имеет форму куба, расстояние между соседними ионами $a$=0,28 нм.

1.3.28. При тех же условиях, что и в предыдущей задаче, определите напряженность электрического поля, воздействующего на монокристалл каменной соли, если ее диэлектрическая проницаемость ε=5,65. Вычислите коэффициент упругой связи ионов $k_{упр}$ в кристалле, полагая, что напряженность внутреннего электрического поля равна напряженности внешнего поля.

1.3.29. Между пластинами плоского конденсатора без воздушных промежутков зажат лист гетинакса толщиной $h$=1 мм. На конден-

сатор подано напряжение $U$=200 В. Определите поверхностную плотность заряда на пластинах конденсатора $\sigma_1$ и на диэлектрике $\sigma_д$. Диэлектрическую проницаемость принять равной шести.

1.3.30. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1$, в котором во взвешенном состоянии находится шар из твердого диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_2$. Изобразите картину силовых линий электрического поля в конденсаторе для двух случаев: а) $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$, б) $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$.

1.3.31. При напряжении 2 кВ плоский конденсатор , изготовленный из высокочастотного диэлектрика, имеет заряд $3{,}5 \cdot 10^{-8}$Кл. При этом же напряжении и при повышении температуры на 100 К заряд возрастает на 1 %. Определите диэлектрическую проницаемость материала и температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, если толщина диэлектрика между пластинами $S$= 5 см$^2$. Какой вывод можно сделать о наиболее вероятном механизме поляризации данного диэлектрика?

1.3.32. Диэлектрическая проницаемость воздуха при 300 К и нормальном атмосферном давлении $\varepsilon$=1,00058. На сколько изменится ее значение, если давление воздуха увеличить в 20 раз?

1.3.33. Диэлектрическая проницаемость газа при давлении $10^5$ Па и температурах 273 и 450 К равна соответственно 1,0067 и 1,0060. Определите: а) температурный коэффициент диэлектрической проницаемости газа; б) диэлектрическую проницаемость этого газа при температуре 273 К и давлении $5 \cdot 10^4$ Па. Оцените концентрацию молекул газа при этих условиях.

1.3.34. Диэлектрическая проницаемость ε кристаллического кварца на частоте 1 МГц равна 4,5, а показатель преломления света в видимой области спектра $n$=1,55. Можно ли данный диэлектрик отнести к группе неполярных веществ?

## 1.4. Диэлектрические потери

Удельными диэлектрическими потерями называется энергия, рассеиваемая в виде тепла в единице объема и в единицу времени в диэлектрике, находящемся в электрическом поле, и вызывающая его нагрев. При постоянном поле потери обусловливаются током сквозной проводимости – движением ионов, иногда – свободных электронов. Потери на сквозную электропроводность присущи в большей или меньшей мере всем диэлектрикам без исключения. Величина потерь на сквозную электропроводность определяется удельным объемным со-

противлением $\rho_v$, а в твердых диэлектриках также и удельным поверхностным сопротивлением $\rho_s$.

При переменном поле различают следующие виды потерь: 1) потери на сквозную электропроводность; 2) поляризационные потери, обусловленные замедленной поляризацией; 3) ионизационные потери; 4) потери, обусловленные неоднородностью структуры. Для вывода выражения мощности потерь пользуются эквивалентной схемой диэлектрика, состоящей из последовательно или параллельно включенных активного сопротивления *R* и емкости *C*. Эквивалентная схема выбирается так, чтобы расходуемая активная мощность была равна мощности, рассеиваемой в диэлектрике конденсатора, а вектор тока был сдвинут относительно вектора напряжения на тот же угол, что и в рассматриваемом конденсаторе.

В идеальном вакуумном конденсаторе без потерь угол между векторами тока $\vec{I}_c$ и напряжения $\vec{U}_c$ равен $90^0$ (рис. 1.9,а). Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ и его функция tgδ (рис. 1.9,б). Тангенс угла диэлектрических потерь (tgδ) – параметр, учитывающий все виды потерь в диэлектрике и представляющий собой тангенс угла, дополняющего угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи до $90^0$. Тангенс угла диэлектрических потерь равен отношению

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{I_a}{I_c}, \qquad (1.8)$$

а мощность диэлектрических потерь в переменном электрическом поле равна

$$P_{\sim} = U^2 \omega C tg\delta, \qquad (1.9)$$

где *U* – приложенное напряжение; $\omega = 2\pi f$ – частота. Из выражения (1.8) следует, что диэлектрические потери существенно влияют на работу аппаратуры высокого напряжения, высокочастотной и, в особенности, одновременно высокочастотной и высоковольтной. Тангенс угла диэлектрических потерь зависит от состава и структуры диэлектриков, от агрегатного состояния, а также от условий эксплуатации.

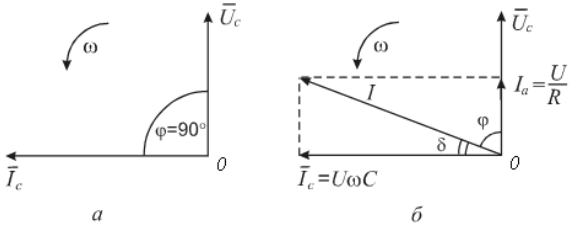



Рис. 1.9. Векторные диаграммы для конденсатора
с идеальным диэлектриком (*а*) и диэлектриком с потерями (*б*)

У чистых однородных неполярных диэлектриков диэлектрические потери малы и обусловлены только током сквозной проводимости; tgδ незначителен, порядка $10^{-4}$, с ростом частоты падает (рис. 1.10, кривая *1*), так как $I_a$ от частоты практически не зависит, а реактивный ток $I_c$ увеличивается. Для таких диэлектриков при повышении температуры tgδ возрастает за счет увеличения тока сквозной проводимости (рис. 1.11, кривая *1*).

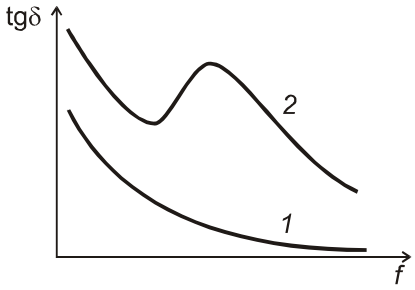



Рис. 1.10 Частотная зависимость tgδ для диэлектриков с потерями на сквозную электропроводность (1); с потерями на электропроводность и поляризационными потерями (2)

Полярные диэлектрики, у которых потери обусловлены как сквозной проводимостью (иногда значительной), так и релаксационными видами поляризации, имеют высокий tgδ ~ $10^{-2}$ – $10^{-1}$. Частотная и температурная зависимости tgδ таких диэлектриков имеют максимумы, показанные на рис. 1.10, кривая *2* и 1.11, кривая *2*. Появление максимума на зависимости tgδ(*f*) объясняется инерционностью диполей и дипольных групп, не успевающих ориентироваться по полю за полупериод его изменения. Общий характер частотной зависимости соот-

ветствует кривой *1*, рис. 1.10, т. е. потерям на сквозную электропроводность. При наличии нескольких релаксаторов появляется соответствующее число максимумов tgδ, аналогичных «ступенькам» на зависимости ε(*f*) рис. 1.8. Появление максимумов на температурной зависимости tgδ полярных диэлектриков объясняется тем, что по мере повышения температуры закрепленные диполи, получившие дополнительную энергию, получают большую свободу перемещения и ориентации по полю. При этом возрастает мощность диэлектрических потерь и tgδ. Начиная с определенной температуры, соответствующей максимуму tgδ на его температурной зависимости, энергия

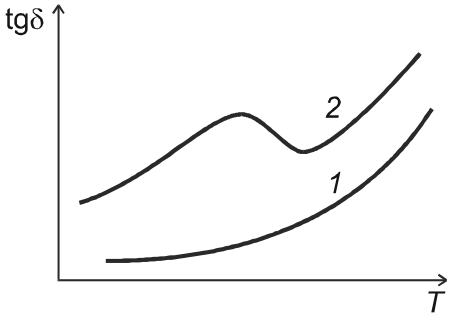



Рис. 1.11. Зависимость tgδ от температуры для неполярных (*1*) и полярных (*2*) диэлектриков

теплового движения становится выше энергии электрического поля, нарушается ориентация диполей, затрата энергии уменьшается и tgδ снижается. При высоких температурах tgδ полярных диэлектриков возрастает за счет роста тока сквозной проводимости.

У диэлектриков с газовыми включениями tgδ растет при увеличении напряжения вследствие ионизации газа. Поэтому пористые диэлектрики непригодны для высоковольтной аппаратуры. У гигроскопичных материалов tgδ имеет повышенное значение, так как вода является источником свободных ионов.

Величина tgδ для неоднородных и композиционных диэлектриков зависит от природы и распределения включений, от специальных наполнителей. Значения tgδ слоистых пластмасс могут изменяться в широких пределах в зависимости от количественных соотношений компонентов, достигая нескольких единиц.

Наименьшие потери имеют однородные диэлектрики плотной структуры с минимальным содержанием примесей, имеющие мгно-

венную поляризацию. К таким материалам относятся полистирол, полиэтилен, фторопласт-4, трансформаторное масло, слюда, высокочастотный стеатит и др. Особенно высокие требования предъявляются к диэлектрикам, применяемым на высоких частотах и в высоковольтной аппаратуре.

Задачи

1.4.1. В каких диэлектриках и при каких условиях существенную роль играют потери на ионизацию?

1.4.2. Установите взаимосвязь между видами поляризации и механизмом диэлектрических потерь.

1.4.3. Приведите пример диэлектрика, диэлектрические потери которого в некотором интервале температур уменьшаются при нагревании. Укажите механизм потерь в таком диэлектрике.

1.4.4. Как влияет температура на положение частотного максимума тангенса угла релаксационных потерь?

1.4.5. Можно ли частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и активной мощности рассчитывать по формулам для эквивалентных схем диэлектрика с потерями?

1.4.6. При комнатной температуре тангенс угла диэлектрических потерь ультрафарфора $\mathrm{tg}\delta=5\cdot10^{-4}$, а при повышении температуры до 100 ºС он возрастает в 2 раза. Чему равен $\mathrm{tg}\delta$ этого материала при температуре 200 ºС? Во сколько раз увеличится активная мощность, выделяющаяся в высокочастотном проходном изоляторе из этого материала, при изменении температуры от 20 до 200 ºС? Изменением диэлектрической проницаемости керамики пренебречь.

1.4.7. При определении активной мощности при тех же условиях, что и в предыдущей задаче, учтите температурные изменения диэлектрической проницаемости, считая $\alpha_\varepsilon=120\cdot10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$ .

1.4.8.. В дисковом керамическом конденсаторе емкостью $C$=100 пФ, включенном на переменное напряжение $U$=100 В частотой $f$=1 МГц, рассеивается мощность $P_a=10^{-3}$ Вт. Определите реактивную мощность, тангенс угла диэлектрических потерь и добротность конденсатора.

1.4.9. При тех же условиях, что и в предыдущей задаче, определите удельные потери в диэлектрике, если его диэлектрическая проницаемость $\varepsilon$ = 150 , электрическая прочность $E_{пр}$=10 МВ/м и запас по электрической прочности $K$=10.

1.4.10. При изменении параметров керамического конденсатора на частоте $f$=1 кГц получено: емкость $C$=1000 пФ; $tg\delta=8\cdot10^{-3}$. Определите эквивалентное последовательное ($r_s$) и эквивалентное параллельное ($R_p$) сопротивление на этой частоте.

1.4.11. Активная мощность рассеяния $P_{a1}$ в кабеле с изоляцией из полиэтилена при напряжении $U$=20 В частотой 1 МГц равна 200 мкВт. Чему равна активная мощность рассеяния $P_{a2}$ в этом же кабеле при напряжении 10 В частотой 2 МГц? Считать, что потери в полиэтилене обусловлены только сквозной электропроводностью.

1.4.12. Определите коэффициент потерь неполярного диэлектрика на частоте 1 МГц, если удельное сопротивление материала равно $10^{15}$ Ом·м.

1.4.13. При изменении сопротивления изоляции керамического конденсатора емкостью 100 пФ получили $R_{из}=2\cdot10^{11}$ Ом; при изменении на частоте $f$=1 МГц получили $tg\delta=7\cdot10^{-4}$ . Рассчитайте эквивалентное параллельное сопротивление $R_p$ на частоте 1 МГц и сравните его со значением сопротивления изоляции. Какие выводы можно сделать о механизме диэлектрических потерь в керамическом материале этого конденсатора?

1.4.14. Рассчитайте активную мощность потерь при постоянном напряжении $U_0$=100 В для конденсатора на основе пленки полиэтилентерефталата емкостью $C$= 1 мкФ. Постоянная времени этого конденсатора $\tau_c$=10 000 МОм·мкФ. Какой ток будет протекать по выводам этого конденсатора, если его включить в сеть с напряжением 220 В и частотой 50 Гц?

1.4.15. Тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) неполярного диэлектрика на частоте 50 Гц равен $10^{-3}$. Вычислите активную мощность рассеяния $P_a$ в конденсаторе из этого диэлектрика на частоте $f$=1 кГц при напряжении 1 кВ, если емкость конденсатора $C$ равна 1000 пФ.

1.4.16. Получите выражение для комплексной диэлектрической проницаемости полиэтилена ($\varepsilon$=2,2; $tg\delta=10^{-4}$ ). Чему равна диэлектрическая восприимчивость $\chi$ полиэтилена?

1.4.17. Чему равна активная мощность рассеяния в кабеле с сопротивлением изоляции 20 МОм при постоянном напряжении 20 В?

1.4.18. Вычислите на частоте 50 Гц тангенс угла диэлектрических потерь хорошо очищенного трансформаторного масла, удельное объемное сопротивление которого равно $10^{12}$ Ом·м и диэлектрическая проницаемость $\varepsilon$=2,2.

1.4.19. Определите удельные диэлектрические потери в плоском конденсаторе, изготовленном из пленки полистирола толщиной 20 мкм, если на конденсатор подано напряжение 2 В частотой 2 МГц (для полистирола $\varepsilon$=2,5 $tg\delta=2\cdot10^{-4}$).

1.4.20. Полиэтиленовая изоляция характеризуется следующими значениями электрических параметров: $\varepsilon$=2,3; $\rho_v = 10^{15}$ Ом·м

$tg\delta$=3·10$^{-4}$ (на частоте $f$=1 МГц). Объясните, можно ли частотные изменения tgδ и активной мощности рассеяния $P_a$ описать, используя параллельную эквивалентную схему диэлектрика.

1.4.21. Изобразите (качественно) температурную частотную зависимость емкости и эквивалентную схему с учетом всех видов поляризации и диэлектрических потерь: для слюдяного конденсатора; полистирольного конденсатора; сегнетокерамического конденсатора; конденсатора на основе неорганического стекла; конденсатора на основе рутиловой керамики. Постройте (качественно) температурную зависимость температурного коэффициента емкости для этих конденсаторов. Конденсаторы используются в диапазоне температур 5-85 ºС на частотах до 100 кГц.

1.4.22. Между латунными электродами площадью S помещена керамическая пластина толщиной $h$=5 мм, имеющая диэлектрическую проницаемость $\varepsilon$=7, тангенс угла диэлектрических потерь при комнатной температуре $tg\delta_0$=2·10$^{-4}$, температурный коэффициент $\alpha_{tg\delta}$=5·10$^{-3}$ К$^{-1}$. Определите допустимое напряжение $U$ между электродами на рабочей частоте $f$=50 МГц, если температура, до которой нагревается пластина в электрическом поле, не превышает $T$=373 К. При расчете полагать что суммарный коэффициент теплопередачи от диэлектрика во внешнюю среду $\sigma$=30 Вт/(м$^2$·К), а температура окружающей среды $T_o$=293 К.

1.4.23. Объясните, почему при пластификации поливинилхлорида органическими полярными жидкостями максимум релаксационных потерь на температурной зависимости tg δ смещается в область более низких температур.

1.4.24. Какой состав неорганического стекла характеризуется максимальным значением tg δ: а) 100 %$SiO_2$; б)90 % $SiO_2$+5 % $Na_2O$ + 5 % $K_2O$; в) 90 % $SiO_2$+10 % $Na_2O$; г) 85 % $SiO_2$+10 % $Na_2O$+5 % BaO?

1.4.25. При увеличении переменного напряжения от 10 до 11 кВ ионизационные потери в высоковольтном керамическом конденсаторе возрастают в 8 раз. Определите напряжение начала ионизации газовых включений в керамике.

## 1.5. Пробой диэлектриков

Надежность и долговечность электрической изоляции проводов, диэлектрика конденсатора и других деталей радиоэлектронной аппаратуры зависят от электрической прочности диэлектрика. Пробоем называется потеря диэлектриком изолирующих свойств в канале, образующемся между электродами, под действием электрического

поля. Напряжение, при котором происходит пробой, называется пробивным напряжением ($U_{пр}$).

Электрическую прочность диэлектрика $E_{пр}$ в однородном электрическом поле определяют величиной пробивного напряжения $U_{пр}$, отнесенной к толщине диэлектрика $d$ (расстоянию между электродами):

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d}, \text{ В/м.} \qquad (1.10)$$

Допускаются производные единицы измерения: МВ/м, кВ/мм, кВ/см.

В случае неоднородного поля под $E_{пр}$ подразумевают среднее значение пробивной напряженности. Величина $E_{пр}$ характеризует способность диэлектрика противостоять разрушающему действию электрического поля.

Явление пробоя связано с нарушением химических связей между молекулами (атомами), ионизацией атомов вещества лавинообразно нарастающим под действием ударной ионизации потоком электронов. Электрическая прочность материала определяется длиной свободного пробега электронов, т. е. плотностью вещества и его агрегатным состоянием.

В *твердых* диэлектриках различают три основных вида пробоя: электрический, электротепловой и электрохимический. Возникновение того или иного вида пробоя в диэлектрике зависит от его свойств, формы электродов, условий эксплуатации.

Электрический пробой твердых диэлектриков сводится к нарушению упругих связей в молекулах под действием электронной лавины и по своей природе является чисто электронным процессом. Электрический пробой, в отличие от электротеплового, возникает при условии хорошего теплоотвода и отсутствия краевого разряда, искажающего поле. В этих условиях значения электрической прочности диэлектриков высоки и могут составлять ~$10^3$ МВ/м. Электрический пробой протекает очень быстро ($10^{-8}$ – $10^{-7}$ с), электрическая прочность большинства однородных материалов в однородном поле не зависит от толщины, температуры и времени действия напряжения. Величина $E_{пр}$ неоднородных диэлектриков заметно уменьшается с увеличением площади электродов и толщины диэлектрика из-за повышения вероятности попадания слабых мест в направлении электрического поля.

На практике часто до наступления электрического пробоя при более низком напряжении происходит электротепловой пробой, вызванный тем, что количество теплоты, выделяющейся в диэлектрике за счет сквозной проводимости и диэлектрических потерь, превышает

количество теплоты, которое может рассеиваться. При этом нарушается тепловое равновесие и процесс приобретает лавинообразный характер, материал разогревается до температур, соответствующих расплавлению и обугливанию. Для теплового пробоя характерно уменьшение электрической прочности с ростом температуры, а также частоты электрического поля вследствие роста мощности диэлектрических потерь [соотношение(1.9)]. Напряжение электротеплового пробоя определяют по формуле

$$U_{\text{пр}} = K\sqrt{\frac{\sigma h\left(t - t_0\right)}{f\varepsilon tg\,\delta}}, \qquad (1.11)$$

Где $K$ – числовой коэффициент, равный $1{,}15\cdot10^5$ , если все величины выражены в единицах СИ; $\sigma$ - коэффициент теплопередачи системы диэлектрик – металл электродов; $h$ – толщина диэлектрика; $f$ – частота; $\varepsilon$ - относительная диэлектрическая проницаемость материала; $tg\,\delta$ - тангенс угла потерь диэлектрика при температуре окружающей среды, равной $t_0$ ; $t$ - температура нагретого за счет диэлектрических потерь материала.

Пробивное напряжение с увеличением длительности действия приложенного напряжения уменьшается из-за дополнительного разогрева диэлектрика, а также химического старения и других явлений. При кратковременном приложении напряжения (например, импульсного) вероятность теплового пробоя мала даже при сравнительно большой проводимости, так как образец не успевает прогреться.

Электрическая прочность при тепловом пробое уменьшается с ростом толщины диэлектрика вследствие увеличения его неоднородности и ухудшения теплоотдачи.

В диэлектриках, длительно находящихся в электрическом поле, может происходить электрохимический пробой вследствие электролиза, ионизации газовых включений и т.д. Эти процессы приводят к химическому старению диэлектрика. Конечной стадией электрохимического пробоя чаще всего является тепловой пробой.

Наибольшей электрической прочностью обладают твердые диэлектрики, однородные по структуре, имеющие низкую электрическую проводимость, повышенные теплопроводность и нагревостойкость (пленочные фторопласт-4, полиэтилен, лавсан, слюда и т.д.). Величина $E_{\text{пр}}$ таких материалов достигает 100 – 300 МВ/м.

Пробой *жидких* диэлектриков в основном обусловлен количеством и природой примесей, содержащихся в них. Пробой жидкостей, содержащих газовые включения, объясняется локальным перегревом жидкости за счет энергии, выделяющейся в легкоионизирующихся

пузырьках. Вскипание жидкости приводит к образованию газового канала между электродами, в котором и развивается пробой. Частицы твердых примесей также понижают $E_{пр}$ жидких диэлектриков вследствие возможности поляризации в поле и создания проводящих “мостиков”, полностью или частично соединяющих электроды.

Большое внимание уделяется очистке гигроскопичных жидких диэлектриков от воды, снижающей $E_{пр}$. Неочищенное трансформаторное масло, например, имеет $E_{пр}$ = 4 МВ/м, после тщательной очистки электрическая прочность масла повышается до 20 – 25 МВ/м.

*Газообразные* диэлектрики широко применяются в газонаполненных и вакуумных конденсаторах. Воздух является хорошим изолятором, но только в слабых полях. Электрическая прочность газообразных диэлектриков не превышает 2 – 3 МВ/м. Процесс пробоя обусловлен лавинным умножением электронов под действием ударной ионизации и фотоионизации.

Число электронов, образующихся в течение 1 с в 1 см$^3$ воздуха под действием радиоактивности Земли или космических лучей, составляет от 10 до 20. Эти электроны являются начальными зарядами, приводящими к пробою в достаточно сильном поле.

При увеличении напряженности электрического поля $E$ электроны на длине свободного пробега $\lambda$ приобретают энергию $W=e\lambda E$, достаточную для ионизации молекул газа: $W \geq W_u$ ($W_И$ – энергия ионизации, $e$ – заряд электрона). В результате при столкновении с атомами и молекулами они порождают новые электроны. «Вторичные» электроны под действием поля в свою очередь вызывают ионизацию молекул газа. В результате этого процесса число электронов в газовом промежутке, лавинообразно нарастая, очень быстро увеличивается. Электроны распределяются в межэлектродном пространстве в виде компактного облачка, называемого *электронной лавиной*.

Известны два механизма пробоя газов: лавинный и лавинно-стримерный. *Стример* представляет собой скопление ионизированных частиц, сильно превосходящее лавину по степени ионизации.

При *лавинном* механизме ударная ионизация электронами сопровождается вторичными процессами на катоде, в результате которых заряды в газовом промежутке восполняются. Пробой газа сопровождается образованием серии лавин, причем каждая вновь образующаяся лавина по сравнению с предыдущей содержит большее число электронов – происходит «раскачивание» электронных лавин. Лавинный пробой, как правило, развивается в течение относительно длительного времени (более 1 мкс) и не характерен для импульсных напряжений.

При *лавинно*-стримерном механизме на развитие пробоя существенно влияет совместное действие поля пространственного заряда лавины и фотоионизации в объеме газа.

В некоторых случаях электрон, ускоренный электрическим полем, может не ионизировать молекулу, а привести ее в возбужденное состояние: электрон, находящийся внутри молекулы, переходит из равновесного состояния с меньшей энергией в состояние с более высокой энергией (на более удаленную от ядра орбиту). Такая возбужденная молекула в следующий момент отдает свою избыточную энергию в форме излучения – испускает фотон. Фотон поглощается какой-либо другой молекулой, которая при этом может ионизироваться. Такая внутренняя фотонная *ионизация* газа благодаря большой скорости распространения излучения приводит к быстрому развитию в разрядном промежутке каналов с повышенной концентрацией носителей заряда, которая достаточна для преобразования лавины в стример. После распространения стримеров (положительного, образованного ионами, и отрицательного, созданного электронами) на весь межэлектродный промежуток происходит пробой газа.

Электрическая прочность газов уменьшается с ростом расстояния между электродами, имеет немонотонную зависимость от давления с минимумом, соответствующим давлению, близкому к атмосферному.

Задачи

1.5.1. Какие механизмы пробоя твердых диэлектриков вам известны? Каковы условия проявления каждого из них? Почему значение пробивного напряжения не характеризует электрическую прочность диэлектрика?

1.5.2. Почему электрическая прочность твердых диэлектриков больше, чем жидких, а жидких – больше, чем газообразных?

1.5.3. Электрическая прочность непропитанной конденсаторной бумаги и конденсаторного масла соответственно равна 35 и 20 кВ/мм. После пропитки бумаги конденсаторным маслом ее электрическая прочность возрастает до 50 кВ/мм. Почему электрическая прочность пропитанной бумаги больше, чем электрические прочности непропитанной бумаги и пропитывающего диэлектрика?

1.5.4. Одинаково ли будет изменяться пробивное напряжение воздуха, если производить его нагревание: а) при постоянном давлении; б) при постоянном объеме?

1.5.5. Почему ударная ионизация молекул газа в сильном электрическом поле производится главным образом электронами, а не ионами?

1.5.6. Как влияет давление газа на его электрическую прочность и ионизационные потери?

1.5.7. Чем отличается пробой газа в однородном и неоднородном электрических полях? Каким образом в газе можно создать однородное поле? Почему при увеличении расстояния между электродами пробивное напряжение газа в однородном поле возрастает?

1.5.8. При расстоянии между электродами 0,1 мм электрическая прочность вакуума равна $10^8$ В/м. Каков при этом механизм пробоя вакуума? Как меняется электрическая прочность вакуума при увеличении расстояния между электродами?

1.5.9. По каким признакам можно выявить механизм пробоя твердых диэлектриков? Какой механизм пробоя характерен для диэлектриков при импульсном воздействии высокого напряжения?

1.5.10. Почему более толстые слои диэлектриков, как правило, имеют меньшую электрическую прочность?

1.5.11. Предполагая, что в диэлектрике доминируют потери на электропроводность, изобразите график зависимости напряжения теплового пробоя от температуры окружающей среды.

1.5.12. Изобразите графически зависимости напряжения пробоя воздуха от расстояния между электронами при постоянном давлении. Как изменится вид графика, если давление станет меньше первоначального? Дайте объяснение рассматриваемым закономерностям.

1.5.13. Изобразите графически зависимость напряжения пробоя газа от давления при различных расстояниях между электродами. Объясните закономерности в изменении хода кривых.

1.5.14. Как изменится энергия, приобретаемая свободным электроном в газе в однородном электрическом поле, если давление газа увеличить в два раза при одновременном уменьшении в два раза длины разрядного промежутка? Как изменится при этом средняя длина свободного пробега электрона? Внешнее напряжение, приложенное к газу, считать постоянным.

1.5.15. Пленка поливинилхлорида при электрическом пробое разрушается при напряжении 1,5 кВ. Определите толщину пленки, если ее электрическая прочность равна 50 МВ/м.

1.5.16. В изоляторе линии электропередачи при постоянном напряжении 25 кВ происходит поверхностный пробой. Объясните, можно ли использовать этот изолятор в линиях электропередачи промышленной частоты с действующим напряжением 220 кВ.

1.5.17. При каком максимальном напряжении может работать слюдяной конденсатор емкостью $C$=1000 пФ с площадью обкладок $S=6\cdot10^{-4}$м$^2$, если он должен иметь четырехкратный запас по электриче-

ской прочности? Диэлектрическая проницаемость слюды $\varepsilon$=7, ее электрическая прочность $E_{пр}$=100 МВ/м. Какова толщина $h$ слюдяной пластинки?

1.5.18. Определите запас по электрической прочности плоского конденсатора и толщину диэлектрика из неорганического стекла, если емкость конденсатора 68 пФ, площадь обкладки 10 см$^2$, а рабочее напряжение 10 кВ. Диэлектрическую проницаемость стекла принять равной 6,5, а его электрическую прочность равной $5 \cdot 10^7$ В/м.

1.5.19. В плоском конденсаторе емкостью $C$=39 пФ используется неорганическое стекло, имеющее диэлектрическую проницаемость $\varepsilon$=6 и электрическую прочность $E_{пр}$=100 МВ/м. Какими следует выбрать толщину диэлектрика $h$ и площадь обкладок $S$, если конденсатор должен работать при напряжении 16 кВ при четырехкратном запасе по электрической прочности? Возможность поверхностного пробоя при расчете не учитывать.

1.5.20. Известно, что при тепловом пробое в равномерном поле диэлектрик однородной структуры толщиной 2 мм, расположенный между электродами площадью 2 см$^2$, пробивается при напряжении 15 кВ. При каком напряжении пробьется этот диэлектрик, если его расположить между электродами площадью 3 см$^2$?

1.5.21. Известно, что при тепловом пробое диэлектрик толщиной 4 мм пробивается при напряжении 15 кВ на частоте 100 Гц. При каком напряжении промышленной частоты пробьется такой же диэлектрик толщиной 2 мм?

1.5.22. Известно, что диэлектрик толщиной 1 мм при тепловом пробое разрушается при напряжении 10 кВ. Рассчитайте и постройте для этого диэлектрика график зависимости пробивного напряжения от толщины (до толщины 5 мм).

1.5.23. Имеются две стеклянные пластины разной толщины ($h_1 \ll h_2$), для каждой из которых в однородном электрическом поле определены значения пробивного напряжения ($U_{пр1}$, $U_{пр2}$) и электрической прочности ($E_{пр1}$, $E_{пр2}$). Каким будет соотношение между значениями пробивного напряжения и электрической прочности этих двух пластин? Изобразите (качественно) зависимости пробивного напряжения и электрической прочности стекла от толщины.

1.5.24. Ответьте на вопросы, поставленные в предыдущей задаче, для случая двух листов картона разной толщины.

1.5.25. На обкладки конденсатора подали напряжение $U_1$=5 кВ. Между обкладками находится однородный материал с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1$=6. Затем его заменили материалом с другой диэлектрической проницаемостью, а к конденсатору приложили напряжение $U_1$=10 кВ. Напряженность электрического поля в диэлектри-

ке в обоих случаях одинакова, а расстояние между обкладками $h_2$ во втором случае равно 4 мм. Определите расстояние между обкладками и емкость конденсатора в первом случае, если размер обкладок 2·4 см.

1.5.26. Как и почему изменится пробивное напряжение воздуха при нормальном атмосферном давлении, если температуру повысить от 20 ºС до 100 ºС?

1.5.27. Определите минимальную скорость электрона, чтобы он мог ионизировать атом неона, если потенциал ионизации неона 21,5 В. Какое расстояние должен пройти электрон в поле напряженностью 3 МВ/м, чтобы приобрести эту скорость?

1.5.28. Средняя длина свободного пробега электрона в неоне составляет $7{,}9\cdot10^{-4}$ м при $T$=300 К и давлении $p$=133 Па. Определите минимальную напряженность электрического поля, при которой электрон на длине свободного пробега достигнет энергии ионизации неона. Начальную скорость электрона принять равной нулю. Потенциал ионизации неона 21,5 В.

1.5.29. В нормальных условиях ($p$=$10^5$ Па; $T$=20 ºС) электрическая прочность воздуха составляет 3,2 МВ/м. Как изменится электрическая прочность, если температура повысится до 100 ºС, а давление – до 0,2 МПа.

## 2. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 2.1. Классификация магнитных материалов

Все вещества в природе являются магнетиками, т.е. обладают определенными магнитными свойствами и определенным образом взаимодействуют с внешним магнитным полем. Магнитные свойства вещества зависят от магнитных свойств изолированных элементарных частиц, структуры атомов и молекул, а также их групп.

Магнитные свойства атома в основном определяются магнитными свойствами электронов. Магнетизм других частиц относительно мал. Так, магнитный момент атомного ядра приблизительно в тысячу раз меньше магнитного момента электронной оболочки атома. Магнитный момент электрона возникает вследствие движения электрона по орбите (орбитальный момент) и наличия у него спина (спиновый момент). Магнитный момент многоэлектронного атома представляет собой сумму магнитных моментов всех электронов, включая как орбитальные моменты, так и спиновые. Каждый электрон вносит в полный магнитный момент атома независимый векторный вклад.

В соответствии с современными представлениями о магнетизме различают следующие основные типы магнитного состояния вещества: диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм (нескомпенсированный антиферромагнетизм). Вещества, в которых проявляются эти явления, соответственно называются: *диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.* Схематическое расположение моментов электронов атомов, для разных по магнитным свойствам веществ иллюстрируется на рис. 2.1.

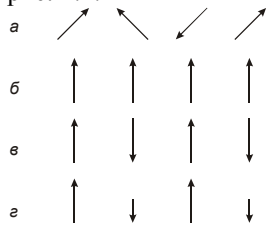



Рис. 2.1. Схематическое расположение спинов в парамагнитных (*а*), ферромагнитных (*б*), антиферромагнитных (*в*) и ферримагнитных (*г*) веществах. Диамагнетикам свойственна полная взаимная компенсация магнитных моментов атомов

Основными магнитными величинами являются: намагниченность *M*, А/м; $M = \kappa \vec{H}$, где κ – магнитная восприимчивость; $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля, А/м. Магнитная индукция *B*, Тл (тесла), характеризует суммарное магнитное поле внутри материала:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1+\kappa)\vec{H} = \mu_0\mu\vec{H} = \mu_a\vec{H}\,, \qquad (2.1)$$

где $\mu_0$ – магнитная постоянная, численно равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, характеризующая магнитную проницаемость вакуума; μ – относительная магнитная проницаемость вещества, которая показывает, во сколько раз магнитная проницаемость данной среды больше магнитной проницаемости вакуума (величина безразмерная); $\mu_a = \mu_0\mu$ – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м.

Отдельные классы магнетиков различаются по величине и знаку магнитной восприимчивости, а также по характеру зависимости магнитных характеристик от температуры и напряженности магнитного поля.

*Диамагнетиками* называют вещества, в которых имеет место полная взаимная компенсация как орбитальных, так и спиновых магнитных моментов.

Физическая природа диамагнетизма основана на классическом представлении об атоме как системе электронов, движущихся вокруг

ядра по определенным замкнутым траекториям-орбитам с некоторой угловой скоростью.

Если на атом накладывается медленно меняющееся магнитное поле, то эта угловая скорость меняется, а радиус орбиты остается неизменным. Изменение угловой скорости приводит к возникновению магнитного момента $\vec{\mu}_m$ величиной

$$\vec{\mu}_m = -\frac{e^2}{4m}\mu_0 r^2 \vec{H}, \qquad (2.2)$$

где $e$ – заряд электрона, $m$ – его масса, $r$ – радиус электронной орбиты, $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля, приложенного перпендикулярно к плоскости орбиты. Атомная магнитная восприимчивость $\kappa$, рассчитанная по (2.1), (2.2), имеет порядок $\kappa \approx -(10^{-6} - 10^{-5})$, т.е. соответствует величине, измеряемой экспериментально для диамагнитных твердых тел, и не зависит от температуры. Магнитная проницаемость диамагнетиков $\mu \approx 0{,}99999$ и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

Изменение угловой скорости электрона, связанное с наложением магнитного поля, всегда обусловливает отрицательную магнитную восприимчивость. Атом с циркулирующим в нем электроном ведет себя подобно индуктивности, в которой в соответствии с правилом Ленца возникла э.д.с. противоположного знака. Таким образом, во всем объеме твердого тела возникают индуцированные внешним магнитным полем незатухающие микроскопические вихревые токи, обусловленные прецессией электронных орбит. Направление индуцированных магнитных моментов всегда противоположно направлению внешнего магнитного поля, поэтому диамагнетики отличаются тем, что выталкиваются из неоднородного магнитного поля. Диамагнетизм является результатом прецессии всех электронов атомов и молекул, поэтому присущ всем веществам, но проявляется только в том случае, если не перекрывается более сильным пара- и ферромагнетизмом.

К диамагнитным веществам относятся водород, инертные газы, азот, хлор, вода, большинство органических соединений, ряд металлов: Cu, Ag, Au, Be, Zn, Cd, Mg, Pb, B, Ga, Sb, а также графит, стекло и др.

Диамагнетизм не имеет простого практического применения. К числу наиболее интересных диамагнетиков относятся сверхпроводники. Они обладают бесконечно большой диамагнитной восприимчивостью – свойством, которое чрезвычайно полезно при конструировании сверхпроводящих магнитов.

*Парамагнетиками* называются вещества, в которых взаимодействие между постоянными магнитными моментами атомов – элементарными магнитными диполями – мало, в результате чего при обычных температурах под действием теплового движения молекул магнитные моменты атомов располагаются статистически равновероятно относительно любого направления и суммарный магнитный момент равен нулю. Под действием внешнего магнитного поля создается преимущественное направление расположения элементарных магнитных моментов, т.е. тело оказывается намагниченным, однако при обычных полях и температурах намагниченность парамагнетиков очень мала. Магнитная восприимчивость их положительна и имеет значение $\kappa \sim (10^{-5} - 10^{-2})$, относительная магнитная проницаемость $\mu \approx 1{,}001$.

Проявлением парамагнетизма является независимая ориентация магнитных моментов атомов и ионов под действием внешнего магнитного поля. Так как моменты ориентируются в направлении поля и тем самым увеличивают его, магнитная восприимчивость $\kappa$ больше нуля.

Парамагнетизм характеризуется двумя независимыми факторами. Один из них – температурная зависимость суммарной намагниченности всего образца, другой – природа самих магнитных моментов атомов.

Для парамагнитных газов и редкоземельных элементов температурная зависимость магнитной восприимчивости характеризуется законом Кюри, установленным экспериментально в 1895 г.:

$$\kappa = C/T, \qquad (2.3)$$

где $C$ – постоянная Кюри, $T$ – температура, К.

Для переходных парамагнитных металлов, у которых взаимодействием между элементарными носителями магнетизма (молекулярным полем) пренебречь нельзя, справедлив более общий закон Кюри – Вейса:

$$\kappa = C/(T - \Delta), \qquad (2.4)$$

где $\Delta$ – постоянная Вейса, различная для разных веществ (может быть и больше, и меньше нуля).

На рис. 2.2,а показана зависимость намагниченности $M(H)$ для диа- и парамагнетиков при слабых полях и при обычных или высоких температурах. В обоих случаях значение $M$ пропорционально $H$, что свидетельствует о независимости $\kappa$ от $H$. Для намагничивания парамагнетиков до насыщения (рис. 2.2,б), т.е. до состояния, когда все элементарные магнитные моменты будут параллельны внешнему полю, требуется при комнатной температуре поле напряженностью примерно

$10^{11}$ А/м, а при $T = 1$ К примерно $3 \cdot 10^5$ А/м. Однако в последние годы выяснилось, что в парамагнетиках можно создать высокую намагниченность, не прибегая к сильным магнитным полям, а используя поток квантов света (оптическую накачку).

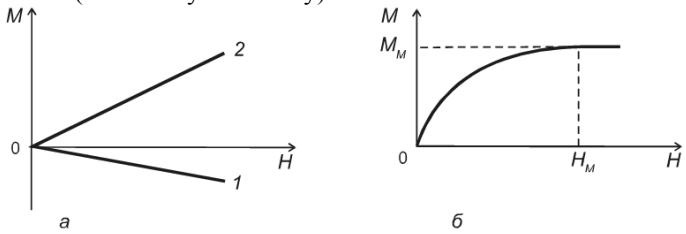



Рис. 2.2. Зависимость намагниченности $M$ от напряженности магнитного поля $H$: *а* – для диамагнетиков *(1)* и парамагнетиков *(2)*; *б* – для парамагнетиков при низких температурах или очень сильных полях

С повышением температуры при неизменной напряженности поля возрастает дезориентирующая роль теплового движения молекул и поэтому намагниченность убывает. Парамагнетики отличаются тем, что они втягиваются в неоднородное магнитное поле.

Поскольку все заполненные электронные оболочки имеют нулевой полный момент количества движения, они обладают также нулевым полным магнитным моментом. В частности, атомы или ионы, обладающие только заполненными оболочками, не имеют постоянных магнитных моментов и, следовательно, не могут быть парамагнитными. Никаких исключений из этого правила не обнаружено. Инертные газы He, Ar, Kr и т.д. и такие ионы, как $Na^+$ и $Cl^-$, диамагнитны. Диамагнитны также и многие газы, такие как Б и др., поскольку все электроны в их молекулах спарены. Свободные атомы других веществ обнаруживают парамагнетизм, если у них имеются неспаренные спины или нескомпенсированный момент количества движения.

К парамагнетикам относятся кислород, окись азота, соли железа, кобальта и никеля, щелочные металлы, а также Mg, Ca, Al, Cr, Mo, Mn, Pt, Pb и др.

Парамагнетизм в атомах или ионах не существует в одиночку: одновременно с ним всегда имеют место и диамагнитные свойства. Поскольку оба эти эффекта противоположны друг другу по знаку, суммарные магнитные свойства материала определяются преобладающим. У большинства материалов величина парамагнитной восприимчивости значительно больше диамагнитной, т.е. парамагнетизм обычно преобладает над диамагнетизмом.

Парамагнитные вещества используются в качестве рабочих тел в квантовых парамагнитных усилителях и генераторах.

*Ферромагнетиками* называют вещества, характеризующиеся намагничиванием недостроенных внутренних оболочек атомов, поскольку магнитные моменты заполненных оболочек равны нулю, а внешние валентные электроны металла обобществлены. Такими элементами являются переходные металлы группы железа, имеющие недостроенную 3*d*-оболочку, и редкоземельные элементы с недостроенной 4*f*-оболочкой. Наличие магнитного момента у атомов обусловлено только нескомпенсированными спиновыми магнитными моментами, поскольку орбитальные магнитные моменты весьма малы. Для ферромагнетиков в отсутствие внешнего поля энергетически выгодным является параллельное расположение магнитных моментов соседних атомов внутри домена.

При помещении ферромагнитного материала в магнитное поле одновременно происходят процессы ориентации магнитных моментов доменов и смещение их границ (изменение объема). В слабом поле преобладает процесс обратимого смещения границ, т.е. рост объема доменов, у которых магнитный момент, направленный вдоль оси легкого намагничивания, составляет наименьший угол с направлением внешнего поля. При усилении поля процесс идет более интенсивно и приобретает необратимый характер, кривая намагничивания $B(H)$ становится круче (рис. 2.3). При дальнейшем увеличении напряженности поля осуществляется процесс вращения вектора намагниченности в направлении внешнего поля и магнитное состояние материала достигает технического насыщения.

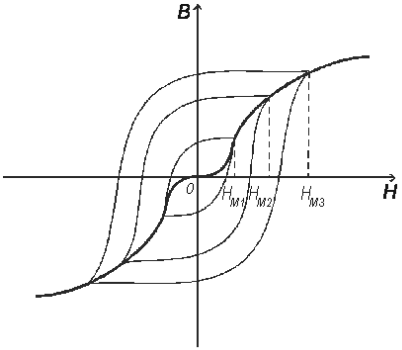
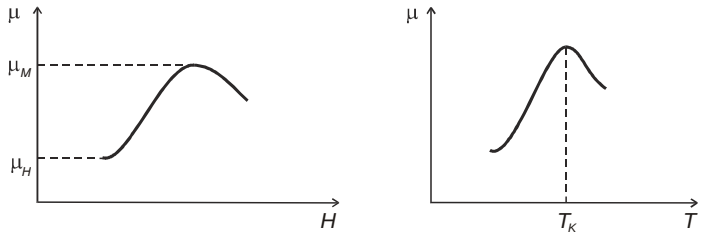



Рис. 2.3. Основная кривая намагничивания
и семейство гистерезисных циклов

В переменных магнитных полях магнитное состояние образца периодически повторяется и его магнитная индукция зависит от величины намагничивающего поля, направления и частоты его изменения. Форма петли гистерезиса при неизменной частоте зависит от предельных значений напряженности поля. Семейство таких симметричных петель изображено на рис. 2.3. Сплошная кривая, проходящая по вершинам петель, называется нормальной, или основной, кривой индукции.

Причинами гистерезиса являются необратимые смещения границ доменов, необратимые процессы вращения и задержка роста зародышей перемагничивания, под которыми понимают небольшие объемы с самопроизвольной намагниченностью обратного направления по отношению к основной ориентации намагниченности образца. Ферромагнетики характеризуются большими положительными значениями κ и μ (до сотен тысяч и миллионов), а также сложной нелинейной зависимостью этих параметров от напряженности внешнего магнитного поля (рис. 2.4,а). При температурах выше точки Кюри $T_к$, определенной для каждого материала, ферромагнитное состояние переходит в парамагнитное (рис. 2.4,б) вследствие того, что хаотическое тепловое движение атомов нарушает параллельную ориентацию их магнитных моментов и, следовательно, доменное строение ферромагнетика. Точка Кюри чистого железа составляет 768, никеля – 631, кобальта – 1404 °С.




а б

Рис. 2.4. Зависимость относительной магнитной проницаемости ферромагнетиков от напряженности магнитного поля *(а)* и температуры *(б)*

*Антиферромагнетики* – это вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу, поэтому имеет место их взаимная компенсация. Магнитная восприимчивость антиферромагнетиков мала и составляет $\kappa \approx (10^{-5} - 10^{-3})$. В слабых полях κ и μ практически не зависят

от напряженности внешнего магнитного поля, в сильных являются сложной функцией напряженности поля. В некоторой степени свойства антиферромагнетиков схожи со свойствами парамагнетиков. Пара- и антиферроманитные вещества объединяют положительная магнитная восприимчивость и компенсация магнитных моментов атомов. Различие заключается в том, что спиновые моменты парамагнетиков ориентированы хаотически, а антиферромагнетиков – параллельно друг другу.

По мере повышения температуры от 0 К величина к растет, достигая максимума при температуре, называемой точкой Нееля, и далее начинает уменьшаться, подчиняясь на этом участке закону Кюри – Вейса.

К антиферромагнетикам относятся редкоземельные металлы Ce, Pr, Nd, Sm и Eu, а также Cr и Mn; многие окислы, хлориды, сульфиды, карбонаты переходных элементов, например на основе марганца: MnO, $MnCl_2$, $MnF_2$, $MnS_2$ и др., аналогично на основе Fe, Co, Ni, Cr и др.

*Феррримагнетиками* (или нескомпенсированными антиферромагнетиками) называют вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу, однако величины этих магнитных моментов имеют различные значения, благодаря чему результирующая намагниченность может быть большой.

К ферримагнетикам относятся ферриты, представляющие собой магнитную керамику, состоящую из смеси окиси железа $Fe_2O_3$ с окислами других металлов. Структурная формула ферритов $MeO{\cdot}Fe_2O_3$, где Me – двухвалентный металл (Fe, Ni, Mn, Zn, Co, Cu, Cd, Mg и др.). Многие свойства ферримагнетиков качественно аналогичны свойствам ферромагнетиков, однако имеются и существенные различия. Например, ферримагнетики (ферриты) отличаются от ферромагнетиков меньшей величиной индукции насыщения и имеют более сложную температурную зависимость основных магнитных параметров.

Преимущества ферритов при работе в ВЧ- и СВЧ-диапазонах обусловлены тем, что их удельное электрическое сопротивление в $10^6$ - $10^{11}$ раз превышает удельное сопротивление металлических ферромагнетиков, так как они являются оксидными материалами, а не металлами. По значению удельного электрического сопротивления $\rho$ они относятся к классу полупроводников или диэлектриков. Вследствие этого вихревые токи (и соответствующая мощность магнитных потерь) в ферритах очень малы и они применяются в качестве магнитного мате-

риала при частотах до сотен мегагерц, тогда как металлические магнитные материалы применяются при частотах до нескольких десятков мегагерц.

Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость ферримагнетиков ниже, чем у ферромагнетиков, и достигают значений нескольких десятков тысяч.

Диа-, пара- и антиферромагнетики объединяются в группу слабомагнитных веществ, а ферро- и ферримагнетики – в группу сильномагнитных (см. рис. 2.1).

## 2.2. Потери в магнитных материалах

При перемагничивании ферромагнетиков в переменных магнитных полях всегда наблюдаются тепловые потери энергии. Они складываются из потерь на гистерезис и динамических потерь. В свою очередь динамические потери включают в себя потери на вихревые токи и магнитное последействие. Мощность, расходуемая на гистерезис, может быть представлена в виде

$$P_{\Gamma} = \frac{f \oint HdB}{D}, \qquad (2.5)$$

где $f$ – частота тока; $D$ – плотность материала, $\oint HdB$ - площадь петли гистерезиса.

Мощность, расходуемую на вихревые токи, можно вычислить по формуле

$$P_{\text{в.т.}} = \frac{f^2 B_{\text{макс}}^2 d^2 \eta}{D\rho}, \qquad (2.6)$$

где $\eta$ – коэффициент формы; $d$ – толщина материала; $B_{макс}$ – максимальная индукция, достигаемая в начале цикла; $\rho$ – удельное сопротивление материала.

В цепях переменного тока рассеяние мощности в катушках индуктивности иногда оценивают тангенсом угла магнитных потерь

$$\operatorname{tg}\delta_M = \frac{r}{\omega L}, \qquad (2.7)$$

где $L$ – индуктивность катушки; $r$ – сопротивление, эквивалентное всем видам потерь мощности в магнитном материале.

### Задачи

2.2.1. Почему диамагнетики намагничиваются противоположно направлению вектора напряженности и внешнего магнитного поля? Как влияет температура на диамагнитную восприимчивость?

2.2.2. Как изменяется магнитная восприимчивость парамагнетиков с повышением температуры? Может ли быть достигнуто магнитное насыщение парамагнитных веществ?

2.2.3. Назовите основные механизмы намагничивания ферромагнетика, приводящие к нелинейной зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля.

2.2.4. Почему в области магнитного насыщении ферромагнетика намагниченность материала возрастает с увеличением напряженности магнитного поля? Как влияет температура на изменение намагниченности в области технического насыщения?

2.2.5. Могут ли обладать ферромагнитными свойствами сплавы, состоящие из неферромагнитных элементов?

2.2.6. Объясните, как и почему изменяется индукция насыщения ферромагнетиков при повышении температуры.

2.2.7. Объясните, чем определяются направления векторов спонтанных намагниченностей в доменах и расположение доменных границ в отсутствие внешнего магнитного поля.

2.2.8. Чем отличается спиновое обменное взаимодействие в ферро- и антиферромагнетиках?

2.2.9. Объясните, почему высоконикелевый пермаллой, имеющий примерно в два раза меньшую, чем железо и электротехническая сталь, индукцию насыщения, обладает вместе с тем существенно более высокой начальной магнитной проницаемостью.

2.2.10. Какими причинами обусловлен различный характер температурных зависимостей магнитной проницаемости магнитного материала, измеряемой в слабом и сильном магнитных полях?

2.2.11. Укажите, какими способами можно полностью размагнитить ранее намагниченный ферромагнитный образец.

2.2.12. Изобразите (качественно) зависимость потерь на перемагничивание ферромагнитного сердечника от напряженности магнитного поля.

2.2.13.Укажите, следствием какого универсального закона являются диамагнитные свойства вещества. Почему парамагнетизм, в отличие от диамагнетизма, не универсален? Как зависит диамагнитная восприимчивость химического элемента от его места в Периодической системе элементов?

2.2.14. Чем и почему отличаются предельные петли гистерезиса металлических ферромагнетиков и ферритов? Изложите методику

экспериментального определения петли гистерезиса и основной кривой намагничивания.

2.2.15. Какое влияние оказывает магнитная проницаемость на характеристики кольцевых ферритовых сердечников?

2.2.16. Назовите магнитомягкие и магнитотвердые ферромагнетики, на основе которых получают композиционные магнитные материалы – магнитодиэлектрики и магнитопласты. Почему применительно к магнитодиэлектрикам употребляется термин «эффективная магнитная проницаемость»? Какова технология изготовления изделий из этих материалов?

2.2.17. Чем объясняется высокая магнитная проницаемость пермаллоев?

2.2.18. Объясните природу широкой петли гистерезиса бариевых ферритов и ферромагнитных сплавов системы Fe – Ni – Al. Какими технологическими приемами удается получить из этих материалов постоянные магниты с анизотропными свойствами?

2.2.19. Укажите, как можно экспериментально определить напряженность магнитного поля в зазоре электромагнита? На каких физических эффектах основан принцип действия магнитных датчиков?

2.2.20. В однородное магнитное поле помещен цилиндр из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью так, что ось цилиндра перпендикулярна к вектору напряженности магнитного поля. Изобразите распределение линий магнитной индукции.

2.2.21. В нейтральном атоме железа два электрона находятся в 4-s состоянии при не полностью заполненной внутренней 3d-оболочке. Учитывая, что при ионизации сначала удаляются 4s-электроны, приведите распределение электронов по энергетическим состояниям в свободном атоме железа, а также двух- и трехвалентных ионах железа.

2.2.22. Диамагнитная восприимчивость меди равна - $9.5 \cdot 10^{-6}$ Определите намагниченность и магнитную индукцию в медном проводе при воздействии на него однородного магнитного поля напряженностью1000 А/м.

Укажите, как ориентированы векторы намагниченности и магнитной индукции относительно друг друга.

2.2.23. При насыщении магнитная индукция чистого железа $B$=2.2 Тл. Учитывая, что элементарная ячейка кристаллической решетки железа представляет собой объемно-центрированный куб с ребром $a$=0.286 нм, рассчитайте магнитный момент, приходящийся на один атом железа.

2.2.24. Магнитная индукция насыщения металлического никеля, имеющего плотность 8960 кг/см$^3$, равна 0,65 Тл. Определить маг-

нитный момент, приходящийся на один атом никеля (в магнетонах Бора).

2.2.25. Имеется два магнитных материала, для которых выполняются условия: $\mu_{max1} > \mu_{max2}$, $B_{S1} > B_{S2}$. Постройте (качественно) на одном графике: а) основные кривые намагничивания для этих материалов; б) зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

2.2.26. В однородное магнитное поле с индукцией $B_0$ перпендикулярно к магнитному потоку помещена плоскопараллельная пластина из однородного изотропного ферромагнетика с магнитной проницаемостью $\mu$. Определите магнитную индукцию $B_1$ и напряженность магнитной индукцию $H_1$ внутри ферромагнетика.

2.2.27. Какую форму петли гистерезиса должны иметь магнитные материалы, чтобы их магнитная проницаемость не зависела от напряженности магнитного поля?

2.2.28. При напряженности магнитного поля $H=10^4$ А/м магнитная индукция в висмуте $B$=12,564 Тл. Определите магнитную восприимчивость $k_м$ вещества. Какой вывод можно сделать о природе намагниченности?

2.2.29. Магнитная восприимчивость никеля при температурах 400 и 800 $^0$ С равна соответственно $1{,}25\cdot10^{-3}$ и $1{,}14\cdot10^{-4}$. Определите температуру Кюри и магнитную восприимчивость при $T$= 600 $^0$С.

2.2.30. Допуская, что железо является парамагнетиком в широкой области температур, оцените напряженность магнитного поля, необходимую для создания при комнатной температуре спонтанной намагниченности, равной 0,12 Тл.

2.2.31. В сердечнике трансформатора удельные магнитные потери на гистерезис и на вихревые токи при частоте 2 кГц равны и составляют 2 Вт/кг. Определите суммарные удельные магнитные потери в сердечнике на частоте 400 Гц, если максимальная магнитная индукция в нем та же, что и на частоте 2 кГц.

2.2.32. В сердечнике трансформатора на частоте 50 Гц потери на гистерезис при индукции магнитного поля 0,1 и 0,5 Тл составляют 0,15 и 1,97 Вт/кг соответственно. Определите потери на гистерезис на частоте 200 Гц при индукции поля 0,6 Тл.

2.2.33. На частоте 50 Гц удельные потери на вихревые токи в сердечнике из электротехнической стали при индукции магнитного поля $B$=1,2 Тл составляет 6,5 Вт/кг. Определите потери на вихревые токи в сердечнике на частоте 400 Гц при магнитной индукции 0,5 Тл, если масса сердечника *m=0,5 кг.*

2.2.34. Ферромагнитное железо обладает кубической объемноцентрированной решеткой с периодом идентичности 2,86 Å и намаг-

ниченностью $1{,}75 \cdot 10^6$ Гс. Вычислите магнитный момент, приходящийся на один атом железа, в магнетонах Бора.

2.2.35. Определите удельные магнитные потери на вихревые токи в сердечнике трансформатора, набранном из листов электротехнической стали толщиной 0,35 мм, если на сердечник воздействует изменяющийся по синусоидальному закону магнитный поток с частотой 50 Гц и максимальной индукцией 0,5 Тл, обусловленный прохождением
переменного тока $i$ по обмотке. Удельное сопротивление стали $\rho$ принять равным 0,5 мкОм·м.

2.2.36. Запишите распределение катионов по кислородным междоузлиям для никель-цинкового феррита составом $Ni_{0.8}Zn_{0.2}Fe_2O_4$. Рассчитайте для этого материала индукцию насыщения при температуре вблизи абсолютного нуля и сравните полученный результат с индукцией насыщения для феррита никеля в тех же условиях. Период кристаллической решетки твердого раствора принять равным 0,84 нм.

2.2.37. Объясните, почему при замене части ионов $Ni^{2+}$ немагнитнымим ионами $Zn^{2+}$ наблюдается снижение температуры Кюри и увеличение начальной магнитной проницаемости феррита $NiFe_2O_4$.

2.2.38. Объясните, как изменится температурная зависимость индукции насыщения магнетита $Fe_2O_4$, если часть ионов $Fe^{3+}$ замещена ионами $Al^{3+}$. Известно, что ионы $AL^{3+}$ занимают в решетке шпинели октаэдрические кислородные междоузлия.

2.2.39. Определите магнитные потери в сердечнике К40·20·7,5 из феррита марки 200 НМ на частоте 0,1 МГц при пропускании через намагничивающую обмотку тока 40 мА. Обмотка состоит из 100 витков, добротность сердечника в данных условиях равна 10. Магнитную проницаемость сердечника при рабочей напряженности поля принять равной $\mu_н$.

2.2.40. Найти удельные магнитные потери в ферритовом сердечнике марки 200 НН, перемагничивающемся на частоте 0,1 МГц магнитным полем напряженностью $H_m$=4 А/м, если в данных условиях $tg\ \delta_м = 0{,}2$ , магнитная проницаемость $\mu$=2500.

2.2.41. Кольцевой сердечник размерами $R{\cdot}r{\cdot}h{=}16{\cdot}8{\cdot}8$ мм, изготовленный из феррита марки 200 НМ, на частоте 0,01 МГц имеет $tg\ \delta_м = 0{,}5$ . На сердечнике намотана обмотка из 20 витков. Найдите эквивалентное сопротивление потерь в сердечнике в слабых магнитных полях.

2.2.42. Изобразите (качественно) температурные $\mu(T)$ и частотные $\mu(f)$ зависимости магнитной проницаемости ферритов марок 4000 НМ и 1000 НМ, исходя из общих закономерностей изменения

свойств марганец-цинковых ферритов. Сравните эти материалы по следующим параметрам:

- начальной магнитной проницаемости $\mu_н$;
- граничной частоте $f_{гр}$;
- тангенсу угла магнитных потерь $tg\ \delta_м$;
- коэрцитивной силе $H_c$;
- удельному сопротивлению $\rho$;
- температурному коэффициенту магнитной проницаемости $\alpha_\mu$;
- температуре Кюри $T_к$;
- потерям на вихревые токи $P_{вт}$;
- потерям на гистерезис $P_г$.

2.2.43. Кольцевой ферритовый сердечник массой $m=0,1$кг перемагничивается переменным магнитным полем напряженностью $H_m$=1 кА/м и частотой $f = 10^4$ Гц. Определить мощность, выделяемую в сердечнике, если магнитная проницаемость материала $\mu$=1000; $tg\ \delta_м$ = 0,02; плотность феррита $d$ = 4,5 Мг/м$^3$.

2.2.44. Кольцевой ферритовый сердечник размерами $R{\cdot}r{\cdot}h=16{\cdot}8{\cdot}8$ мм с магнитной проницаемостью $\mu$=1000 имеет обмотку, содержащую 100 витков. Измерениями установлено, что на частоте 0,1 МГц при токе 100 мА в катушке выделяется активная мощность 0,3 Вт, а в отсутствие магнитного сердечника при том же токе в обмотке выделяется лишь 0,1 Вт. Определите добротность сердечника.

2.2.45. Пористость ферритовых стержней круглого сечения диаметром $D_ф$=10 мм составляет 3 %. Стержни изготовлены по керамической технологии путем обжига предварительного спрессованных заготовок. Каким должен быть диаметр заготовок $D_з$, если их пористость составляет 27 %? Определите относительное уменьшение длины стержня при обжиге.

2.2.46. Определите коэрцитивную силу кольцевого ферромагнитного сердечника, если для его размагничивания через обмотку, содержащую 100 витков, требуется пропустить ток 63 мА. Средний диаметр кольца 20 мм.

2.2.47. Кольцевой магнитопровод имеет площадь поперечного сечения $S$=100 мм$^2$ и среднюю длину магнитного контура $l_{ср}=0,1$ *м*. На сердечник намотана обмотка с числом витков $n=100$. Определите магнитный поток через сердечник при токе в обмотке $I=1$ *А*, если магнитная проницаемость материала сердечника равна 2000.

2.2.48. Определите индуктивность катушки с кольцевым магнитным сердечником размерами $R{\cdot}r{\cdot}h=30{\cdot}20{\cdot}20$ мм и обмоткой, состоящей из 200 витков. Сердечник изготовлен из высоконикелевого

пермаллоя с относительной магнитной проницаемостью $\mu$=50000 (при рабочей напряженности магнитного поля).

2.2.49. Катушка с ферритовым тороидальным сердечником диаметром 10 мм имеет индуктивность 0,12 Гн и содержит 100 витков. Определите ток в катушке, при котором магнитная индукция в сердечнике равна 0,1 Тл.

2.2.50. Найдите индуктивность соленоида, имеющего 200 витков, намотанных на диэлектрическое основание, длиной $l$ = 50 мм. Площадь поперечного сечения основания $S$=50 мм$^2$. Как изменится индуктивность катушки, если в нее введен цилиндрический ферритовый сердечник, имеющий магнитную проницаемость $\mu$=400, определенную с учетом размагничивающего действия воздушного зазора?

2.2.51. Определите, сколько витков необходимо намотать на магнитный сердечник длиной 100 мм и диаметром 8 мм, чтобы получить индуктивность катушки $L$=10 мГн. Магнитную проницаемость сердечника считать равной 500.

2.2.52. Тороидальный сердечник из пермаллоя с внутренним диаметром 30 мм и наружным диаметром 40 мм имеет обмотку из 200 витков. При пропускании через обмотку тока 0,5 А в сердечнике создается магнитное поле индукцией 1,5 Тл. Определите магнитную проницаемость сердечника.

2.2.53. Найдите намагниченность $J_м$ парамагнетика, находящегося внутри соленоида длиной l=30 см с сечением S=2 см$^2$ и числом витков n=300, когда по обмотке проходит ток I=1,5 А. Индуктивность соленоида L=7,55·10$^{-5}$ Гн.

2.2.54. Определите магнитную индукцию ферромагнитного сердечника, помещенного внутрь соленоида длиной $l$=20 см с числом витков $n$=800, если по обмотке проходит ток 0,2 А, а эффективная магнитная проницаемость сердечника $\mu$=200.

2.2.55. Кольцевой ферритовый сердечник со средним диаметром $d_{ср}$= 25 мм имеет воздушный зазор длиной 1 мм. При пропускании тока 0,17 А через обмотку сердечника, состоящую из 500 витков, в зазоре создается магнитная индукция $B_0$=0,1 Тл. Определите магнитную проницаемость феррита.

2.2.56. Магнитная восприимчивость сердечника из магнитодиэлектрика на основе альсифера $k_M$=10. Определите напряженность магнитного поля внутри этого сердечника, если индукция магнитного поля $B$=0,1 Тл.

2.2.57. Приведите пример конструкции катушки с регулируемой индуктивностью. Какие физические закономерности лежат в основе процесса регулирования?

2.2.58. Покажите направление вектора магнитной индукции в ферритовых сердечниках Ш-образной, тороидальной и броневой конструкции. Как должна быть расположена обмотка относительно сердечника?

2.2.59. Как изменится добротность катушки индуктивности, если в её тороидальном сердечнике перпендикулярно к направлению магнитного потока образовалась трещина (тонкий воздушный зазор)?

2.2.60. Почему катушки индуктивности с сердечниками из магнитодиэлектриков обычно обладают лучшей температурной стабильностью, чем катушка с ферритовыми сердечниками?

2.2.61. Расшифруйте обозначения пермаллоев промышленных марок: 76 НХД, 65 НП, 80 НХС, 79 НМ.

2.2.62. Какими параметрами характеризуют термостойкость, температурную стабильность и частотные свойства ферритов?

2.2.63. Расшифруйте обозначения ферритов марок: 20000 НМ, 10000 НН, 100 ВЧ.

2.2.64. От какого параметра магнитного материала зависит площадь поперечного сечения магнитопровода силового трансформатора?

2.2.65. При напряженности магнитного поля $H$=400 кА/м магнитотвердый сплав ЮНДК35Т5 имеет магнитную индукцию $B$=1 Тл. Определите намагниченность сплава.

2.2.66. Определите силу, с которой притягиваются друг к другу полюса электромагнита, если площадь сечения полюса $S$=25 см$^2$, а магнитная индукция в зазоре между ними $B$=0,6 Тл.

2.2.67. Какой из трех ленточных кольцевых сердечников одинаковых размеров из пермаллоев марок 50 НХС, 50 Н, 79 НМ имеет при одних и тех же условиях эксплуатации меньшие потери на вихревые токи, если толщина пермаллоевой ленты всех сердечников одинакова? Изобразите (качественно) на одном рисунке основные кривые намагничивания пермаллоев марок 50 Н, 79 НМ.

2.2.68. Намагниченный тороидальный сердечник, изготовленный из магнитотвердого материала, имеет прямоугольное сечение 10·10 мм при наружном диаметре $D_н$=6 см. Определите напряженность магнитного поля в зазоре, если напряженность магнитного поля в сердечнике составляет 5 кА/м. Чему равна магнитная энергия в зазоре? При расчете рассеянием поля у краев зазора пренебречь.

2.2.69. Для магнита из феррита бария, имеющего коэрцитивную силу $H_{c1}$=240 кА/м и остаточную индукцию $B_{r1}$=0.35 Тл, получен наибольший запас магнитной энергии $W_{max}$=10 кДж/м$^3$. Чему равен наибольший запас магнитной энергии $W_{max2}$ для магнита из материала на основе редкоземельных металлов состава $Sm_{0.5}Pr_{0.5}Co_{0.5}$, для кото-

рого $H_{c2}$=700 кА/м и $B_{r2}$=0.93 Тл, если коэффициенты выпуклости кривых размагничивания этих двух магнитов считать одинаковыми?

2.2.70. Какие требования предъявляется к значениям остаточной индукции и коэрцитивной силе материалов, применяемых в устройствах магнитной записи в качестве носителей информации?

2.2.71. Объясните, почему полюсные наконечники сердечников электромагнитов и постоянных магнитов изготавливают в форме усеченного конуса?

2.2.72. Катушка индуктивности выполнена в виде плоской спирали, образованной нанесенной на поверхность диэлектрической подложки металлической пленкой. Как изменится добротность $Q$ такой катушки, если ширину витка спирали увеличить в два раза при том же числе витков? Как изменятся индуктивность $L$ и добротность катушки, если плоскую спираль нанести на поверхность ферритовой пластины?

2.2.73. Вычислите намагниченность насыщения смешанного феррита составом $Y_3Fe_{4.5}Ga_{0.5}O_{12}$ вблизи абсолютного нуля, если известно, что галлий занимает в кристаллической решетке тетраэдрические кислородные междоузлия. Как изменится температура Кюри при добавлении галлия к иттриевому феррогранату?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Холомина Т.А., Зубков М.В. Свойства и применение металлов и сплавов: учеб. пособие. – Рязань: РГРТУ, 2014. – 84 с.

2. Материаловедение: учеб. пособие/ С.П.Вихров Т.А.Холомина; под ред. Ю.М.Солдака. – Рязань: РГРТУ, 2006. – 160 с.

3. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2004. – 519 с.

4. Вихров С.П., Холомина Т.А., Бегун П.И., Афонин П.Н. Биомедицинское материаловедение. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2006.- 383 с.

5.Антонов Б.Л., Сорокин В.С.,Терехов В.А.Материалы электронной техники. Задачи и вопросы – М.: Высшая школа, 1990. – 208 с.

6. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев В.М. Электротехнические материалы – Изд. 7-е – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

7. Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 350 с.

8.Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения: пер. с англ. К.М. Зотовой, Д.О.Чаркина; под ред. В.П.Зломанова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 400 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ …… . 3
1.1. Классификация диэлектриков …… ……. ….. 3
1.2.Электропроводность диэлектриков …… …… 3
Задачи …… ……... 7
1.3. Поляризация диэлектриков…… 10
Задачи ……... 15
1.4. Диэлектрические потери…… 18
Задачи …….. 21
1.5. Пробой диэлектриков…… 24
Задачи…….. 28
2. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ …….. 31
2.1.Классификация магнитных материалов…….. 31
2.2. Потери в магнитных материалах…… 39
Задачи……..... 39
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ……... 47

Х о л о м и н а Татьяна Андреевна

З у б к о в Михаил Владимирович

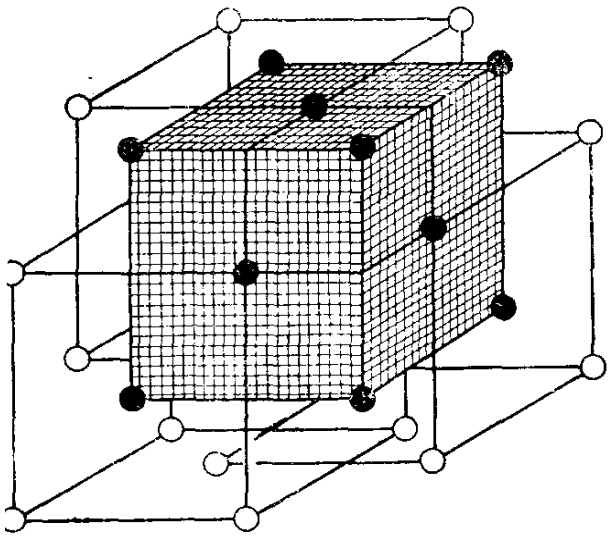
Свойства и применение диэлектриков и магнитных материалов

Редактор Р.К. Мангутова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать . Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л. 3,0.
Тираж 100 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**РЯЗАНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ**

**С.П.ВИХРОВ, Т.А.ХОЛОМИНА**

# СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ



Рязань 2004

Министерство образования Российской Федерации
Рязанская государственная радиотехническая академия

**С.П.ВИХРОВ, Т.А.ХОЛОМИНА**

# СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Учебное пособие

Рекомендовано УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 653900 «Биомедицинская техника»

Рязань 2004

*Предисловие*

Интенсивное развитие науки и техники невозможно без решения проблемы совершенствования качества и экономичности материалов – вещественной основы любой продукции. Новые технические материалы появляются в результате предварительного глубокого изучения экономических, функциональных и потребительских свойств различных веществ, а также технологии их получения и обработки.

Металлы, сплавы и полупроводники относятся к наиболее широко применяемым в технике материалам. Практическое использование материалов в приборостроении определяется их свойствами, которые зависят от состава, структуры и воздействия внешних факторов.

В учебном пособии рассмотрены классификация твердых проводниковых и полупроводниковых материалов, особенности их строения. Приведены основные типы диаграмм состояния сплавов; проанализированы структурные превращения в системе железо – углерод, происходящие при изменении температуры и состава. Рассмотрены особенности влияния термической и химико-термической обработки на свойства сталей, их классификация и применение в технике.

Проанализировано влияние состава, температуры, электромагнитного излучения, электрического и магнитного полей на свойства полупроводников, а также практическое применение возникающих явлений.

Целью учебного пособия является краткое и доступное по форме изложение учебного материала, предусмотренного действующими образовательными стандартами. Учебное пособие рекомендуется для самостоятельной работы студентов, обучающихся по специальности 060800 – заочной и очной форм обучения, а также специальностям 190500, 190600, 190900 дневного отделения.

# МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

## 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

К металлам относятся вещества, обладающие высокими теплопроводностью и электрической проводимостью, ковкостью, блеском и другими характерными свойствами, которые обусловлены наличием в их кристаллической решетке большого числа свободных электронов.

Единственными объективными критериями, позволяющими отнести материал к металлам, считаются наличие электропроводности при $T = 0$ К и положительный температурный коэффициент удельного сопротивления. Указанными выше свойствами обладают свыше 80 простых веществ (элементов) и множество металлических сплавов.

Все металлы и сплавы делят на **черные** (к ним относят железо и сплавы на его основе; на их долю приходится около 95 % производимой в мире металлопродукции) и **цветные** или, точнее, нежелезные (все остальные металлы и сплавы). По физическим и химическим свойствам и характеру залегания в земной коре нежелезные металлы делят на следующие группы: **легкие** – алюминий, магний, титан, бериллий, литий, натрий, калий, стронций, барий и др.; **тяжелые** – медь, никель, кобальт, свинец, олово, цинк, кадмий, сурьма, висмут, ртуть и др.; **тугоплавкие** – вольфрам, молибден, ниобий, тантал, ванадий, хром, цирконий и др.; **благородные** – золото, серебро, платина и платиноиды (рутений, родий, палладий, осмий, иридий); **рассеянные** – галлий, индий, таллий; **редкоземельные** – скандий, иттрий, лантан и все лантаноиды; **радиоактивные** – технеций, франций, радий, полоний, актиний, торий, уран и трансурановые элементы.

Приведенная классификация условна: многие металлы могут быть отнесены одновременно к разным группам. Например, легкий металл титан является также тугоплавким; тугоплавкий металл рений – типичный рассеянный элемент и т.д.

Металлы играют огромную роль в современной технике. Обычно металлы применяют не в чистом виде, а в виде сплавов, количество которых превышает 10 тысяч.

Металлы получают из руд, а также путем вторичной переработки материалов. Рудами называют горные породы, которые технически возможно и экономически целесообразно перерабатывать для извлечения содержащихся в них металлов. К основным процессам металлургического процесса относятся: обработка руд с целью их подготовки к извлечению металлов (дробление, обогащение, окускование и пр.); извлечение металлов из руд и других материалов; очистка металлов от нежелательных примесей; производство металлов и сплавов; термическая, химико-термическая и термомеханическая обработка; формообразование давлением и литьем; покрытие в декоративных или защитных целях поверхности изделий из металла слоями другого металла.

К основным свойствам металлов и сплавов относятся физические (в том числе механические), химические, технологические и функциональные. К физическим свойствам относятся: температура плавления, цвет, плотность, магнитная восприимчивость, электропроводность, теплоемкость и др. Особую группу составляют механические свойства: прочность, пластичность, твердость, ударная вязкость и др. Химические свойства металлов определяются способностью их атомов легко отдавать валентные электроны и переходить в состояние положительно заряженных ионов. Указанное определяет особенности химического взаимодействия металлов и сплавов с агрессивными средами.

К технологическим свойствам металлов и сплавов относится их способность к формоизменению (ковкость, свариваемость и т.д.). Важное значение имеет жидкотекучесть – свойство расплавленного металла заполнять и точно воспроизводить литейную форму.

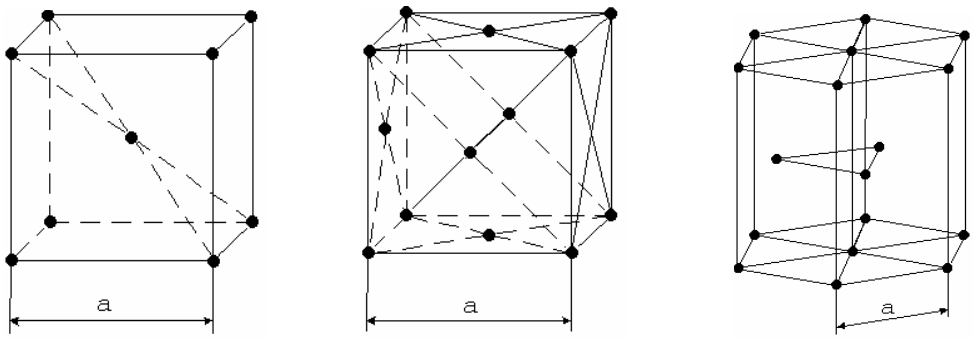
Функциональные или эксплуатационные свойства включают в себя хладостойкость, жаропрочность, жаростойкость, антифрикционность и другие характеристики материалов, определяемые условиями их работы.

## 2. СТРОЕНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

Металлы и сплавы в твердом состоянии имеют поликристаллическую структуру, состоящую из отдельных зерен – монокристаллических областей, ориентированных относительно друг друга под различными углами. На границе между зернами атомы имеют менее правильное расположение, чем в объеме зерна. Линейный размер зерен составляет $1–10^4$ мкм.

С помощью рентгеноструктурного анализа установлено, что кристаллическое строение твердых тел, состоящих из различных атомов, описывается 14 различными типами пространственных элементарных ячеек.

Наиболее широко применяются металлы и сплавы, образованные одним из 3-х типов пространственных решеток, определяемых отдельно взятой элементарной ячейкой: кубической объемно-центрированной ОЦК ($\alpha$–Fe, $\beta$–Fe, $\delta$–Fe, Cr, W, Mo, V и др.); кубической гранецентрированной ГЦК ($\gamma$–Fe, Cu, Al, Ni, Pb и др.); гексагональной плотноупакованной ГПУ (Ti, Mg, Zn, Be и др.) (рис. 1.1).




а б в

Рис. 1.1. Атомно-кристаллическое строение металлов с кубической объемноцентрированной (а); гранецентрированной (б) и гексагональной плотноупакованной (в) элементарными ячейками

Переход металла из жидкого состояния в твердое (кристаллическое) называется **кристаллизацией**. Подвижность атомов при снижении температуры уменьшается, устанавливается определенный порядок в их расположении с образованием отдельных групп атомов, близких к элементарным ячейкам, имеющимся в твердом металле. Возникают центры кристаллизации – зародыши, вокруг которых постепенно образуется твердая фаза. Кристаллизация происходит вследствие перехода к более устойчивому состоянию с меньшей свободной энергией [1].

Процесс кристаллизации характеризуют кривыми охлаждения или нагревания, изображенными в координатах температура – время. На рис. 1.2 изображены кривые охлаждения металла и двухкомпонентного сплава. При охлаждении расплавленного чистого металла вначале (участок 1 – 2 рис. 1.2,а) понижение температуры идет плавно. При достижении температуры кристаллизации на кривой охлаждения (рис. 1.2,а) появляется горизонтальный участок 2 – 3, так как отвод тепла в окружающую среду компенсируется выделяющейся скрытой теплотой кристаллизации. После окончания кристаллизации температура вновь понижается равномерно (участок 3 – 4 рис. 1.2,а).

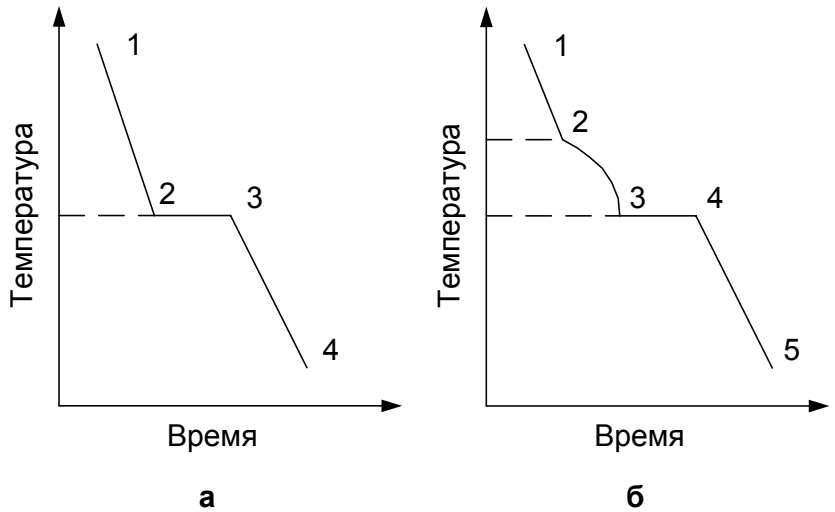



Рис. 1.2. Кривые охлаждения металла (а) и двухкомпонентного сплава (б)

При охлаждении из жидкого состояния сплава двух металлов процесс кристаллизации протекает несколько иначе (рис. 1.2,б).

Точка 2 соответствует началу выделения из жидкой фазы кристаллов одного из компонентов сплава. Выделяющаяся при кристаллизации теплота замедляет ход кривой охлаждения и в точке 2 кривая изменяет наклон (участок 2 – 3). Выпадение кристаллов избыточного компонента и равномерное понижение температуры происходят, пока сплав не достигнет определенного состава. В дальнейшем наблюдается одновременная кристаллизация компонентов, происходящая при постоянной температуре (участок 3 – 4 рис. 1.2,б). После полного затвердевания сплава в точке 4 его температура снова начинает снижаться по плавной кривой 4 – 5.
Температура, соответствующая каким-либо фазовым превращениям в металле или сплаве, называется **критической точкой**. При нагревании твердых металлов или сплавов процесс их расплавления сопровождается поглощением теплоты.

## 3. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СПЛАВОВ

Чистые металлы в большинстве случаев не обеспечивают необходимого комплекса механических, технологических и функциональных свойств и поэтому применяются редко. В большинстве случаев в технике используют сплавы.
Металлическим **сплавом** называют материал, состоящий из двух или более компонентов и обладающий свойствами, характерными для металлов. Сплавы создаются в результате расплавления, спекания исходных компонентов и другими методами [1]. Необходимым процессом получения сплава является диффузия элементов в твердом, жидком или газообразном состоянии. Диффузия осуществляется путем взаимного проникновения частиц каждого из компонентов сплава с образованием новых однородных тел, называемых фазами.
Для описания свойств сплавов в металловедении используют понятия: система, фаза, компонент.
**Системой** называют совокупность фаз, находящихся в равновесии при определенных внешних условиях (температуре, давлении).
**Фазой** называют однородную по химическому составу, кристаллическому строению и свойствам часть системы, отделенную от ее других частей поверхностью раздела. Однофазной системой является, например, однородная жидкость, твердый чистый металл; двухфазной – механическая смесь двух видов кристаллических веществ.
**Компонентами** называют вещества, образующие систему. Компонентами могут быть элементы (металлы и неметаллы), а также химические соединения. По числу компонентов различают двойные, тройные и многокомпонентные сплавы. Компонент сплавов может быть основным, легирующим или случайным.
Сплавы, находящиеся в твердом состоянии, делят по составу на 3 группы: твердый раствор, химическое соединение, механическая смесь компонентов.
**Твердый раствор**. В жидком состоянии большинство металлических сплавов представляет собой однородные жидкости, т.е. жидкие растворы. При переходе в твердое состояние во многих таких сплавах однородность, а следовательно и растворимость, сохраняется. Твердый раствор, как и металл, имеет одну кристаллическую решетку, соответствующую типу кристаллической решетки основного компонента сплава (растворителя). Различие состоит в том, что в кристаллической решетке металла размещаются атомы одного элемента, а в твердом растворе – атомы различных элементов, образующих этот твердый раствор.
По характеру размещения атомов в кристаллической решетке различают твердые растворы замещения (рис. 1.3,а) и твердые растворы внедрения (рис. 1.3,б).

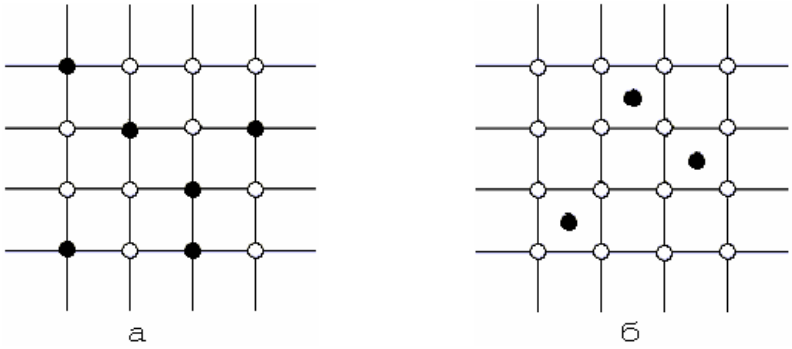



Рис. 1.3. Расположение атомов в твердых растворах [1]: а – замещения; б – внедрения; ○ – атом компонента-растворителя; ● – атом растворимого компонента

В твердых растворах замещения, состоящих из компонентов А и В, атомы растворимого компонента В замещают отдельные атомы основного компонента А – растворителя в кристаллической решетке. В этом случае при несовпадении размеров атомов размер элементарной ячейки может изменяться. Растворимость в твердом состоянии может быть неограниченной или ограниченной. Неограниченная растворимость обеспечивает замещение в кристаллической решетке любого числа атомов компонента А атомами компонента В.

Неограниченная растворимость возможна при следующих условиях:

1) наличие у компонентов кристаллических решеток (элементарных ячеек) одного типа;

2) незначительное отличие размеров атомов компонентов (не более чем на 8 %);

3) достаточно близкое соответствие строения валентных оболочек атомов компонентов (тип химической связи).

Примерами сплавов с неограниченной растворимостью компонентов являются сплавы Cu–Ni, Fe–Ni, Fe–Cr и др.

Если компоненты сплава не полностью удовлетворяют указанным выше условиям, образуются твердые растворы замещения с ограниченной растворимостью компонентов. При этом чем больше разница в размерах атомов компонентов, тем меньше растворимость в твердом состоянии. С изменением температуры ограниченная растворимость в твердом состоянии обычно меняется. Примерами систем с ограниченной растворимостью компонентов являются Al–Cu, Mg–Al и др.

В твердом растворе внедрения атомы растворимого компонента внедряются в междоузлия кристаллической решетки основного компонента (рис. 1.3,б). Такие твердые растворы обычно образуются, когда атомы растворимого компонента имеют небольшие размеры по сравнению с атомами растворителя. Чаще всего это имеет место, когда в металле растворяются неметаллические элементы. Примером твердого раствора внедрения является сплав Fe–C.

**Химическое соединение**. Элементы, образующие химические соединения, обычно резко отличаются по размерам атомов, строению электронных оболочек и параметрам кристаллических решеток. К образованию химических соединений склонны элементы, далеко расположенные друг от друга в периодической таблице Д.И. Менделеева.

В отличие от обычных химических соединений многие металлические соединения имеют переменный состав, который может изменяться в широких пределах. Получение химического соединения $A_mB_n$ с образованием однородного кристаллического вещества возможно только при строго определенных весовых соотношениях компонентов. При

этом образуется кристаллическая решетка, не похожая на решетки сплавляемых компонентов. Примером может служить сплав Cu–Mg при содержании 17 % Mg. Свойства сплава – химического соединения резко отличаются от свойств элементов, образующих его.

Сплавы – химические соединения не всегда встречаются в чистом виде. Например, при избытке растворимого компонента возможно образование химического соединения в комбинации с твердым раствором.

**Механическая смесь**. Образование механических смесей происходит, когда элементы обладают ограниченной растворимостью, а также при наличии химического соединения. Механические смеси могут состоять из кристаллов чистых компонентов, твердых растворов и химических соединений. При образовании механической смеси кристаллические решетки отдельных фаз не меняются. Механические смеси обычно образуют металлы, отличающиеся друг от друга размерами атомов и температурой плавления. Примером сплава, образующего механическую смесь, является система Ag–Pb.

Приведенные выше положения указывают в общем виде на особенности взаимодействия элементов при образовании сплавов и на их возможную структуру. Однако при образовании и термообработке сплавов на основе конкретных компонентов имеются особенности, которые в металловедении изучаются экспериментально. Например, для установления режимов термической обработки сплавов с целью придания им необходимых свойств необходимо знать температуры начала и окончания процессов плавления, перехода в твердое состояние, особенности структурных превращений в критических точках. Построение кривых охлаждения (нагревания) на основе экспериментальных данных называется **термическим анализом**. Полученные экспериментальные данные систематизируют, обобщают и отображают в виде особых диаграмм – диаграмм состояния сплавов.

## 4. ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ

**Диаграмма состояния** представляет собой графическое изображение фазового состояния сплавов и критических точек в зависимости от температуры и концентрации в условиях равновесия.

Для того чтобы обеспечить равновесное состояние системы охлаждение сплава из жидкого состояния осуществляют очень медленно. **Равновесными** считаются такие условия, при которых процессы, протекающие в системе, являются обратимыми. В данном случае – процессы, происходящие при охлаждении сплава, должны в точности совпадать с процессами, протекающими при его нагреве.

Диаграмму состояния строят в координатах температура – концентрация (рис. 1.4). Для сплавов, состоящих из двух компонентов A и B, состав характеризуется отрезком прямой, принятым за 100 %. Крайние точки A и B соответствуют 100 % чистых компонентов. Любая точка на этом отрезке характеризует состав двойного сплава. Так, например, точка C соответствует сплаву, состоящему из 20 % B и 80 % A; точка D – 60 % B и 40 % A.

Для построения диаграммы состояния из компонентов изготовляют серию сплавов различного состава и для каждого из них строят кривую охлаждения по результатам термического анализа в координатах температура – время (так же, как для металлов).

Особенности поликристаллического строения сплавов в твердом состоянии изучаются с помощью оптического микроскопа обычно при 100–1000-кратном увеличении. Атомная структура сплавов и параметры кристаллических решеток определяются методом рентгеноструктурного анализа.

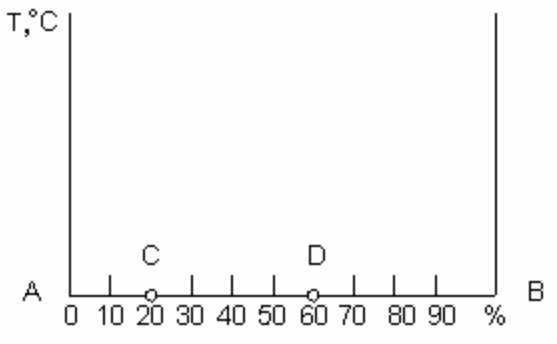



Рис. 1.4. Координаты для изображения диаграммы состояния двухкомпонентной системы

В зависимости от характера строения двухкомпонентных сплавов (в жидком состоянии оба компонента неограниченно растворяются друг в друге, образуя однородный жидкий раствор) различают следующие основные типы диаграмм состояния:

1) при образовании компонентами механической смеси;
2) при неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;
3) при ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;
4) при образовании компонентами химического соединения.

**Диаграмма состояния сплавов из компонентов,**

**образующих в твердом состоянии механическую смесь**

Экспериментально установлено, что при совместной кристаллизации сплавов, компоненты которых не растворяются друг в друге в твердом состоянии, температура начала кристаллизации всегда ниже, чем у исходных компонентов. Температура же окончания процесса перехода в твердое состояние одинакова для сплавов любого состава двухкомпонентной системы.

На рис. 1.5 приведена диаграмма состояния сплава с компонентами А и В. Выше линии KCN все сплавы двухкомпонентной системы представляют собой однофазный жидкий сплав (ж. с.). Эта линия называется **линией ликвидуса** (с греч. – жидкий), линия DCE – **линией солидуса** (с греч. – твердый). Ниже линии DCE все сплавы находятся в твердом состоянии. Сплав, соответствующий точке С, называется **эвтектическим** (эвтектикой).

**Эвтектикой**, таким образом, называется механическая смесь кристаллов двух (или более) твердых веществ одновременно закристаллизовавшихся из жидкого сплава при температуре ниже температуры плавления отдельных компонентов или любых других их смесей. Это определение относится к твердой эвтектике. Жидкой эвтектикой называется жидкий расплав (раствор), из которого возможна такая кристаллизация.

В отличие от эвтектики, **эвтектоид** – аналогичная ей составляющая металлических сплавов, образуется не из жидкой, а из твердой фазы. Эвтектоид, по сравнению с эвтектикой, имеет более тонкое дисперсное строение из двух или более фаз.

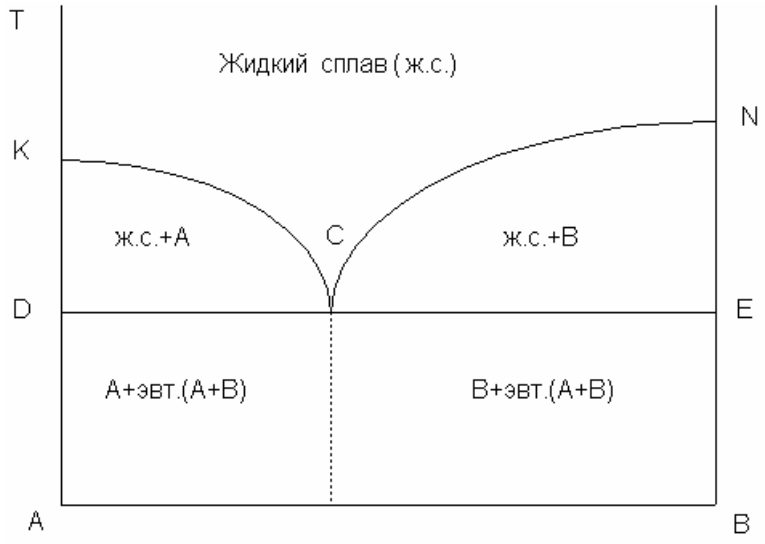



Рис. 1.5. Диаграмма состояния сплавов, образующих в твердом состоянии механическую смесь компонентов А и В

Эвтектический сплав данной системы имеет строго определенное процентное соотношение компонентов А и В. Сплавы, расположенные слева от эвтектики, называются **доэвтектическими**, а справа – **заэвтектическими**.

В доэвтектических сплавах сначала при охлаждении ниже линии ликвидуса КС выделяются кристаллы компонента А, а в заэвтектических – ниже линии CN – кристаллы компонента В.

После затвердевания, т.е. ниже линии солидуса DCE, доэвтектические сплавы состоят из кристаллов А и эвтектики, а заэвтектические – из кристаллов В и эвтектики.

## Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Рассмотрим построение диаграммы состояния для сплавов с неограниченной растворимостью в твердом состоянии. Например, экспериментально получены кривые охлаждения компонентов А и В и сплавов I (70 % А и 30 % В), II (50 % А и 50 % В) и III (20 % А и 80 % В) (рис. 1.6, а).Кристаллизация компонента А начинается и заканчивается при постоянной температуре $t_A$. Аналогично происходит кристаллизация компонента В при температуре $t_B$. Кристаллизация сплавов I, II и III происходит в интервале температур. Кристаллизация сплава I начинается при температуре $t_1$ и заканчивается при температуре $t_2$ с образованием твердого раствора $\alpha$. Аналогично происходит кристаллизация и двух других сплавов – при температуре $t_3$ начинается и при температуре $t_4$ заканчивается

затвердевание сплава II, а сплава III – при температурах $t_5$ и $t_6$. Разница только в интервале температур начала и конца кристаллизации [1].

Если на оси абсцисс сетки в координатах температура – концентрация (рис. 1.6, б) отметить точками исследованные сплавы и в каждой из этих точек восстановить перпендикуляры, т.е. провести линии сплавов, затем на эти линии, а также на левую и правую ординаты температур, соответствующие компонентам А (левая) и В (правая), перенести найденные критические точки от $t_A$ до $t_B$, и одноименные (имеющие одинаковый физический смысл) критические точки соединить плавными кривыми, то получится диаграмма состояния сплавов А и В с неограниченной растворимостью в твердом состоянии (рис. 1.6, б).

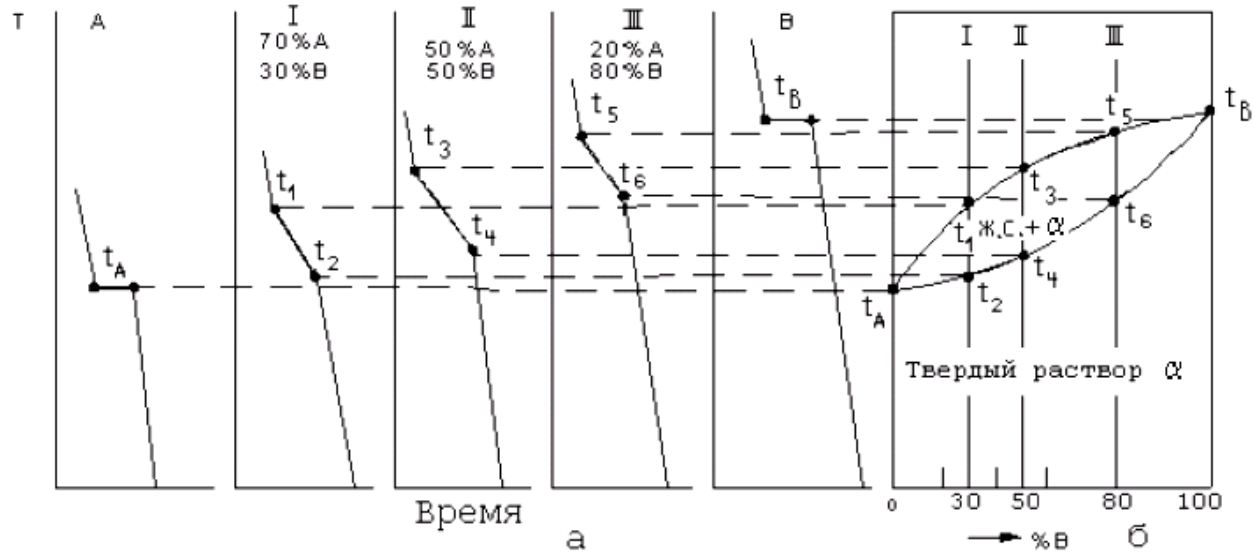



Рис. 1.6. Построение диаграммы состояния сплавов для случая неограниченной растворимости компонентов А и В в твердом состоянии [1]: а – кривые охлаждения; б – диаграмма состояния

На этой диаграмме кривая $t_A t_1 t_3 t_5 t_B$ – кривая начала затвердевания сплавов – *линия ликвидуса*, а кривая $t_A t_2 t_4 t_6 t_B$ – кривая конца затвердевания – *линия солидуса.*

Рассмотрим процесс кристаллизации какого-либо сплава, например сплава I состава 50 % компонента А и 50 % компонента В по этой диаграмме при очень медленном охлаждении, т.е. полностью в равновесных условиях (рис. 1.7). При температуре $t_л$ начинается кристаллизация и образуются первые кристаллы. На любой диаграмме состояния состав твердой части сплава (состав кристаллов, которые могут находиться в равновесии с жидкостью) при данной температуре показывает линия солидуса. Следовательно, первые образовавшиеся кристаллы имеют состав точки М. При

дальнейшем охлаждении, когда сплав достигает, например, температуры $t_1$, в равновесии с жидкостью уже находятся только кристаллы состава точки Л.

Рассмотрим, каким образом ранее образовавшиеся кристаллы состава точки М превращаются в кристаллы состава точки Л. В кристаллах состава М больше компонента В, чем в кристаллах состава Л; следовательно, кристаллы состава М обогащаются компонентом А. Этот процесс происходит за счет диффузии атомов компонента А в уже имеющиеся, т.е. возникшие до этой температуры, кристаллы. При достаточной выдержке или медленном охлаждении при $t_1$ устанавливается равновесие кристаллов точки Л и жидкого сплава. Но в кристаллах состава точки Л компонента В больше, чем в сплаве; следовательно, жидкая часть сплава беднее компонентом В. При этой температуре состав жидкой части сплава определяется линией ликвидуса, т.е. точкой N. При дальнейшем охлаждении, когда сплав достигает температуры $t_2$ и устанавливается равновесие, сплав состоит из кристаллов состава точки К и жидкой части сплава состава точки Р. При достижении температуры $t_c$ сплав полностью затвердевает и состоит из однородных кристаллов твердого раствора (состава 50 % А и 50 % В).

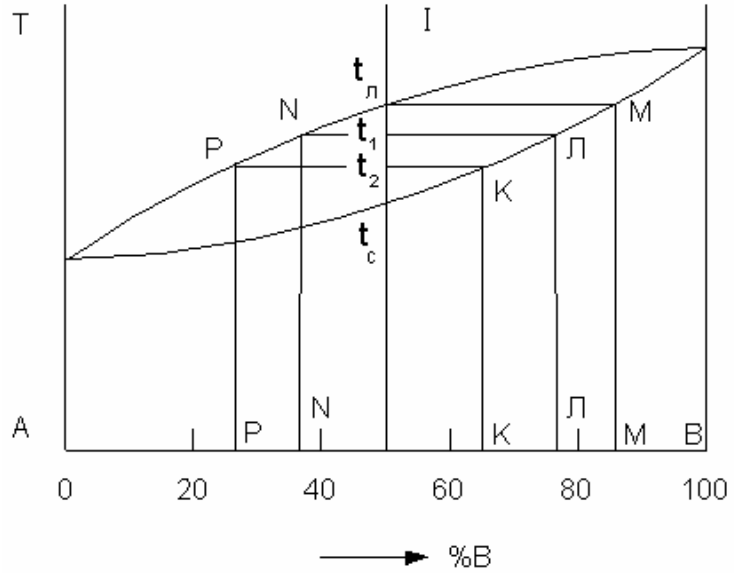



Рис. 1.7. Диаграмма состояния сплавов для случая неограниченной растворимости компонентов А и В в твердом состоянии

В реальных условиях ускоренного охлаждения состав кристаллов не получается однородным в связи с тем, что скорость кристаллизации больше скорости диффузии.

**Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии**

Один из видов такой диаграммы состояния показан на рис. 1.8. Число фаз в данной системе три – жидкий раствор, твердый раствор компонента В в компоненте А (обозначим его α) и твердый раствор компонента А в компоненте В (обозначим его β) [1].

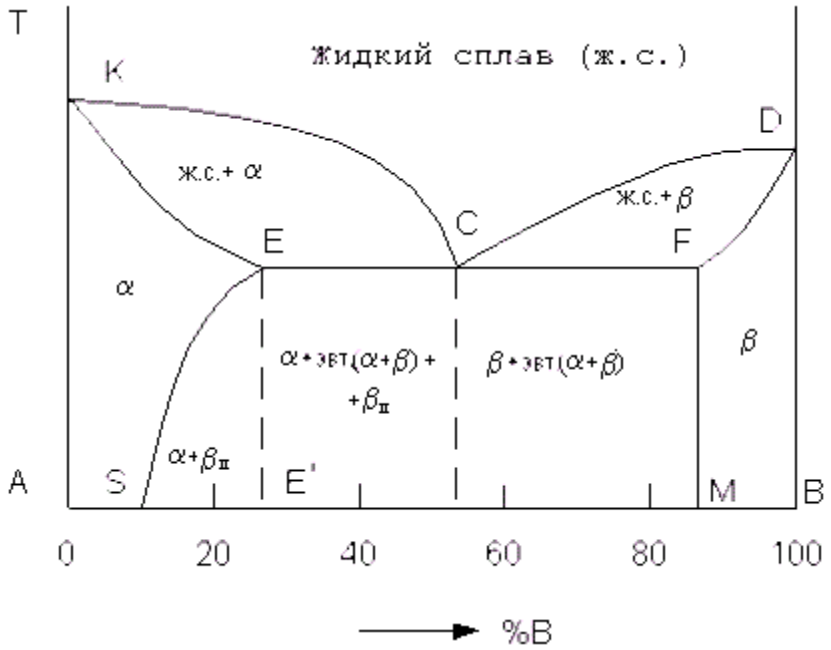



Рис. 1.8. Диаграмма состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонентов А и В в твердом состоянии

На этой диаграмме линия KCD – линия ликвидуса, линия KECFD – линия солидуса. По линии ликвидуса КС из жидкого сплава выделяются кристаллы α, а по линии CD кристаллы β. На линии солидуса КЕ сплавы затвердевают с образованием кристаллов α, на линии DF – кристаллов β. На линии солидуса ECF происходит одновременная кристаллизация α- и β-фаз с образованием эвтектики.

Сплав состава точки С после затвердевания состоит только из одной эвтектики α+β. Аналогично ранее рассмотренному случаю сплавы, по своему составу находящиеся левее эвтектической точки С (на линии ЕС), после затвердевания имеют структуру α+эвтектика (α+β) и являются доэвтектическими. Сплавы, по своему составу лежащие правее точки С (на линии CF), после затвердевания имеют структуру β+эвтектика (α+β) и являются заэвтектическими.

Линия ES показывает ограниченную растворимость в твердом состоянии компонента B в компоненте A, уменьшающуюся с понижением температуры, а линия FM – растворимость компонента A в B, не изменяющуюся с понижением температуры.

Точка E характеризует предельную растворимость компонента B в компоненте A, а точка F – A в B. Если кристаллизуются сплавы, состав которых находится левее точки S (или правее точки M), то при любой температуре в твердом состоянии все количество компонентов B (или A) находится в твердом растворе и структура таких сплавов состоит из зерен $\alpha$ (или $\beta$). В сплавах, состав которых находится между точками S и E', т.е. за пределом растворимости B в A, образовавшиеся при затвердевании кристаллы $\alpha$ при понижении температуры ниже линии ES пересыщены компонентом B и поэтому происходит выделение из них избыточных кристаллов, которыми являются кристаллы $\beta$ концентрации точки M, называемые вторичными ($\beta_{11}$). После полного охлаждения эти сплавы имеют структуру, состоящую из кристаллов $\alpha$ состава точки S и кристаллов $\beta_{11}$ – $\alpha + \beta_{11}$. В сплавах состава линии EC, имеющих после затвердевания структуру $\alpha$ + эвтектика ($\alpha+\beta$), из кристаллов $\alpha$ тоже выделяются кристаллы $\beta$, и после полного охлаждения будет структура $\alpha$ + эвтектика ($\alpha+\beta$)+$\beta_{11}$.

Процесс выделения вторичных кристаллов из твердого раствора называется *вторичной кристаллизацией*, в отличие от образования кристаллов в жидком сплаве (*первичная кристаллизация*).

## Диаграмма состояния сплавов с образованием компонентами химического соединения

Химическое соединение обозначают $A_mB_n$. Это означает, что в данном соединении на m атомов компонента A приходится n атомов компонента B. Диаграмма состояния сплавов для случая образования между компонентами химического соединения, состав которого при нагреве и охлаждении не изменяется, приведена на рис. 1.9.

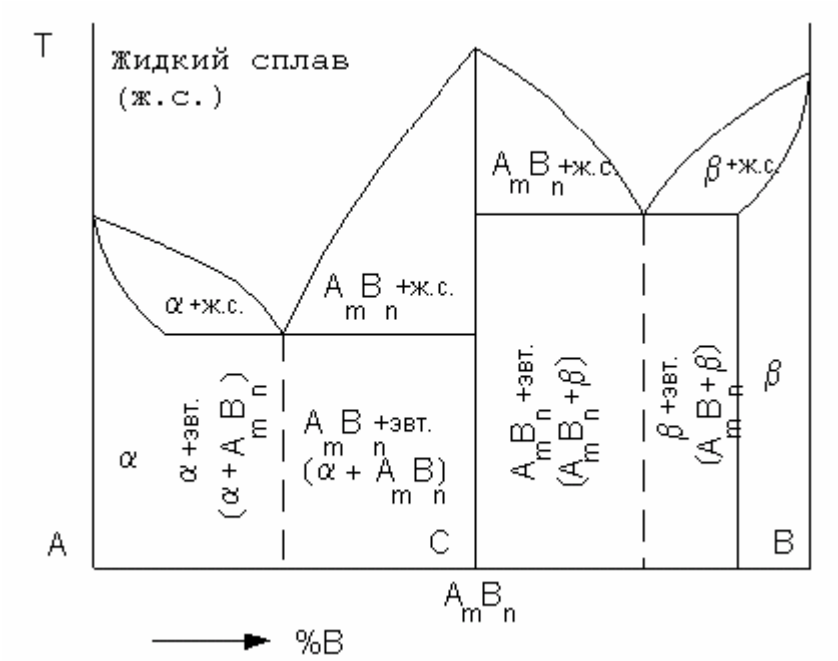



Рис. 1.9. Диаграмма состояния сплавов для случая образования компонентами А и В химического соединения

Данная диаграмма как бы составлена из двух диаграмм: компонент А – химическое соединение $A_mB_n$ и компонент В – химическое соединение $A_mB_n$. В сплавах левее точки С (соответствующей по составу химическому соединению $A_mB_n$) компонента А имеется больше, чем входит в химическое соединение. Следовательно, в этих сплавах левее точки С образуется эвтектика $\alpha$+ $A_mB_n$. В сплавах правее точки С компонента В больше, чем может входить в химическое соединение. Следовательно, в этих сплавах образуется эвтектика $A_mB_n+\beta$.

**Связь между свойствами сплавов и типом диаграммы состояния**

Основоположником учения о связи диаграмм состояния со свойствами сплавов является академик Н.С. Курнаков. На рис. 1.10 схематически показана зависимость свойств сплавов от типа диаграммы состояния, откуда можно вывести следующее: при образовании твердых растворов с неограниченной растворимостью свойства изменяются по плавным кривым (рис. 1.10, б); при образовании твердых растворов с ограниченной растворимостью или механической смеси свойства изменяются прямолинейно (рис. 1.10, а, в); при образовании химического соединения свойства изменяются резко – скачком (рис. 1.10, г).

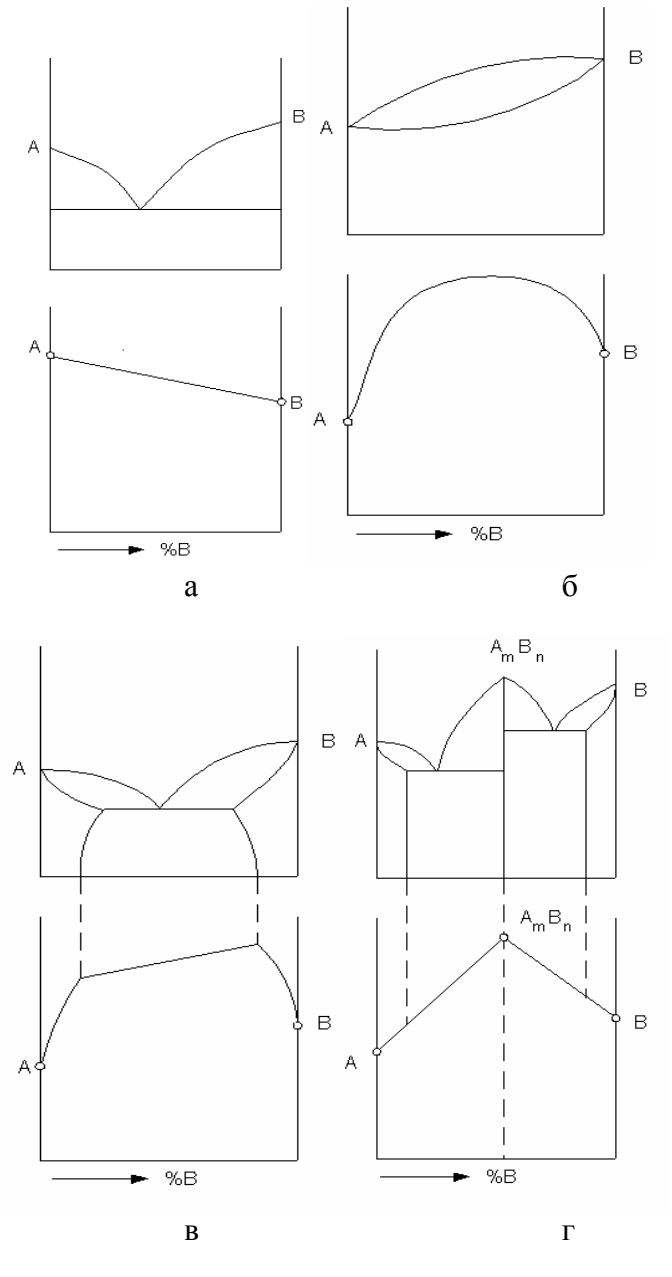



Рис. 1.10. Свойства сплавов и вид их диаграммы состояния (по Н.С. Курнакову)

## 5. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО – УГЛЕРОД

### Основные свойства железа

Чистое железо – металл серебристо-белого цвета, весьма пластичный. Железо образует несколько окислов: FeO, $Fe_2O_3$, $Fe_3O_4$. Температура плавления $T_{пл}$=1539 °С, кипения – $T_{кип}$=2450 °С. Свойства железа в значительной степени зависят от содержания углерода, в меньшей – от других компонентов, концентрация которых ниже (Si, Mn, P, S и др.). Для железа характерно явление **полиморфизма** (**аллотропии**), при котором твердые вещества могут изменять тип кристаллической решетки и свойства под воздействием внешних факторов (температура, давление и т.д.) Железо имеет 4 полиморфные модификации: α-, β-, γ- и δ-Fe. Кристаллическая решетка α-, β- и δ-Fe – ОЦК с разными межатомными расстояниями, γ-Fe – ГЦК. Модификации α- и γ-Fe способны образовывать твердые растворы с углеродом. Другими примерами веществ, обладающих аллотропными

модификациями структуры и свойств, являются: углерод (алмаз и графит); двуокись кремния (α- и β-кварц, тридимит, кристобалит, стишовит, коэсит); серое и белое олово. Полиморфные превращения являются обратимыми, в процессе выделяется скрытая теплота кристаллизации (если превращение идет при охлаждении). На кривой охлаждения появляются критические точки и горизонтальные участки, соответствующие процессам перекристаллизации.

На рис. 1.11 приведена кривая охлаждения железа из расплавленного состояния, на которой горизонтальными участками отделены температурные интервалы существования различных модификаций железа.

При переходе β-Fe в α-Fe тип кристаллической решетки сохраняется, но меняются физические свойства: железо из парамагнитного состояния переходит в ферромагнитное, т.е. при температуре ниже 768°С становятся возможными спонтанная намагниченность материала и его доменная структура.

К железоуглеродистым сплавам относят стали и чугуны. Основными элементами, от которых зависят структура и свойства сталей и чугунов, являются железо и углерод. Железо с углеродом образует твердые растворы внедрения и химическое соединение; α–железо растворяет очень мало углерода (до 0,02 % при 727 °С). Твердый раствор углерода и других элементов в α-железе называется *ферритом*. Феррит имеет низкую твердость и прочность: НВ 80; $\sigma_B$=250 МПа (25 кгс/мм$^2$) и высокую пластичность (Θ=50 %). γ-железо растворяет значительно большее количество углерода – до 2,14 % при 1147 °С. Твердый раствор углерода и других элементов в γ-железе называется *аустенитом.* В железоуглеродистых сплавах он может существовать только при высоких температурах. Аустенит пластичен, твердость его НВ 160–200, Θ=40÷50 %.

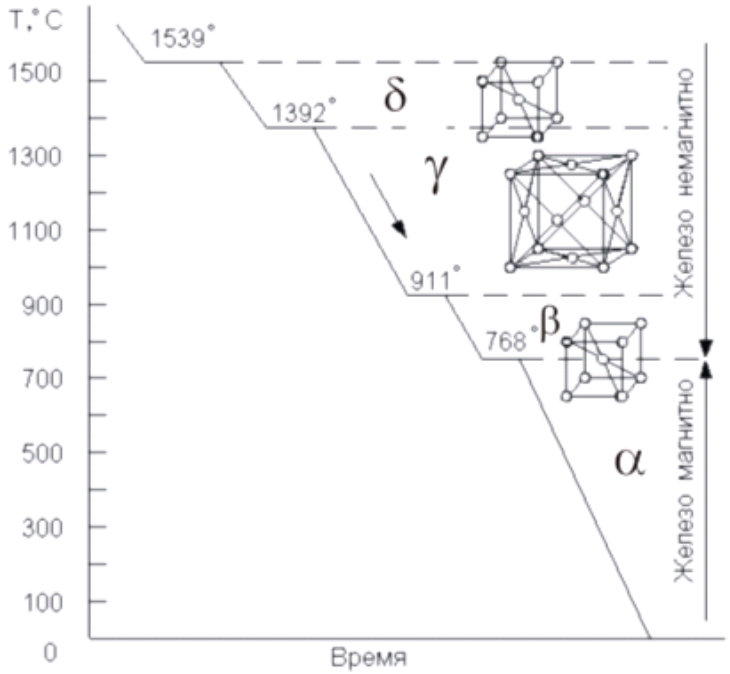



Рис. 1.11. Кривая охлаждения железа

Железо с углеродом также образует химическое соединение $Fe_3C$, называемое *цементитом* или карбидом железа. В цементите содержится 6,67 % С; он имеет высокую твердость (~НВ 800), но чрезвычайно низкую, практически нулевую, пластичность.

**Диаграмма состояния железо – цементит(Fe – $Fe_3C$)**

Диаграмма состояния Fe – $Fe_3C$ (в упрощенном виде) приведена на рис. 1.12. На этой диаграмме точка А (1539 °С) соответствует температуре плавления (затвердевания)

железа, а точка D (~1600 °С) – температуре плавления (затвердевания) цементита. Линия ACD – линия ликвидуса, показывающая температуры начала затвердевания (конца плавления) сталей и чугунов. Линия AECF – линия солидуса, показывающая температуры конца затвердевания (начала плавления).
По линии ликвидуса AC (при температурах, соответствующих линии AC) из жидкого сплава кристаллизуется аустенит, а по линии ликвидуса CD – цементит, называемый первичным цементитом.

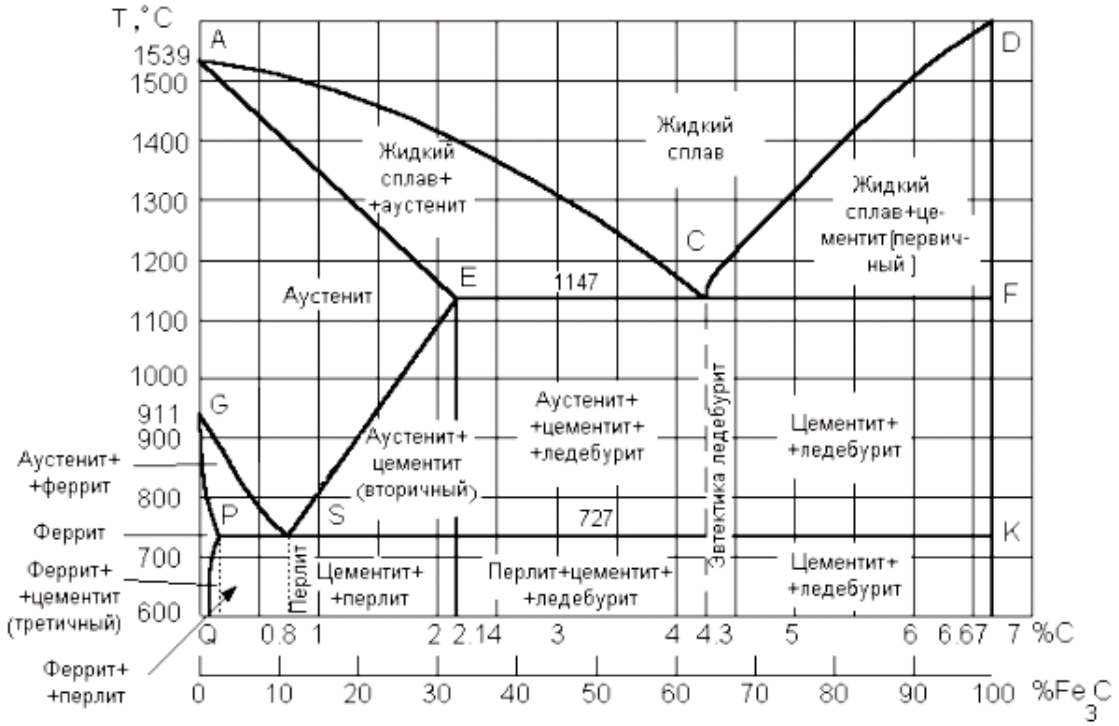



Рис. 1.12. Диаграмма состояния Fe – $Fe_3C$ (в упрощенном виде)

В точке С при 1147 °С и содержании 4,3 % С из жидкого сплава одновременно кристаллизуются аустенит и цементит первичный, образуя эвтектику, называемую *ледебуритом*. По линии солидуса AE сплавы с содержанием до 2,14 % С окончательно затвердевают с образованием аустенита. По линии солидуса EC (1147 °С) сплавы с содержанием 2,14–4,3 % С окончательно затвердевают с образованием эвтектики ледебурита. Так как при более высоких температурах из жидкого сплава выделяется аустенит, следовательно, такие сплавы после затвердевания имеют структуру аустенит+ледебурит. По линии солидуса CF (1147 °С) сплавы с содержанием 4,3–6,67 % С окончательно затвердевают также с образованием эвтектики ледебурита. Так как при более высоких температурах из жидкого сплава выделяется цементит (первичный), следовательно, такие сплавы после затвердевания имеют структуру – первичный цементит+ледебурит.
В результате первичной кристаллизации во всех сплавах с содержанием до 2,14 % С образуется однофазная структура – аустенит. Сплавы железа с углеродом, в которых в результате первичной кристаллизации в равновесных условиях получается аустенитная структура, называют *сталями*. Следовательно, сталь – это железоуглеродистые сплавы с содержанием до 2,14 % С. Сплавы с содержанием более 2,14 % С, в которых при кристаллизации образуется ледебурит, называют *чугунами*. Следовательно, чугун – это железоуглеродистые сплавы с содержанием более 2,14 % С. Излом таких чугунов светлый, блестящий (белый излом), поэтому такие чугуны называют белыми.
В железоуглеродистых сплавах превращения в твердом состоянии характеризуют линии GSE, PSK, PQ. Линия GS показывает начало превращения аустенита в феррит (при

охлаждении). Критические точки, лежащие на линии GS, обозначают $A_3$ (при нагреве $Ac_3$, а при охлаждении $Ar_3$). Линия SE показывает, что с понижением температуры растворимость углерода в аустените уменьшается. Так, при 1147 °С в аустените может раствориться 2,14 % С, а при 727 °С – 0,8 % С. С понижением температуры из аустенита выделяется избыточный углерод в виде цементита, называемого вторичным. Критические точки, лежащие на линии SE, обозначают А*cm*. В чугунах с содержанием 2,14–4,3 % С при 1147 °С, кроме ледебурита, есть аустенит, из которого при понижении температуры тоже выделяется вторичный цементит.
Линия PSK (727 °С) – линия эвтектоидного превращения. На этой линии во всех железоуглеродистых сплавах аустенит распадается, образуя структуру, представляющую собой механическую смесь феррита и цементита и называемую *перлитом* (~НВ 200). Критические точки, лежащие на линии PSK, обозначают $A_1$ (при нагреве $Ac_1$, а при охлаждении $Ar_1$).
Линия PQ показывает, что с понижением температуры растворимость углерода в феррите уменьшается от 0,02 % при 727 °С до 0,006 % при комнатной температуре. При охлаждении ниже 727 °С из феррита выделяется избыточный углерод в виде цементита, называемого третичным.
Ниже 727 °С железоуглеродистые сплавы имеют следующие структуры.
Стали, содержащие менее 0,8 % С – феррит+перлит, называют доэвтектоидными сталями (рис. 2.13, а).
Стали с содержанием 0,8 % С – перлит, называют *эвтектоидными сталями* (рис. 1.13, б).
Стали с содержанием 0,8–2,14 % С – перлит и цементит (вторичный), называют *заэвтектоидными сталиями* (рис. 1.13, в).
В рассмотренных выше сплавах, таким образом, имеются 3 твердые фазы – феррит, цементит и аустенит и эти же фазы в структурно связанном состоянии: эвтектоид – перлит и эвтектика – ледебурит.

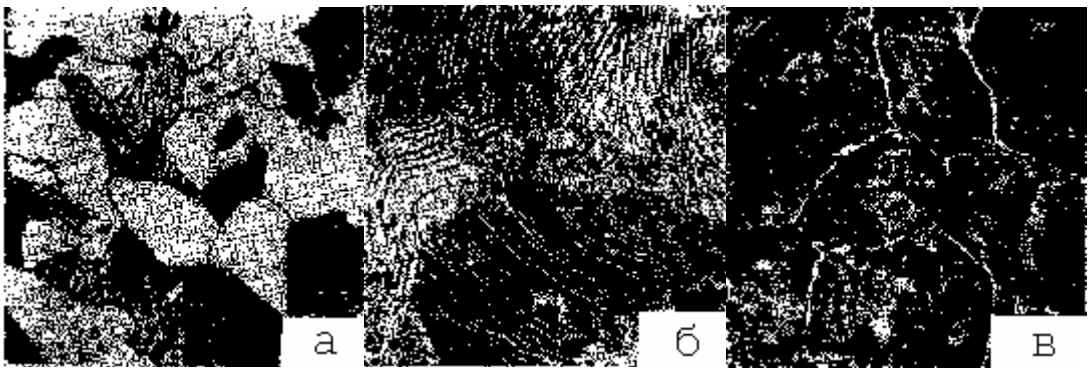


Рис. 1.13. Микроструктура стали [1]: а – доэвтектоидная сталь – феррит (светлые участки) и перлит (темные участки), ×500; б – эвтектоидная сталь – перлит, × 1000; в – заэвтектоидная сталь – перлит и цементит (в виде сетки), × 200

В сплавах железо – углерод при распаде аустенита взможна кристаллизация углерода в свободном состоянии в виде *графита*.
Графит является неметаллической фазой, он мягок и обладает низкой пластичностью, располагается в основной массе сплава, имеет развитую объемную форму в виде пластинок.
Диаграмма состояния системы железо – цементит используется на практике для определения видов и режимов термической обработки стали с целью придания сплаву необходимых свойств.

# 6. ТЕРМИЧЕСКАЯ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

**Термической обработкой** называют процессы, связанные с нагревом и охлаждением, вызывающие изменения внутреннего строения сплава и обусловленные этим изменения физических, механических и других свойств.

Основой процессов термической обработки является полиморфизм железа и его твердых растворов на основе $\alpha$- и $\gamma$-Fe. В результате полиморфизма происходит изменение кристаллической структуры сплавов в твердом состоянии. Следует отметить, что нагрев или охлаждение однокомпонентного металла (железа) не оказывает значительного влияния на его структуру и свойства. Между тем термическая обработка углеродистой стали при определенных условиях позволяет изменять структуру материала и его физико-механические свойства в широких пределах.

Термической обработке с целью требуемого изменения структуры и свойств (твердости, обрабатываемости и др.) подвергают как полуфабрикаты (заготовки), так и готовые изделия (детали, инструмент). В зависимости от структурного состояния стали, получаемого в результате применения термообработки, последняя подразделяется на отжиг (первого и второго рода), нормализацию, закалку и отпуск.

Технологический процесс термообработки включает 3 последовательно выполняемые операции:

1) нагрев до определенной температуры;
2) выдержку при этой температуре;
3) охлаждение с заданной скоростью.

Для понимания особенностей фазовых превращений, происходящих при термической обработке стали, необходимо рассмотреть процесс перехода аустенита в перлит. Этот процесс включает 4 этапа.

1. При охлаждении аустенита до температуры, равной 727 °С, происходит практически мгновенный переход $\gamma$-Fe в $\alpha$-Fe с изменением типа кристаллической решетки с ГЦК на ОЦК. При этом выделяется избыточный углерод, который не успевает диффундировать и остается в решетке железа. В результате образуется сплав – пересыщенный твердый раствор углерода в $\alpha$-Fe, который носит название *мартенсит* (твердость – 62 – 65 НВ).

2. Углерод начинает диффундировать к центрам кристаллизации и образуется смесь кристаллов $\alpha$-Fe+C и цементита $Fe_3C$. Линейный размер кристаллов цементита составляет ~$10^{-5}$мм. Такой сплав называется *трооститом* (твердость – 40 НВ).

3. Зерна $Fe_3C$ увеличиваются до ~$10^{-4}$мм и образуется смесь кристаллов $\alpha$-Fe+C и $Fe_3C$, которая называется *сорбитом* (твердость – 30 НВ).

4. Зерна $Fe_3C$ вырастают до размера, превышающего $10^{-3}$ мм, и образуется *перлит* (твердость – 15–20 НВ).

Структуры аустенита и перлита являются стабильными (равновесными), а мартенсита, троостита и сорбита – неравновесными.

Известно, что если аустенит охлаждать со скоростью 50 град/с, образуется сорбит; 100 град/с – троостит; 150–200 град/с – мартенсит. При термообработке, вызывающей переход аустенита в мартенсит, плотность стали уменьшается (плотность аустенита – (8,0–8,1) г/см$^3$, мартенсита – 7,8 г/см$^3$), а линейные размеры и объем увеличиваются. Поэтому после термообработки в материале возникают внутренние механические напряжения.

**Отжигом** называется процесс термической обработки, включающий нагрев до определенной температуры, выдержку и последующее, как правило, медленное охлаждение (в печи) с целью получения более равновесной структуры стали. В результате отжига устраняются внутренние напряжения, измельчается зерно, повышается пластичность стали.

*Отжиг первого рода* – это термическая обработка, при которой, как правило, не происходит фазовых превращений (перекристаллизации), а если они имеют место, то не оказывают влияния на конечные результаты, предусмотренные целевым назначением. В зависимости от температурного режима отжиг первого рода устраняет неоднородности химического состава или физических свойств, созданные предшествующими обработками. Разновидностями отжига первого рода являются диффузионный и рекристаллизационный.

Целью *диффузионного* отжига (гомогенизации) являются выравнивание химического состава и удаление дендритной структуры кристаллов в фасонных отливках и слитках легированной стали. Неоднородность химического состава заготовок повышает анизотропию их свойств и склонность стали, обрабатываемой давлением, к хрупкому разрушению. Диффузионный отжиг производится при температурах 1100 – 1200 °С в течение 30 – 50 ч. Только при таких условиях наиболее эффективно протекают диффузионные процессы, необходимые для выравнивания состава стали по всему объему.

Общая продолжительность процесса, включающая нагрев, выдержку и медленное охлаждение со скоростью 30 – 100 град/ч (обычно вместе с печью) может превышать 100 ч.

*Рекристаллизационный* отжиг (разновидность *низкого* отжига) – термическая обработка холоднодеформированной стали, включающая нагрев выше температуры рекристаллизации, выдержку при этой температуре и последующее охлаждение. Целью рекристаллизационного отжига является устранение наклепа и получение определенной величины зерна. Наклеп возникает в результате весьма высоких давлений, применяемых при обработке давлением, резанием и пр. Зерна поверхностных слоев приобретают вытянутую форму. Создаются относительные смещения (сдвиги) частей кристаллической решетки.

Рекристаллизационный отжиг применяют как до, так и после холодной обработки давлением для снятия созданных наклепом внутренних напряжений в материале.

Для достижения рекристаллизации по всему объему и сокращения времени процесса температура отжига должна превышать температуру порога рекристаллизации. Для углеродистых сталей (содержащих 0,08 – 0,2 % углерода), чаще подвергаемых холодной деформации (прокатке, штамповке, волочению), температура отжига составляет 680 – 700 °С, продолжительность – от 0,5 до 1,5 ч.

После отжига зерна поверхностных слоев материала, деформированные и сплющенные после наклепа, восстанавливают нормальную форму. Сталь приобретает мелкозернистое строение, пониженную твердость, повышаются пластичность и обрабатываемость в холодном состоянии.

Целью *отжига второго рода* являются фазовые превращения – перекристаллизация стали с достижением практически равновесного структурного (фазового) состояния. Различают следующие разновидности отжига второго рода: полный, неполный, изотермический.

*Полному* отжигу подвергают доэвтектоидную сталь с целью создания мелкозернистости, понижения твердости и повышения пластичности, снятия внутренних напряжений. Сталь нагревают до температуры на 30 – 50 °С выше точки $Ac_3$. При нагреве исходная крупнозернистая ферритно-перлитная структура превращается в мелкозернистую структуру аустенита, обеспечивающую высокие вязкость и пластичность стали. Продолжительность выдержки должна быть достаточной для полного прогрева всего объема материала и завершения фазовых превращений. Чрезмерное повышение

температуры выше точки $Ac_3$ вызывает рост зерна аустенита, что ухудшает свойства стали.

При последующем медленном охлаждении из мелкозернистого аустенита образуется мелкая ферритно-перлитная структура. Медленное охлаждение должно обеспечить распад аустенита при малых степенях переохлаждения, чтобы избежать образования излишне дисперсной ферритно-карбидной структуры и свойственной ей высокой твердости. Скорость охлаждения, необходимая для полного отжига, зависит от устойчивости переохлажденного аустенита, следовательно, от состава стали. В связи с этим легированные стали, отличающиеся высокой устойчивостью переохлажденного аустенита, охлаждаются значительно медленнее (10 –100 °С/ч), чем углеродистые (200 – 250 °С/ч).

Заэвтектоидную сталь полному отжигу не подвергают.

*Неполному* отжигу подвергают заэвтектоидную и эвтектоидную сталь с целью превращения пластинчатого перлита в зернистый. Для получения зернистого перлита заэвтектоидную сталь нагревают до температуры немного выше точки $Ac_1$ (до 740 – 780 °С). При нагреве происходит превращение перлита в аустенит, а цементит остается и образуется структура цементит+аустенит.

При последующем медленном охлаждении из аустенита образуется ферритоцементитная структура с зернистой формой цементита – зернистый перлит. Заэвтектоидные (инструментальные) стали подвергают только неполному отжигу для снижения твердости и улучшения обрабатываемости резанием, а также подготовки структуры к закалке. Доэвтектоидные стали неполному отжигу подвергают редко в связи с неполной перекристаллизацией структуры.

Изотермический отжиг обычно применяют для легированных сталей с целью полного распада аустенита и образования ферритно-перлитной структуры. Нагрев осуществляется при температуре, применяемой для полного отжига. Затем производят сравнительно быстрое охлаждение (переносом в другую печь) до температуры, лежащей ниже точки $Ac_1$ (~650 °С), и начинают изотермическую выдержку, необходимую для полного распада аустенита, после чего следует охлаждение на воздухе.

Преимущество изотермического отжига состоит в снижении продолжительности процесса по сравнению с полным отжигом. При выборе температуры выдержки изотермического отжига, близкой к температуре минимальной устойчивости переохлажденного аустенита в

перлитной области, достигается минимальное время процесса. Другим преимуществом отжига является получение более однородной структуры материала.

*Изотермический* отжиг улучшает обрабатываемость стали резанием и чистоту поверхности, уменьшает склонность к деформации при последующих термической и (или) химико-термической обработках.

**Нормализация** – это термическая обработка, включающая нагрев до температуры на 30 – 50 градусов выше критических точек $Ac_3$ для доэвтектоидной стали и A*cm* для эвтектоидной стали, выдержку при этой температуре и охлаждение на воздухе. Вследствие более быстрого охлаждения, чем при полном отжиге, структура перлита после нормализации является такой же, как после полного отжига, но более дисперсной (тоньше пластинки ферритоцементитной смеси).

Цель нормализации доэвтектоидных и эвтектоидных сталей та же, что и полного отжига. Однако после нормализации твердость и прочность стали выше, чем после полного отжига. Нормализация применяется обычно для исправления структуры перегретой и литой стали, измельчения зерна, смягчения стали перед обработкой и резанием, подготовки к закалке, устранения сетки вторичного цементита в заэвтектоидной стали [6]. Нормализация, по сравнению с отжигом, – более экономичная операция, так как не требует длительного охлаждения вместе с печью.

**Закалка** стали применяется для значительного повышения прочности и твердости материала. Закалка производится нагреванием на 30 – 50 градусов выше температур, соответствующих линии аустенитного превращения (GSK) диаграммы состояния Fe – C (рис. 1.12); затем осуществляется выдержка в течение необходимого времени. Охлаждение после закалки проводится с высокой скоростью 100 – 500 град/с. Основным и решающим фактором, определяющим структуру и физико-механические свойства закаленной стали, является именно скорость охлаждения.

Особое значение для закалки имеет скорость охлаждения в интервале температур, где аустенит менее всего устойчив (650 – 550 °C). Обычно этот интервал температур при закалке необходимо пройти быстро. Важное значение имеет скорость охлаждения и в интервале температур 300 – 200 °C, когда во многих сталях происходит образование мартенсита. В этом интервале требуется более медленное охлаждение во избежание возникновения напряжений и закалочных трещин.

На практике применяют следующие охлаждающие среды: вода, 10 %-е растворы NaCl, $H_2SO_3$, $Na_2CO_3$ в воде, машинное масло, трансформаторное масло, эмульсия масла в воде, мыльная вода, керосин, воздух.

Углеродистые стали, имеющие высокую критическую скорость закалки, охлаждают (закаливают) в воде, а легированные стали, имеющие более низкую критическую скорость закалки, охлаждают в масле, где охлаждение происходит медленнее. Недостатком масла как охлаждающей среды являются его легкая воспламеняемость и относительно высокая стоимость. С понижением температуры охлаждающей среды закалка стали становится более резкой.

Существуют следующие способы закалки: в одном охладителе; в двух средах; с подстуживанием (перед погружением в охладитель материал некоторое время выдерживают на воздухе); ступенчатая; изотермическая закалка и др.

Существует метод поверхностной закалки – нагревание за счет теплового действия тока, индуцируемого в поверхностных слоях материала при помещении его в электромагнитное поле высокой частоты.

Кроме высоких прочности и твердости, закаленная сталь приобретает и повышенную хрупкость.

**Отпуском** называют нагрев закаленной стали до температуры ниже критической точки $Ac_1$ с выдержкой при этой температуре и с последующим сравнительно медленным охлаждением на воздухе. Целью отпуска являются частичное или полное устранение внутренних напряжений, снижение твердости и повышение вязкости.

Отпуск является заключительной операцией термической обработки стали. Основными факторами, влияющими на свойства стали после отпуска, являются температура нагрева и продолжительность выдержки. В зависимости от значения температуры отпуск разделяют на низко- и высокотемпературный.

Цель *низкотемпературного* отпуска, проводимого при 150 – 250 °С – уменьшение внутренних напряжений в закаленной детали без снижения твердости. Отпуск проводят в масляных или солевых ваннах. Низкотемпературный (низкий) отпуск называют также отпуском на мартенсит.

*Среднетемпературный* (средний) отпуск – отпуск на троостит – происходит при нагреве до температур 350 – 450 °С. При этом снижается твердость стали.

*Высокотемпературный* (высокий) отпуск – отпуск на сорбит – производится при температуре 500 – 650 °С. Применяют в машиностроении для изделий из

конструкционной стали с целью обеспечения достаточной прочности, вязкости и пластичности. Сочетание закалки с высоким отпуском на сорбит называется *улучшением* стали. Эту операцию применяют для среднеуглеродистых сталей (0,35 – 0,60 % С).

**Химико-термическая обработка стали** – это процесс, представляющий собой сочетание термического и химического воздействия с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя стали.

При химико-термической обработке протекают следующие процессы [6]: распад молекул во внешней среде и образование атомов диффундирующего элемента (диссоциация); поглощение атомов поверхностью стали (адсорбция); проникновение атомов в глубь стали (диффузия).

Химико-термическая обработка позволяет получить стальную деталь с твердым поверхностным слоем и мягкой сердцевиной.

Диффузионное насыщение поверхности деталей проводят различными элементами: углеродом, азотом, хромом, кремнием, бором и др.

*Цементация* – процесс химико-термической обработки, представляющей собой диффузионное насыщение поверхностного слоя стали углеродом. В поверхностном слое содержание углерода составляет 0,8 – 1,0 %.

Цементацию проводят в твердых, жидких и газообразных средах, называемых карбюризаторами. В качестве твердого карбюризатора применяют древесный уголь с добавлением углекислых солей ($BaCO_3$, $Na_2CO_3$ и др.). Жидкие карбюризаторы (смесь цианистого калия с бурой, содой и другими веществами) применяют в случаях, когда нужно получить тонкий цементированный слой с высоким содержанием углерода.

Газовую цементацию проводят при нагреве деталей до 900 – 950 °С в специальных герметически закрытых печах, в которые непрерывным потоком подают цементирующий углеродсодержащий газ (метан, бензол и др.).

Цементированные детали (зубчатые колеса, ролики подшипников и др.) подвергают термической обработке, наиболее часто закалке при 820 – 850 °С и отпуску.

*Азотирование* – процесс химико-термической обработки, представляющий собой диффузионное насыщение поверхностного слоя стали азотом. Цель азотирования – получение поверхности деталей высокой твердости и износостойкости или устойчивости против коррозии (антикоррозионное азотирование) [1].

Для азотирования детали нагревают (при 500 – 700 °С) в специальной герметически закрытой печи, через которую пропускают аммиак $NH_3$. Образовавшийся свободный азот,

находящийся в атомарном состоянии, воздействует на сталь и образует с элементами, входящими в ее состав (Fe, Cr, Al), нитриды, придающие поверхностному слою очень высокую твердость. Недостаток азотирования – длительность процесса (до 90 ч). Азотированию подвергают цилиндры моторов и насосов, зубчатые колеса, штампы, пуансоны и др. Антикоррозионному азотированию подвергают в основном углеродистые стали при 600 – 700 °С с выдержкой в течение 0,5 – 1 ч.

Поверхностное насыщение стали одновременно углеродом и азотом в расплавленной цианистой соли называют *цианированием*, а в газовой среде – *нитроцементацией*. Цель этих процессов – получение высокой твердости и износостойкости поверхности деталей. Процессы проводятся при температуре 820 – 960 °С, их продолжительность 1,5 – 6,0 ч. Затем детали (широкой номенклатуры) охлаждают на воздухе, подвергают закалке и отпуску.

*Борированием* называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали бором при нагревании в соответствующей среде. Обычно борирование выполняют при электролизе расплавленной буры ($Na_2B_4O_7$), при этом стальное изделие является катодом. Процесс проводят при температуре 930 – 950 °С в течение 2 – 6 ч. В результате борирования износостойкость деталей возрастает в 2 – 6 раз.

Диффузионное насыщение металлами (алюминием, хромом и др.) и металлоидами (кремнием, бором и др.), называемое *диффузионной металлизацией*, проводят с целью повышения жаростойкости, коррозионной стойкости, твердости и износостойкости стальных деталей. Насыщение при 1000 – 1200 °С проводят в твердых, жидких и газовых средах.

## 7. СВОЙСТВА, КЛАССИФИКАЦИЯ И МАРКИРОВКА СТАЛЕЙ

Как указывалось выше, сталью называют сплав железа с углеродом и другими элементами с содержанием углерода до 2,14 % (точка Е рис. 1.12).

На свойства стали значительное влияние оказывают постоянные (нежелательные) примеси (сера, фосфор, газы), а также технологические добавки (кремний, марганец и др.). Примеси могут попадать в сплав из природных соединений и руд, а также при переработке металлолома. Основным элементом сплава, по отношению к которому все остальные элементы – примеси, является тот, чья атомная решетка определяет кристаллографическое строение всего сплава. Пока содержание элементов в стали таково,

что кристаллографическое строение сплава определяется решеткой железа, сплав называется легированной сталью. Когда содержание элементов достигает таких значений, что строение сплава определяется решеткой добавочных элементов, а не железа, то говорят уже о сплаве (титановом, никелевом и др.).

Если сталь имеет в своем составе железо, углерод и некоторое количество постоянных примесей (S, P, Si, Mn, газы), то такую сталь называют *углеродистой.* Если в процессе выплавки углеродистой стали к ней добавляют легирующие элементы (Cr, Ni, W, Mo и др.), а также Mn и Si в повышенном количестве (более 0,8 – 1,0 %), то такую сталь называют *легированной*.

*Углерод* оказывает основное влияние на свойства углеродистой стали, находится в ее составе главным образом в связанном состоянии в виде цементита. В свободном состоянии в виде графита содержится в чугунах. С увеличением содержания углерода в стали повышаются ее твердость и прочность, уменьшаются пластичность и вязкость.

*Сера* является нежелательной примесью, образует с железом сульфид железа FeS, который находится в стали в виде эвтектики Fe – FeS с температурой плавления 985 °С. При нагреве стали до температуры 1000 – 1200 °С для горячей обработки давлением эвтектика плавится, сера кристаллизуется на границах зерен, что приводит к нарушению связи между зернами, повышению хрупкости, разрушению при деформации вследствие образования внутренних трещин и надрывов. Это явление называют *красноломкостью*. Содержание серы в стали не должно превышать 0,06 %.

*Фосфор* растворяется в $\alpha$- и $\gamma$-Fe, искажает кристаллическую решетку и ухудшает пластичность стали. Фосфор вызывает явление *хладноломкости*, является нежелательной примесью, содержание которой в сталях должно быть менее 0,08 %.

*Азот, кислород* присутствуют в сплавах в составе оксидов, нитридов – хрупких неметаллических соединений (включений), которые создают дефекты кристаллической структуры. Они являются концентраторами напряжений и могут понизить механические свойства (прочность, пластичность).

*Водород* поглощается сталью в атомарном состоянии. При охлаждении сплава растворимость водорода снижается, он накапливается в микропорах под высоким давлением. Это может привести к образованию в материале внутренних надрывов (флокенов).

*Марганец и кремний* – полезные примеси. Их добавляют в сталь при выплавке. Марганец существенно снижает красноломкость стали, образует пластичный MnS с температурой

плавления 1620 °С. Марганец увеличивает твердость, прочность и износостойкость стали, при его содержании более 1,5 % снижается пластичность стали.

Кремний связывает закись железа (FeO) с образованием силикатов ($FeO \cdot SiO_2$), которые удаляются вместе со шлаками. Кроме того, кремний понижает склонность стали к хладноломкости, способствует получению более однородной структуры, положительно сказывается на упругих характеристиках. Кремний способствует изменению магнитных свойств стали, а при содержании его в количестве 15 – 20 % придает материалу кислотоупорность.

Обычное содержание кремния в углеродистой стали – не более 0,4 %, марганца – 0,8 %.

Стали классифицируют по химическому составу, качеству и назначению. По *назначению* стали подразделяются на конструкционные, инструментальные, стали с особыми физико-химическими свойствами. По *химическому составу* различают стали углеродистые и легированные.

*Конструкционные* стали применяют для изготовления деталей машин и конструкций; *инструментальные* – режущих, измерительных инструментов, штампов и т.д. К сталям и сплавам *с особыми свойствами* относят жаропрочные, коррозионно-стойкие, магнитные и др. Они нашли широкое применение в приборостроении, в том числе в медицинской технике.

По *качеству* различают стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные. При этом учитываются способ выплавки и содержание серы и фосфора. Стали *обыкновенного* качества имеют повышенное содержание нежелательных примесей – до 0,06 % серы и до 0,08 % фосфора, их механические свойства ниже, чем у сталей других групп. *Качественные* стали содержат серу и фосфор в концентрации менее 0,035 % каждого элемента. *Высококачественные* стали, выплавляемые в электропечах, содержат менее 0,025 % и серы, и фосфора. *Особо высококачественные* стали, подвергнутые электрошлаковому переплаву с вакуумированием, содержат серу и фосфор в концентрации, не превышающей 0,015 %.

## Углеродистые стали

В зависимости от содержания углерода стали делятся на *низкоуглеродистые* с содержанием углерода 0,09 – 0,25 %, *среднеуглеродистые* с содержанием 0,25 – 0,60 % углерода и *высокоуглеродистые* с содержанием более 0,60 % углерода.

Стали *обыкновенного качества* являются наиболее дешевыми и широко применяются в тех случаях, когда к материалу не предъявляются повышенные требования. По сравнению с качественными сталями они содержат больше серы, фосфора, неметаллических включений вследствие менее тщательной очистки в процессе выплавки. Из углеродистых сталей обыкновенного качества изготавливают балки, прутки, листы, трубы; сварные, клепаные и болтовые конструкции (балки, фермы, детали подъемных кранов и др.); малонапряженные детали машин (оси, валы, шестерни, втулки, валики, болты и др.). Детали машин часто упрочняются с помощью термической обработки.

Марки *углеродистой стали обыкновенного качества* обозначаются буквами и цифрами, например Ст0, …, Ст6, БСт0,…, БСт6, ВСт0, …, ВСт6. Буквы Ст обозначают сталь, цифры от 0 до 6 – условный номер марки в зависимости от химического состава и механических свойств. Чем больше число, тем больше содержание углерода в стали, выше прочность и ниже пластичность.

В зависимости от гарантируемых химического состава и свойств углеродистые стали обыкновенного качества делят на три группы: А, Б, В (группа А в марке стали не указывается). Сталь группы А имеет гарантированные механические свойства и не подвергается горячей обработке. Для стали группы Б гарантируется химический состав, сталь подвергается обработке давлением; для стали группы В гарантируются химический состав и механические свойства (используется для сварных конструкций).

К *углеродистым качественным конструкционным сталям* предъявляются повышенные требования по химическому составу и механическим свойствам. Эти стали выплавляются кислородно-конвертерным способом в мартеновских или электропечах.

Качественные углеродистые стали маркируют цифрами: 05, 08, 10, 15, 20, …, 85, которые указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Такие стали делят на несколько групп.

Низкоуглеродистые качественные стали 05, …, 10 (без термической обработки) хорошо обрабатываются давлением в холодном состоянии вследствие их высокой пластичности, а также хорошо свариваются из-за малого содержания углерода. Они используются для производства малонагруженных деталей машин и сварных конструкций.

Стали 15, 20, 25, составляющие вторую группу низкоуглеродистых качественных сталей, хорошо свариваются и обрабатываются резанием. Их применяют без термической обработки или в нормализованном состоянии для изготовления неответственных деталей

машин, после цементации – деталей с повышенной износостойкостью (кулачковые валики, кронштейны и др.).

Самой значительной является группа среднеуглеродистых сталей 30, 35, 40, 45, 50, подвергающихся термической обработке. Они хорошо обрабатываются на металлорежущих станках в отожженном состоянии. Сочетание высоких прочностных и пластических свойств позволяет применять эти стали для изготовления ответственных деталей машин (шпиндели, распределительные валы и др.).

Высокоуглеродистые стали 60, 65, 70, 75, 80 и 85 подвергаются различным видам термической обработки, в результате чего приобретают высокую прочность, износостойкость и упругие свойства. Применяются для изготовления пружин, рессор, замковых шайб и др.

*Углеродистые инструментальные стали* маркируют следующим образом: впереди ставят букву У, затем цифру – среднее содержание углерода, выраженное в десятых долях процента. Например, сталь марки У9 содержит в среднем 0,9 % С, сталь У11 – 1,1 % С. Для обозначения высококачественных сталей в конце марки ставится буква А, а особо высококачественных сталей (выплавленных, например, методом электрошлакового переплава с вакуумированием) – буква Ш. В марках некоторых специальных сталей буква впереди указывает на назначение: А – автоматная сталь (А30), Р – быстрорежущая сталь (Р12) и др.

## Легированные стали

*Легированными* называют стали, в которых, кроме железа, углерода, случайных примесей и технологических добавок, содержатся легирующие элементы для придания сталям специальных свойств. Основными легирующими элементами являются марганец, кремний, хром, никель, вольфрам, молибден и др.

Легированные стали делят на *низколегированные* с общим содержанием легирующих элементов до 2,5 %, *среднелегированные* – 2,5 – 10,0 % и *высоколегированные* – более 10 %.

Основной целью легирования является изменение строения стали и ее физико-механических свойств. Легированием можно повысить твердость стали, сопротивление износу и коррозии и т.д. В зависимости от входящих в состав сталей легирующих элементов их называют хромистыми, хромоникелевыми, ванадиевыми и т.п.

Влияние легирующих элементов на свойства стали определяется их концентрацией и особенностями взаимодействия с железом и углеродом. При взаимодействии с железом легирующие компоненты обычно образуют твердые растворы или химические соединения, а при взаимодействии с углеродом находятся в связанном или свободном состоянии.

При образовании твердых растворов замещения железа с легирующими компонентами возможна как полная (Ni, Co), так и ограниченная растворимость (Cr, W, Mo). Если введенное в сталь количество примесей превышает предел растворимости, то избыток образует с железом химические соединения: FeCr, $Fe_3W_2$, $Fe_3Mo_2$ и т.д. При образовании твердых растворов изменяются все свойства исходного материала, особенно физические и механические. При образовании механических соединений изменяются, главным образом, механические свойства стали.

Легирующие компоненты Mn, Cr, W, Mo, V, Ti, Nb, Ta, Zr и др. образуют с углеродом устойчивые карбиды $Mn_3C$, $Cr_4C_3$, $WC_2$, $Mo_2C$, VC, TiC, NbC, TaC, ZrC, повышающие предел прочности и твердость стали. Все легирующие компоненты, за исключением Mn, при нагревании стали задерживают рост зерна аустенита, что позволяет подвергать легированные стали обработке давлением, не опасаясь перегрева.

Легирующие элементы оказывают влияние и на другие свойства стали: Ni, V, Co повышают вязкость; Mn, Ni, Cr увеличивают стойкость к истиранию; Ni, Cr, Cu, Si, Mo и др. повышают коррозионную стойкость.

По структуре легированные стали в отожженном состоянии разделяют на следующие группы: доэвтектоидные (содержащие избыточный феррит), эвтектоидные (имеющие перлитную структуру), заэвтектоидные (в структуру входят избыточные вторичные карбиды) и ледебуритные (составной частью структуры являются первичные карбиды).

По структуре в нормализованном состоянии легированные стали делят на три класса:

1) перлитные (содержание легирующих компонентов – до 5 %);
2) мартенситные (содержание легирующих компонентов от 5 до 13 %);
3) аустенитные (содержание легирующих компонентов – до 20–30 %).

Наиболее распространенными являются легированные стали доэвтектоидные, эвтектоидные и перлитные, к которым относятся низко- и среднелегированные конструкционные и инструментальные стали. Стали мартенситные, ферритные, ледебуритные и заэвтектоидные являются высоколегированными.

*Качественные, высококачественные и особо высококачественные* стали маркируют следующим образом. Содержание углерода указывают в начале марки цифрой, соответствующей его содержанию в сотых долях процента для конструкционных сталей и в десятых долях процента для инструментальных сталей.

Легирующие элементы указывают русскими буквами: марганец – Г, кремний – С, хром – Х, никель – Н, вольфрам – В, ванадий – Ф, титан – Т, молибден – М, кобальт – К, алюминий – Ю, медь – Д, бор – Р, ниобий – Б, цирконий – Ц, азот – А.

Цифры, следующие после букв, указывают содержание легирующего элемента в целых процентах; отсутствие цифры указывает на то, что сталь содержит менее 1,5 % указанного элемента. Исключением являются вольфрам и молибден.

Для высококачественных конструкционных сталей в конце марки ставят букву А. Например, сталь 12Х2Н4 – качественная конструкционная с содержанием 0,12 % углерода, 2 % хрома и 4 % никеля; сталь 12Х2Н4А – высококачественная такого же состава. В конце марки стали особо высокого качества (электрошлакового переплава) стоит буква Ш.

Все стали инструментальные легированные и с особыми свойствами всегда высококачественные, поэтому в конце марки этих сталей буква А не ставится.

Легированные *конструкционные* стали делят на цементируемые, улучшаемые и высокопрочные.

Для тяжело нагруженных деталей небольших размеров (зубчатые колеса, оси и др.) применяют низкоуглеродистые *цементируемые* легированные стали марок 20Х, 12Х2Н4А и др. После цементации, закалки в воде и низкого отпуска поверхность деталей приобретает высокую твердость, а сердцевина не упрочняется.

*Улучшаемые* среднеуглеродистые легированные стали – это стали, подвергаемые улучшению путем термической обработки, состоящей в закалке с 820 – 880 °С в масле с последующим высоким отпуском (550 – 650 °С). Для тяжело нагруженных деталей больших размеров применяют легированные стали марок 40ХН, 30ХГСА и др.

Для деталей с высоким пределом прочности ($\sigma_B$=1500–2500 МПа) используют *высокопрочные* стали на основе железа, легированного никелем, кобальтом, титаном, молибденом, хромом и другими элементами марок Н12К15М10, Н18К9М5Т и др. Такие стали называются мартенситностареющими, их закаливают с 800 – 860 °С на воздухе с последующим старением при 450 – 500 °С. Применяют их для особо ответственных тяжело нагруженных деталей.

К конструкционным легированным сталям относятся также износостойкие, рессорно-пружинные, шарикоподшипниковые и др.

Основными свойствами *инструментальных* легированных сталей являются твердость, вязкость, износостойкость, теплостойкость (красностойкость), прокаливаемость.

Инструментальные стали делят на углеродистые (рассмотренные ранее), легированные и быстрорежущие.

Инструменты из легированных сталей после закалки, как правило, в масле и низкого отпуска имеют высокую твердость, отличаются повышенной вязкостью, меньшей склонностью к деформациям и трещинообразованию при закалке. Из легированных инструментальных сталей марок 9ХС, ХВГ, В1, ХВ5 и других изготавливают различные режущие инструменты, имеющие сложную конфигурацию.

При изготовлении штампов для горячей обработки металлов применяют легированные инструментальные стали сложного состава: 4Х2В5ФМ, 4Х3ВФ2М2, 3Х2В8Ф и др.

*Быстрорежущие* стали широко используют для изготовления режущего инструмента, обладающего большой твердостью и работающего при высоких скоростях резания. Быстрорежущая сталь относится к ледебуритному (карбидному) классу сталей. В ее состав входят карбидообразующие элементы – хром, вольфрам, ванадий, кобальт, молибден.

Высокие режущие свойства инструментов, изготовленных из быстрорежущих сталей марок Р6, Р9, Р12, Р18 (цифра после буквы показывает среднее содержание вольфрама в процентах), получают после закалки с температуры 1210 – 1290 °С в зависимости от марки стали с последующим отпуском. Режущие свойства инструментов повышают также с помощью цианирования.

Более подробный анализ механических, химических и других свойств металлов и сплавов, применяемых в биотехнических аппаратах и системах приведен в [2].

## 8. ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

### Электропроводность металлов

Классическая электронная теория металлов представляет твердый проводник в виде системы, состоящей из узлов кристаллической ионной решетки, внутри которой находится электронный газ из коллективизированных свободных валентных электронов. К электронному газу применялись представления и законы обычных газов. Это привело к выводу законов Ома и Джоуля – Ленца, позволило описать и объяснить ранее

обнаруженные экспериментальным путем основные законы электропроводности и потерь электрической энергии в металлах.

Однако исчерпывающее объяснение явлений электропроводности оказалось возможным на основе квантовой механики. В соответствии с квантово–механическими представлениями причиной наличия электрического сопротивления твердых тел является не столкновение свободных электронов с атомами решетки (как в классической теории Друде), а рассеяние их на дефектах решетки, вызывающих нарушение периодичности потенциала. Идеально правильная, бездефектная неподвижная решетка не способна рассеивать свободные носители заряда и поэтому должна обладать нулевым сопротивлением.

Подвижность и длина свободного пробега электронов в твердом теле зависят от структуры материала. Чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления ρ. Примеси, искажая решетку, приводят к увеличению ρ. С позиций квантовой механики рассеяние электронных волн происходит на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с расстоянием порядка четверти длины волны электрона; нарушения меньших размеров не вызывают заметного рассеяния волн де Бройля. В металлическом проводнике, где длина волны электрона порядка 5 Å, микродефекты создают значительное рассеяние, уменьшающее подвижность электронов и длину свободного пробега и, следовательно, приводят к росту ρ. Так как в металлах концентрация электронного газа $n$ практически не зависит от температуры ($T$), то зависимость удельного сопротивления ρ (и обратной величины удельной электропроводности σ) от температуры полностью определяется температурной зависимостью подвижности (μ) и пропорциональной ей длины свободного пробега электронов (λ).

Вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т.е. уменьшается среднестатистическая длина свободного пробега λ, уменьшается подвижность электронов и, как следствие, уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление (рис. 1.14).

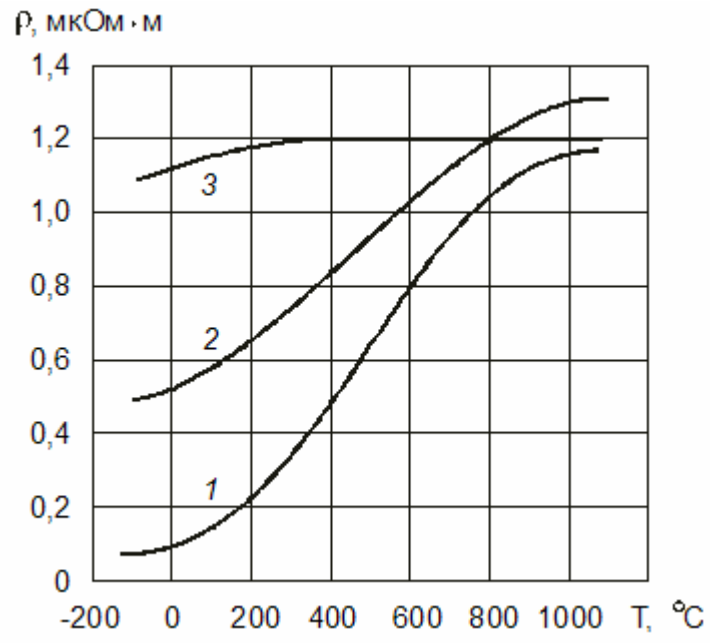



Рис. 1.14. Зависимость удельного сопротивления металлов и сплавов от температуры: 1 – железо; 2 – электротехническая сталь с содержанием 4 % Si; 3 – сплав Fe-Ni-Cr

**Удельное сопротивление сплавов**

Как указывалось, примеси и нарушения правильной структуры металлов ведут к увеличению их удельного сопротивления.

Значительное возрастание ρ наблюдается при сплавлении двух металлов в том случае, если они образуют твердый раствор, т.е. создают при отвердевании совместную кристаллизацию и атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого.

Зависимость удельного сопротивления сплава двух металлов, образующих твердый раствор, от процентного содержания каждого из них представлена на рис. 1.15 (кривая а). Кривая имеет максимум, соответствующий некоторому соотношению содержания компонентов в сплаве; при уменьшении содержания каждого из них ρ падает, приближаясь к соответствующим значениям ρ чистых металлов. Обычно наблюдается определенная закономерность и в изменении *ТК*ρ (*ТК* – температурный коэффициент): относительно высокими значениями ТКρ обладают чистые металлы, а у сплавов *ТК*ρ меньше и даже может приобретать небольшие по абсолютной величине отрицательные значения (рис. 1.15, кривая б). Это объясняется тем, что у сплавов изменение ρ вызывается не только изменением подвижности носителей заряда, но в некоторых случаях и возрастанием концентрации носителей при повышении температуры.

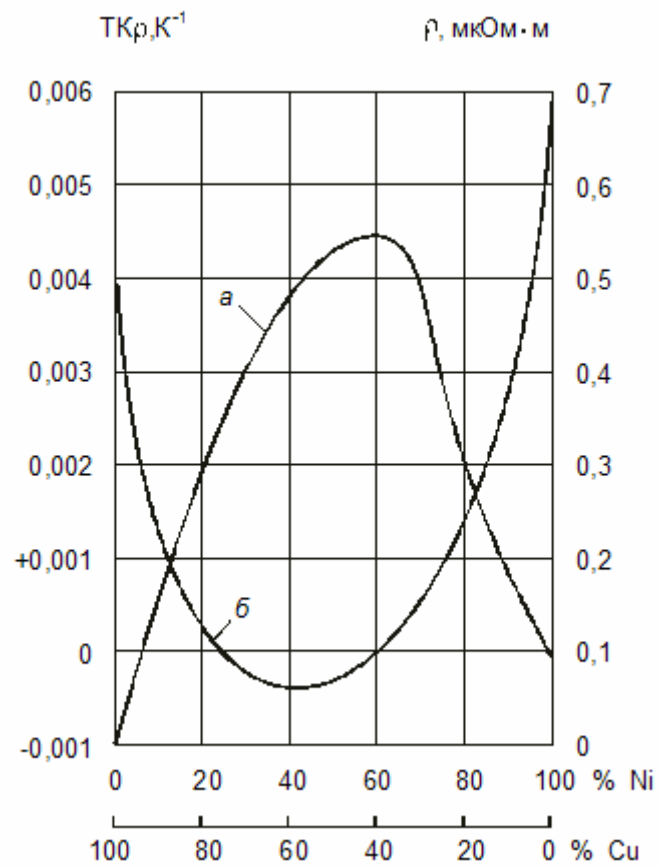



Рис. 1.15. Зависимость ρ (а) и ТК ρ (б) сплавов системы Cu-Ni от состава (в процентах по массе)

**Теплопроводность**

Тепло через металл передается в основном теми же свободными электронами, которые определяют и электропроводность металлов; количество их в единице объема металла весьма велико. Поэтому, как правило, коэффициент теплопроводности η металлов много больше, чем у диэлектриков. Очевидно, что при прочих равных условиях чем больше удельная электрическая проводимость σ металла, тем больше его коэффициент теплопроводности η. При повышении температуры, когда подвижность электронов в металле и, соответственно, его удельная проводимость σ уменьшаются, отношение коэффициента теплопроводности металла к его удельной электрической проводимости η/σ должно возрастать. Математически это выражается законом Видемана – Франца – Лоренца:

$$\eta/\sigma = L_0 T, \tag{1.1}$$

где $T$ – абсолютная температура, К; $L_0$ – число Лоренца, равное

$$L_0 = \frac{\pi^2}{3}\frac{k^2}{e^2}. \tag{1.2}$$

Подстановка в (1.2) значений постоянной Больцмана $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К и заряда электрона $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл дает $L_0 = 2{,}45 \cdot 10^{-8}$ $В^2/К^2$.

Закон Видемана – Франца – Лорентца для большинства металлов хорошо подтверждается при температурах, близких к нормальной или несколько повышенных.

Проверим справедливость этого закона для меди при нормальной температуре. Подставляя в формулу (1.1) параметры меди: $\sigma = 57 \cdot 10^6$ См/м и $\eta = 390$ Вт/(м·К), получаем (при $T = 293$ К) $L_0 = 2{,}54 \cdot 10^{-8}$ $В^2/К^2$, что весьма близко к теоретическому значению. При нормальной температуре для алюминия $L_0 = 2{,}1 \cdot 10^{-8}$, для свинца и олова $2{,}5 \cdot 10^{-8}$, для железа $2{,}9 \cdot 10^{-8}$ $В^2/К^2$.

Однако в области низких температур коэффициент при $T$ в уравнении (1.1) уже не остается неизменным: так, для меди при охлаждении он проходит через минимум, а при приближении к абсолютному нулю вновь близок к теоретическому значению $L_0$.

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 9. ОБЩИЕ СВОЙСТВА И КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Полупроводники по удельному сопротивлению, которое при комнатной температуре составляет $10^{-6}$–$10^9$ Ом·м, занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Они обладают совокупностью физических свойств, которые выделяют их среди других материалов.

В отличие от проводников электропроводность полупроводников увеличивается с ростом температуры (рис. 2.1). Для полупроводников характерна зависимость значения удельной проводимости от вида и количества содержащихся в них примесей. Например, при введении в чистый кремний 0,001 % фосфора его удельная проводимость увеличивается в $10^5$ раз.

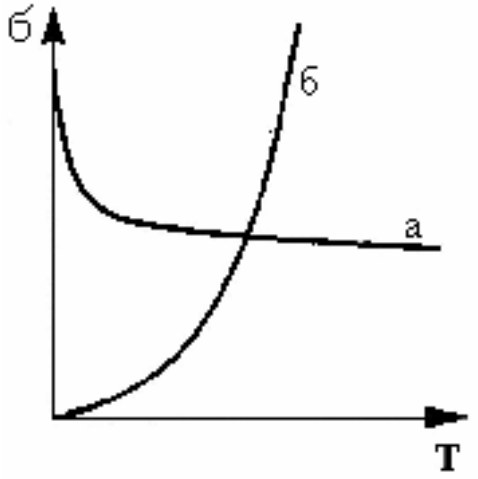



Рис. 2.1. Зависимость удельной проводимости от температуры для металлов (а) и полупроводников (б)

Свойства полупроводниковых материалов сильно зависят от внешних факторов – электрического и магнитного полей, электромагнитного и ядерного излучений и др.
По химическому составу полупроводниковые материалы делят на простые вещества (атомные, элементарные полупроводники – германий, кремний, теллур и др.) и химические соединения различных типов. Если входящие в состав соединений вещества обозначить как А и В, то основные типы бинарных соединений представляют следующим образом: $A^{II}B^{VI}$($Cu_2O$, CuS и др.), $A^{III}B^{V}$(GaAs, GaP, InP и др.), $A^{IV}B^{IV}$(SiC) и др. Полупроводниковые свойства присущи тройным соединениям $CuAlS_2$, $CuSbS_2$, $CuFeS_2$, $ZnSiAs_2$, $PbBiSe_2$ и твердым растворам GeSi, $GaAs_{1-x}P_x$, $In_xAl_{1-x}Sb$ и др. К твердым органическим полупроводникам относятся фталоцианин, антрацен, нафталин и др. [3].
Основным типом химической связи между атомами в элементарных полупроводниках является ковалентная, в химических соединениях – смешанная ионно-ковалентная.
Наиболее распространенными типами кристаллической структуры являются структура типа алмаза (ГЦК с базисом) для простых веществ; сфалерита и вюрцита – для химических соединений. По структуре полупроводниковые материалы могут быть монокристаллическими, поликристаллическими и неупорядоченными (стеклообразными).
Уникальные свойства полупроводниковых материалов обусловили широкое техническое применение их для изготовления самых различных приборов – полупроводниковых диодов, транзисторов, тиристоров, фотодиодов, фототранзисторов, светодиодов, полупроводниковых лазеров, а также датчиков давлений, магнитных полей, температур, излучений и др. Использование полупроводников вызвало коренные преобразования в радиотехнике, кибернетике, автоматике, телемеханике. Полупроводниковая электроника открыла новые пути микроминиатюризации различного оборудования, в том числе биомедицинских и биотехнических аппаратов и систем.

## 10. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗОНЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Понимание физических явлений, происходящих в полупроводниках, невозможно без знания положений зонной теории твердого тела, основанных на представлениях квантовой механики.
Электрон в изолированном атоме может находиться лишь на строго определенных дискретных энергетических уровнях, которые разделены интервалами запрещенных энергий. Дискретность значений энергии электронов в изолированном атоме подтверждается характером спектров поглощения и излучения разреженных газов, т.е. определенными спектральными линиями, наличие которых объясняется переходом электрона с одного уровня на другой, при котором излучается или поглощается свет определенной частоты, соответствующей разности энергий этих уровней [2].
При образовании кристалла благодаря сближению N одинаковых атомов на расстояния, близкие к расстоянию между атомами в кристаллической решетке *a,* начинает проявляться взаимодействие атомов между собой. В этом случае принцип Паули распространяется на всю совокупность атомов как на единую систему , и в результате такого взаимодействия эквивалентные уровни электронов изолированных атомов образуют не энергетические уровни, на каждом из которых находится в N раз больше электронов, а энергетические зоны, состоящие из N уровней (рис. 2.2). Так как в кристалле объемом 1 $м^3$ имеется примерно $10^{28}$атомов, а ширина энергетической зоны порядка 1 эВ, расстояние между энергетическими уровнями в зоне составляет около $10^{-28}$ эВ.

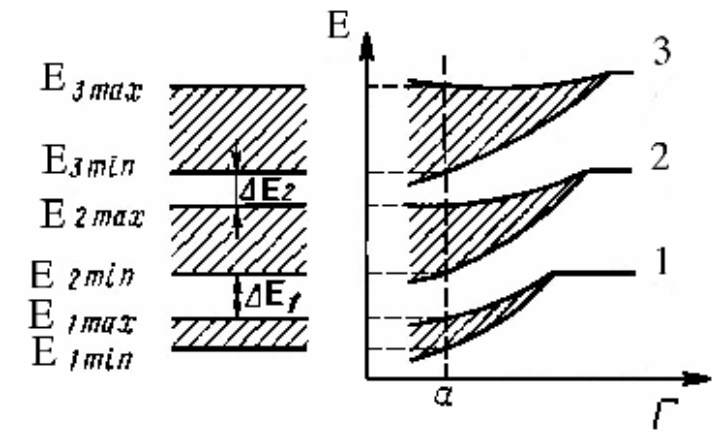



Рис. 2.2. Энергетические зоны при сближении атомов

Для реально возможных микроскопических объемов кристалла расстояние между энергетическими уровнями не превышает $10^{-17}$ эВ. В то же время при комнатной температуре энергия электронов порядка 0,03 эВ. Поэтому электроны могут свободно переходить с одного уровня на другой внутри зоны; можно считать, что энергетические зоны являются квазинепрерывными.

Энергетические зоны, подобно энергетическим уровням электрона в изолированном атоме, в общем случае разделены интервалами запрещенных энергий $\Delta E_i$, которые называют *запрещенными зонами*.

Электроны в изолированном атоме стремятся занять уровни с минимальной энергией; верхние энергетические уровни остаются свободными. В соответствии с этим не все энергетические зоны твердого тела заняты электронами. Самую верхнюю из заполненных зон называют *валентной зоной*, а самую нижнюю из свободных зон – *зоной проводимости*.

Так как движение электрона во внешнем электрическом поле связано с изменением его скорости и энергии, то на энергетической схеме такое движение соответствует перемещению электрона по близлежащим уровням разрешенной зоны. Это означает, что принимать участие в электропроводности могут только те электроны твердого тела, которые расположены в зонах, не полностью заполненных электронами.

У атомов металлов (за исключением щелочноземельных элементов) на верхнем занятом электронами уровне электронов меньше, чем возможных состояний. Например, у атома Na электроны по уровням (состояниям) распределены следующим образом: $1s^2 2s^2 2p^6 3s$. На уровне 3s находится один электрон вместо двух возможных. Валентная зона твердого тела, возникающая в результате расщепления уровня 3s, также оказывается не полностью заполненной.

У элементов II группы таблицы Д.И. Менделеева расщепление соответствующих энергетических уровней происходит таким образом, что полностью заполненная валентная зона и полностью свободная зона проводимости перекрываются, образуя одну общую зону, в которой энергетических состояний больше, чем имеющихся электронов. Электроны таких зон могут принимать участие в электропроводности. Этим и объясняется высокая проводимость элементов этой группы.

У полупроводников и диэлектриков между валентной зоной и зоной проводимости имеется запрещенная зона. При температуре абсолютного нуля и в отсутствие внешнего воздействия их валентная зона полностью заполнена, а зона проводимости свободна от электронов. С этой точки зрения различие между диэлектриком и полупроводником чисто количественное. К полупроводникам условно относят вещества с шириной запрещенной зоны $\Delta E_0$=0,05 – 3 эВ, а к диэлектрикам – вещества с $\Delta E_0$> 3 эВ.

## **11.** СОБСТВЕННЫЕ И ПРИМЕСНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

*Собственными* называют полупроводники, не содержащие донорных и акцепторных примесей. Зонная диаграмма таких полупроводников представлена на рис. 2.3,а, где $E_c$ – нижний энергетический уровень зоны проводимости, называемый дном зоны проводимости; $E_v$ – верхний энергетический уровень валентной зоны, называемый потолком валентной зоны; $\Delta E_0$ – ширина запрещенной зоны.
Практически чаще пользуются энергетической схемой, изображенной на рис. 2.3,б, где представлены лишь потолок валентной зоны и дно зоны проводимости. Стрелкой обозначен энергетический переход электрона из валентной зоны в зону проводимости, который может быть осуществлен за счет энергии тепловых колебаний решетки или энергии внешнего воздействия на полупроводник. С уходом электрона в зону проводимости в валентной зоне полупроводника остается свободным энергетическое состояние, называемое *дыркой*, а сама валентная зона становится не полностью заполненной.

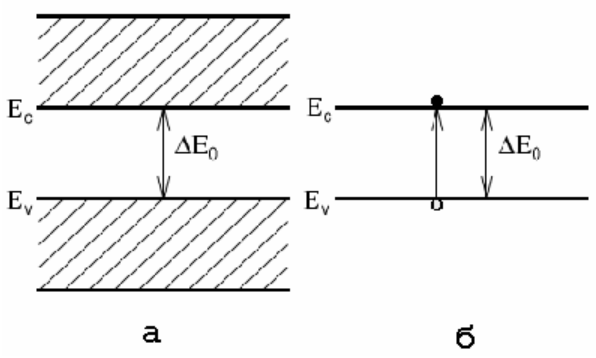



Рис. 2.3. Зонная диаграмма собственного полупроводника

В качестве примера собственного полупроводника рассмотрим монокристалл кремния, являющегося элементом IV группы таблицы Д.И. Менделеева. В кристаллической решетке кремния у каждого атома с каждым из четырех ближайших к нему соседей существует ковалентная связь. Плоская модель кристаллической решетки кремния представлена на рис. 2.4, где имеется изображение символа ковалентной связи, в которой участвуют два электрона. При разрыве ковалентной связи между атомами кремния образуются свободный электрон и незавершенная связь, которой на зонной диаграмме соответствует возможное, но не занятое электроном, состояние в валентной зоне – дырка. При отсутствии внешнего электрического поля дырка, как и электрон, будет совершать хаотическое движение в пределах кристалла. Происходит это вследствие того, что электрон соседней ковалентной связи за счет энергии тепловых колебаний решетки может заполнить незавершенную ковалентную связь, в результате чего дырка из положения 1 перейдет в положение 2. По этим же причинам она может перейти в положение 3,4 и т.д. Таким образом, движение дырки осуществляется за счет перемещения электрона, участвующего в ковалентной связи.

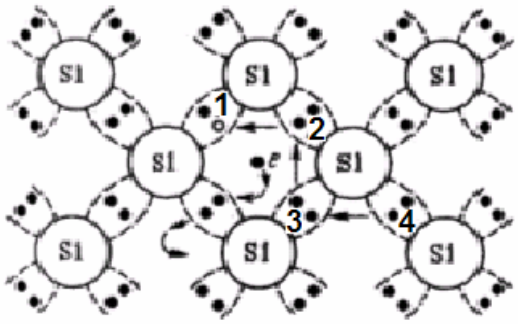


Рис. 2.4. Плоская модель кристаллической решетки собственного полупроводника (кремния)

Итак, в результате разрыва ковалентной связи образуется пара свободных носителей заряда – электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне, которые и создают собственную электропроводность полупроводника. Энергия, необходимая для разрыва ковалентной связи, определяется шириной запрещенной зоны полупроводника. Для кремния она составляет 1,12 эВ. Свободные носители заряда при комнатной температуре возникают вследствие флюктуаций тепловых колебаний решетки, так как средней тепловой энергии решетки при комнатной температуре для разрыва ковалентной связи в кремнии недостаточно.

*Примесными* называют полупроводники, содержащие донорные и (или) акцепторные примеси.

Если в кремний или германий в качестве примеси ввести элемент V группы таблицы Менделеева, например мышьяк, то атому примеси для завершения ковалентных связей с атомами основного вещества необходимо четыре валентных электрона (рис. 2.5). Пятый валентный электрон атома примеси в ковалентной связи не участвует. Со своим атомом он связан силой кулоновского взаимодействия. Энергия этой связи невелика. Для фосфора, мышьяка, сурьмы она порядка 0,01 эВ в германии и 0,05 эВ в кремнии. Так как при 300 К тепловая энергия kT~0,03 эВ, то очевидно, что при комнатной температуре будет происходить ионизация примесных атомов мышьяка вследствие отрыва пятого валентного электрона, который становится свободным. В германии при 300 К все примесные атомы мышьяка ионизованы. Образовавшиеся при этом положительные ионы примеси принимать участие в электропроводности не могут, так как они локализованы. Находясь в узле кристаллической решетки полупроводника, они являются ее структурными элементами.

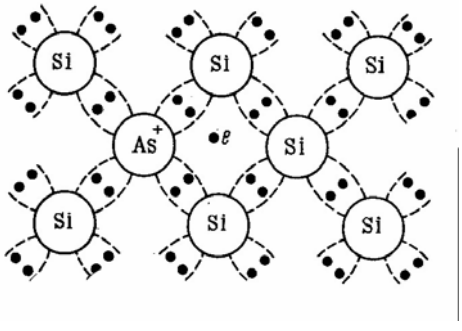



Рис. 2.5. Плоская модель кристаллической решетки полупроводника n-типа (кремния, легированного мышьяком)

Примесь, имеющую валентных электронов больше, чем необходимо для завершения связей между ближайшими атомами основного вещества, и в результате этого способную отдавать электроны, называют *донорной*, а полупроводник с такой примесью – *полупроводником с электронной электропроводностью* (или *n-типа)*.

Для того чтобы пятый валентный электрон стал свободным (на энергетической схеме перешел в зону проводимости), необходимо затратить энергию, значительно меньшую, чем для разрыва ковалентной связи. В соответствии с этим энергетический уровень пятого валентного электрона на зонной диаграмме должен располагаться в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости (рис. 2.6)

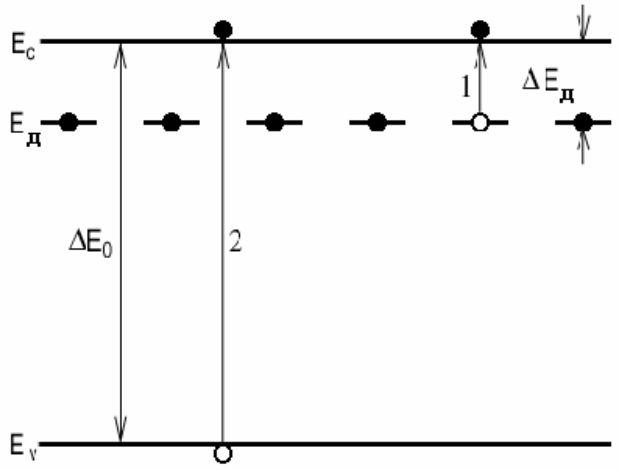



Рис. 2.6. Зонная диаграмма полупроводника n-типа

При температуре абсолютного нуля и в отсутствие внешнего воздействия на полупроводник его валентная зона полностью заполнена, зона проводимости пуста, локальные энергетические уровни донорной примеси $E_Д$ заняты электронами. По мере повышения температуры сначала часть электронов, а затем все электроны с локальных уровней $E_Д$ перейдут в зону проводимости (переходы 1, рис. 2.6). Наряду с этим будут происходить и переходы 2, обусловленные разрывом ковалентных связей, в результате чего образуется пара свободных носителей заряда: электрон и дырка.

Так как для ионизации донорной примеси требуется энергия. значительно меньшая, чем для разрыва ковалентной связи ($\Delta E_Д$), то при температурах, при которых собственная электропроводность проявляется слабо, электропроводность полупроводника определяется в основном электронами, образовавшимися при ионизации донорной примеси. Поэтому электроны в полупроводнике n-типа называют основными носителями заряда, а дырки – неосновными носителями.

Если в полупроводник IV группы таблицы Менделеева ввести в качестве примеси элемент III группы, например алюминий, то все три валентных электрона примесного атома будут участвовать в образовании ковалентных связей. При этом одна из четырех связей с ближайшими атомами основного вещества окажется незавершенной.

Примесь, имеющую валентных электронов меньше, чем это необходимо для завершения связей между ближайшими атомами основного вещества, и вследствие этого способную захватить электроны, называют *акцепторной*, а полупроводник с такой примесью – *полупроводником с дырочной электропроводностью* (или *p-типа*).

Незавершенная связь в результате тепловых колебаний решетки может быть заполнена электроном соседней связи, которая в свою очередь окажется незавершенной (рис. 2.7). Незавершенная связь – дырка за счет тепловых колебаний решетки будет совершать хаотическое движение в пределах кристалла. Атом акцепторной примеси, принявший четвертый электрон для завершения ковалентной связи, становится отрицательным ионом. Такой ион называют ионизированным атомом акцепторной примеси. Принимать участие в электропроводности он не может, так как является структурным элементом кристалла.

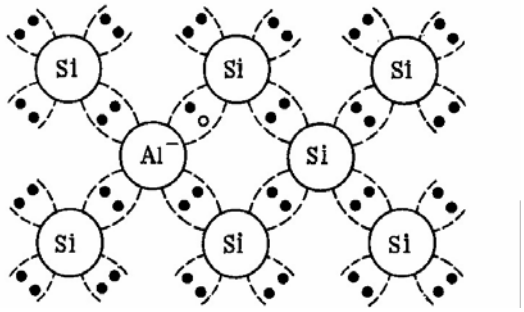



Рис. 2.7. Плоская модель кристаллической решетки полупроводника p-типа (кремния, легированного алюминием)

Для того чтобы образовалась свободная дырка, необходима энергия меньшая, чем для разрыва ковалентной связи ($\Delta E_a$). В германии и кремнии для бора, алюминия, галлия, индия эта энергия составляет 0,01÷0,07 эВ. Значит, локальные энергетические уровни акцепторной примеси $E_a$ расположены в запрещенной зоне полупроводника вблизи потолка валентной зоны.

При температуре абсолютного нуля и в отсутствие внешнего воздействия на полупроводник акцепторные уровни свободны от электронов. По мере повышения температуры электроны валентной зоны будут заполнять эти локальные уровни при одновременном образовании в валентной зоне соответствующего числа дырок (рис. 2.8, переходы 1). Вместе с тем возможны и переходы 2, при которых образуется пара свободных носителей: электрон–дырка.

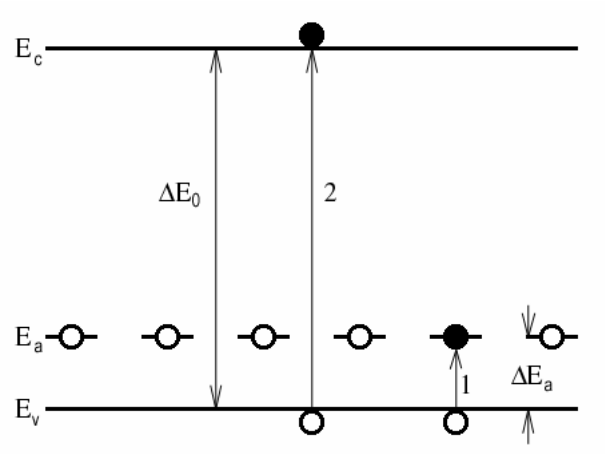



Рис. 2.8. Зонная диаграмма полупроводника р-типа

В полупроводнике р-типа основными носителями заряда являются дырки, неосновными – электроны.

Отметим, что в полупроводниках могут быть примеси, энергетические уровни которых расположены в запрещенной зоне далеко от краев разрешенных зон. Такие уровни называют глубокими. У кремния и германия глубокие уровни возникают при наличии в них примесных атомов золота, меди, кислорода, железа и др.
Рассмотренные зонные модели собственных и примесных полупроводников являются упрощенными, хотя в большинстве случаев они применимы для объяснения физических процессов в полупроводниках и полупроводниковых приборах. Однако есть явления, которые можно объяснить лишь с помощью модели структуры зон, основанной на представлениях квантовой механики с учетом волновых свойств микрочастиц.

## 12. ЗАВИСИМОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Как отмечалось, концентрация свободных носителей заряда в полупроводниках увеличивается под влиянием температуры, электромагнитного, ионизирующего излучений и других внешних факторов. Если температура постоянна и никакие другие внешние факторы на полупроводник не воздействуют, то такое состояние называют термодинамически равновесным. В этом случае скорость генерации свободных носителей заряда равна скорости их рекомбинации. Такие носители заряда получили название равновесных. Их концентрации обозначают через $n_0$ и $p_0$ (для электронов и дырок соответственно).
Концентрации свободных равновесных носителей заряда в полупроводнике (электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне) определяются эффективной плотностью энергетических состояний в разрешенных зонах и их фактическим заполнением [3, 4]. Значение эффективной плотности разрешенных состояний определяется с позиций квантовой механики соотношениями неопределенностей Гейзенберга, а вероятность их заполнения статистической вероятностной функцией Ферми – Дирака [4].
Теория показывает, что в общем виде концентрация свободных электронов в зоне проводимости полупроводника при любой температуре

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right), \qquad (2.1)$$

а концентрация свободных дырок в валентной зоне

$$p_0 = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right), \tag{2.2}$$

где $N_c$ и $N_V$ – эффективные плотности разрешенных состояний в зоне проводимости и валентной зоне соответственно; $E_F$ – уровень (энергия) Ферми полупроводника (вероятностная характеристика материала), при пересечении уровня Ферми с каким–либо энергетическим уровнем в запрещенной зоне полупроводника вероятность заполнения этого уровня равна 0,5; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Для собственного полупроводника $n_0=p_0=n_i$. С учетом закона действующих масс

$$n_0 p_0 = n_i^2, \tag{2.3}$$

концентрация собственных носителей заряда определяется как квадратный корень из произведения (2.1) и (2.2):

$$n_i = (N_c N_V)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_c - E_V}{2kT}\right) = \sqrt{N_c N_V} \exp\left(-\frac{\Delta E_0}{2kT}\right). \tag{2.4}$$

Из (2.1) – (2.3) следует, что концентрация свободных носителей заряда как собственных, обусловленных нарушением ковалентных связей, так и примесных, возникших в результате ионизации атомов примеси, возрастает при увеличении температуры по экспоненциальному закону. Предэкспоненциальные множители $N_c$ и $N_v$ – также зависят от температуры, но зависимость эта более слабая – степенная:

$$\begin{aligned} N_c &\sim T^{3/2} \\ N_V &\sim T^{3/2}. \end{aligned} \tag{2.5}$$

Температурную зависимость концентрации свободных носителей заряда, изображенную на рис. 2.9, рассмотрим на примере полупроводника n-типа. Зависимость в общем виде имеет три участка: 1– примесной проводимости; 2– истощения примеси; 3 – собственной проводимости.

При температуре абсолютного нуля валентная зона полупроводника полностью заполнена, донорные примеси не ионизированы (донорные уровни заняты электронами), зона проводимости пуста. При повышении температуры начинается ионизация донорных атомов и электроны с донорных уровней переходят в зону проводимости (участок 1 рис. 2.9). Чем выше температура, тем больше концентрация свободных электронов в зоне проводимости.

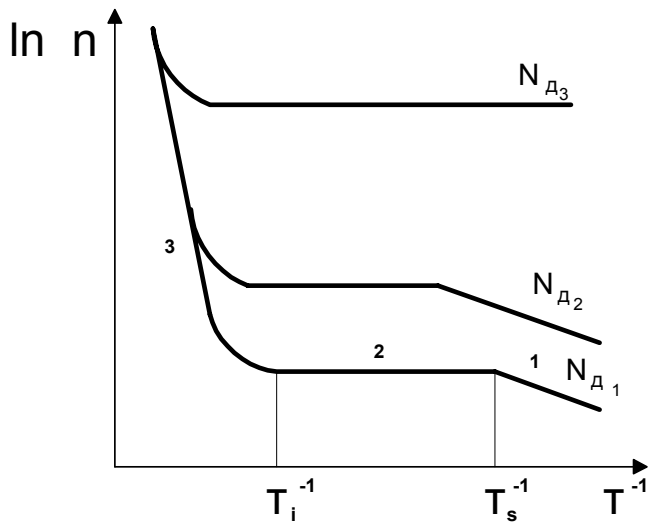



Рис. 2.9. Температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда в полупроводнике n-типа: $N_{Д1}<N_{Д2}<N_{Д3}$

При температуре $T_S$ все донорные атомы оказываются ионизированными. Повышение температуры от $T_S$ до $T_i$ на участке 2 рис. 2.9 (участке истощения примеси) не приводит к росту концентрации свободных носителей, поскольку тепловая энергия $кT>\Delta E_Д$, но еще недостаточна для возбуждения значительной собственной проводимости – нарушения ковалентных связей полупроводника и перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости.

При температуре $T_i$ на участке 3 рис. 2.9 концентрация электронов, приобретающих энергию, достаточную для перехода из валентной зоны в зону проводимости, превышает концентрацию имеющихся в ней электронов, обусловленных ионизацией донорной примеси. При температурах, больших $T_i$, в полупроводнике наблюдается собственная проводимость.

Из рис. 2.9 видно, что чем выше концентрация примеси, тем выше концентрация электронов на участках 1 и 2 и тем больше значения температур, соответствующих началу истощения примеси и собственной проводимости. Кривая, изображенная на рис. 2.9 для наибольшей концентрации примеси $N_{Д3}$, характерна для так называемых вырожденных полупроводников. У таких полупроводников концентрация свободных носителей заряда вплоть до перехода к собственной проводимости не зависит от температуры, а уровень Ферми находится не в запрещенной зоне, а в зоне проводимости.

Установлено, что в области примесной проводимости (на участке 1 рис. 2.9) от температуры абсолютного нуля до $T_S$ температурная зависимость концентрации свободных электронов имеет следующий вид:

$$n_0 = \left(\frac{N_c N_Д}{2}\right)^{1.2} \exp\left(-\frac{E_c - E_Д}{2kT}\right) = A\exp\left(-\frac{\Delta E_Д}{2kT}\right), \qquad (2.6)$$

где $N_Д$ – концентрация донорной примеси; $\Delta E_Д=E_c - E_Д$ – энергия ионизации донорной примеси; $A = \sqrt{\frac{N_c N_Д}{2}}$.

Логарифмируя (2.6), получаем

$$\ln n_0 = \ln A - \frac{\Delta E_Д}{2kT}. \qquad (2.7)$$

Выражение (2.7) является уравнением прямой с отрицательным угловым коэффициентом, пропорциональным $\Delta E_Д$.
На участке 3 при температурах, больших $T_i$ (рис. 2.9), в области собственной проводимости справедливо соотношение (2.4). Если обозначить $\sqrt{N_c N_V} = B$, после логарифмирования (2.4), получим

$$\ln n_i = \ln B - \frac{\Delta E_0}{2kT}. \qquad (2.8)$$

Выражение (2.8) так же, как (2.7), является уравнением прямой с отрицательным угловым коэффициентом. Тангенс угла наклона прямой пропорционален ширине запрещенной зоны полупроводника $\Delta E_0$. Температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда в полупроводниках, построенная в координатах $\ln n_0 = f(T^{-1})$, наглядно показывает характер физических процессов, происходящих при изменении температуры, и позволяет рассчитать параметры полупроводникового материала: энергию ионизации донорной примеси $\Delta E_Д$ и энергию, необходимую для разрыва ковалентных связей – ширину запрещенной зоны $\Delta E_0$.
Отметим, что температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда – дырок для полупроводника р-типа выглядит аналогично изображенной на рис. 2.9.
Интерпретация зависимости на участке примесной проводимости проводится на основе представлений о захвате акцепторными атомами электронов из валентной зоны и об образовании в ней свободных дырок.
Экспоненциальный закон изменения концентрации свободных носителей заряда при изменении температуры обусловливает принципиальное различие между температурной зависимостью проводимости полупроводников и металлов (рис. 2.1). У последних концентрация свободных носителей от температуры практически не зависит.

## 13. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Удельная электрическая проводимость любого материала определяется концентрацией и подвижностью свободных носителей заряда, значения которых зависят от температуры.
*Подвижность* μ свободных носителей заряда характеризует их рассеяние и определяется как коэффициент пропорциональности между дрейфовой скоростью $v_{др}$ и напряженностью электрического поля ε: $v_{др} = \mu\varepsilon$.
*Рассеяние* свободных носителей заряда, т.е. изменение их скорости или направления движения, может происходить из-за наличия в реальных кристаллах полупроводников дефектов структуры (к ним относятся, например, атомы и ионы примеси), тепловых колебаний кристаллической решетки.
Установлено, что при рассеянии носителей заряда только на ионах примеси подвижность

$$\mu \sim T^{3/2}. \qquad (2.9)$$

Увеличение подвижности свободных носителей заряда с повышением температуры объясняется тем, что чем выше температура, тем больше тепловая скорость движения свободного носителя и тем меньше времени он будет находиться в кулоновском поле иона, изменяющего траекторию его движения, а значит, он будет иметь меньшее рассеяние и более высокую подвижность. По мере повышения температуры все более существенное значение приобретает рассеяние на тепловых колебаниях кристаллической решетки, которое при определенной температуре становится преобладающим.
Тепловые колебания кристаллической решетки увеличиваются с ростом температуры, растет и рассеяние носителей, а их подвижность уменьшается. Установлено, что в

атомных полупроводниках при рассеянии свободных носителей заряда преимущественно на тепловых колебаниях решетки

$$\mu \sim T^{-3/2}. \tag{2.10}$$

На рис. 2.10 приведены зависимости подвижности свободных носителей заряда в полупроводнике n-типа с разной концентрацией донорной примеси. С повышением температуры при рассеянии на ионах примеси подвижность увеличивается, а затем вследствие все возрастающих колебаний кристаллической решетки и обусловленного ими рассеяния – уменьшается. Величина и положение максимума кривой $\mu(T^{-1})$ зависит от концентрации примеси. С ее увеличением максимум смещается в область более высоких температур, а вся кривая – вниз по оси ординат. При концентрации примеси, равной $N_{Д3}$, соответствующей вырожденному полупроводнику, подвижность уменьшается с ростом температуры аналогично тому, как это происходит в проводниковых материалах (раздел 1.8).

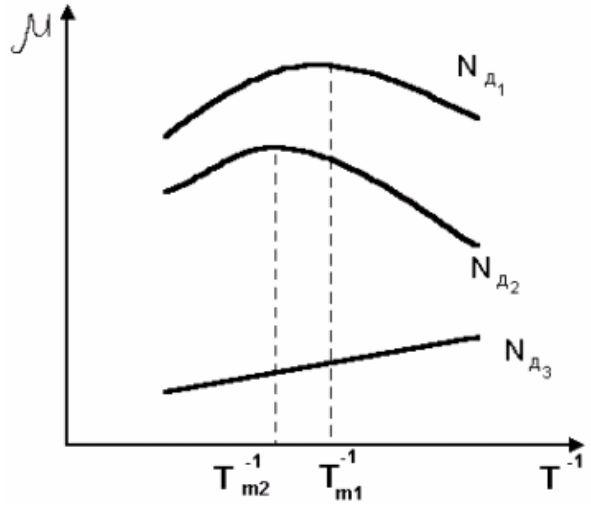



Рис. 2.10. Зависимость подвижности свободных электронов от температуры в полупроводнике n-типа: $N_{Д1}<N_{Д2}<N_{Д3}$

При очень низких температурах, когда тепловые колебания кристаллической решетки малы, а примесные атомы слабо ионизированы, рассеяние свободных носителей в основном происходит на нейтральных атомах примеси. При таком механизме рассеяния подвижность не зависит от температуры, а определяется концентрацией примеси.

Итак, концентрация свободных носителей заряда в полупроводниках увеличивается с ростом температуры по экспоненциальному закону, а температурная зависимость подвижности имеет в общем виде характер кривой с максимумом и степенной закон изменения.

В общем случае удельная электрическая проводимость σ полупроводника, в котором носителями заряда являются свободные электроны с подвижностью $\mu_n$ и свободные дырки с подвижностью $\mu_p$, равна:

$$\sigma = n_0 e\mu_n + p_0 e\mu_p, \tag{2.11}$$

где e – элементарный заряд.

Для собственного полупроводника

$$\sigma_i = en_i(\mu_n + \mu_p) = e(\mu_n + \mu_p)(N_c N_V)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta E_0}{2kT}\right). \tag{2.12}$$

Учитывая, что степенная зависимость слабее экспоненциальной, можно записать:

$$\sigma_i = C \exp\left(-\frac{\Delta E_0}{2kT}\right). \qquad (2.13)$$

Аналогично для примесного полупроводника n-типа в области примесной проводимости:

$$\sigma_n = e n_0 \mu_n = e \mu_n \left(\frac{N_c N_Д}{2}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta E_Д}{2kT}\right) = D \exp\left(-\frac{\Delta E_Д}{2kT}\right), \qquad (2.14)$$

а р-типа:

$$\sigma_p = G \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{2kT}\right). \qquad (2.15)$$

Соотношения (2.14) и (2.15) справедливы лишь до тех пор, пока не наступит полная ионизация примеси. Получив экспериментальную зависимость удельной проводимости от температуры в виде $\ln\sigma(T^{-1})$, можно определить ширину запрещенной зоны полупроводника и энергию ионизации примеси по соотношениям (2.13) – (2.15). Рассмотрим экспериментальные кривые температурной зависимости удельной электрической проводимости кремния, содержащего различное количество донорной примеси (рис. 2.11) [3].

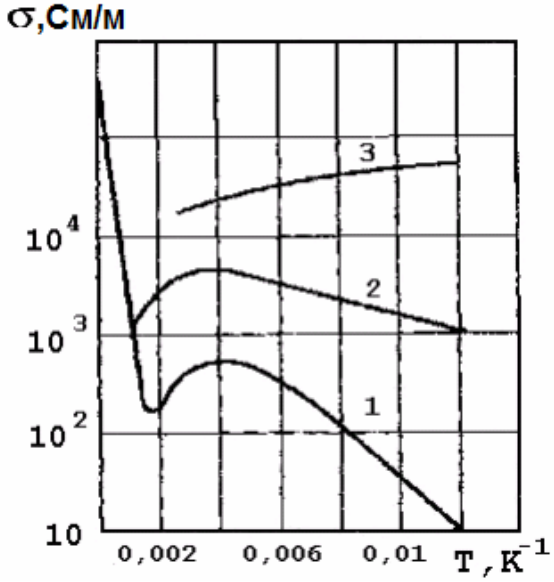



Рис. 2.11. Температурная зависимость удельной электрической проводимости кремния, содержащего различное количество донорной примеси $N_Д$: 1 – $4{,}8\cdot10^{23}$; 2 – $2{,}7\cdot10^{24}$; 3 – $4{,}7\cdot10^{25}$ м$^{-3}$ [3]

Повышение удельной проводимости кремния с увеличением температуры в области низких температур обусловлено увеличением концентрации свободных носителей заряда – электронов за счет ионизации донорной примеси. При дальнейшем повышении температуры наступает область истощения примеси – полная ее ионизация. Собственная же электропроводность кремния заметно еще не проявляется.

В условиях истощения примеси концентрация свободных носителей заряда практически от температуры не зависит и температурная зависимость удельной проводимости

полупроводника определяется зависимостью подвижности носителей от температуры. Наблюдаемое в этой области уменьшение удельной проводимости кремния с ростом температуры происходит за счет снижения подвижности при рассеянии свободных носителей заряда на тепловых колебаниях кристаллической решетки.
Однако возможен и такой случай, когда область истощения примеси оказывается в интервале температур, где основным механизмом рассеяния является рассеяние на ионах примеси. Тогда удельная проводимость полупроводника с повышением температуры будет увеличиваться: $\sigma \sim T^{3/2}$.
Резкое увеличение удельной проводимости при дальнейшем росте температуры (рис. 2.11) соответствует области собственной электропроводности, в которой концентрация увеличивается экспоненциально [соотношение (2.4)], а подвижность снижается по степенному закону (2.10).
У вырожденного полупроводника (кривая 3 на рис. 2.11) концентрация свободных носителей заряда не зависит от температуры и температурная зависимость проводимости определяется зависимостью их подвижности от температуры (рис. 2.10).

## 14. ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

**Поглощение света**. Вследствие отражения и поглощения света полупроводником интенсивность падающего на него монохроматического излучения интенсивностью $I_0$ уменьшается до некоторой величины I. В соответствии с законом Ламберта – Бугера [3]:

$$I = I_0 (1 - R) \exp(-\alpha x), \qquad (2.16)$$

где R – коэффициент отражения, x – расстояние от поверхности полупроводника вдоль направления луча (в объеме) до данной точки; $\alpha$ – коэффициент поглощения.

Величина $\alpha^{-1}$ равна толщине слоя вещества, при прохождении через который интенсивность света уменьшается в e раз (e – основание натурального логарифма).
Поглощение полупроводником энергии электромагнитного излучения может быть связано с различными физическими процессами: нарушением ковалентных связей между атомами материала с переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости; ионизацией примесных атомов и возникновением дополнительных свободных электронов или дырок; изменением колебательной энергии атомов решетки; образованием экситонов и др.
Если поглощение света полупроводником обусловлено переходами электронов из валентной зоны в зону проводимости за счет энергии квантов излучения, то поглощение называют *собственным*; если возникновением свободных носителей за счет ионизации примесных атомов (доноров или акцепторов) – *примесным*.
У ряда полупроводников за счет поглощения кванта света возможно такое возбуждение электрона валентной зоны, которое не сопровождается его переходом в зону проводимости, а образуется связанная система электрон–дырка, перемещающаяся в пределах кристалла как единое целое. Эту систему называют *экситоном*. Оптическое поглощение полупроводника, обусловленное взаимодействием излучения с колебательным движением кристаллической решетки, называют *решеточным* [3, 4].
Независимо от механизма поглощения квантов излучения процесс подчиняется закону сохранения энергии.
**Фотопроводимость** полупроводников – явление, всегда сопровождающее процесс поглощения энергии электромагнитного излучения. При освещении полупроводника концентрация свободных носителей заряда в нем может возрасти за счет носителей, возбужденных поглощенными квантами света. Такими носителями могут быть как

собственные электроны и дырки, так и носители, перешедшие в свободное состояние вследствие ионизации примесных атомов.
Освещение полупроводника светом в течение достаточно длительного времени не приводит к бесконечному росту концентрации избыточных (по сравнению с равновесными) носителей заряда, так как по мере роста концентрации свободных носителей растет вероятность их рекомбинации. Наступает момент, когда рекомбинация уравновешивает процесс генерации свободных носителей и устанавливается равновесное состояние полупроводника с более высокой проводимостью $\sigma_{равн}$, чем без освещения ($\sigma_0$). Изложенное иллюстрируется рис. 2.12. Изменение фотопроводимости при освещении полупроводника импульсом прямоугольной формы происходит в соответствии с изменением концентрации свободных носителей заряда.

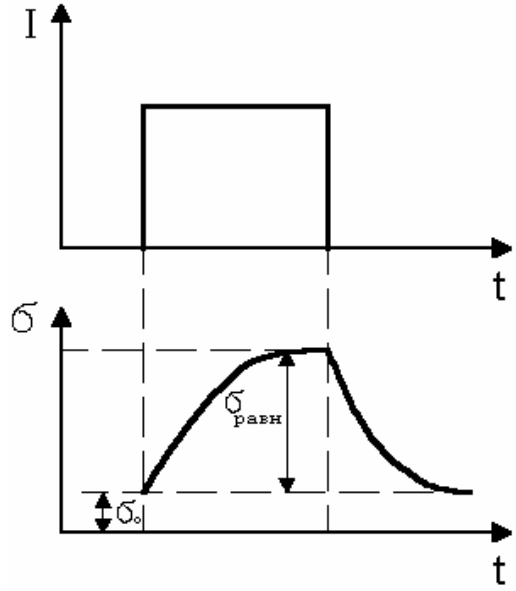



Рис. 2.12. Изменение фотопроводимости полупроводника во времени при освещении его прямоугольным импульсом света

Спектральная зависимость фотопроводимости соответствует спектру поглощения полупроводника, т.е. зависимости коэффициента поглощения $\alpha$ от длины волны излучения $\lambda$ (рис. 2.13).

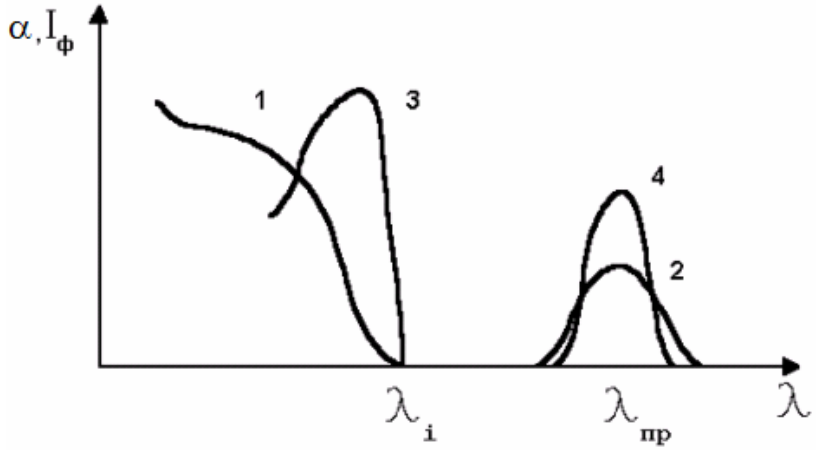



Рис. 2.13. Спектр поглощения полупроводника и спектральное распределение фоточувствительности: 1 – собственное поглощение; 2 – примесное поглощение; 3,4 – фототок

При более длинноволновом излучении, когда энергия квантов света $E_Ф$ невелика ($E_ф=h\nu$, где h – постоянная Планка, ν – частота) при $\lambda_{пр}$ наступает примесное поглощение и возникает фотопроводимость (фототок) за счет ионизации примесей (кривые 2, 4, рис. 2.13). При меньшей длине волны $\lambda_i$, т.е. большей энергии квантов света, соизмеримой с шириной запрещенной зоны, полупроводника $\Delta E_0$ возникают собственное (фундаментальное) поглощение и фотопроводимость (фототок) (кривые 1,3, рис. 2.13). Такая длина волны $\lambda_i$ называется краем собственного (фундаментального) поглощения полупроводника. Коротковолновый спад фотопроводимости (кривая 3, рис. 2.13) объясняется высоким коэффициентом поглощения (кривая 1, рис. 2.13), т.е. практически весь свет поглощается в очень тонком поверхностном слое материала.
Как указано выше, фотопроводимость, вызванная генерацией свободных носителей, всегда сопровождается поглощением энергии электромагнитного излучения. В процессе рекомбинации, напротив, энергия выделяется. Выделяющаяся энергия может поглощаться кристаллической решеткой (*безызлучательная рекомбинация*) либо излучаться в виде кванта света (*излучательная рекомбинация*). Последнее явление нашло применение в светодиодах, используемых в приборостроении в качестве световых индикаторов.

## 15. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

К важнейшим термоэлектрическим явлениям в полупроводниках относятся эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона [3 - 5].
Эффект *Зеебека* (термоэлектрический эффект) состоит в возникновении э.д.с. в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных материалов (разных металлов или полупроводников, или металла и полупроводника), если температуры контактов различны (рис. 2.14).
Термо-э.д.с. имеет три составляющие. Первая составляющая обусловлена диффузией носителей заряда из области полупроводника с более высокой температурой в область с более низкой (рис. 2.15). Градиент концентрации возникает вследствие дополнительной генерации основных или собственных носителей под возникновением повышенной температуры. Таким образом, градиент температуры вызывает создание градиента концентрации носителей заряда с их последующей диффузией к менее нагретому контакту. Вследствие указанных процессов «холодный» контакт приобретает знак основных носителей заряда, а «горячий» – знак соответствующих ионизированных донорных или акцепторных атомов примеси. Ионы являются элементами кристаллической решетки полупроводника и создают неподвижный объемный заряд: положительный в полупроводнике n-типа или отрицательный в полупроводнике p-типа.

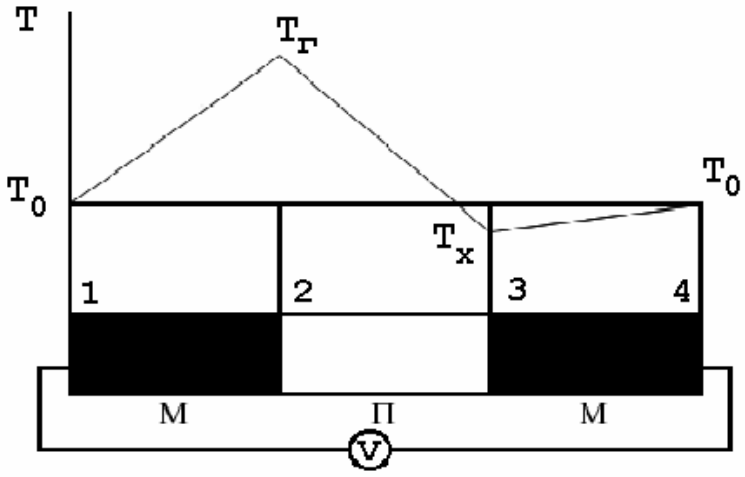



Рис. 2.14. Схема распределения температур в термоэлементе

Таким образом, диффузионная составляющая термо-э.д.с. возникает из–за нарушения (вследствие диффузии) электрической нейтральности областей полупроводника с разной температурой.

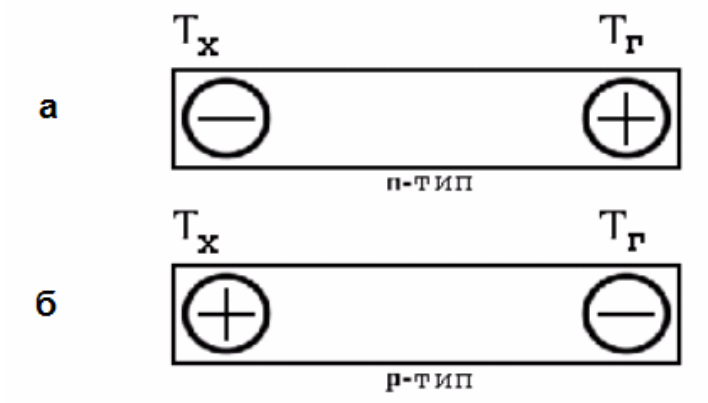



Рис. 2.15. Объемные заряды в полупроводнике n-типа (а) и p-типа (б) при наличии разности температур

Вторая составляющая термо-э.д.с. – это следствие температурной зависимости контактной разности потенциалов. Если оба спая (рис. 2.14) имеют одну и ту же температуру, то контактные разности потенциалов на этих спаях равны, направлены в противоположные стороны и не дают результирующей термо-э.д.с. Если же температура сплава различна, то величина контактной разности потенциалов будет также различна. Поэтому в цепи термоэлемента появляется вторая составляющая термо-э.д.с. с той же полярностью, что и диффузионная.

Третья составляющая термо-э.д.с. возникает в термоэлементе вследствие увлечения электронов (дырок) фононами, т.е. квантами тепловой энергии колебаний кристаллической решетки. Если в полупроводнике существует градиент температуры, то будет существовать направленное движение фононов от горячего спая к холодному. В результате столкновения фононов с носителями заряда фононы увлекают за собой в n-полупроводнике электроны, а в p-полупроводнике – дырки. Этот эффект может оказаться преобладающим при низких температурах.

Результирующая термо-э.д.с., состоящая их трех рассмотренных составляющих, зависит от температуры горячего ($T_г$) и холодного ($T_x$) спаев, от электрофизических свойств материалов.

Эффект *Пельтье* состоит в охлаждении или нагревании контакта двух материалов при протекании через него постоянного тока (рис. 2.16).

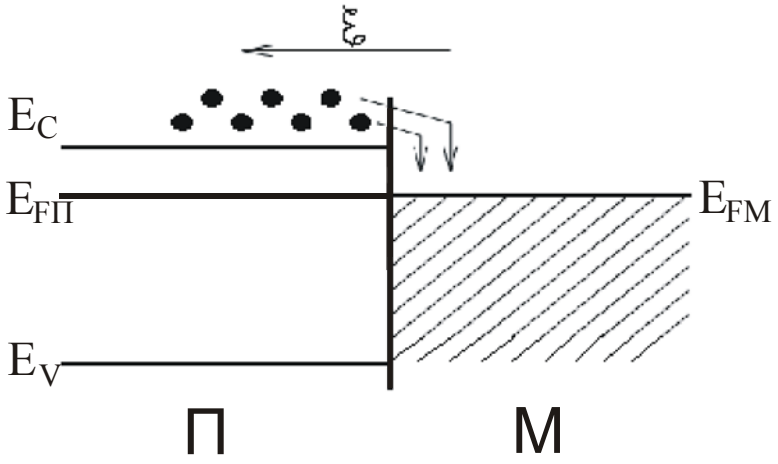



Рис. 2.16. Схема контакта электронного полупроводника с металлом, поясняющая эффект Пельтье [3]

Если напряженность внешнего электрического поля ε направлена так, как изображено на рис. 2.16, то перенос носителей тока через контакт (электрический ток) будет связан с переходом электронов из полупроводника в металл. Однако энергия электронов в зоне проводимости полупроводника больше, чем у электронов проводимости в металле. Поэтому электроны, переходя из полупроводника в металл, избыток энергии передадут кристаллической решетке в области контакта. В результате этого перенос электронов из полупроводника в металл будет сопровождаться выделением тепла на контакте и его нагревом.

При противоположном направлении напряженности внешнего электрического поля прохождение электрического тока будет связано с переходом электронов из металла в полупроводник, т.е. с уровней с меньшей энергией на уровни с большей энергией. Энергию, необходимую для этого, электроны получают от кристаллической решетки в области контакта, что приводит к его охлаждению.

Эффект Томсона состоит в выделении или поглощении тепла, дополнительно к теплу Джоуля – Ленца, при протекании постоянного тока по однородному полупроводнику, в котором имеется градиент температуры.

Эффект Зеебека и Пельтье наблюдаются в металлах и полупроводниках. В полупроводниках соответствующие величины, например термо-э.д.с., обычно на несколько порядков превышают таковые в металлах. Поэтому эффекты Зеебека и Пельтье в полупроводниках нашли большое практическое применение. В частности, эффект Зеебека используется для создания источников питания. К.п.д. полупроводниковых термогенераторов достигает 15–20 %. Термоэлектрические явления используются также в технике измерения электрофизических параметров полупроводников для определения типа их проводимости (рис. 2.15).

Термоэлектрический эффект Зеебека применяется для измерения температуры (термопары) и при других измерениях, которые могут быть сведены к измерению температуры.

Эффект Пельтье используется при создании компактных холодильных установок.

# 16. ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Ранее были рассмотрены кинетические явления в полупроводниках (перенос свободных носителей заряда) под действием электрического поля, а также при наличии градиента концентрации (градиента температуры).

*Гальваномагнитными* называют кинетические явления, которые возникают при одновременном действии электрического и магнитного полей.

Если полупроводник (или проводник), вдоль которого течет электрический ток, поместить в магнитное поле, перпендикулярное к направлению тока, то в материале возникает поперечное электрическое поле, перпендикулярное к току и магнитному полю. Это явление получило название *эффекта Холла*, а возникающая поперечная э.д.с. – э.д.с. *Холла*.

Допустим, что по полупроводнику в виде прямоугольной пластины (рис. 2.17) протекает ток с плотностью

$$j = en\nu_{др} = \sigma\varepsilon . \qquad (2.17)$$

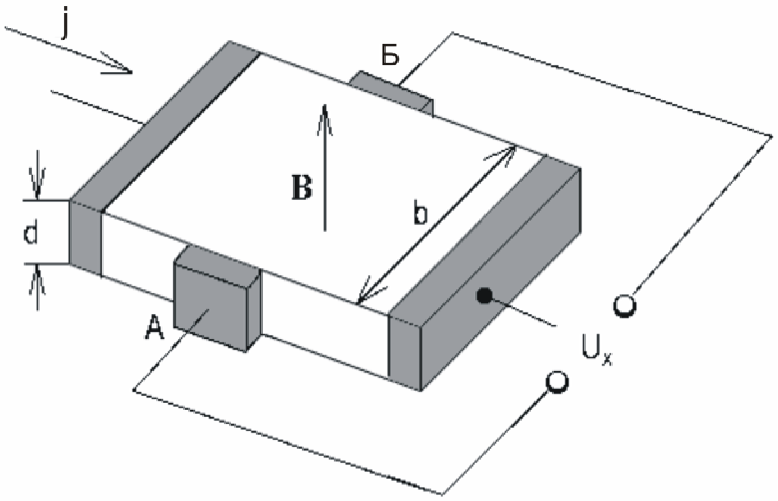



Рис. 2.17. Образец для измерения э.д.с. Холла

Если полупроводник однородный, то его эквипотенциальные поверхности располагаются перпендикулярно к вектору электрического поля ε, следовательно, и к вектору плотности тока j. Исходя из сказанного, разность потенциалов между точками А и Б будет равной нулю, так как точки лежат в плоскости перпендикулярной к вектору j. При помещении такого полупроводника в магнитное поля напряженностью В на носитель заряда, дрейфующий со скоростью $\nu_{др}$, будет действовать сила Лоренца

$$F_{Л} = e[\nu_{др}B]. \qquad (2.18)$$

Если скорость носителей заряда определяется внешним электрическим полем, то направление силы Лоренца не зависит от знака заряда, а определяется только взаимным направлением векторов ε и В, т. е. и электроны, и дырки под действием силы Лоренца

отклоняются в одну и ту же сторону. При этом в слабом магнитном поле траектория движения носителей изменяется слабо, а в сильном поле наблюдается значительное искривление траектории.

Для выбранных на рис. 2.18 направлений ε и B сила Лоренца действует вверх. Под действием этой силы носители заряда в полупроводнике будут смещаться к верхней поверхности образца. На нижней поверхности полупроводника возникает дефицит носителей заряда и появляется электрическое поле напряженностью $\varepsilon_x$, перпендикулярное к направлению внешнего поля ε и магнитного поля B. Это явление возникновения поперечной э.д.с. в полупроводнике с текущим током под действием магнитного поля и называют эффектом Холла. Напряженность поля $\varepsilon_x$ возрастает до тех пор, пока сила, обусловленная этим полем, не скомпенсирует силу Лоренца:

$$-e\varepsilon_x = e v_{др} B . \qquad (2.19)$$

Если ширину образца принять равной b, то холловская разность потенциалов

$$U_x = \varepsilon_x b = -v_{др} B b . \qquad (2.20)$$

Воспользовавшись выражением (2.17), можно записать

$$U_x = -\frac{1}{en_0} jBb = R_x jBb . \qquad (2.21)$$

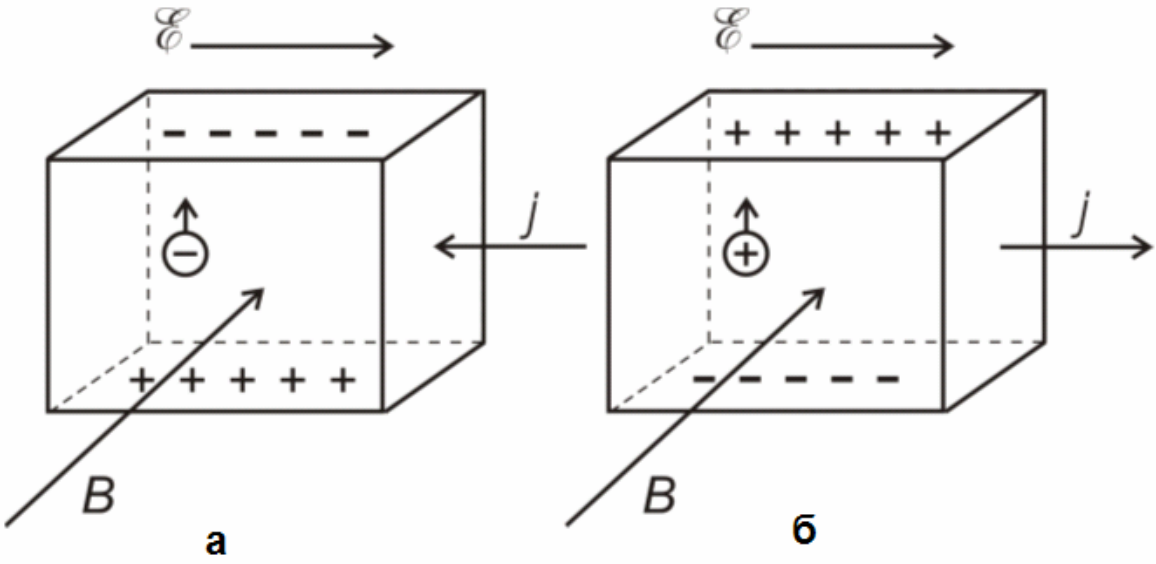



Рис. 2.18. Отклонение носителей заряда под действием магнитного поля в электронном полупроводнике (а) и в дырочном полупроводнике (б)

Величину $R_x$ принято называть коэффициентом (постоянной) Холла. Для электронных полупроводников

$$R_x = -\frac{1}{en_0}, \tag{2.22}$$

а для дырочных полупроводников

$$R_x = \frac{1}{ep_0}. \tag{2.23}$$

Коэффициент Холла обратно пропорционален концентрации основных носителей заряда, а знак его совпадает со знаком этих носителей. Обратно пропорциональная зависимость э.д.с. Холла от концентрации свободных носителей заряда объясняется тем, что при определенной величине тока носители перемещаются тем быстрее и отклоняются магнитным полем тем сильнее, чем меньше их концентрация.

Рассмотренные выше зависимости не учитывают распределения носителей заряда в объеме полупроводника по скоростям. Для учета механизмов рассеяния носителей заряда в полупроводнике вводится холл-фактор r. Тогда для электронного полупроводника коэффициент Холла будет $R_x = -\frac{r}{en_0}$. При рассеянии на тепловых колебаниях кристаллической решетки $r=3\pi/8$, при рассеянии на ионах примеси $r=315\pi/512\approx1{,}93$. Поскольку рассеяние носителей заряда зависит от температуры, то при определении коэффициента Холла при низких температурах необходимо полагать r=1,93. Для температур, при которых имеет место рассеяние на тепловых колебаниях кристаллической решетки, $r=3\pi/8$. Если в процессе рассеяния одновременно участвуют колебания решетки и ионы примеси, r имеет более сложное выражение.

Произведение $|R_x|\sigma$ имеет размерность подвижности и называется холловской подвижностью носителей заряда $\mu_x$. В то же время удельная электропроводность полупроводника, определяемая дрейфовой подвижностью, находится как $\sigma=en\mu_{др}$. Тогда $\mu_x=r\mu_{др}$, то есть холловская подвижность пропорциональна дрейфовой подвижности. Для металлов и вырожденных полупроводников коэффициент Холла не зависит от механизма рассеяния, поэтому $\mu_x=\mu_{др}$.

Для полупроводников с двумя типами носителей, концентрации и подвижности которых соответственно равны $n_0$, $\mu_n$ и $p_0$, $\mu_p$, коэффициент Холла

$$R_x = \frac{r(p_0\mu_p^2 - n_0\mu_n^2)}{e(p_0\mu_p + n_0\mu_n)^2}. \tag{2.24}$$

Для собственного полупроводника $n_0=p_0=n_i$,

$$R_x = \frac{r}{en_i}\left(\frac{\mu_p - \mu_n}{\mu_p + \mu_n}\right) = \frac{r}{en_i}\left(\frac{1-b}{1+b}\right), \qquad (2.25)$$

где $b=\mu_n/\mu_p$. Так как обычно $b>1$, то в собственных полупроводниках $R_x<0$. Согласно (2.24) инверсия знака $R_x$ может наблюдаться в биполярных полупроводниках.

Поскольку подвижность и концентрация носителей заряда являются функциями температуры, то $R_x$ также зависит от температуры. Измерения зависимости коэффициента Холла от температуры имеют особую ценность. Они позволяют установить температурную зависимость концентрации носителей заряда, а в совокупности с измерениями удельной электропроводности – температурную зависимость подвижности. По температурной зависимости концентрации или коэффициента Холла в области слабой ионизации примеси можно определить энергию ионизации примеси ($\Delta E_a$, $\Delta E_Д$), а в области собственной электропроводности – ширину запрещенной зоны ($\Delta E_0$). На рис. 2.19 приведены зависимости концентрации носителей заряда (рис. 2.19, а) и коэффициента Холла (рис. 2.19, б, в) в соответствующих координатах, когда эти зависимости имеют вид прямых линий. Кривая на рис. 2.19, б соответствует полупроводнику n-типа, а на рис. 2.19, в – полупроводнику p-типа. В области примесной проводимости $R_x$ в таком полупроводнике положителен, а в области собственной проводимости – отрицателен [согласно (2.25)]. При переходе к собственной проводимости $R_x$ меняет знак, переходя через нуль, а зависимость $\ln R_x$ при этом терпит разрыв.

Ранее было указано, что холловское напряжение прямо пропорционально индукции магнитного поля для полей не слишком высокой напряженности. Расчет показал, что критерием слабого поля и, следовательно, применимости полученных выше соотношений для э.д.с. Холла и коэффициента Холла является условие:

$$\varphi = B\mu = R_x \sigma B << 2\pi , \qquad (2.26)$$

где $\varphi$ – угол Холла, $\mu$ – подвижность.

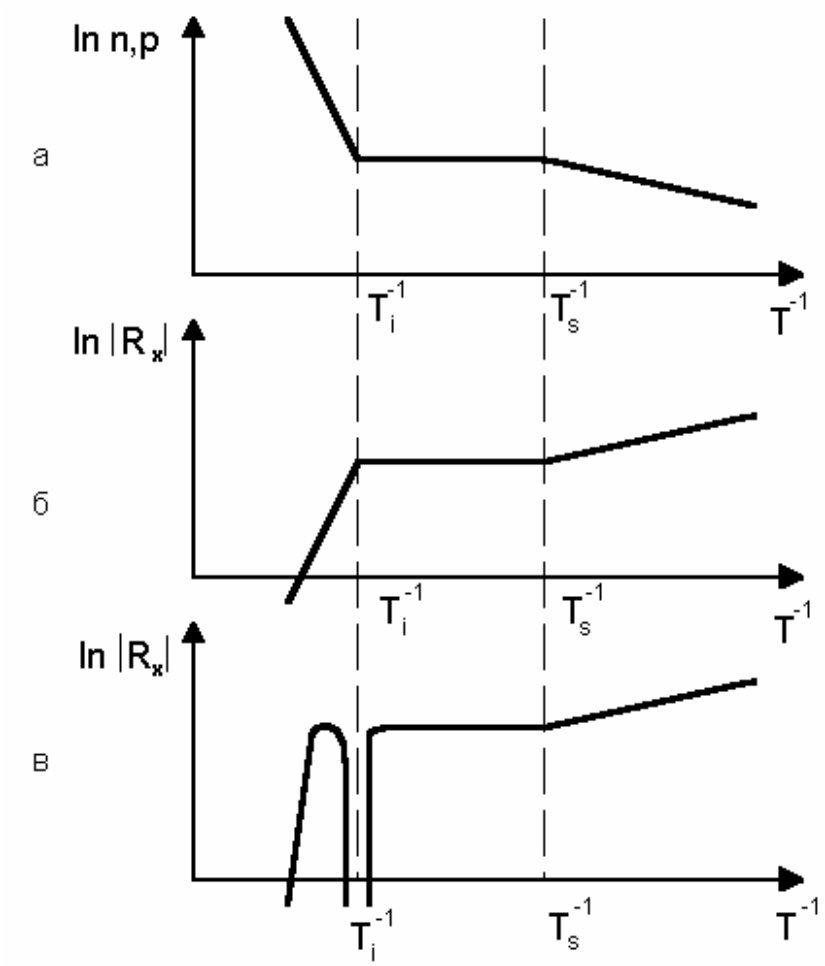



Рис. 2.19. Зависимость концентрации носителей заряда (а) и коэффициента Холла для полупроводника n-типа (б) и полупроводника p-типа (в)

Если в магнитных полях высокой напряженности угол Холла, то есть угол, на который отклоняются свободные носители заряда, будет близок к $2\pi$, то за время свободного пробега носители будут не просто отклоняться от направления своего первоначального движения, а «закручиваться» вокруг силовых линий магнитного поля. Установлено, что слабыми могут считаться магнитные поля с индукцией B: для германия – менее 16 Тл, для кремния – менее 40 Тл, для антимонида индия – менее 0,8 Тл.

Необходимо отметить, что величина э.д.с. Холла в полупроводниках может на порядки величины превышать значение э.д.с. Холла в проводниковых материалах.

Эффект Холла является, таким образом, мощным экспериментальным средством изучения фундаментальных параметров полупроводников: концентрации и знака заряда носителей, а также их подвижности, энергии ионизации примеси и ширины запрещенной зоны.

Кроме того, эффект Холла применяют в магнитометрах, измерителях малых перемещений и давлений, бесконтактных переключателях и других устройствах.

*Библиографический список*


1. Технология металлов и конструкционных материалов / Б.А. Кузьмин, Ю.Е. Абраменко, В.К. Ефремов и др.; Под ред. Б.А. Кузьмина. М.: Машиностроение, 1981. 351 с.
2. Материалы для внутритканевого протезирования: Учеб. пособие /С.П. Вихров, Т.А. Холомина, П.И. Бегун, П.Н. Афонин; Рязан. гос. радиотехн. акад. Рязань, 2003. 80 с.
3. Электрорадиоматериалы / Под ред. Б.М.Тареева. М.: Высшая школа, 1978. 336 с.
4. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела: Пер. с англ. М.: Мир, 1969. С. 437-503.
5. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 304 с.

*Оглавление*

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

1. Металлы и сплавы ....3

1.1. Классификация и свойства металлов и сплавов ....3

1.2. Строение и кристаллизация металлов ....4

1.3. Основные типы сплавов....6

1.4. Диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов ....8

1.5. Диаграмма состояния системы железо – углерод ....16

1.6. Термическая и химико-термическая обработка стали....20

1.7. Свойства, классификация и маркировка сталей....27

1.8. Электро- и теплопроводность металлов и сплавов ....34

2. Полупроводниковые материалы ....38

2.1. Общие свойства и классификация полупроводников....38

2.2. Энергетические зоны и электрические свойства твердых тел....39

2.3. Собственные и примесные полупроводники....41

2.4. Зависимость концентрации свободных носителей заряда в полупроводниках от температуры ....45

2.5. Температурная зависимость проводимости полупроводников ....48

2.6. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках....51

2.7. Термоэлектрические явления....53

2.8. Эффект Холла ....56

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 61

В и х р о в  Сергей Павлович

Х о л о м и н а  Татьяна Андреевна

# СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Редактор И.П. Перехрест

Коррекор Е.В. Ипатова

Лицензия № 020446.
Подписано в печать 10.03.04. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 5,25.
Уч. изд. л. 5,25. Тираж 150 экз. Заказ
Рязанская государственная радиотехническая академия.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТА

УДК 621.38+615.83

Свойства и применение металлов и полупроводников: Учеб. пособие/ С.П. Вихров, Т.А. Холомина; Рязан. гос. радиотехн. акад. Рязань, 2004. 84 с. ISBN 5-7722-0250-2.

Рассмотрены классификация металлов и сплавов, особенности их строения и процессов кристаллизации. Проведен анализ основных типов диаграмм состояния сплавов. Особое внимание уделено анализу диаграммы состояния системы железо - углерод, а также влияния термической и химико-термической обработки на свойства сталей. Проанализированы свойства, классификация и применение сталей в технике. Проведены классификация и анализ свойств полупроводниковых материалов: электропроводности, оптических, фотоэлектрических, термоэлектрических явлений, эффекта Холла. Показано практическое применение различных эффектов в полупроводниках.

Предназначено для самостоятельной работы студентов, обучающихся по специальности 060800 – заочной и очной форм обучения, а также специальностям 190500, 190600, 190900 дневного отделения.

Ил. 34. Библиогр.: 5 назв.

*Металлы, сплавы, диаграмма состояния сплава, свойства полупроводников*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанской государственной радиотехнической академии.

Рецензент: кафедра общей и экспериментальной физики (зав. кафедрой проф. Э.П. Шеретов)

ISBN 5-7722-0250-2

© Рязанская государственная радиотехническая академия, 2004

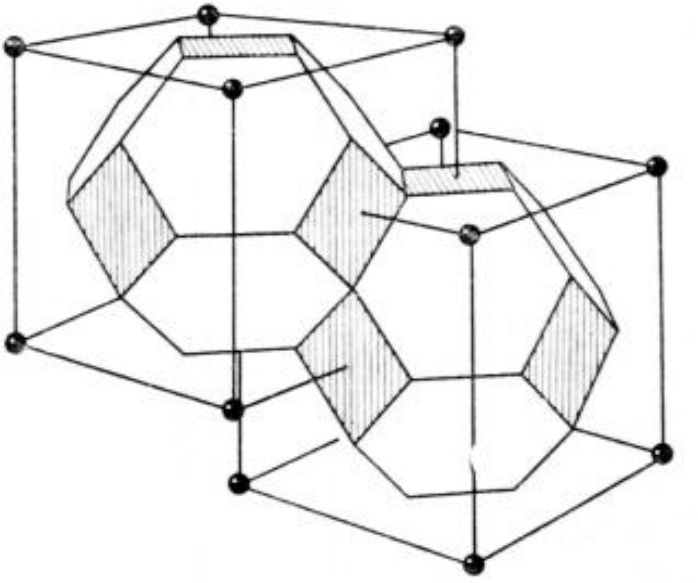
**3838**

Федеральное агентство по образованию

Рязанский государственный радиотехнический университет

# ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Методические указания к практическим занятиям



2006

УДК 539.2

Физика твердого тела: Методические указания к практическим занятиям / Рязан. гос. радиотехн. университет. Сост.: Т.А. Холомина. Рязань, 2006. 40 с.

Приведены задачи по основным разделам физики твердого тела, в ряде случаев содержащие методические указания по решению. Необходимые теоретические сведения содержатся в литературе, приведенной в библиографическом списке. Часть задач заимствована из сборников, указанных в библиографическом списке, остальные разработаны составителем.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих дисциплину «Физика твердого тела».

Ил. 3. Библиогр.: 6 назв.

*Кристаллическая решетка, уровень Ферми, собственные и примесные полупроводники, электроны, дырки, фононы, магнитные свойства, p-n-переход*

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

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой
С.П. Вихров)

Физика твердого тела

Составитель Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 06. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,5.
Уч.-изд. л. 2,5. Тираж 50 экз. Заказ

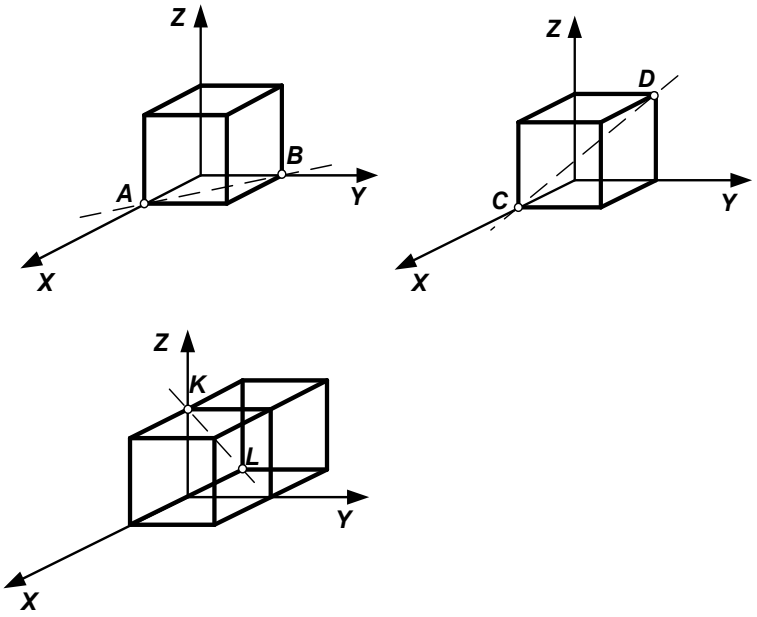
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

# 1. СТРОЕНИЕ И СТРУКТУРА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

1.1. Плоскость пересекает оси кубического кристалла в точках 3*a*, 2*a*, 2*a*, где *a* - параметр элементарной ячейки. Найти индексы и символ Миллера этой плоскости.

1.2. Изобразить приблизительно плоскости (001),(110),(1 $\bar{1}$ 1),(111) в кристалле кубической сингонии.

1.3. Найти индексы и символы прямых *AB, CD, KL*, изображенных на рис.1.1, а, б, в.




а б

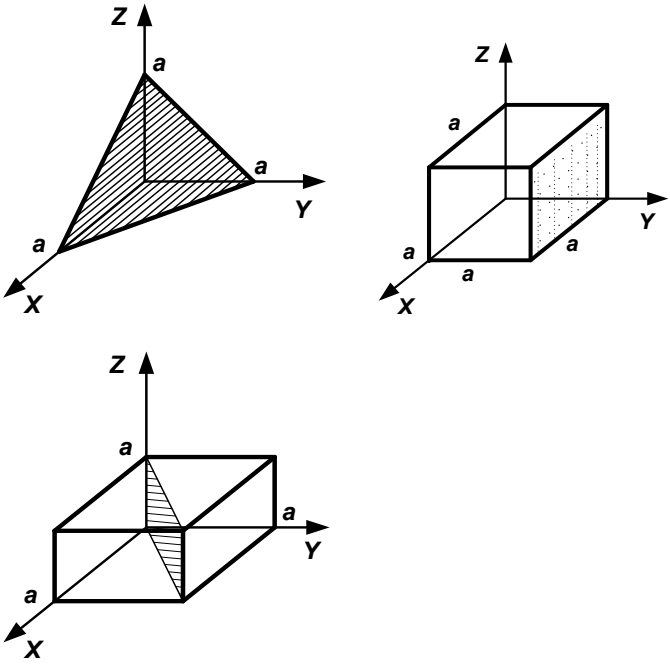
Рис. 1.1. К задаче 1.3

1.4. Написать индексы направления, проходящего через узлы [[100]] и [[001]] примитивной кубической решетки.

1.5. Написать индексы и символ направления, проходящего в кубической решетке через начало координат и узел с кристаллографическим символом, в двух случаях:1) [[242]]; 2) [[112]].

1.6. Написать индексы и символ направления, проходящего через два узла с кристаллографическими символами (в двух случаях):1) [[123]] и [[321]]; 2)[[121]] и [[201]].

1.7. Определить индексы и символ Миллера указанных на рис. 1.2 плоскостей.

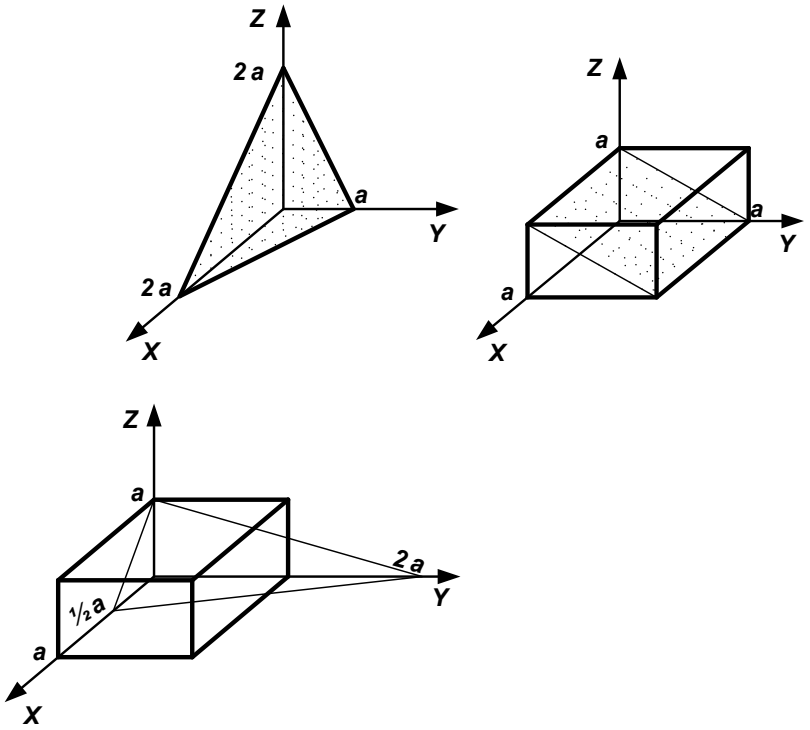



а б в

Рис.1.2. К задаче 1.7

1.8. Плоскость проходит через узлы $[[\bar{1}00]]$,$[[0\bar{1}0]]$ и $[[00\bar{1}]]$ кубической решетки. Написать индексы и символ Миллера для этой плоскости.

1.9. Определить индексы и символ Миллера указанных на рис. 1.3 плоскостей.




а б в

Рис. 1.3. К задаче 1.9

1.10. Система плоскостей в примитивной кубической решетке задана символом Миллера (221). Найти наименьшие отрезки, отсекаемые плоскостью на осях координат, и изобразить эту плоскость графически.

1.11. Определить символ вертикальной грани кристалла, если заданы отрезки, отсекаемые этой гранью на осях координат: OA = 8,79 см; OB = 9.44 см, и отношение осевых единиц: $a:b$ = 0,621:1.

1.12. Точкам пересечения некоторой плоскости кристалла с осями координат соответствуют числа 2,1,4. Найти индексы и символ Миллера для этой плоскости и изобразить соответствующий чертеж.

1.13. Найти символ грани кристалла *A′B′C′,* отсекающей на осях *OX*, *OY* и *OZ* отрезки, соответственно 1/4, $\sqrt{3}$ /2 и 2 см, если известно, что единичная грань *ABC* того же кристалла отсекает на тех же осях отрезки 1, $2\sqrt{3}$ и 4 см.

1.14. По известным символам Миллера следующих граней найти символы Миллера-Браве: $(100)$, $(0\bar{1}0)$, $(\bar{2}11)$, $(3\bar{2}1)$, $(\bar{1}\bar{2}0)$.

1.15. Даны отрезки, отсекаемые вертикальной гранью гексагонального кристалла на осях *OX* и *OU*, *OA*=2 и *OF*= -3. Определить символ грани.

1.16. Определить индексы и символы плоскостей, проходящих через две пространственных диагонали куба.

1.17. Определить символ оси зоны (ребра), образованной гранями дидодекаэдра (321) и (132).

1.18. С помощью рентгеноструктурного анализа установлено, что кристалл шпинели $MgAlO_4$ имеет параметры: a = b = c = 8,11 Å. На кристалле наблюдаются грани (111), $(\bar{1}\bar{1}1)$, $(1\bar{1}\bar{1})$, $(\bar{1}\bar{1}1)$ и грани, параллельные названным. Требуется:

1) изобразить общий вид кристалла (найти облик);

2) найти символ оси зоны, содержащей грани $(111)$ и $(\bar{1}\bar{1}1)$;

3) найти условие принадлежности граней кристалла этой зоне;

4) определить, какие еще грани кристалла также принадлежат этой зоне;

5) изобразить проекцию решетки шпинели на плоскость (001);

6) провести след плоскости (110) и нормаль к этой плоскости, проходящую через начало координат; найти расстояние по нормали от начала координат до первой плоскости этого семейства, выраженное в ангстремах;

7) определить углы между соседними плоскостями.

1.19. У кристалла ромбической серы грань *(hkl)* лежит на пересечении осей зон [ $\bar{2}30$ ] и [ $04\bar{1}$ ]. Были измерены следующие углы:

51°28′ – между гранями (100) и (*hkl*);

70 ° 18′ - между гранями (010) и (*hkl*).

Определить индексы и символ грани (*hkl*), угол между (001) и (*hkl*) и осевые отрезки *a* и *c*, если *b* =12,94 Å.

Указания к решению. Воспользовавшись законом Вейсса и тем, что сумма квадратов направляющих косинусов в системе ортогональных осей координат равна 1, т.е. $cos^2\varphi + cos^2\xi + cos^2\chi = 1$, получим соотношение $h/a : k/b: l/c = cos\ \varphi : cos\ \xi : cos\ \chi$.

1.20. Написать индексы и символ Миллера для плоскостей, содержащих узлы с кристаллографическими символами, в двух случаях: а) [[111]], [[1 $\bar{1}$ 2]], [[ $\bar{1}$ 01]]; б) [[1 $\bar{1}$ 1]], [[010]], [[ $\bar{1}$ $\bar{1}$ 1]]. Найти отрезки, отсекаемые этими плоскостями на осях координат.

1.21. Определить, будут ли какие-либо из плоскостей семейства {111} нормальны к каким-либо плоскостям семейства {011}. Привести примеры.

1.22. Вычислить угол ψ между двумя направлениями в кубической решетке кристалла, которые заданы кристаллографическими символами [110] и [111].

1.23. Система плоскостей примитивной кубической решетки задана символом {111}. Определить расстояние *d* между соседними плоскостями, если параметр (элементарная трансляция) *a* решетки равен 0,3 нм.

1.24. Определить параметр *a* примитивной кубической решетки, если межплоскостное расстояние *d* для системы плоскостей, заданных символом Миллера {212}, при рентгеноструктурном измерении оказалось равным 0,12 нм.

1.25. Три системы плоскостей в примитивной кубической решетке заданы символами Миллера: а) {111}; б) {110}; в){100}. Указать, для какой системы межплоскостные расстояния *d*

минимальны и для какой системы – максимальны. Определить отношения межплоскостных расстояний.

1.26. Вычислить угол ψ между плоскостями в кубической решетке, заданными символами Миллера (111) и (111).

1.27. Две плоскости в кубической решетке заданы символами Миллера (010) и (011). Определить угол между плоскостями.

1.28. Направление прямой в кубической решетке задано символом Миллера [011]. Определить угол между этой прямой и плоскостью (111).

1.29. Определить угол между прямой [111] и плоскостью (111) в кубической решетке.

1.30. Плоскость в кубической решетке задана символом Миллера (011), а направление – символом [111]. Определить угол между прямой и плоскостью.

1.31. Найти угол между направлением [111] и плоскостью (111):
а) в кубическом кристалле;
б) в тетрагональном кристалле с трансляциями $a$ = 5,67 Å, $c$ = 12,70 Å.

1.32. В тетрагональном кристалле $CuFeS_2$ угол между плоскостями (111) и ($\bar{1}\,\bar{1}\,1$) равен 108º40′. Вычислить: а) отношение трансляций $a/c$; б) угол между осями зон [236] и [001].

1.33. Вычислить угол между плоскостями (100) и ($1\,\bar{1}\,0$) в кремнии.

1.34. Вычислить минимальное расстояние между плоскостями {120} в кремнии. Параметр элементарной ячейки равен 5,43 Å.

1.35. Определить угол между плоскостями (110) и ($1\,\bar{1}\,2$) в кремнии.

1.36. Вычислить для кубической решетки углы между направлением [123] и осями координат.

1.37. Определить угол между плоскостью (112) и направлением [111] в кристалле тетрагональной сингонии, если $a$ = 2,5 Å, $c$ = 3,6 Å.

1.38. Найти угол между плоскостью (101) кристалла кубической сингонии и плоскостью, лежащей на пересечении осей зон [101] и [$\bar{1}\,1\,\bar{1}$].

1.39. Найти угол между плоскостью (320) кристалла кубической сингонии и плоскостью, лежащей на пересечении осей зон [0 $\bar{1}$ 2] и [1 $\bar{1}$ 0].

1.40. Вычислить угол между ребром, образованным при пересечении граней (210) и (02 $\bar{1}$) кристалла кубической сингонии, и плоскостью (111).

1.41. Решетку типа алмаза можно рассматривать как комбинацию двух вставленных друг в друга и смещенных одна относительно другой на 1/4 пространственной диагонали подрешеток со структурой ГЦК. У одной подрешетки начало координат лежит в точке с координатами 000, а у другой оно сдвинуто вдоль диагонали куба на четверть ее длины. Требуется: а) написать координаты всех атомов этой элементарной ячейки; б) определить число атомов, образующих эту элементарную ячейку.

1.42. Полиморфизмом называется свойство некоторых веществ существовать в нескольких кристаллических фазах, отличающихся по симметрии структуры и свойствам. Чистое железо при атмосферном давлении имеет следующие модификации:

α-железо ↔ γ-железо ↔ δ-железо

ОЦК ↔ 910 ° С↔ ГЦК ↔1400 ºС↔ ОЦК.

Рассчитать отношение плотностей железа в структурах α- и γ-железо при 910 ºС, исходя из равенства атомных радиусов обеих модификаций и свойства металлов иметь плотнейшую упаковку атомов.

1.43. Вывести математическое соотношение между параметром $a$ и радиусом r несжимаемых шаров в следующих типах элементарных ячеек с плотнейшей упаковкой:

а) примитивная кубическая;

б) объемно-центрированная кубическая (ОЦК);
в) гранецентрированная кубическая (ГЦК);
г) структура алмаза.

1.44. У каких плоскостей в структурах ГЦК и ОЦК наиболее высокая плотность упаковки атомов? В каких направлениях указанных структур линейная плотность расположения атомов максимальна?

1.45. Параметр кубической элементарной ячейки металла, содержащей два атома, согласно данным рентгеноструктурного анализа, составляет 3.16 Å. Плотность металла – 19,35 г/см$^3$ . Вычислить атомную массу элемента.

1.46. Вычислить число Авогадро исходя из следующих данных: плотность золота равна 19,3 г/см$^3$, золото кристаллизуется в гранецентрированную кубическую элементарную ячейку с параметром 0,4 нм.

1.47. Сколько атомов приходится на одну элементарную ячейку: 1) примитивной решетки кубической сингонии; 2) объемно-центрированной решетки ромбической сингонии; 3) гранецентрированной решетки кубической сингонии; 4) базоцентрированной решетки ромбической сингонии; 5) примитивной решетки гексагональной сингонии; 6) гексагональной структуры с плотной упаковкой.

1.48. Определить число элементарных ячеек кристалла объемом 1 м$^3$: 1) хлористого цезия (решетка ОЦК); 2) меди (решетка ГЦК); 3) кобальта, имеющего гексагональную структуру с плотнейшей упаковкой.

1.49. Изучение кристалла хлорида натрия с помощью рентгеноструктурного анализа показало, что он представляет собой гранецентрированную кубическую решетку с расстоянием между ионами натрия и хлора, равным 0, 2814 нм. Плотность кристалла составляет 2,165 г/см$^3$. Вычислить число Авогадро.

1.50. Определить период идентичности $l$ вдоль прямой [111] в решетке кристалла $NaC$ . Плотность указана в задаче 1.49.

1.51. Рассчитать следующие параметры структуры кремния: 1) число атомов, содержащихся в элементарной ячейке; 2) атомный радиус элемента, полагая что длина ребра элементарной ячейки кристалла составляет 0,54 нм; 3) число атомов кремния в 1 $см^3$; 4) концентрацию валентных электронов в 1 $см^3$.

1.52. Длина ребра куба в элементарной ячейке кристалла алмаза составляет 0,365 нм. Найти расстояние между двумя ближайшими соседними атомами и концентрацию атомов в 1 $см^3$.

1.53. Найти зависимость расстояния между двумя ближайшими атомами от параметра *a* для ГЦК и ОЦК элементарных ячеек.

1.54. Вычислить плотность кристалла неона (при 20 К), полагая, что его решетка гранецентрированная кубической сингонии. Постоянная *a* при той же температуре равна 0,452 нм.

1.55. Найти плотность кристалла стронция, если известно, что его решетка гранецентрированная кубической сингонии, а расстояние *d* между ближайшими соседними атомами равно 0,43 нм.

1.56. Определить относительную атомную массу кристалла, если известно, что расстояние *d* между ближайшими соседними атомами составляет 0,304 нм. Решетка кристалла ОЦК, плотность – 534 $кг/м^3$.

1.57. Найти постоянную решетки *a* и расстояние между ближайшими соседними атомами кристалла *d*: 1) алюминия (решетка ГЦК); 2) вольфрама (решетка ОЦК).

1.58. Определить постоянные *a* и *c* решетки кристалла магния, который представляет собой гексагональную структуру с плотнейшей упаковкой. Плотность кристаллического магния равна 1,74 $г/см^3$.

1.59. Вычислить постоянную *a* решетки кристалла бериллия, который представляет собой гексагональную структуру с плотнейшей упаковкой атомов. Параметр *c* решетки равен 0,359 нм, плотность составляет 1,82 $г/см^3$.

1.60. Найти плотность кристалла гелия (при 2 К), который представляет собой гексагональную структуру с плотнейшей упаковкой. Постоянная решетки, определенная при той же температуре, равна 0,357 нм.

1.61. Зная плотность меди 8,9 г/см$^3$, вычислить параметр *a* ее кристаллической решетки.

1.62. Параметр кристаллической решетки меди равен 0,361 нм. Написать символ Миллера для системы плоскостей, плотность расположения атомов в которых максимальна. Вычислить эту плотность, выразив ее в количестве атомов, приходящихся на 1 см$^2$.

1.63. Рассчитать теоретическую плотность кристалла *NaCl*, если постоянная элементарной ячейки составляет 0,5628 нм. В элементарную ячейку входят четыре иона натрия и четыре иона хлора.

1.64. В орторомбической структуре все ребра элементарной ячейки взаимно перпендикулярны, но не равны между собой по длине. Начертить плоскость (321) и направление [321]. Найти угол между направлением [321] и нормалью к плоскости (321), если длины ребер элементарной ячейки относятся как 1 : 1 : 2.

1.65. Рассчитать «угол между связями» в структуре твердого германия.

1.66. Рентгеновские лучи с медного анода имеют длину волны $\lambda = 1{,}537$ Å. Попадая на кристалл алюминия, они вызывают дифракцию от плоскостей (111) под углом Вульфа-Брегга $\theta = 41{,}13^\circ$ .Алюминий имеет структуру ГЦК, плотность 2,699 г/см$^3$, атомную массу – 26,98 г·моль$^{-1}$. По этим экспериментальным данным рассчитать число Авогадро (число атомов в 1 моле вещества).

1.67. Получена рентгенограмма вращения с монокристалла тетрагональной сингонии. Длина волны рентгеновского излучения равна 1,542 Å; пучок рентгеновских лучей перпендикулярен к оси вращения, которая является осью этого кристалла. Радиус камеры 3 см, длина 10 см. На нулевой слоевой линии наблюдаются рефлексы на расстояниях 0,54; 0,75; 1,08; 1,19; 1,52; 1,63; 1,71 и 1,97 см от места выхода прямого пучка, т.е. от центра пленки. Расстояние первой слоевой линии от нулевой линии составляет 0,66 см.

Проиндицировать наблюдаемые на нулевой слоевой линии рефлексы, вычислить параметры элементарной ячейки кристалла и расстояние каждой наблюдаемой слоевой линии от нулевой линии рентгенограммы вращения.

1.68. Рентгенограмма металлического порошка получена в рентгеновской камере Дебая-Шерера на излучении молибдена $K_\alpha$ ($\lambda$ = = 0,7107 Å). Для первых шести наблюдаемых линий дебаевские углы $\theta$ оказались равными 7.35; 7,82; 8,33; 10,70; 12,80 и 13,90º.

Определить тип кристаллической решетки и проиндицировать (найти символы) наблюдаемые линии. Вычислить атомную массу вещества, если его плотность составляет 1,74 г/см$^3$. Единицу атомной массы принять за $1{,}660 \cdot 10^{-24}$ г.

1.69. На дебаеграмме некоторого кубического кристалла, полученной на излучении меди $K_\alpha$ ($\lambda$ = 1,542 Å), наблюдаются линии под углами Брегга $\theta$:12,3; 14,1; 20,2; 24,0; 25,1; 29,3; 32,2 и 33,1º.

Определить символы плоскостей, которые вызвали появление указанных линий на дебаеграмме. Найти число структурных единиц в одной элементарной ячейке, выяснить, является ли эта решетка примитивной, гранецентрированной или объемно-центрированной, вычислить длину ребра ячейки. Плотность вещества равна 8,31 г/см$^3$, атомная масса составляет 312. Единицу атомной массы принять за $1{,}660 \cdot 10^{-24}$ г.

1.70. Электроны, подобно рентгеновским лучам, могут быть использованы для наблюдения дифракции в кристаллах. При какой энергии электронов они будут отражаться от плоскостей (100) кристалла с параметром решетки 4 Å, если угол Вульфа-Брегга равен 45º?

1.71. Через площадь кристалла 1 см$^2$ проходят $10^6$ прямолинейных краевых дислокаций. На какое расстояние переместится каждая дислокация, если нагреть кристалл от 0 до 1000 К? Энергия активации дислокации составляет 1 эВ, а постоянная решетки – 2 Å.

# 2. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ И СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

2.1. Пользуясь распределением Ферми-Дирака, рассчитать при $T$ = 300 К вероятность заполнения электроном энергетического уровня, расположенного: 1) выше уровня Ферми на а) 0,1эВ, б) 1.0 эВ; 2) ниже уровня Ферми на 0,1 эВ.

2.2. Как и во сколько раз изменится вероятность заполнения электроном энергетического уровня в металле, если уровень расположен на 0,1 эВ ниже уровня Ферми и температура повысится от 200 до 300 К?

2.3. Определить температуру идеального газа, средняя энергия частиц которого равна средней энергии свободных электронов в металле при $T$ = 0 К с уровнем Ферми, равным 6 эВ.

2.4. Найти разницу энергий (в единицах $kT$ ) электрона, энергия которого соответствует уровню Ферми, и электронов, находящихся на уровнях, вероятности заполнения которых равны 0,2 и 0,8.

2.5. Определить долю свободных электронов в металле при $T$ = 0 К, энергия которых отличается от максимальной менее чем на 50 %.

2.6. Металлический образец объемом 1 см$^3$ находится при $T$ = 0 К. Уровень Ферми соответствует 5 эВ. Найти концентрацию свободных электронов, импульс которых отличается от максимального не более чем на 10 %.

2.7. Определить температуру, при которой в твердом проводнике вероятность найти электрон с энергией выше уровня Ферми на 0,5 эВ составляет 2 %.

2.8. На грань кристалла под углом 40 º к плоскости поверхности падает параллельный пучок электронов, движущихся с одинаковой скоростью. Определить скорость электронов, если они испытывают интерференционное отражение первого порядка. Расстояние между атомными плоскостями кристалла составляет 2 Å.

2.9. Найти долю тяжелых дырок в полной концентрации дырок собственного германия, приняв эффективную массу тяжелых дырок, равной 0,34 $m_0$, а легких – 0,04 $m_0$.

2.10. На сколько надо повысить температуру по сравнению с 300 К, чтобы концентрация свободных электронов в собственном германии увеличилась в 2 раза? Температурной зависимостью эффективной плотности состояний в этой задаче пренебречь.

2.11. Показать, что вероятность того, что состояние с энергией, превышающей уровень Ферми на величину $\Delta E$, будет занято, в точности совпадает с вероятностью иметь свободное состояние, энергия которого меньше значения энергии Ферми на эту же величину $\Delta E$.

2.12. Кинетическая энергия электрона в атоме водорода составляет около 10 эВ. Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные линейные размеры атома.

2.13. В германии часть атомов замещена атомами сурьмы. Рассматривая электрон примесного атома, не участвующий в ковалентной связи, по модели Бора, оценить энергию его связи и эффективный радиус орбиты.

2.14. Вычислить вероятность нахождения электрона на уровнях $E_F$ + + 0,1 эВ и $E_F$ - 0,1 эВ при температурах 0, 150, 300 и 1000 К. Результаты представить в форме таблицы и в виде графика.

2.15. Вычислить эффективную плотность состояний в зоне проводимости и в валентной зоне кремния при комнатной температуре. Считать, что эффективные массы носителей выражаются через массу электрона следующим образом: $m_n^* = 1{,}1\ m_0$; $m_p^* = 0{,}56\ m_0$.

2.16. Рассчитать эффективную плотность состояний в зоне проводимости германия при температурах 10 и 100 К.

2.17. Какова будет ошибка, если заменить распределение Ферми-Дирака распределением Максвелла-Больцмана при расчете вероятности заполнения энергетического уровня, лежащего выше уровня Ферми на 4 $kT$, ниже на $2\ kT$?

2.18. Ширина запрещенной зоны чистого полупроводника составляет 1 эВ. Вычислить вероятность заполнения электроном уровня вблизи дна зоны проводимости при температурах 0 и 290 К.

2.19. Оценить величину неопределенности в измерении значения импульса частицы массой в 1 г, положение центра которой ограничено областью пространства диаметром $10^{-6}$ м. Чему равна минимальная энергия, которой могла бы обладать такая частица?

2.20. Рассматривая движение частицы в трехмерном потенциальном ящике, получить выражение для расчета числа состояний, энергии которых меньше некоторой заданной $E^*$. У к а з а н и е. Необходимо в $k$-пространстве построить сферу радиусом $E^*$ и найти число возможных значений $k$ внутри одного октанта этой сферы.

2.21. Вычислить значение энергии Ферми при температуре абсолютного нуля для валентных электронов натрия и лития. Почему значение энергии Ферми не зависит от размера образца металла? Эффективную массу электрона принять равной массе покоя.

2.22. Энергия электрона в валентной зоне гипотетического металла иллия с примитивной кубической решеткой имеет вид: $E = Ak^2 + B$, где $A = 10^{-38}$ Дж·м$^2$, $B$ = -12 эВ, $k = 2\pi/\lambda$. Энергия ионизации свободного атома составляет 1 эВ, валентная зона является $p$-зоной и состояния вплоть до $ka = = (2\pi^2)^{1/3}$ заполнены ($a$ – параметр ребра кристалла, равный 2Å). Вычислить: а) отношение $m^*/m$; б) число валентных электронов, приходящихся на один атом металла.

## 3. РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СОБСТВЕННЫХ И ПРИМЕСНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ. ЗАКОН ДЕЙСТВУЮЩИХ МАСС

3.1. Во сколько раз и как изменится концентрация электронов в беспримесном кремнии при его нагревании от 300 до 350 К?

3.2. Во сколько раз и как изменится концентрация дырок в собственном германии при охлаждении его от 300 до 200 К?

3.3. При температуре 300 К концентрация электронов в собственном полупроводнике составляла $2 \cdot 10^{14}$ $см^{-3}$, а при 350 К увеличилась до $6{,}4 \cdot 10^{15}$ $см^{-3}$. Определить ширину запрещенной зоны материала без учета температурной зависимости эффективной плотности состояний в разрешенных зонах.

3.4. В германии *n*-типа концентрация донорной примеси составляет $10^{18}$ $см^{-3}$. Считая, что все атомы примеси ионизированы, найти концентрацию дырок при температуре 300 К.

3.5. Кристалл кремния содержит в качестве легирующей примеси $10^{-4}$ атомных процента мышьяка. Затем он равномерно легируется примесью фосфора с концентрацией $3 \cdot 10^{16}$ $см^{-3}$ и после этого равномерно легируется примесью бора с концентрацией $10^{18}$ $см^{-3}$. Последующий отжиг полностью активирует все примеси. Определить: а) какой тип проводимости будет иметь образец кремния; б) чему будет равна результирующая концентрация основных и неосновных носителей заряда. Концентрация атомов кремния составляет $5 \cdot 10^{22}$ $см^{-3}$.

3.6. Определить концентрацию электронов и дырок в германии при 300 К для двух случаев: 1) полупроводник легирован примесью мышьяка с концентрацией $10^{17}$ $см^{-3}$; 2) полупроводник легирован примесями мышьяка с концентрацией $10^{18}$ $см^{-3}$ и индия с концентрацией $3{,}5 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$ . Считать, что все атомы примесей ионизированы.

3.7. В кремнии содержится $2 \cdot 10^{-5}$ атомных процента примеси фосфора. Считая, что концентрация электронов определяется полностью ионизированными атомами донорной примеси, определить концентрацию электронов и дырок, а также удельное сопротивление полупроводника. Концентрация атомов в кристалле составляет $5 \cdot 10^{22}$ $см^{-3}$.

3.8. Вычислить удельное сопротивление германия *p*-типа с концентрацией дырок, равной $3 \cdot 10^{20}$ $м^{-3}$. Сравнить полученное значение с удельным сопротивлением германия *n*-типа при той же концентрации электронов.

3.9. Найти удельное сопротивление собственного кремния при температуре 300 К. Вычислить удельное сопротивление того же полупроводника после введения донорной примеси с концентрацией $3{,}5 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$.

3.10. Вычислить концентрацию дырок в германии, содержащем $10^{15}$ см$^{-3}$ примеси фосфора и $5 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$ примеси бора при комнатной температуре.

3.11. Образец полупроводника *n*-типа находится в состоянии термодинамического равновесия при комнатной температуре и характеризуется следующими параметрами: удельное сопротивление равно 5 Ом·см; подвижность электронов 1600 см$^2$/В·с; подвижность дырок 600 см$^2$/В·с; собственная концентрация носителей заряда $1{,}4 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$; эффективная плотность состояний в зоне проводимости $10^{19}$ см$^{-3}$. Определить: а) концентрации электронов и дырок; б) положение уровня Ферми; в) вероятность событий, состоящих в том, что донорный уровень занят и свободен, если $E_c - E_D = 0{,}05$ эВ.

3.12. Определить вероятность занятости уровня с энергией на 0,063 эВ превосходящей уровень Ферми в беспримесном кремнии при температуре 1000 К.

3.13. Подсчитать число электронов на единицу объема в зоне проводимости собственного кремния при температуре 300 К.

## 4. ЗАВИСИМОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА И ПОЛОЖЕНИЯ УРОВНЯ ФЕРМИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

4.1. Рассчитать положение уровня Ферми в германии электронного типа проводимости при температуре 300 К и концентрации донорной примеси: а) $10^{15}$ ; б)$10^{17}$ см$^{-3}$. Изобразить зонные диаграммы.

4.2. Найти положение уровня Ферми в кремнии при температуре 500 К и следующих концентрациях примесей: 1) $10^{23}$ атомов бора в 1 м$^3$; 2) $10^{22}$ атомов сурьмы в 1 м$^3$. Энергии ионизации примесей: $\Delta E_{In}$=0,041 эВ; $\Delta E_{Sb}$=0,039 эВ. Изобразить зонные диаграммы.

4.3. Найти равновесную концентрацию электронов и дырок, а также положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны и дна зоны проводимости в кремнии , содержащем $8\cdot10^{16}$ см$^{-3}$ атомов мышьяка и $2\cdot10^{16}$ см$^{-3}$ атомов бора. Энергии ионизации примесей: $\Delta E_{As}$=0,054 эВ; $\Delta E_{B}$=0,045 эВ. Изобразить зонную диаграмму полупроводника в масштабе.

4.4. Найти концентрации электронов и дырок , а также положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны в германии, находящемся в состоянии термодинамического равновесия, при следующих значениях температуры: 0, 100, 200, 300 и 400 К. Кристалл легирован акцепторными атомами с концентрацией $10^{15}$ см$^{-3}$. Считать, что при Т=100 К ионизированы 50 % ,а при более высоких температурах – 100 % примесных атомов. Изобразить зонные диаграммы.

4.5. Определить энергию ионизации донорной примеси в кремнии с удельным сопротивлением, равным 5000 Ом·см, полагая, что при температуре $T$=200 К ионизировано 60 % донорной примеси.

4.6. Концентрация атомов в кристалле германия равна $4{,}4\cdot10^{28}$ см$^{-3}$,
$E_C$-$E_D$=0,01 эВ. Определить положение уровня Ферми при температуре 300 К, если на $10^6$ атомов германия приходится 1 атом примеси. Изобразить зонную диаграмму в масштабе.

4.7. Найти положение уровня Ферми в германии, содержащем $10^{23}$ атомов мышьяка и $5\cdot10^{22}$ атомов галлия в 1 м$^3$ при температурах 10 и 300 К. Донорный уровень мышьяка расположен на 0,013 эВ ниже дна зоны проводимости. Изобразить зонные диаграммы полупроводника при указанных температурах.

4.8. В кристалле кремния на каждые $10^8$ атомов полупроводника приходится 1 атом акцепторной примеси. Найти положение уровня Ферми относительно потолка валентной зоны при

комнатной температуре. Решить задачу при условии, что на каждые $10^3$ атомов кремния приходится 1 атом акцепторной примеси. При какой концентрации акцепторной примеси уровень Ферми совпадает с потолком валентной зоны?

4.9. Определить положение уровня Ферми при комнатной температуре для полупроводникового соединения *InSb*, если ширина его запрещенной зоны составляет 0,4 эВ, а отношение эффективной массы дырки к эффективной массе электрона равно 2. Изобразить зонную диаграмму собственного полупроводника.

4.10. Образец кремния электронного типа проводимости имеет при комнатной температуре удельное сопротивление, равное 5 Ом·см. Найти для состояния термодинамического равновесия концентрацию дырок при температурах 27, 100 и 500 ºС.

4.11. Кристалл кремния электронного типа проводимости равномерно легирован примесью мышьяка с концентрацией $10^{16}$ см$^{-3}$, а кристалл кремния дырочного типа проводимости равномерно легирован примесью бора с концентрацией $10^{15}$ см$^{-3}$. Для каждого образца полупроводникового материала определить:

а) равновесную концентрацию неосновных носителей заряда при 300 К, предполагая, что все примеси полностью ионизированы;

б) положение уровня Ферми относительно края валентной зоны в каждом материале при 300 К; положение уровня Ферми при условии, что оба типа примесей имеются в одном образце;

в) температуру, при которой ионизирована половина примесных атомов;

г) температуру, при которой собственная концентрация превышает примесную в 10 раз. Для задания б) изобразить зонные диаграммы.

4.12. Рассчитать значения максимума уровня Ферми в запрещенной зоне полупроводника и соответствующей ему температуры при концентрации донорной примеси, равной $10^{16}$ см$^{-3}$;энергии ионизации доноров, равной 0,02 эВ и $m_n^* = 0{,}3m_0$.

4.13. Определить критическую концентрацию донорной примеси, выше которой наступает вырождение полупроводника при $m_n^* = 0{,}2m_0$; $\Delta E_D$=0.01 эВ.

4.14. Найти концентрации электронов и дырок, а также положение уровня Ферми для германия, содержащего $5 \cdot 10^{22}$ м$^{-3}$ атомов мышьяка при 40 и 500 К. Энергия ионизации примеси составляет 0,013 эВ. Изобразить зонные диаграммы.

4.15. При температуре 300 К удельное сопротивление беспримесного полупроводника составляло 10 Ом·м, а при 400 К оказалось равным 0,3 Ом·м. Найти ширину запрещенной зоны материала.

4.16. Во сколько раз и как изменится концентрация дырок в собственном германии при его охлаждении от 300 до 200 К?

4.17. При комнатной температуре концентрация дырок в полупроводнике равна $10^{14}$ см$^{-3}$, а концентрация электронов - $5 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$. Во сколько раз и как изменится удельное сопротивление кристалла, если провести дополнительное легирование акцепторной примесью с концентрацией $5 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$? Считать примеси полностью ионизированными, подвижности электронов и дырок – равными. Изобразить зонные диаграммы полупроводника до и после дополнительного легирования.

4.18. Рассчитать положение уровня Ферми в собственном кремнии при 700 К, если эффективная масса электрона в 5 раз больше эффективной массы дырки. Изобразить зонную диаграмму.

4.19. Какова ширина запрещенной зоны беспримесного полупроводника, если после нагревания от 100 до 400 К его электропроводность увеличилась в 820 раз?

4.20. В вырожденном полупроводнике концентрация свободных электронов равна $8 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$. Найти положение уровня Ферми, приняв $m_n^* = 0.33 m_0$. Изобразить зонную диаграмму.

4.21. Найти температуру, при которой уровень Ферми занимает максимальное положение в полупроводнике электронного типа проводимости с концентрацией донорной примеси $10^{19}$ см$^{-3}$, если эффективная масса электрона составляет половину массы покоя.

4.22. Найти число атомов пятивалентной примеси на единицу объема кремния, необходимое для сдвига уровня Ферми к дну зоны проводимости при комнатной температуре.

4.23. При какой концентрации свободных электронов в кристалле температура вырождения электронного газа в нем равна 0 ºС?

## 5. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

5.1. Вычислить ширину запрещенной зоны теллура, если после нагревания от 300 до 400 К его электропроводность увеличилась в 5,2 раза.

5.2. Образец кремния находится при комнатной температуре. Вычислить: а) удельное сопротивление собственного полупроводника; б) удельное сопротивление примесного полупроводника, если концентрация донорных атомов составляет $3{,}5 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$.

5.3. К пластине длиной 5 см, изготовленной из чистого кремния, приложено напряжение 50 В. За какое время электрон пройдет через весь образец (осуществится перенос заряда, эквивалентного одному электрону)?

5.4. Вычислить скорость дрейфа электронов и дырок в германии при комнатной температуре в поле напряженностью 1000 В/м.

5.5. Кристалл кремния электронного типа проводимости при комнатной температуре имеет удельное сопротивление 10 Ом·см. Найти скорость дрейфа дырок и электронов при плотности тока 1 мА/см$^2$.

5.6. Вычислить отношение дрейфовых токов электронов и дырок при комнатной температуре: а) для собственного германия; б) собственного кремния; в) кремния n-типа с удельным сопротивлением 5 Ом·см; в) кремния *p*-типа с удельным сопротивлением 5 Ом·см.

5.7. Полупроводниковый кристалл прямоугольной формы размерами 0,2х0.2х0.05 см содержит $10^{21}$ свободных электронов в 1 м$^3$

при комнатной температуре. К двум противоположным узким граням приложено напряжение 20 В. Вычислить величину тока, полагая подвижность носителей заряда, равной 0,03 $м^2/В·с$.

5.8. В образце полупроводника действуют два механизма рассеяния носителей заряда. Если бы действовал только первый механизм, то подвижность была бы равна 800 $см^2/В·с$. Если бы действовал только второй механизм, то подвижность была бы равна 200 $см^2/В·с$. Какова подвижность носителей заряда с учетом обоих механизмов рассеяния?

5.9. Беспримесный кремний при комнатной температуре имеет удельное сопротивление, равное 2000 Ом·м. Рассчитать концентрации носителей заряда. Найти, какую часть электропроводности составляет электронная.

5.10. Найти минимально возможную удельную электропроводность кремния при комнатной температуре. Рассчитать концентрации электронов и дырок для найденного значения удельной электропроводности.

5.11. Вычислить отношение полного тока электронной проводимости к полному току дырочной проводимости: а) в чистом германии; б) в германии *p*-типа с удельным сопротивлением 0,005 Ом·м.

5.12. Удельное сопротивление образца кремния электронного типа проводимости составляет 7500 Ом·см при температуре 50 К, а концентрация донорных атомов равна $5·10^{15}$ $см^{-3}$. Рассчитать энергию ионизации донорной примеси, если известно, что указанная температура соответствует участку примесной проводимости полупроводника.

5.13. Представим себе атомы в кристалле шариками, связанными между собой пружинами. Пусть атом меди на пружине, обладающей коэффициентом жесткости, эквивалентным частоте колебаний $10^{13}$ $с^{-1}$, находится в положении максимального удаления от связанного с ним другого атома меди. Найти значение «нулевой» амплитуды колебаний. Из условия задачи следует, что атомы в реальном кристалле никогда не находятся точно в узлах решетки даже

при нулевой температуре, а участвуют в случайных движениях, источником которых является действие принципа неопределенности.

5.14. Исходя из условия предыдущей задачи, найти соотношение между коэффициентом жесткости пружины и массой атома, такое, чтобы амплитуда «нулевых колебаний» была по порядку величины равна параметру кристаллической решетки 4Å. Твердое тело такого рода не сможет сохранять свою решеточную структуру и даже при температуре абсолютного нуля останется в жидком состоянии. К числу таких веществ, по-видимому относится гелий. Атомы гелия обладают малой массой, сила химической связи между атомами слаба; даже при температурах, близких к абсолютному нулю, амплитуда «нулевых колебаний» близка по величине к расстоянию между атомами.

5.15. Для образца твердого тела длиной $L$ фонон с наибольшей длиной волны $\lambda_{макс}$ определяется соотношением $\lambda_{макс} = 2L$. У фонона с самой короткой длиной волны ее значение определяется как $\lambda_{мин} = c/\nu$, где $c$ – скорость звука в твердом теле, $\nu$ – эйнштейновская частота колебаний кристаллической решетки. Рассчитать приближенное значение минимальной длины волны для типичного металла. Сравнить найденное значение со средним межатомным расстоянием в твердом теле, приблизительно равным 3 Å.

5.16. Оценить максимальные значения энергии и импульса фонона в образце меди с параметром элементарной ячейки $a$ = 30 нм, при скорости распространения колебаний кристаллической решетки, равной 4 км/с.

5.17. Определить усредненную скорость звука в кристалле, характеристическая температура которого равна 300 К. Межатомное расстояние в кристалле равно 25 нм.

5.18. Определить приближенно скорость звука в кристалле алмаза, зная, что дебаевская температура алмаза равна 1860 К, а среднее расстояние между атомами составляет 1,54 Å.

5.19. Показать, что при высоких температурах квантовое выражение для средней энергии гармонического осциллятора переходит в классическое.

5.20. Найти и выразить в электрон-вольтах энергию фонона, соответствующую максимальной частоте Дебая, если характеристическая температура равна 250 К.

5.21. Определить квазиимпульс фонона, соответствующего частоте $\omega=0{,}1\omega_{max}$, где $\omega_{max}$ – максимальная частота колебаний кристаллической решетки. Усредненная скорость звука в кристалле равна 1380 м/с, температура Дебая соответствует 100 К. Дисперсией звуковых волн в кристалле пренебречь.

5.22. Длина волны фонона, соответствующего $\omega=0{,}01\omega_{max}$, равна 52 нм. Пренебрегая дисперсией звуковых волн, определить характеристическую температуру Дебая, если усредненная скорость звука в кристалле равна 4,8 км/с.

5.23. Вычислить усредненную скорость фононов (скорость звука) в серебре. Известны: модуль продольной упругости (модуль Юнга) $E$=74 ГПа; модуль поперечной упругости (модуль сдвига) $G$= 27 ГПа; плотность серебра $\rho=10{,}5$ г/см$^3$.

5.24. Характеристическая температура золота равна 170 К, плотность – 19,3 г/см$^3$, параметр кристаллической решетки – 30 нм. Определить модуль продольной упругости кристалла (модуль Юнга).

5.25. Среднее время жизни электрона в образце германия электронного типа проводимости составляет при комнатной температуре $10^{-12}$ с. Определить, насколько увеличится кинетическая энергия электрона за время свободного пролета в электрическом поле напряженностью $10^5$ В/м. Какова напряженность электрического поля, необходимая для того, чтобы за время свободного пролета электрона в этом поле сообщить ему кинетическую энергию, достаточную, чтобы «выбить» электрон: а) с донорного уровня; б) из валентной зоны и «перебросить» его в зону проводимости. Для простоты принять эффективную массу электрона равной массе покоя.

5.26. Определить максимальную частоту собственных колебаний атомов в кристалле золота.

5.27. Оценить скорость распространения акустических колебаний в кристаллической решетке алюминия, характеристическая температура которого составляет 396 К.

5.28. Классическая теория дает значение удельной теплоемкости, равное 6 кал/моль·К. Используя это значение рассчитать тепловую энергию одного моля металла при 300 К.

5.29. Дебаевская температура для золота составляет примерно 170 К. Оценить значение тепловой энергии одного моля золота при 300 К и сравнить с результатом, полученным в предыдущей задаче. Какова величина ошибки при расчете по классической теории?

5.30. Определить характеристическую температуру кристалла, теплоемкость которого составляет 217 Дж/кмоль·град при температуре 14 К.

5.31. Удельные теплоемкости свинца и алюминия при постоянном объеме и температуре, равной 20 ºС, составляют 126 и 896 Дж/кг·град соответственно. Выполняется ли для указанных твердых тел закон Дюлонга-Пти? Вычислить для каждого из металлов молярные теплоемкости и сравнить их со значениями, получаемыми по закону Дюлонга-Пти.

5.32. Найти частоту тепловых колебаний атомов серебра по модели Эйнштейна, если характеристическая температура кристалла составляет 165 К.

5.33. Определить относительную погрешность, которая будет допущена, если при вычислении молярной теплоемкости кристалла вместо значения, даваемого моделью Эйнштейна при характеристической температуре, воспользоваться значением, получаемым по закону Дюлонга-Пти.

5.34. Молярная теплоемкость кристалла с одномерной решеткой выражается формулой

$$C_M = 3R\left(2\frac{T}{T_D}\int_0^{T_D/T}\frac{x\,dx}{e^x-1}-\frac{T_D/T}{e^{T_D/T^{T/}}-1}\right).$$

Найти предельное выражение для $C_M$ при низких температурах ($T<<T_D$). Известно значение интеграла

$$\int_0^{\infty} \frac{x}{e^x - 1} dx = \frac{\pi}{6}.$$

5.35. Молярная теплоемкость кристалла с двумерной решеткой выражается формулой:

$$C_M = 3R\left(6\left(\frac{T}{T_D}\right)^2 \int_0^{T_D/T} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} - \frac{2\left(T_D/T\right)}{e^{T_D/T} - 1}\right).$$

Найти предельное выражение молярной теплоемкости кристалла при низких температурах ($T << T_D$). Известно значение интеграла

$$\int_0^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = 2{,}405.$$

5.36. Определить относительную погрешность, которая будет допущена при вычислении теплоемкости кристалла, если вместо значения, вычисленного в соответствии с моделью Дебая при характеристической температуре, воспользоваться значением, полученным по закону Дюлонга-Пти.

5.37. Теплоемкость серебра при 10 К составляет 199 Дж/моль·град. Определить характеристическую температуру.

5.38. Найти максимальную частоту собственных колебаний атомов в кристалле железа, если при температуре 20 К его удельная теплоемкость равна 2,7 мДж/г·град.

5.39. Вычислить электронную теплоемкость $C_{эл}$ для меди при 2 и 1000 К. Полученные значения сравнить с теплоемкостью кристаллической решетки при тех же температурах. Характеристическая температура меди равна 316 К.

Примечание. Электронная теплоемкость металла $C_{эл} = \gamma T$, где $\gamma$ –коэффициент пропорциональности. Для меди $\gamma$ = 7,28 Дж/моль·град$^2$.

5.40. Вычислить максимальную частоту колебаний кристаллической решетки твердого тела, если известно, что при температуре 20 К его молярная теплоемкость равна 1,7 Дж/моль·град.

5.41.Рассматривая кристалл как сосуд, содержащий фононный газ, и используя приближения теории теплоемкости Дебая, показать, что для температур, значительно превышающих температуру Дебая, число акустических фононов в единице объема составляет $9NT/2T_D$ (где $N$ – число атомов решетки в единице объема, $T_D$ – температура Дебая).

5.42. Для твердых тел, в которых рассеяние на акустических фононах является основным механизмом рассеяния, показать, что при температурах, превышающих температуру Дебая, подвижность электронов (а значит, для постоянной концентрации носителей и электропроводность) должна быть пропорциональна $T^{-1}$ в металлах и $T^{-3/2}$ в полупроводниках.

5.43. Полагая, что рассеяние происходит на акустических колебаниях кристаллической решетки, найти величину термо-э.д.с. в германии, содержащем $6\cdot10^{15}$ см$^{-3}$ мелких акцепторов, при температуре 200 К. Энергия ионизации примеси составляет 0,01 эВ.

5.44. Коэффициент термо-э.д.с. пары хромель (90 % *Ni* + 10 % *Cr*) – копель (44 % *Ni* + 56 % *Cu*) равен 80 мкВ/К. Определить ЭДС термопары при разности температур горячего и холодного спаев, равной 400 К.

5.45. Коэффициент термо-э.д.с. пары железо- золото составляет 62 мкВ/К. Определить отношение концентраций свободных электронов в этих металлах.

5.46. Концентрация электронов проводимости в меди в 1,7 выше, чем в константане (60 % *Cu* + 40 % *Ni* ). Определить коэффициент термо-э.д.с. пары медь-константан.

5.47. Оценить величину «фононной» термо-э.д.с.ЭДС в германии *n*-типа при температуре 20 К, полагая, что подвижность электронов в основном определяется рассеянием на акустических колебаниях кристаллической решетки и равна $4\cdot10^5$ см$^2$/В·с, а

рассеяние фононов происходит на стенках образца. Поперечный размер образца составляет 1 мм, а скорость звука $5 \cdot 10^5$ см/с.

5.48. Образец германия электронного типа проводимости толщиной 1 мм с концентрацией электронов $10^{20}$ $м^{-3}$ помещен в магнитное поле с индукцией 0,1 Тл. Определить величину э.д.с. Холла при токе 1 мА, протекающем через образец.

5.49. Удельная электропроводность и коэффициент Холла арсенида индия соответственно равны $4 \cdot 10^2$ Ом $^{-1}$·м $^{-1}$ и $10^{-2}$ $м^3$/Кл. Считая, что проводимость осуществляется зарядами одного знака, определить их концентрацию и подвижность.

5.50. Удельное сопротивление монокристалла кремния дырочного типа проводимости при комнатной температуре составляет $9 \cdot 10^{-4}$ Ом·м, подвижность дырок равна 0,04 $м^2$/В·с. Найти значение коэффициента Холла.

5.51. К образцу полупроводникового материала приложено магнитное поле с индукцией 0,5 Тл. Коэффициент Холла и удельное сопротивление полупроводника соответственно равны – $3{,}66 \cdot 10^{-4}$ $м^3$/Кл и $8{,}93 \cdot 10^{-3}$ Ом·м. Найти угол Холла.

5.52. Вычислить коэффициент Холла для кристалла германия, содержащего $10^{23}$ $м^{-3}$ атомов индия и $10^{24}$ $м^{-3}$ атомов сурьмы при комнатной температуре.

5.53. Имеется образец германия с поперечным сечением 0,1 х 0,2 см и концентрацией легирующей примеси, равной $10^{17}$ $см^{-3}$. Вдоль образца протекает ток 0,6 А. Перпендикулярно к направлению тока действует магнитное поле с индукцией 0,5 Тл. Вычислить напряжение Холла между контактами к узким сторонам боковой поверхности образца.

5.54. В эксперименте по изучению эффекта Холла кремниевый образец имеет длину 1,0 см, толщину 0,1 см, расстояние между холловскими электродами 0,2 см. Вдоль образца приложено напряжение 0,245 В, значение протекающего тока – 5 мА, индукция магнитного поля – 1 Тл. Величина напряжения Холла оказалась равной 2 мВ. Полагая, что рассеяние носителей заряда осуществляется тепловыми колебаниями кристаллической решетки, определить: а) тип

проводимости полупроводника, из которого выполнен образец; б) концентрацию основных носителей заряда; в) холловскую подвижность носителей заряда; г) подвижность носителей, связанную с протеканием основного тока; д) коэффициент диффузии носителей заряда.

5.55. В образце германия, помещенном во взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля, эффект Холла не наблюдается. Какую часть общей электропроводности составляет дырочная?

5.56.Образец кремния электронного типа проводимости при 100 К имеет коэффициент Холла, равный $0{,}28 \cdot 10^{-2}$ $м^3/Кл$. Энергия ионизации донорной примеси составляет 0,04 эВ. Определить концентрации донорной примеси, электронов и дырок, пренебрегая вкладом собственной проводимости.

5.57. Вычислить относительное изменение сопротивления кристалла германия, содержащего $10^{23}$ атомов мышьяка и $5 \cdot 10^{22}$ атомов галлия, при помещении в магнитное поле с индукцией 0,5 Тл.

5.58. При изучении эффекта Холла в магнитном поле с индукцией, равной 0,5 Тл, поперечная напряженность электрического поля в беспримесном германии оказалась в 10 раз меньше продольной напряженности электрического поля. Найти разность подвижностей электронов и дырок в исследованном полупроводнике.

5.59. В образце полупроводникового материала, у которого подвижность свободных электронов в 2 раза больше подвижности дырок, эффект Холла не наблюдается. Найти отношение концентраций свободных электронов и дырок в таком полупроводнике.

5.60. Найти концентрацию основных носителей заряда в германии дырочного типа проводимости при 300 К, если известно, что при этой температуре наступает инверсия знака коэффициента Холла.

5.61. Вычислить коэффициент Холла для кремния, содержащего $10^{22}$ $м^{-3}$ примеси мышьяка при 20 и 500 К. Значение энергии ионизации примеси составляет 0,04 эВ. Температурной зависимостью подвижности свободных носителей заряда пренебречь.

5.62. Вычислить отношение продольной напряженности электрического поля к поперечной для пластины чистого кремния, помещенной в магнитное поле напряженностью $H = 8 \cdot 10^5$ А/м, полагая, что кремний является парамагнетиком.

5.63. Определить при комнатной температуре коэффициент Холла в антимониде индия, содержащем акцепторы с концентрацией $5 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$, если отношение холловских подвижностей электронов и дырок к дрейфовым равно 1,18. Известно также, что подвижность электронов превышает подвижность дырок в 80 раз, магнитное поле является слабым.

5.64. При определенной температуре, превышающей температуру инверсии знака коэффициента Холла, этот параметр оказался равным $3{,}66 \cdot 10^{-4}$ м$^3$/Кл. Удельное сопротивление полупроводника составило $8{,}93 \cdot 10^{-3}$ Ом·м, индукция магнитного поля – 0,5 Тл. Полагая, что проводимость осуществляется носителями одного знака, найти их концентрацию и подвижность, а также угол Холла.

5.65. Вычислить коэффициент Холла для собственного кремния при температурах 20 и 200 К. Температурной зависимостью подвижности пренебречь.

## 6. НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

6.1. Найти, на какую величину и как изменится время релаксации основных носителей заряда в германии электронного типа проводимости после проведения дополнительного легирования образца примесью бора, в результате которого проводимость уменьшилась с $10^{-2}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ Ом$^{-1}$·м$^{-1}$.

6.2. Подвижности электронов и дырок в монокристалле кремния при комнатной температуре соответственно равны 0,16 и 0,04 м$^2$/В·с. Найти коэффициенты диффузии электронов и дырок.

6.3. Время жизни носителей заряда в полупроводниках сильно зависит от качества поверхности. При исследовании монокристалла германия электронного типа проводимости с необработанной поверхностью было найдено, что время жизни основных носителей

заряда составляет 78 мкс, а у образца, поверхность которого подверглась ионному травлению, - 340 мкс. Полагая, что подвижность электронов равна 0,36 $м^2/В·с$, найти диффузионную длину электрона при комнатной температуре в обоих образцах.

6.4. Найти подвижность дырок в полупроводнике электронного типа проводимости, если диффузионная длина дырки при комнатной температуре составляет 0,1 см, а время жизни равно 100 мкс.

6.5. Имеется однородная пластина монокристаллического кремния электронного типа проводимости при комнатной температуре с концентрацией донорной примеси, равной $2{,}25·10^{15}$ $см^{-3}$. Первоначально пластина находилась в состоянии термодинамического равновесия, затем подверглась действию потока монохроматического света, после чего состояние термодинамического равновесия восстановилось. Определить: а) равновесные концентрации электронов и дырок; б) неравновесные концентрации электронов и дырок для следующих значений концентрации избыточных носителей заряда: 1)$\Delta n_0=\Delta p_0$ = $10^{13}$ $см^{-3}$; 2) $\Delta n_0=\Delta p_0$ ==$10^{16}$ $см^{-3}$; в) какой уровень возбуждения (низкий или высокий) будет реализован в каждом случае.

6.6. В полупроводнике электронного типа проводимости скорость рекомбинации дырок равна $10^{18}см^{-3}·с^{-1}$, а избыточная концентрация дырок составляет $10^{13}$ $см^{-3}$. Найти среднее время жизни неосновных неравновесных носителей заряда.

6.7. Образец монокристаллического германия, находящийся при комнатной температуре, подвергается непрерывному действию фотонов. Это внешнее возбуждение ионизирует атомы примеси, создавая концентрацию примесных ионов $N_D$ = $10^{17}$ $см^{-3}$ и обусловливает постоянную генерацию $10^{18}$ электронно-дырочных пар в секунду. Подсчитать избыточную концентрацию носителей, а также относительное изменение концентрации носителей заряда вследствие действия фотонов, если $\tau_n = \tau_p = 2$ мс.

Пусть время действия потока фотонов прекращается в момент времени $t=t_0$. Как изменится во времени избыточная концентрация дырок при $t>t_0$? За какое время избыточная концентрация снизится до 5 % начального значения?

6.8. В плоскость $x$= 0 кремниевого образца дырочного типа проводимости при комнатной температуре постоянно инжектируются электроны, время жизни которых составляет 10 мкс. Определить расстояние, на котором концентрация неосновных неравновесных носителей заряда уменьшится на порядок.

6.9. В кристалл германия электронного типа проводимости с концентрацией донорной примеси $10^{15}$ см$^{-3}$ при $t$=0 инжектированы дырки с концентрацией $10^{17}$ см$^{-3}$. Полагая, что все доноры ионизированы, а время жизни дырок постоянно и равно 100 мкс, рассчитать время $t_1$, по истечении которого проводимость полупроводникового кристалла уменьшится до значения 3,51 Ом$^{-1}$·см$^{-1}$. Температура образца постоянна и равна 300 К.

6.10. Проводимость беспримесного полупроводника в исходном состоянии $\sigma_0$ = 2,0 Ом$^{-1}$·м$^{-1}$, а в момент облучения источником генерации носителей составляет $\sigma_1$=2,4 Ом$^{-1}$·м$^{-1}$. Спустя $t_2$ =10 мкс после выключения источника генерации, проводимость образца упала до $\sigma_2$ = 2,3 Ом$^{-1}$·м$^{-1}$. Найти среднее время жизни избыточных носителей заряда, если температура равна 300 К и образец при облучении не нагревается.

6.11. Удельное сопротивление беспримесного полупроводникового монокристалла при комнатной температуре составляет 50 Ом·см. После включения источника электромагнитного излучения оно стало равным 40 Ом·см, а спустя 8 мс после выключения источника электромагнитного излучения удельное сопротивление оказалось равным 45 Ом·см. Найти среднее время жизни свободных носителей заряда.

6.12. В момент времени $t_0$ в полупроводник было введено небольшое количество избыточных дырок. Найти концентрацию дырок, которая осталась несвязанной к моменту времени $t_1$.

6.13. Найти исходную концентрацию избыточных носителей заряда в полупроводнике, если после прекращения возбуждения в момент времени $t_0$ = 0 за любой интервал времени $\Delta t$ = $10^{-3}$ с концентрация избыточных носителей заряда уменьшается на два порядка и в момент времени $t_1$ = 1.1·$10^{-4}$ с составляет $10^{16}$ см$^{-3}$.

6.14. К моменту прекращения возбуждения концентрация избыточных электронов в германии дырочного типа проводимости составляла $10^{19}$ см$^{-3}$ при комнатной температуре. Спустя время, равное 1 мкс, концентрация избыточных носителей упала до $10^{14}$ см$^{-3}$. Исходя из приведенных данных, вычислить сечение захвата электронов.

6.15. Найти концентрацию ловушек в собственном полупроводнике при комнатной температуре, если сечения захвата электронов и дырок равны и составляют $10^{-16}$ см$^{-2}$, время жизни избыточных носителей заряда равно 30 мкс. Считать, что уровень возбуждения невелик, а рекомбинация протекает через центры, локализованные посередине запрещенной зоны.

6.16. В германии электронного типа проводимости с удельным сопротивлением, равным 5 Ом·см, при комнатной температуре концентрация ловушечных центров составляет $5 \cdot 10^{12}$ см$^{-3}$, а их энергетический уровень совпадает с серединой запрещенной зоны. Время жизни неосновных неравновесных носителей заряда составляет $10^4$ с. Найти сечение захвата ловушечных центров.

6.17. В момент времени $t_1 = 10^{-4}$ с после выключения равномерной по объему генерации электронно-дырочных пар неравновесная концентрация носителей заряда оказалась в 10 раз больше, чем в момент $t_2 = 10^{-3}$ с. Определить время жизни неравновесных носителей заряда, если уровень возбуждения невелик и рекомбинация идет через простые дефекты.

6.18. Определить закон изменения со временем концентрации избыточных носителей заряда в полупроводнике электронного типа проводимости, если после выключения источника генерации в момент времени $t = 0$ темп рекомбинации $R = a\,(np - n_i^2)$, где $a$ – постоянный коэффициент.

6.19. В германии электронного типа проводимости с концентрацией основных носителей заряда, равной $10^{15}$ см$^{-3}$, стационарным источником равномерно по всему объему генерируются электронно-дырочные пары носителей. При низком уровне возбуждения время жизни составляет 2 мкс, а при $\Delta n/n_0 = 0.1$ рекомбинация происходит с постоянной времени, равной 4,7 мкс. Считая, что рекомбинация происходит на простых центрах с $E_t = E_c$ –

0,20 эВ, определить отношение сечений захвата дырок и электронов при 300 К.

6.20. Вычислить положение квазиуровня Ферми относительно середины запрещенной зоны кремния с концентрацией донорных атомов $10^{15}$ $см^{-3}$ при температуре 350 К и концентрации избыточных дырок $5 \cdot 10^{13}$ $см^{-3}$. Изобразить зонную диаграмму.

6.21. Рассчитать положение квазиуровня Ферми и построить зонную диаграмму германия, содержащего $10^{16}$ $см^{-3}$ акцепторной примеси, если при температуре, равной 35 К, в монокристалл инжектированы избыточные электроны с концентрацией $3 \cdot 10^{11}$ $см^{-3}$. Энергия ионизации акцепторной примеси составляет 0,001 эВ.

6.22. Определить положение квазиуровней Ферми относительно середины запрещенной зоны в полупроводнике, легированном акцепторной примесью с концентрацией $10^{16}$ $см^{-3}$ при комнатной температуре. Известно, что скорость генерации неравновесных носителей заряда равна $10^{18}$ $см^{-3}$, время жизни электронов составляет 10 мкс, собственная концентрация носителей – $10^{10}$ $см^{-3}$.

## 7. ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

7.1. Известны значения длины волны фотона, соответствующие порогу фундаментального поглощения в полупроводниках: 3,00; 1,65; 1,05; 0,82 и 0,47 мкм. Определить, какие полупроводниковые материалы исследованы.

7.2. Ширина запрещенной зоны кремния равна примерно 1,2 эВ, а германия 0,75 эВ при температуре абсолютного нуля. Для каких длин волн эти кристаллы непрозрачны?

7.3. Чистые кристаллы галогенидов щелочных металлов прозрачны в видимой области спектра. Значения ширины запрещенной зоны для трех таких кристаллов приводятся ниже.

| Кристалл | *KCl* | *KBr* | *KI* |
|---|---|---|---|

Вычислить для каждого из кристаллов длину

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $\Delta E_0$,эВ | 7,6 | 6,5 | 5,6 | волны, начиная с которой кристалл становится непрозрачным. |

7.4. Какова частота электромагнитного излучения, необходимого:
а) для перевода электрона в атоме водорода из основного в первое возбужденное состояние; б) полной ионизации атома? К какой области спектра относится это электромагнитное излучение?

7.5. Вычислить относительное изменение проводимости полупроводника с концентрацией основных носителей заряда (электронов), равной $10^{14}$ см$^{-3}$, при стационарном облучении электромагнитным излучением с интенсивностью

$5 \cdot 10^{15}$ квантов на 1 см$^2$ поверхности в секунду. Коэффициент поглощения $\alpha$ равен 100 см$^{-1}$, толщина образца мала по сравнению с $\alpha^{-1}$, рекомбинация происходит на простых дефектах с постоянной времени $\tau = 200$ мкс.

7.6. Из двух полупроводниковых материалов, ширина запрещенной зоны одного из которых равна 1,5 эВ, а другого – 1,6 эВ в едином монокристалле создан *p*-*n*-гетеропереход. Излучение падает на гетеропереход со стороны полупроводника с большей шириной запрещенной зоны. Найти спектральную полосу чувствительности такого фотоприемника.

7.7. При отражении света с длиной волны $\lambda = 100$ мкм полупроводниковым образцом большой толщины коэффициент отражения R = = 0,36. Коэффициент пропускания пленки из того же материала толщиной 1 мм равен $T = 0{,}17$. Найти коэффициент поглощения $\alpha$.

7.8. Найти величины квазиволновых векторов электрона и дырки, генерируемых при поглощении кванта света в прямозонном полупроводнике с параболическими изотропными законами дисперсии. Принять ширину запрещенной зоны, равной 0,3 эВ,

энергию кванта – 0,31 эВ, показатель преломления $n$ = 4, эффективные массы $m_n^* = m_p^*$.

## 8. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

8.1. Молекула кислорода обладает магнитным моментом, равным 2,8 магнетона бора. Вычислить: а) магнитную восприимчивость 1 м$^3$ кислорода при комнатной температуре и давлении 140 атм (обычное давление в баллоне с газообразным кислородом); б) намагниченность 1 м$^3$ кислорода при указанных выше условиях в магнитном поле Земли.

8.2. Найти магнитный момент $\overline{M}$ и магнитную индукцию $\overline{B}$ для образца металлического ниобия, помещенного в поле напряженностью $10^6$ А/м. Как изменится величина магнитной индукции в присутствии ниобия по сравнению со значением магнитной индукции в вакууме при указанном значении напряженности магнитного поля, если магнитная восприимчивость ниобия составляет приблизительно $2{,}3 \cdot 10^{-6}$.

8.3. Решить предыдущую задачу для германия, у которого магнитная восприимчивость приблизительно равна $-10^{-6}$.

8.4. Вычислить значение магнитной индукции для германия, находящегося в магнитном поле напряженностью $10^5$ А/м.

8.5. Оценить намагниченность ферромагнетика при $T \to 0$ и при $T \to \theta$, где $\theta$ – температура Кюри-Вейсса.

8.6. Известно, что энергия обменного взаимодействия сильно убывает при увеличении расстояния между атомами. Оценить энергию обменного взаимодействия для железа, никеля, кобальта, гадолиния, если известно, что $\theta_{Fe} = 1043$; $\theta_{Ni} = 631$; $\theta_{Co} = 1400$; $\theta_{Gd} = 289$ К.

8.7. Оценить энергию взаимодействия двух магнитных диполей, удаленных друг от друга на расстояние порядка эффективного диаметра атомов ( $\approx$ 1Å ). Сравнить полученное значение с величиной обменной энергии. Какое из этих взаимодействий определяет природу ферромагнетизма твердых тел?

8.8. Сравнить имеющиеся в ферромагнетиках значения энергий обменного, магнитостатического и электростатического взаимодействий с величиной тепловой энергии при температурах $T_1$ = 1 К и $T_2$ = 300 К при расстоянии между взаимодействующими атомами порядка 1Å. Определить, какое из взаимодействий – электростатическое или магнитостатическое способствует установлению обменного взаимодействия.

8.9. Энергия доменных стенок в железе составляет около $10^{-3}$ Дж/м$^2$. Вычислить: а) общую площадь доменных стенок образца железа массой 0,5 кг; б) полную энергию всех доменных стенок. Для простоты расчетов считать, что в типичном образце размагниченного поликристаллического железа домены имеют форму параллелепипедов с размерами 0,1 х 0.01 х 0.01 см.

8.10. Найти намагниченность длинного тонкого стержня, изготовленного из технически чистого железа, длинная ось которого расположена вдоль оси земного магнитного поля, если относительная магнитная проницаемость материала составляет $5 \cdot 10^3$.

8.11. Показать, что магнитоупругая энергия замыкающих доменов имеет величину порядка 50 Дж/м$^3$.

8.12. Ферромагнитное железо обладает кубической объемно-центрированной решеткой с периодом идентичности 2,86 Å и намагниченностью $1{,}75 \cdot 10^6$ Гс. Вычислить магнитный момент, приходящийся на один атом железа, в магнетонах Бора.

8.13. Магнитный момент атома гадолиния составляет 7,95 магнетона Бора. Определить намагниченность насыщения кристалла гадолиния, если он обладает гранецентрированной кубической решеткой с периодом идентичности, равным 3,2 Å.

8.14. Средний магнитный момент атома ферромагнетика составляет 0,6 магнетона Бора, намагниченность насыщения $5{,}1 \cdot 10^5$ Гс. Вычислить период идентичности гранецентрированной кубической решетки.

8.15. Допуская, что железо является парамагнетиком в широкой области температур, оценить напряженность магнитного

поля, необходимую для создания при комнатной температуре спонтанной намагниченности, равной 0,12 Тл.

8.16. В опытах по изучению методом ЯМР магнитных свойств атомов $^{25}Mg$ в основном состоянии обнаружено резонансное поглощение энергии при индукции магнитного поля 0,54 Тл и частоте 1,4 МГц. Определить ядерный фактор Ланде.

8.17. Свободный протон находится в постоянном магнитном поле с индукцией 1 Тл. Определить частоту переменного магнитного поля, при которой происходит резонансное поглощение энергии внешнего поля протоном.

8.18. Методом магнитного резонанса определяют магнитный момент нейтрона. Резонансное поглощение энергии наблюдается при значении магнитной индукции постоянного поля 0,682 Тл и частоте переменного поля, равной 19,9 МГц. Вычислить ядерный фактор Ланде.

8.19. Вычислить величину магнитного поля, в котором резонансная частота для протона будет равна: а) 1 МГц; б) 100 МГц. Являются ли такие поля экспериментально осуществимыми?

8.20. Найти поле, при котором имеет место электронный резонанс на частоте $10^{11}$ Гц, полагая, что ядерный фактор Ланде равен 2.

## 9. КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

9.1. Два одновалентных металла приведены в контакт, т.е. по всей поверхности соприкосновения они отстоят друг от друга лишь на величину одного параметра кристаллической решетки, равного 2 Å. Контактная разность потенциалов составляет 1 В, площадь контакта 1 м$^2$, каждый из образцов металлов представляет собой куб с ребром 1 м. Чему равен поток зарядов из одного металла в другой? Найти процентное изменение концентрации электронов одного из кубов, обусловленное перетеканием зарядов в другой образец.

9.2. На поверхности кремния дырочного типа проводимости существует обедненный слой с пренебрежимо малой концентрацией носителей заряда. Найти толщину области объемного заряда при 300 К, если поверхностный потенциал равен 0,25 В, а концентрация мелких полностью ионизированных акцепторов в объеме составляет $10^{15}$ см$^{-3}$.

9.3. В условиях предыдущей задачи оценить напряженность поля на поверхности полупроводника.

9.4. На поверхности кремния электронного типа проводимости при комнатной температуре существует обедненный слой. При каком значении потенциала в приповерхностной области концентрация дырок сравняется с концентрацией электронов? Оценить толщину приповерхностного слоя, в котором $p(x) > n(x)$, если поверхностный потенциал равен 0,5 В, концентрация электронов в объеме $10^{15}$ см$^{-3}$, а подвижность электронов в 2,9 раза превышает подвижность дырок.

9.5. Найти поверхностный потенциал для собственного германия при комнатной температуре, если концентрация адсорбированной на его поверхности полностью ионизированной донорной примеси составляет $10^{9}$ см$^{-2}$.

9.6. Рассчитать необходимые параметры и изобразить зонную диаграмму равновесного состояния контакта Шоттки при комнатной температуре, если концентрация донорной примеси в кремнии равна $10^{16}$ см$^{-3}$, контактная разность потенциалов 0,6 В, площадь контакта 1 мм$^2$, емкость – 840 пФ.

9.7. Рассчитать необходимые параметры и построить зонные диаграммы диода с барьером Шоттки на основе кремния электронного типа проводимости при комнатной температуре в равновесном состоянии, а также при прямом смещении 1 В и обратном смещении 20 В при следующих параметрах: работа выхода электрона из металла составляет 1 эВ, концентрация донорной примеси - $10^{15}$ см$^{-3}$.

9.8. Рассчитать необходимые параметры и построить зонные диаграммы диода с барьером Шоттки на основе германия электронного типа проводимости при температуре 200 К в равновесном состоянии, а также при прямом смещении 0,5 В и

обратном смещении 10 В при следующих параметрах: работа выхода электрона из металла составляет 0,9 эВ, концентрация донорной примеси – $10^{13}$ см$^{-3}$.

9.9. Рассчитать и построить вольт-амперные характеристики диода с барьером Шоттки при комнатной температуре полагая, что контактная разность потенциалов составляет 0,6 В, концентрация донорной примеси – $10^{15}$ см$^{-3}$. Изменение прямого смещения на диоде – от 0 до 1 В через 0,2 В, обратного – от 0 до 50 В через 10 В.

9.10. Определить контактную разность потенциалов, возникающую в электронно-дырочном переходе при комнатной температуре и концентрациях основных носителей заряда в *n*- и *p*-областях соответственно $1{,}5\cdot10^{14}$ см$^{-3}$ и $3\cdot10^{16}$ см$^{-3}$. Изобразить зонную диаграмму.

9.11. Найти контактную разность потенциалов, возникающую при комнатной температуре в электронно-дырочном переходе, полученном в германии при концентрациях донорной и акцепторной примесей, равных $10^{15}$ см$^{-3}$. Изобразить зонную диаграмму.

9.12. Определить величину контактной разности потенциалов в электронно-дырочном переходе в германии при температуре 200 К и следующих концентрациях основных носителей заряда: $n_n = 10^{18}$ см$^{-3}$ , $p_p = = 10^{17}$ см$^{-3}$. Изобразить зонную диаграмму.

9.13. Как изменится величина контактной разности потенциалов в электронно-дырочном переходе, созданном в кремнии, при изменении температуры от 300 до 400 К, если концентрации основных носителей заряда в *n*- и *p*-областях равны соответственно $10^{12}$ и $10^{15}$ см$^{-3}$.

9.14. Выразить зависимость контактной разности потенциалов электронно-дырочного перехода от удельных сопротивлений электронной и дырочной областей.

9.15. Определить контактную разность потенциалов электронно-дырочного перехода в германии при комнатной температуре, если удельные сопротивления электронной и дырочной областей равны соответственно 0,01 и 1 Ом·см.

9.16. Контактная разность потенциалов электронно-дырочного перехода в германии при комнатной температуре равна 0,072 В. Концентрация основных носителей заряда в *n*-области составляет $10^{21}$ м$^{-3}$. Найти концентрацию неосновных носителей заряда в р-области.

9.17. Найти величину контактной разности потенциалов электронно-дырочного перехода в кремнии при комнатной температуре, зная удельные электропроводности электронной и дырочной областей $\sigma_n$ и $\sigma_p$.

9.18. Рассчитать равновесную ширину симметричного электронно-дырочного перехода в германии, если контактная разность потенциалов равна 0,43 В, а концентрация примесей $10^{17}$ см$^{-3}$.

9.19. Построить зонную диаграмму симметричного электронно-дырочного перехода в кремнии при комнатной температуре и концентрации примесей $10^{15}$ см$^{-3}$.

9.20. Построить зонную диаграмму электронно-дырочного перехода в германии при комнатной температуре, если концентрация донорной примеси составляет $10^{17}$ см$^{-3}$, акцепторной – $10^{15}$ см$^{-3}$.

9.21. Определить равновесную ширину электронно-дырочного перехода в германии при комнатной температуре, если контактная разность потенциалов равна 0,42 В, а удельные сопротивления электронной и дырочной областей соответственно равны 0,01 и 1 Ом·см.

9.22. Найти толщину области пространственного заряда в германиевом электронно-дырочном переходе при комнатной температуре и концентрациях электронов в *n*-области $n_n = 10^{21}$ м$^{-3}$, а в *p*-области $n_p = 5 \cdot 10^{15}$ м$^{-3}$.

9.23. Равновесная ширина несимметричного электронно-дырочного перехода в кремнии при комнатной температуре равна $7{,}65 \cdot 10^{-5}$ см, а контактная разность потенциалов 0,68 В. Определить концентрацию донорной примеси при условии, что *p*-область легирована значительно сильнее.

9.24. Несимметричный электронно-дырочный переход в кремнии имеет низкоомную *p*-область и относительно высокоомную *n*-область. Вычислить равновесную толщину области пространственного заряда, если контактная разность потенциалов составляет 0,75 В, а удельное сопротивление *n*-области равно 1 Ом·см.

9.25. Найти значения толщины области пространственного заряда симметричного электронно-дырочного перехода в кремнии при приложении электрического смещения: а) прямого $U_{пр}$ = 0,3 В; б) обратного $U_{обр}$ = -50 В при комнатной температуре. Концентрация примеси в каждой области составляет $10^{15}$ см$^{-3}$. Изобразить зонные диаграммы для равновесного состояния, а также после приложения прямого и обратного смещения.

9.26. Определить ширину области пространственного заряда электронно-дырочного перехода в германии при комнатной температуре и подаче обратного электрического смещения , равного -10 В, если удельное сопротивление электронной области $\rho_n$ = 0,01 Ом·см, а дырочной $\rho_p$ = 0.5 Ом·см. Считать примеси полностью ионизированными.

9.27. Какова ширина области пространственного заряда электронно-дырочного перехода в кремнии при комнатной температуре и обратном напряжении, равном -50 В, если равновесная ширина составляет $1{,}2\cdot10^{-4}$ см, а контактная разность потенциалов 0,58 В.

9.28. Ширина электронно-дырочного перехода в германии при комнатной температуре после приложения обратного смещения, равного -20 В, имеет величину $1{,}9\cdot10^{-4}$ см. Определить равновесную ширину перехода, если контактная разность потенциалов равна 0,4 В.

9.29. Рассчитать необходимые параметры и построить зонные диаграммы электронно-дырочного перехода в кремнии при комнатной температуре в равновесном состоянии, а также при прямом и обратном смещении для следующих условий: 1) концентрация примеси в обеих областях одинакова и равна $10^{15}$ см$^{-3}$; 2) $N_D = 1.5\cdot10^{14}$ см$^{-3}$, $N_A = 3\cdot10^{16}$ см$^{-3}$; 3) $N_D = 10^{18}$ см$^{-3}$, $N_A = 10^{17}$ см$^{-3}$, температура равна 150 К.

9.30. В несимметричном электронно-дырочном переходе в германии дебаевская длина экранирования в высокоомной области

составляет 0,1 мкм, а контактная разность потенциалов равна 0,5 В. Найти равновесную ширину электронно-дырочного перехода при комнатной температуре.

9.31. Найти отношение равновесной ширины несимметричного электронно-дырочного перехода в германии к дебаевской длине экранирования в его высокоомной области, если $\rho_p$ = 0.01 Ом·см, $\rho_n$ = 1 Ом·см, $T$ = 300 К.

9.32. В кремниевом электронно-дырочном переходе площадью $10^{-8}$ м$^{-2}$ при комнатной температуре концентрация акцепторной примеси в $p$-области равна $10^{15}$ см$^{-3}$, а донорной в $n$-области – $10^{14}$ см$^{-3}$, величина приложенного обратного смещения составляет -10 В .Определить: а) высоту потенциального барьера; б) координаты границ области пространственного заряда $p$-$n$-перехода; в) барьерную емкость. Построить зонную энергетическую диаграмму, найдя положение уровней Ферми в $n$- и $p$-областях.

9.33. Найти значения зарядной емкости , приходящейся на 1 см$^2$ поверхности симметричного электронно-дырочного перехода в кремнии, при прямом напряжении, равном 0,3 В, и обратном, равном -50 В, если температура комнатная, а концентрация доноров и акцепторов составляет $10^{15}$ см$^{-3}$.

9.34. Какие изменения претерпевает емкость симметричного электронно-дырочного перехода в германии при комнатной температуре при изменении напряжения от $U_{пр}$ = 0,1 В до $U_{обр}$ = -10 В, если концентрации донорной и акцепторной примесей равны $10^{17}$ см$^{-3}$, а контактная разность потенциалов – 0,4 В.

9.35. Какова величина барьерной емкости, приходящейся на 1 см$^2$ поверхности несимметричного электронно-дырочного перехода в германии при обратном смещении, равном -20 В, и комнатной температуре? Концентрация доноров в $n$-области значительно превышает концентрацию акцепторов в $p$-области, равную $10^{16}$ см$^{-3}$, контактная разность потенциалов составляет 0,43 В.

9.36. Определить диффузионную емкость электронно-дырочного перехода в кремнии площадью 0,01 см$^2$ при комнатной

температуре после приложения прямого смещения, равного 0,2 В, если известно, что равновесная ширина перехода составляет $7{,}6 \cdot 10^{-5}$ см, а контактная разность потенциалов 0,68 В.

9.37. Какова ширина области пространственного заряда электронно-дырочного перехода в кремнии площадью 0,5 $см^2$ при комнатной температуре, если известно, что его зарядная емкость равна 25,8 пФ.

9.38. При приложении к электронно-дырочному переходу в германии площадью 0,01 $см^2$ напряжения обратного смещения, равного –5 В, барьерная емкость достигает величины 46 пФ. Определить равновесную ширину перехода, если контактная разность потенциалов составляет 0,37 В.

9.39. Определить диффузионную емкость электронно-дырочного перехода в кремнии при комнатной температуре и значении прямого тока 10 мА. Время жизни неосновных носителей заряда в базе принять равным 50 мкс.

9.40. Найти значение диффузионной емкости электронно-дырочного перехода в кремнии при комнатной температуре, если ток насыщения равен 30 мкА, величина напряжения прямого смещения 0,2 В, а время жизни неосновных носителей заряда – 15 мкс.

9.41. Вычислить удельную емкость электронно-дырочного перехода, созданного в германиевом образце, при обратном смещении, равном -1 В. Контактная разность потенциалов составляет 0,35 В, равновесная ширина области пространственного заряда – 0,6 мкм.

9.42. Найти диффузионную емкость несимметричного электронно-дырочного перехода при комнатной температуре и токе 2 мА для случая, когда толщина базы значительно больше диффузионной длины, а время жизни неосновных носителей заряда в базе составляет 5 мкс.

9.43. Определить плотность тока насыщения германиевого симметричного электронно-дырочного перехода при комнатной температуре, если концентрации неосновных носителей заряда в обеих областях равны $10^{12}$ $см^{-3}$.

9.44. Определить плотность тока насыщения электронно-дырочного перехода в германии площадью 0,05 см$^2$ при комнатной температуре и следующих параметрах: $n_n = 10^{16}$ см$^{-3}$; $p_p = 5 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$; $L_n = 0.15$ см; $L_p = 0.1$ см.

9.45. Какова плотность тока насыщения электронно-дырочного перехода в кремнии при комнатной температуре, если $\rho_n$ = 50 Ом·см; $\rho_p$ = 10 Ом·см; $L_n = 0.05$ см; $L_p = 0.03$ см.

9.46. Найти ток насыщения для симметричного кремниевого электронно-дырочного перехода при комнатной температуре, если проводимости *n*- и *p*-областей равны 1 См·см$^{-1}$; диффузионные длины – 0,1 см; площадь *p*-*n*-перехода – 10 мм$^2$ ; удельное сопротивление собственного кремния - $2 \cdot 10^3$ Ом·м.

9.47. В полупроводнике создан резкий несимметричный электронно-дырочный переход. Удельные сопротивления *n*- и *p*-областей соответственно равны $\rho_n$ = 1 Ом·см; $\rho_p$ = 0,1 Ом·см; диффузионные длины неосновных носителей заряда для электронов и дырок составляют $L_n$ = 0,1 см, $L_p$ = 0.2 см. Найти отношение дырочного тока к электронному в центре электронно-дырочного перехода.

9.48. Найти плотность тока насыщения электронно-дырочного перехода в кремнии при комнатной температуре. Концентрация неосновных носителей заряда в обеих областях равна $10^6$ см$^{-3}$, диффузионная длина электронов составляет 0,04 см, а дырок – 0,02 см.

9.49. Обратный ток насыщения кремниевого электронно-дырочного перехода равен 0,5 мкА, а прямой ток при напряжении *U* и комнатной температуре составляет 10 мА. Найти напряжение *U* на *p*-*n*-переходе.

9.50. Обратный ток насыщения кремниевого диода при комнатной температуре составляет 0,1 мкА. Найти дифференциальное сопротивление диода и сопротивление постоянному току при внешнем напряжении 0,3 В, приложенном в прямом направлении.

9.51. Вычислить прямой ток через электронно-дырочный переход при напряжениях 0,3 и 0,4 В при комнатной температуре, если известно, что обратный ток насыщения составляет 0,1 мкА.

9.52. Найти обратный ток насыщения несимметричного кремниевого электронно-дырочного перехода площадью 0,1 $см^2$ при комнатной температуре, если удельное сопротивление базы *p*-типа составляет 1 Ом·см, а время жизни носителей в базе равно 5 мкс.

9.53. Определить среднюю напряженность электрического поля в резком симметричном электронно-дырочном переходе, полученном в кремнии, для случая его равновесного состояния. Концентрации примеси равны $10^{15}$ $см^{-3}$.

9.54. Найти максимальную напряженность электрического поля в германиевом электронно-дырочном переходе при внешнем напряжении 4 В, приложенном в обратном направлении, если известно, что концентрация примеси в базе составляет $10^{20}$ $м^{-3}$.

## ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ

| | |
|---|---|
| Постоянная Планка | $h = 6{,}623 \cdot 10^{-34}$ Дж·с |
| Постоянная Планка | $\hbar = h/2\pi = 1{,}054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с |
| Постоянная Больцмана | $k = 1{,}380 \cdot 10^{-23}$ Дж/град $= 8{,}63 \cdot 10^{-5}$ эВ/град |
| Тепловая энергия при $T = 300$ К | $kT = 0{,}0256$ эВ |
| Газовая постоянная | $R = 8{,}31$ Дж/моль·град |
| Скорость света | $c = 3 \cdot 10^{8}$ м/с |
| Число Авогадро | $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ молекул/моль |
| Масса покоя электрона | $m_0 = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг |
| Масса протона | $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг |
| Заряд электрона | $e = -1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Кл |
| Магнетон Бора | $\mu_B = 9{,}27 \cdot 10^{-24}$ А/м |
| Ядерный магнетон | $\mu_P = 5{,}05 \cdot 10^{-27}$ А/м |

## СВОЙСТВА КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ ПРИ 300 К

| Параметр | Кремний | Германий |
|---|---|---|
| Кристаллическая структура | Типа алмаза | Типа алмаза |
| Число атомов на элементарную ячейку | 8 | 8 |
| Атомный номер | 14 | 32 |
| Постоянная решетки *a,* нм | 0,543 | 0,566 |
| Ширина запрещенной зоны $\Delta E_{0,}$ эВ | 1,124 | 0,670 |
| Относительная диэлектрическая проницаемость ε | 11,7 | 16,0 |
| Собственная концентрация носителей $n_i$, см$^{-3}$ | $1{,}45\cdot10^{10}$ | $2{,}4\cdot10^{13}$ |
| Решеточная подвижность | | |
| электронов $\mu_n$, см$^2$/(В·с) | 1417 | 3900 |
| дырок $\mu_p$, см$^2$/(В·с) | 471 | 1900 |
| Эффективная плотность состояний, см$^{-3}$ | | |
| в зоне проводимости $N_c$ | $2.80\cdot10^{19}$ | $1.04\cdot10^{19}$ |
| в валентной зоне $N_v$ | $1.04\cdot10^{19}$ | $6.04\cdot10^{18}$ |
| Коэффициент диффузии | | |
| электронов $D_n$,см$^2$/с | 34,6 | 98,0 |
| дырок, $D_{p.}$, см$^2$/с | 12,3 | 47,0 |

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высшая школа, 1977. 448 с.

2. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 2000. 494 с.

3. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 630 с.

4.Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела: Пер. с англ. М.: Мир, 1969. 558 с.

5. Бонч-Бруевич В.Л., Звягин И.П., Карпенко И.В., Миронов А.Г.
Сборник задач по физике полупроводников. М.: Наука, 1987.144 с.

6.Задачи по физике твердого тела / Под ред. Г.Дж. Голдсмида. М.: Наука, 1976. 432 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

**1. Строение и структура твердых тел.....**

**2. Основы квантовой механики и статистической физики.....**

**3. Расчет концентрации носителей заряда в собственных и примесных полупроводниках. закон действующих масс.....**

**4. Зависимость концентрации свободных носителей заряда и положения уровня ферми в полупроводниках от температуры.....**

**5. Кинетические явления в твердых телах.....**

**6. Неравновесные процессы в твердых телах.....**

**7. Оптические явления в твердых телах.....**

**8. Магнитные свойства твердых тел .....**

**9. Контактные явления в твердых телах.....**

**Значения некоторых физических постоянных .....**

**Свойства кремния и германия при 300 к.....**