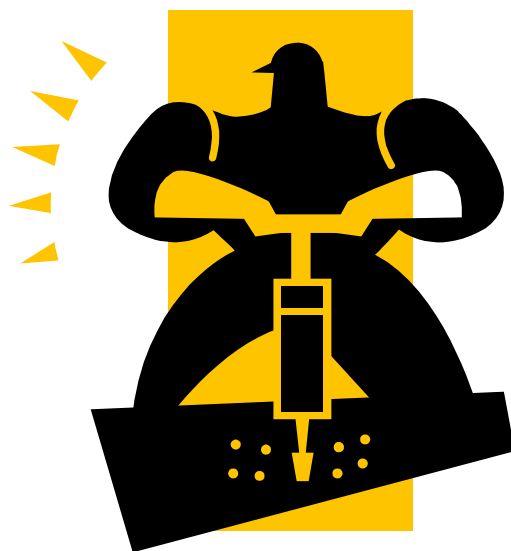


# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГРЕССИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Часть II



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГРЕССИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

## Часть II

Методические указания по выполнению лабораторных работ  
для студентов 1 курса специальности 080502  
дневной и заочной форм обучения



ББК 22.3я73  
УДК 53 (075.8)  
П58

Рекомендовано Редакционно-издательским советом университета

*Рецензент*

кандидат технических наук, доцент  
*А.М. Савельев*

П58 Теоретические основы прогрессивных технологий : методические указания / сост. : В.Ф. Попов, В.А. Пручкин, В.П. Шелохвостов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – Ч. 2. – 32 с. – 100 экз.

Даны методические указания к лабораторным работам по основам механики, термодинамики, принципам и методам изучения строения и свойств твёрдых и жидких материалов.

Предназначены для студентов 1 курса специальности 080502 дневной и заочной форм обучения.

ББК 22.3я73  
УДК 53(075.8)

© ГОУ ВПО "Тамбовский государственный  
технический университет" (ТГТУ), 2008

Учебное издание

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГРЕССИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

### Часть II

Методические указания

Составители:

ПОПОВ Владимир Фёдорович,  
ПРУЧКИН Владимир Аркадьевич,  
ШЕЛОХВОСТОВ Виктор Прокопич

Редактор Ю.В. Шиманова  
Инженеры по компьютерному макетированию: Н.И. Колмакова,  
М.А. Евсейчева

Подписано в печать 24.12.2008.  
Формат 60 × 84 / 16. 1,86 усл. печ. л. Тираж 100. Заказ № 587

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ДИСПЕРСНОЕ СОСТОЯНИЕ ТВЁРДОГО ТЕЛА

**Цель работы:** изучить виды дисперсных систем и свойства порошковых материалов и их применение в технологии порошковой металлургии.

**Приборы и принадлежности:** волюмометр, лабораторные весы, пресс-форма, пресс П-50, штангенциркуль, порошок меди ПМС-1.

### Методические указания

**Дисперсные системы** – это неоднородные материалы, состоящие из двух или более фаз с сильно развитой поверхностью раздела между ними.

**Фаза** – это однородная часть системы, отделённая от других её частей границей раздела, при переходе через которую свойства, строение и химический состав меняются скачком (т.е. резко).

Обычно одна из фаз образует дисперсионную среду, в объёме которой распределена дисперсная фаза в виде мелких (потому и дисперсная) пузырьков, капель или кристаллов.

По агрегатному состоянию дисперсионной среды и дисперсной фазы различают несколько видов дисперсных систем.

1. Газодисперсные системы в зависимости от природы и размера дисперсной фазы делят на аэрозоли, порошки и нетканые волокнистые материалы.

Примерами аэрозолей являются думы (парогазовые смеси продуктов неполного сгорания топлива), туман (мелкие капли воды в воздухе), пыль (дисперсные твёрдые частицы в воздухе).

2. Системы с жидкой дисперсионной средой:

– газовая фаза в зависимости от размера пузырьков образует грубодисперсные газовые эмульсии и пены;

– жидкая фаза в зависимости от размера капель создаёт грубодисперсные эмульсии, высокодисперсные микроэмульсии и латексы;

– твёрдые частицы с уменьшением своего размера образуют грубодисперсные суспензии пасты, высокодисперсные золи и гели.

3. К системам с твёрдофазной дисперсионной средой относятся:

– кристаллические и аморфные тела с включениями пузырьков газа (пенопласты и пенометаллы, микропористые материалы);

– капиллярно пористые материалы с жидким наполнителем;

– композиты на основе металла и пластмассы с твёрдым наполнителем, дисперсноупрочнённые металлические сплавы.

В свободnodисперсных системах (газовых и жидкостных) сцепление между частицами дисперсной фазы отсутствует, каждая из них движется независимо и может участвовать в броуновском движении. Для связнодисперсных (твёрдых) тел характерно образование пространственного каркаса из случайно расположенных частиц дисперсной фазы.

Свойства любой дисперсной системы определяются, прежде всего, межатомным и межмолекулярным взаимодействием на поверхностях раздела.

Рассмотрим свойства дисперсных систем на примере металлических порошков. Одним из способов их получения является криомеханическое дробление компактного металла (рис. 1.1). Пластичный металл сначала замораживают в жидком азоте ( $-196\text{ }^\circ\text{C}$ ), а после его охрупчивания дробят.

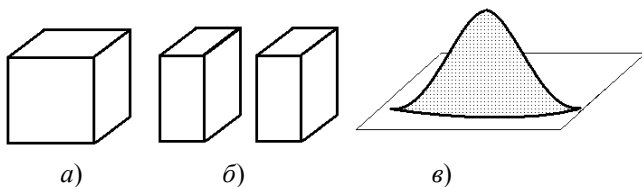


Рис. 1.1. Изменение свободной поверхности твёрдого тела при дроблении:

*a* – компактный материал; *b* – полуфабрикат;

*в* – порошок

Рассмотрим (рис. 1.1, *a*) кубик объёмом  $1 \times 1 \times 1\text{ см}^3$  компактной меди. Площадь его свободной поверхности  $S_S$  (раздел металл – воздух) –  $6\text{ см}^2$ . После его разбивания на две половинки (рис. 1.1, *b*) при той же массе (равной плотности меди –  $8,92\text{ г/см}^3$ ) площадь свободной поверхности вырастет до  $8\text{ см}^2$ . Если процесс измельчения продолжать, то при размере частиц порошка  $100\text{ мкм}$  площадь  $S_S$  той же массы меди станет  $600\text{ см}^2$ , а если они достигнут размера  $10\text{ нм}$ ,  $S_S = 300\text{ м}^2$  (рис. 1.1, *в*).

Таким образом, все порошковые материалы обладают огромной площадью свободной поверхности, а потому имеют все её физические и химические свойства.

### Свойства поверхности твёрдого тела

Рассмотрим их на примере свободной поверхности кристаллического вещества.

**Кристалл** – это бесконечное упорядоченное расположение атомов и молекул в пространстве. На свободной поверхности нарушается его главное свойство – трансляционная симметрия, прекращается закономерное чередование атомов (рис. 1.2).

Атом в объёме кристалла *B* окружён соседями (рис. 1.2), поэтому действующие на него силы взаимодействия уравновешены. У атома *A* на свободной поверхности имеются оборванные валентные связи, кристаллическая решётка искажена. Устойчивость поверхностного слоя определяется действием сил поверхностного натяжения  $F_S$ . Всё это объясняет высокую энергию атомов на поверхности.

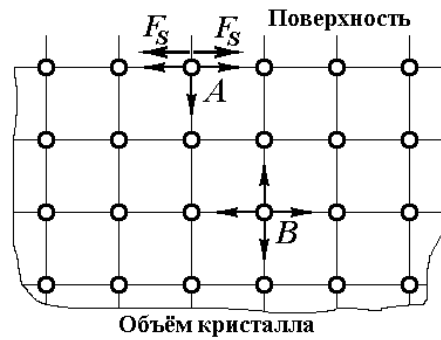


Рис. 1.2. Свободная поверхность кристалла

Итак, свободная поверхность твёрдого тела обладает избытком энергии (поверхностная энергия) и имеет высокую физическую активность, например, скорость диффузии атомов по поверхности намного выше, чем в объёме твёрдого тела.

Справка. **Диффузия** – это направленное тепловое движение атомов.

2. Поверхность легко поглощает атомы и молекулы из окружающей тело среды (это задействует оборванные валентные связи и снижает поверхностную энергию). Это свойство поверхности называют **адсорбция**.

Например, поверхность любого тела всегда покрыта продуктами его окисления кислородом воздуха:

- имеет высокую химическую активность (способность легко вступать в химические реакции с адсорбированными атомами и молекулами);

- поверхность за счёт оборванных валентных связей и своей высокой энергии способна катализировать (ускорять) протекание на ней физических и химических процессов.

#### Свойства порошкового состояния твёрдого тела

Кроме физических и химических свойств, порошки обладают рядом технологических свойств, позволяющих использовать их в технике.

**Текучесть** – способность порошка самопроизвольно двигаться под действием силы тяжести. При засыпании его в любой сосуд порошок ведёт себя подобно жидкости и приобретает его форму.

**Насынная плотность**  $d_n$  – масса единицы объёма свободно насыпанного порошка. Частицы цепляются друг за друга при засыпке, нагораживаются, образуя арки. В результате между ними много пустот и порошок очень рыхлый.

Пример. Для электролитического порошка меди ПМС-1  $d_n = 2,1 \text{ г/см}^3$ , что в 4 раза меньше плотности компактной меди  $d = 8,92 \text{ г/см}^3$ .

**Формуемость (прессуемость)** – способность порошка приобретать форму и некоторую прочность под действием нагрузки. Если на порошок в некоем сосуде (пресс-форме) подействовать нагрузкой, его частицы, проскальзывая между собой, укладываются более плотно. При дальнейшем росте нагрузки частицы деформируются, схватываясь друг с другом. Плотность и прочность прессовки растёт с увеличением давления прессования.

**Спекаемость** – способность порошка самопроизвольно уплотняться при нагревании.

Порошковая заготовка имеет большую площадь свободной поверхности и поэтому огромную избыточную энергию. При нагревании легко начинается поверхностная и объёмная диффузия атомов, которая ведёт к залечиванию поверхности частиц и снижению пористости.

Все эти свойства позволяют широко использовать порошки в различных технологических процессах.

Одним из перспективных направлений современной технологии является порошковая металлургия.

#### Основные этапы порошковой металлургии

1. **Изготовление порошка.** Порошки производят методами дробления (для хрупких материалов), распылением расплава потоками газа или воды, электролизом растворов солей, восстановлением смесей окислов.

2. **Смешивание порошковой шихты.** Цель – получить химически однородную многокомпонентную смесь, ввести в неё твёрдую смазку или пластификатор (для облегчения процесса прессования).

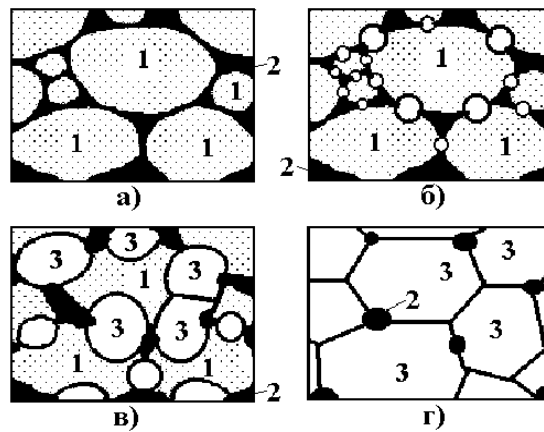
3. **Прессование (формование).** Цель – придать форму и предварительную плотность и прочность заготовки. Для этого используют прессование в закрытых пресс-формах, прокатку между вальками или экструзию (выдавливание через отверстие необходимой формы) порошка.

4. **Спекание (обжиг).** Цель – получить окончательную структуру, свойства и размеры спечённой заготовки. Механизм – диффузионный.

Движущая сила процесса – стремление порошковой заготовки уменьшить свою высокую избыточную энергию за счёт сокращения площади свободной поверхности частиц путём её залечивания.

При нагревании прессовки (рис. 1.3, а) без доступа воздуха с поверхности частиц порошка улетучивается адсорбированная влага и органические вещества.

При дальнейшем повышении температуры активизируется поверхностная диффузия атомов, в результате которой частицы порошка припека-



**Рис. 1.3. Формирование структуры при спекании однокомпонентного порошкового материала:**  
*a* – прессовка; *б* – образование шеек и зародышей зёрен; *в* – формирование изолированных пор и рост зёрен; *г* – структура спекённой заготовки;  
*1* – частицы порошка; *2* – поры; *3* – зёрна

ются друг к другу. В месте их контактов образуются шейки, представляющие зародыши кристалла (зёрна) спекённого материала (рис. 1.3, б).

Эти зёрна растут за счёт атомов, уходящих из частиц порошка (рис. 1.3, в). При этом сквозные (сообщающиеся с поверхностью заготовки) поры между частицами превращаются в отдельные, изолированные друг от друга.

Дальнейший нагрев активизирует и объёмную диффузию. В результате поры залечиваются, исходные частицы порошка рассасываются, вместо них образуется зёрнистая структура спекённого материала, отличающаяся от компактного металла только небольшой остаточной пористостью.

### Порядок работы

1. Определить насыпную плотность металлического порошка. Для этого определить массу мерного стакана  $m_c$  с известным объёмом  $V_n$  на лабораторных весах, установить его на площадку волюмометра и произвести свободную засыпку порошка (на поверхности стакана должна быть горка порошка).

Срезать эту горку металлической линейкой вровень с краями стакана.

Произвести повторное взвешивание и определить  $m_{c+n}$ .

Насыпная плотность порошка рассчитывается по формуле

$$d_n = \frac{m_{c+n} - m_c}{V_n}$$

Повторить измерения три раза и определить среднее значение  $d_n$ .

2. Определить текучесть порошка  $\tau_{50}$ .

Отвесить порцию порошка массой 50 г на лабораторных весах. Засыпать порошок в воронку, закрыв предварительно её выходное отверстие. Затем открыть это отверстие и засечь секундомером время истекания 50 г из воронки.

Повторить измерения три раза и определить среднее значение  $\tau_{50}$ .

3. Изучить прессуемость порошка меди ПМС-1:

– сделать три навески порошка массой 20 г на лабораторных весах;

– изучить устройство пресс-формы для получения заготовки "кольцо" (рис. 1.4), смазать рабочие поверхности её деталей суспензией стеарата цинка в этиловом спирте и собрать её как на рис. 1.4, а;

– засыпать в пресс-форму порцию порошка и ударами молоточка по матрице добиться равномерного заполнения камеры засыпки;

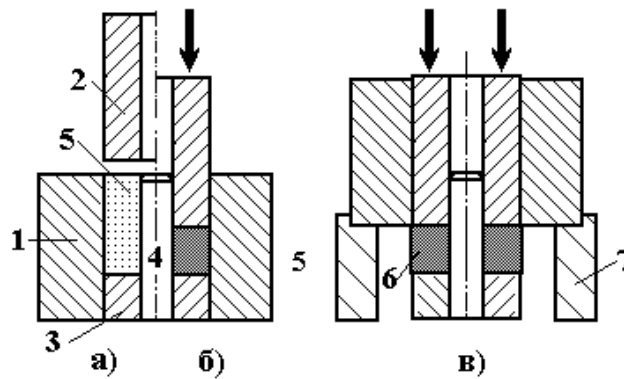
– установить пресс-форму на пресс П-50 и провести прессование (рис. 1.4, б) с усилием 50 000 Н (это соответствует давлению на порошок 500 МПа);

– произвести выпрессовку заготовки с помощью подставки (рис. 1.4, в);

– произвести прессование порошка с усилием 150 000 Н и 250 000 Н (300 МПа и 500 МПа, соответственно).

Измерить размеры полученных прессовок, рассчитать их объём и плотность.

Сравнить полученные значения при разных давлениях и сделать заключение о том, как меняется плотность порошка при увеличении давления.



**Рис. 1.4. Схема прессования:**  
*а* – засыпка порошка; *б* – приложение нагрузки; *в* – выпрессовка;  
 1 – матрица; 2, 3 – верхний и нижний пуансоны; 4 – стержень; 5 – порошок;  
 6 – прессовка; 7 – подставка

**Содержание отчёта**

1. Описание физических, химических и технологических свойств порошка.
2. Схема пресс-формы в момент окончания прессования.
3. Результаты проведённых измерений. Выводы.

**Контрольные вопросы**

1. Виды дисперсных систем.
2. Свойства свободной поверхности твёрдого тела.
3. Свойства порошковых материалов.
4. Основные этапы порошковой металлургии.

**Список литературы**

1. Минаев, А.М. Основы технологии порошковой металлургии / А.М. Минаев. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1998. – С. 79.

**СВЯЗЬ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СО СВОЙСТВАМИ СПЛАВА**

*Цель работы:* изучить зависимость электросопротивления от состава сплава.

*Приборы и принадлежности:* двойной мост постоянного тока, источник постоянного тока, образцовое сопротивление, сплавы различного состава.

**Методические указания**

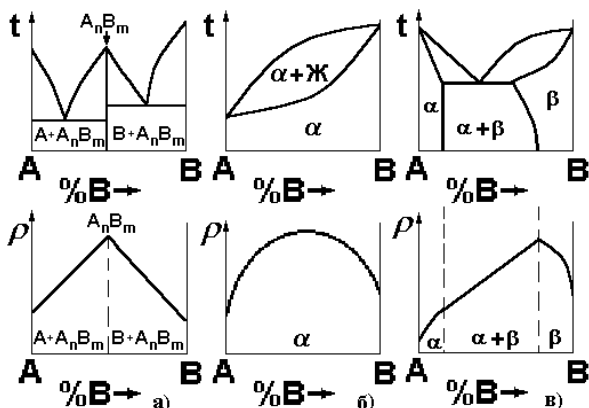
Тип фазовой диаграммы и твёрдого сплава определяет его свойства в равновесном состоянии (рис. 2.1). Существует три основных типа твёрдых сплавов – твёрдый раствор, химическое соединение и механическая смесь.

Для твёрдых растворов характерна нелинейная зависимость удельного электросопротивления от химического состава.

Для физико-механической смеси оно прямо пропорционально количеству каждой фазы, а значит (по правилу отрезков) и химсоставу.

Наличие на диаграмме химического соединения приводит к появлению перелома на линии свойства – содержание компонентов.

В работе предлагается исследовать зависимость удельного электросопротивления от состава сплава и сделать вывод о типе сплава. Для измерения электросопротивления используется метод двойного моста, позволяющий проводить измерения с высокой точностью.



**Рис. 2.1. Влияние типа диаграммы состояния на удельное электросопротивление сплавов с:**  
*a* – химическим соединением; *б* – неограниченной;  
*в* – ограниченной растворимостью

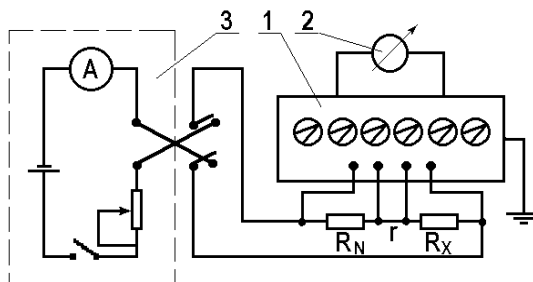
### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой измерения электросопротивления методом двойного моста (рис. 2.2).

Перед началом измерения необходимо удостовериться, что ключ питания схемы разомкнут, гальванометр отключён (нажата кнопка "Шунт"), переключатель его чувствительности в положении "1", измерительные декады в нулевом положении. При этом стрелка гальванометра должна стоять на нуле.

**Внимание!** Любые манипуляции со схемой, кроме процесса измерения, следует проводить при выключенном гальванометре.

2. Закрепить образец  $R_X$  в держателе, включить блок питания схемы, установить ток 0,5 А. Отжать кнопку "Шунт", нажать "Измерение" и, увеличивая чувствительность прибора, компенсировать разбаланс поворотом рукояток декад моста.



**Рис. 2.2 Схема наружных соединений двойного моста:**

1 – мост постоянного тока; 2 – нуль-прибор; 3 – источник постоянного тока

Чувствительность не следует повышать выше позиции "6" переключателя чувствительности. Устранив разбаланс, определить значения  $R$  и  $M_1$  по декадам прибора.

3. Перевести переключатель чувствительности в положение "1", отжать кнопку "Измерение", включить кнопку "Шунт" и разомкнуть ключ питания. Измерить штангенциркулем расстояние между потенциальными контактами. Изменить положение потенциальных контактов. Повторить измерение согласно п. 2. После трёх измерений на одном образце с разной базой между потенциальными контактами, сменить образец и повторить измерения.

Размеры поперечного сечения каждого образца измерить штангенциркулем после его демонтажа из установки.

4. Рассчитать по формуле сопротивление образца, Ом

$$R_X = 10^{-3} R_N M_1 R,$$

где  $R_N = 10^{-3}$  Ом – образцовое сопротивление;  $R$  – показания декад;  $M_1$  – постоянная величина плеча моста.

5. Рассчитать удельное сопротивление образцов для трёх расстояний между контактами:

$$\rho = \frac{R_X F}{l},$$

где  $F$  – средняя площадь поперечного сечения образца по трём измерениям;  $l$  – расстояние между потенциальными жимами.

Данные занести в табл. 2.1

### 2.1. Результаты измерений электросопротивления сплавов

Состав, % вес.	$l_1, \text{ м}$		$l_2, \text{ м}$		$l_3, \text{ м}$		$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$S_X, \text{ Ом}\cdot\text{м}$
	$R_1$	$\rho_1$	$R_2$	$\rho_2$	$R_3$	$\rho_3$		

6. Рассчитать средние арифметические значения удельного сопротивления и их отклонения при 95 % уровне значимости.

7. Построить график зависимости удельного сопротивления от состава. По полученной зависимости сделать вывод о типе изученных сплавов.

### Содержание отчёта

1. Название и цель работы.
2. Описание приборов и образцов.
3. Методика измерения сопротивления, схема установки.
4. Таблица результатов измерений, график  $\rho = f(C \%)$ .
5. Заключение о типе исследованного сплава.

### Контрольные вопросы

1. Основные закономерности формирования свойств сплавов.
2. Основные типы твёрдых сплавов.
3. Правила заполнения диаграмм состояния фазами и структурными составляющими.
4. Фазовый состав сплава. Правило отрезков.



## Список литературы

1. Лахтин, Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов* / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1976. – С. 71 – 73.
2. Лившиц, Б.Г. *Физические свойства металлов и сплавов* / Б.Г. Лившиц. – М. : Metallurgy, 1980. – С. 155 – 157, 177 – 179.

Лабораторная работа 3

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

*Цель работы:* изучить температурную зависимость электропроводности кристаллических материалов.

*Приборы и принадлежности:* электрическая печь с масляным термостатом, омметр, милливольтметр, термопара, образцы материалов.

### Методические указания

**Электрический ток** – это направленное движение заряженных частиц. При движении под действием электрического поля  $E$  они будут менять свою скорость, а значит и энергию. Поэтому высокую проводимость  $\sigma$  (это величина, обратная удельному электрическому сопротивлению) будут иметь лишь такие твёрдые тела, в которых:

- а – есть большая концентрация заряженных частиц  $n_i$ , способных ускоряться под действием поля  $E$ ;
- б – частицы могут направленно двигаться в поле с большой скоростью  $v_i$ :

$$\sigma = \sum_{i=1}^{i=N} n_i \mu_i.$$

Известно деление всех кристаллов по величине удельного электрического сопротивления на три группы – проводники (металлы), полупроводники и изоляторы. Однако такой признак не очень строг и весьма условен. Так, алмаз всегда считался изолятором, но оказывается, что если в природе он окрашен (в голубой или жёлтый цвет), он ведёт себя как полупроводник. Встречаются металлические сплавы с очень большим сопротивлением.

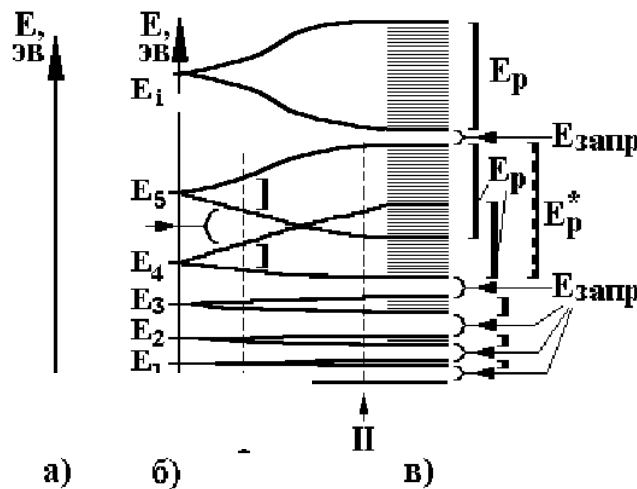
Более надёжный способ классификации – изучение температурной зависимости электропроводности кристаллов – здесь наблюдается не количественное, а качественное различие между проводниками и непроводниками (диэлектриками). Электропроводность проводников (металлы) уменьшается с увеличением температуры (электросопротивление растёт). Электропроводность непроводников (к ним относятся полупроводники и изоляторы) возрастает с увеличением температуры.

Как объяснить такое разное поведение этих кристаллических материалов? Для этого необходимо разобраться с закономерностями движения электронов в материалах различного строения.

Если мы рассматриваем так называемый свободный электрон (летит где-то в космосе – под действием случайных силовых полей), то он может иметь любые значения энергии (любая точка на оси энергии, как показано на рис. 3.1, а).

В изолированном атоме электрон может иметь лишь дискретные уровни энергии  $E_i$ , все остальные значения – запрещены (рис. 3.1, б). Это объясняется волновыми свойствами движущейся частицы и условиями устойчивости его орбиты. Стационарной орбитой является лишь та, в периметр которой укладывается целое число длин волн электрона. Тогда электрон на такой орбите можно рассматривать как стоячую волну, которая не передаёт энергии. Считается, что эти уровни зависят от главного  $n$  и орбитального  $l$  квантовых чисел. Энергетические уровни, соответствующие различным значениям магнитного  $m$  и спинового числа  $m^s$ , совпадают.

При образовании кристалла атомы сближаются и их ядра начинают заметно влиять на электроны других атомов, меняя их энергию. При этом происходит расщепление дискретных энергетических уровней в разре-



**Рис. 3.1. Изменение энергии электронов:**

- а – изолированный электрон; б – электрон в отдельном атоме;
- в – расщепление энергетических уровней при сближении атомов и образовании кристалла

щённые зоны. Расстояние и тип кристаллической решётки влияют на зонную структуру материала. Positionами I и II на рис. 3.1, в показаны варианты зонной структуры полиморфного материала с разным расстоянием между атомами в кристаллической решётке (в положении II две зоны перекрываются, образуя гибридную  $E_p^*$ , как, например, в графите).

Разрешенные энергетические зоны отделены друг от друга запрещенными зонами значений энергии электронов. Разрешенная зона тем шире, чем больше энергия электрона на соответствующем уровне в изолированном атоме. Возможные значения энергии электронов в разрешенной зоне не непрерывны, а квантованы, т.е. дискретны, а общее их число конечно. В кристалле из  $N$  атомов одному дискретному значению энергии электрона в изолированном атоме соответствует зона, состоящая из  $(2l + 1)N$  дискретных уровней. На каждом из них может находиться не более двух электронов с антипараллельными спинами. Шаг дискретности этих значений энергии для 1 моля кристаллического вещества ( $N = 6,02 \cdot 10^{23}$  атомов) составляет энергию порядка  $10^{-23}$  электрон-вольт (эВ). Для электронов внутренних оболочек атомов вероятность туннельного перехода электрона от одного атома к другому оказывается очень малой. Это связано с уменьшением прозрачности потенциального барьера, в результате чего частота просачивания электрона сквозь потенциальный барьер оказывается ничтожно малой.

В реальном веществе при 0 К ( $-273$  °С) электронами заполнены не все разрешенные энергетические зоны, а лишь часть, начиная с самой нижней.

**Валентной зоной** называется наиболее удаленная зона разрешенных значений энергии, которая при абсолютном нуле хотя бы частично заполнена электронами. Именно она определяет многие физические и химические свойства материала.

Если все уровни валентной зоны заняты электронами, ни один из них не может ускоряться электрическим полем. Таким образом, в кристалле валентные электроны могут быть носителями тока, если зона заполнена ими частично, и есть близко расположенные ( $10^{-23}$  эВ) свободные уровни энергии, на которые электроны могут переходить, ускоряясь под действием электрического поля.

В зависимости от заполнения электронами валентной зоны кристаллы делятся на проводники и непроводники (рис. 3.2).

В проводниках (серебро, медь, алюминий, железо и др.) валентная зона заполнена электронами не полностью (рис. 3.2, а), поэтому при воздействии на них даже самого слабого электрического поля электроны могут ускоряться в нём и переходить на более высокие уровни. Поэтому в проводниках валентная зона  $V$  одновременно является зоной проводимости  $C$  (расположенные выше следующая разрешенная и запрещенная зоны совершенно не влияют на электропроводность!).

В непроводниках все разрешенные уровни валентной зоны  $V$  заняты полностью электронами (рис. 3.2, б, в), а до свободных уровней в следующей разрешенной зоне отделяет барьер  $E_g = E_C - E_V$ , где  $E_g$  – ширина за-

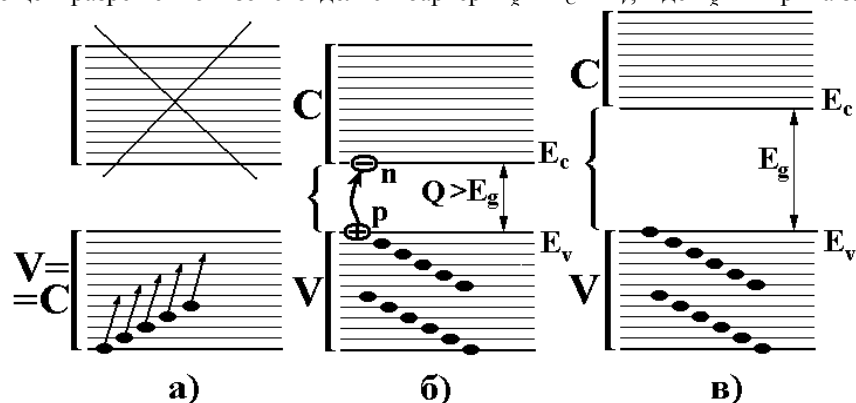


Рис. 3.2. Зонная структура кристаллов:  
а – проводники; б – полупроводники; в – изоляторы  
(чёрными овалами показаны уровни, занятые электронами)

прещенной зоны;  $E_C$  – дно зоны проводимости;  $E_V$  – потолок валентной зоны. Поэтому при 0 К ( $-273$  °С) и полупроводник и изолятор не могут пропускать электрический ток – при этой температуре в них нет электронов, способных ускоряться в электрическом поле. К непроводникам относятся полупроводники (кремний, германий, арсенид галлия и др.) и изоляторы (алмаз, оксиды алюминия и магния).

Что происходит при нагревании полупроводников до температуры  $T > 0$  К? Сообщаемое тепло увеличивает энергию атомов и электронов. Средняя энергия тепловых колебаний кристаллической решетки  $Q \approx kT$  ( $k$  – постоянная Больцмана), но благодаря флуктуациям электрон может случайно получить и больше.

Если она окажется больше ширины запрещенной энергии  $Q > E_g$ , то электрон, находящийся в валентной зоне  $V$ , может перескочить на свободный энергетический уровень в зоне проводимости  $C$  (рис. 3.2, б, в). Здесь он уже сможет увеличивать свою энергию, а значит, станет электроном, участвующим в электрическом токе (такую заряженную частицу называют электроном проводимости  $n$ ). Одновременно с этим в валентной зоне появляется свободный энергетический уровень (его называют дыркой  $p$ ), который может занять (ускоряясь электрическим полем) другой электрон.

При этом дырка  $p$  (положительно заряженная квазичастица) будет двигаться вниз по энергии противоположно электронам.

Существует и противоположный процесс, когда свободный электрон проводимости возвращается в незаполненную валентную зону – рекомбинирует с дыркой. При заданной температуре  $T$  осуществляется термодинамическое равновесие между тепловой генерацией и рекомбинацией носителей заряда, в результате чего в зоне проводимости устанавливается некоторая, вполне определенная концентрация свободных электронов  $n_0$ , а в валентной зоне – дырок проводимости  $p_0$ .

Таким образом, чем выше температура, тем больше концентрация электронно-дырочных пар (носителей тока), тем меньше сопротивление полупроводников.

Удельная проводимость полупроводника описывается соотношением

$$\sigma_i = e(n_i \mu_n + p_i \mu_p),$$

где  $n_i$  и  $p_i$  – концентрации электронов и дырок в собственном полупроводнике;  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – их подвижности, характеризующие скорость направленного движения заряженных частиц под действием электрического поля.

Изоляторы (диэлектрики) лишь количественно отличаются от полупроводников – в них ширина запрещённой зоны намного больше и для образования электронно-дырочной пары требуется очень большая энергия. Поэтому при невысоких температурах нагрева их сопротивление практически не меняется.

Увеличение электрического сопротивления проводников с ростом температуры нельзя объяснить с помощью зонной теории. Для этого надо разобраться с понятием подвижности носителей тока.

В отсутствие электрического поля электроны в зоне движутся хаотично и чем выше температура, тем быстрее. Причина этого в том, что тепловые колебания атомов в узлах решётки сообщают электронам дополнительную энергию и случайным образом меняют направление их движения (рассеяние носителей тока).

При увеличении температуры растёт хаотичность движения заряженных частиц (она не исчезает при помещении проводника в электрическое поле), что мешает их направленному движению (уменьшая их подвижность) и увеличивает электросопротивление проводника.

Такие же процессы идут и в непроводниках, однако в них с ростом температуры быстрее растёт концентрация электронов и дырок проводимости. Поэтому в диэлектриках влияние хаотичности движения сказывается на подвижности зарядов лишь при температурах, близких к плавлению (рис. 3.3).

Аналогичным образом на сопротивление проводников действует искажённость кристаллической решётки.

Различные дефекты структуры реального кристалла искажают строгую периодичность его потенциального поля, что вызывают хаотичность движения электронов проводимости. Электрическое сопротивление дефектного кристалла проводника больше.

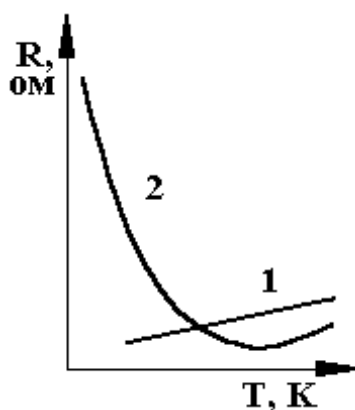


Рис. 3.3. Зависимость сопротивления твёрдых тел от температуры:  
1 – металлы; 2 – полупроводники и диэлектрики

Дефекты уменьшают удельное электрическое сопротивление непроводников – они могут создавать в запрещённой зоне дополнительные энергетические уровни, которые будут облегчать появление в полупроводниках электронов проводимости или дырок и тем самым увеличивать электропроводность.

### Порядок выполнения работы

1. Установить образцы проводника и полупроводника в измерительную кассету и поместить в ванну термостата (рис. 3.4).

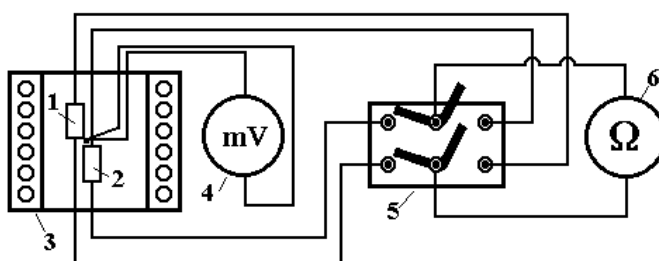


Рис. 3.4. Схема установки для изучения электропроводности материалов:  
1, 2 – образцы; 3 – печь; 4 – милливольтметр; 5 – ключ; 6 – омметр

2. Включить омметр и милливольтметр, дать им прогреться в течение 10 – 15 мин. Провести несколько измерений электросопротивления при комнатной температуре, проверить стабильность показаний омметра.

3. Включить нагрев печи и провести измерения электросопротивления полупроводника и металла при температуре от 20 до 120 °С через 5 °С. Для переключения образцов пользоваться перекидным электрическим ключом. Данные занести в табл. 3.1.

### 3.1. Влияние температуры на электрическое сопротивление кристаллических тел

$t, ^\circ\text{C}$		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$R, \text{ом}$	Металл											
	Полупроводник											

4. По результатам измерений построить графики изменения электрического сопротивления кристаллических материалов от температуры.

### Содержание отчёта

1. Название и цель работы.
2. Тип приборов и характеристики используемых кристаллических материалов.
3. Метод измерения сопротивления, схема установки.
4. Таблица экспериментальных данных и график зависимости  $R = f(t)$ .

### Контрольные вопросы

1. Образование энергетических зон. Валентная, запрещённая и зона проводимости.
2. Зонная структура металлов, диэлектриков и полупроводников.
3. Примесные уровни в полупроводниках. Доноры, акцепторы, собственные полупроводники.
4. Концентрация носителей зарядов в собственном полупроводнике. Уровень Ферми.
5. Основные и неосновные, равновесные и неравновесные носители.
6. Закон действующих масс.

### Список литературы

1. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М., 1997.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 1994.

Лабораторная работа 4

### ИЗУЧЕНИЕ ПОРОШКОВ

*Цель работы:* ознакомиться с методами статистического анализа случайных величин и построить гранулометрическую кривую порошка.

*Приборы и принадлежности:* микроскопы на просвет и на отражение, объект-микрометр, металлические порошки.

### Методические указания

При изучении сложных процессов, в которых участвует большое количество структурных единиц или действующих факторов, параметры, описывающие состояние системы, являются случайными величинами. В таком случае для количественной и качественной оценки используют вероятностно-статистические методы.

Случайная величина  $X$  принимает в зависимости от случая те или иные значения  $x_i$ . Частота встречи отдельных значений определяется вероятностью  $p_i$  (рис. 4.1).

В других случаях распределение вероятностей задаётся указанием для каждого отрезка значений случайной величины  $a = [a, b]$  вероятности  $p_x(a, b)$  события  $a \leq x < b$ . Если случайная величина меняется не дискретно, а непрерывно, вероятность попадания её значения в диапазон  $[a, b]$  описывается функцией  $P_x(a, b) = \int_a^b p_x(x) d(x)$ , где  $p_x(x)$  – плотность вероятности.

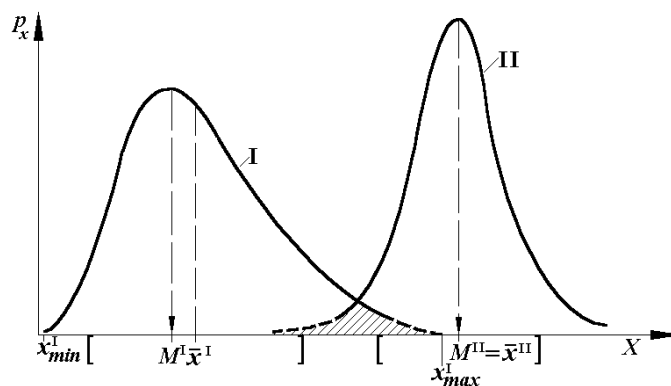


Рис. 4.1. Кривые распределения случайных величин  $X_I$  и  $X_{II}$

Для описания распределения случайной величины используют целый ряд числовых характеристик, среди которых чаще всего используют её среднее значение (математическое ожидание)  $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ , дисперсия среднего

$$D_{\bar{X}}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n(n-1)},$$

где  $n$  – число измерений случайной величины в экспериментальной выборке (чем больше  $n$ , тем с большей точностью среднее значение по выборке будет ближе к истинному значению математического ожидания).

**Модой** распределения случайной величины  $M$  называют её значение (или диапазон значений), для которого плотность вероятности  $p(x)$  имеет максимум, т.е. которое наиболее часто встречается.

Часто приходится сравнивать значения нескольких случайных величин, например, чтобы ответить на вопрос, какой из порошков более крупный по размеру частиц. Размер порошков описывается гранулометрической кривой, представляющей частотное распределение диаметров частиц. В этом случае можно сравнить значения моды двух кривых. На рис. 4.1 мода  $M^{II} > M^I$ , но кривые порошков перекрываются (показано штриховкой). Чтобы объективно ответить на поставленный вопрос, следует проверить, не перекрываются ли доверительные интервалы двух случайных величин  $\Delta_I$  и  $\Delta_{II}$  (показаны на рис. 4.1 квадратными скобками).

Доверительный интервал среднего значения случайной величины  $\Delta$  с вероятностью  $q$  (обычно в технике используют  $q = 95\%$ ) содержит истинное среднее значение случайной величины и задаётся отрезком  $[\bar{X} - D_{\bar{X}} \times t_q^k; \bar{X} + D_{\bar{X}} \times t_q^k]$ , где  $D_{\bar{X}}$  – стандартное отклонение (равное квадратному корню из дисперсии среднего),  $t_q^k$  – коэффициент Стьюдента;  $k = n - 1$  – число степеней свободы (для  $n > 30$   $t_q^k = 1,96$ ). Очень грубой оценкой разброса значений случайной величины может служить размах  $[X_{\min}; X_{\max}]$ .

Если доверительные интервалы двух случайных величин перекрываются, с вероятностью  $q = 95\%$  их нельзя считать разными (порошки из нашего примера – различны, второй порошок крупнее, так как у него больше среднее значение диаметра частиц).

### Порядок выполнения работы

Для построения гранулометрической кривой порошка надо выполнить следующие действия:

1. Подготовить микроскоп к работе, настроить резкость шкалы окуляр – микрометра, навести резкость на объект – порошок оловянной бронзы.
2. Произвести с помощью окулярной шкалы микроскопа измерение диаметра ста произвольно выбранных частиц порошка и записать его в виде массива значений случайной величины  $d_i$  (размерность – число минимальных делений окулярной шкалы, дел.ок.).
3. Произвести частотный анализ значений диаметра частиц порошка:
  - определить размах изменения (вариации) размера порошинок по выборке из  $N = 100$  измерений –  $[d_{\min}; d_{\max}]$  – минимальное и максимальное значения;
  - определить величину интервала

$$A = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{K},$$

где число интервалов классификации  $K = \sqrt[3]{N} \approx 5$ ;  $N$  – число измерений. Округлить значение величины интервала до целого числа;

– определить диапазоны значений частотного анализа (табл. 4.1) (если значение  $d_{\min}$  близко по величине к нулю, следует принять его равным 0);

– провести классификацию (сортировку) массива измеренных значений случайной величины, заполняя табл. 4.1 (за событие принимается попадание величины случайного значения в  $i$ -й интервал классификации; в этом случае в графе "Число событий" надо добавить единицу (счётную палочку));

– после сортировки всех измеренных значений посчитать число событий в каждом интервале и записать результат в графе "Статистический вес" (так как было измерено 100 частиц – в %).

4. По результатам частотного анализа построить гранулометрическую кривую изученного порошка  $f=f(d)$ . Для этого на выбранных интервалах изменения размеров частиц порошка отложить по вертикали величину статистического веса  $f_i$  из табл. 4.1 в виде прямоугольного столбца (рис. 4.2).

5. Определить цену деления окуляр – микрометра по известной методике и подставить её после  $d$  на оси гранулометрической кривой (например, если цена деления 10 мкм/деление, следует написать  $d \times 10$  мкм).

6. Определить моду полученного распределения, указав соответствующий интервал значений размера частиц порошка.

#### 4.1. Частотный анализ значений диаметра частиц порошка

№ интервала	Диапазон значений $i$ -го интервала классификации, дел.	Число событий	Статистический вес $f_i$ , %
1	$d_{\min} \leq d \leq d_{\min} + A$		
2	$d_{\min} + A < d \leq d_{\min} + 2A$		
3	$d_{\min} + 2A < d \leq d_{\min} + 3A$		
4	$d_{\min} + 3A < d \leq d_{\min} + 4A$		
5	$d > d_{\min} + 4A$		

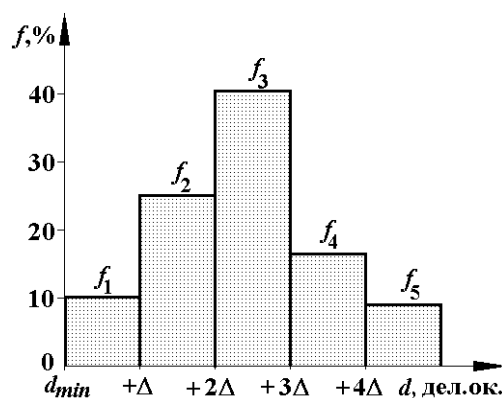


Рис. 4.2. Частотная кривая изменения размера частиц порошка

7. Рассчитать среднее значение случайной величины  $\bar{d}$  и стандартное отклонение от среднего значения  $D_{\bar{x}}$  по выборке из 100 измерений.

#### Содержание отчёта

1. Название и цель работы.
2. Таблица частотного анализа значений диаметра частиц порошка.
3. Гранулометрическая кривая изученного порошка и её характеристики: мода, среднее значение диаметра частиц, стандартное отклонение среднего.

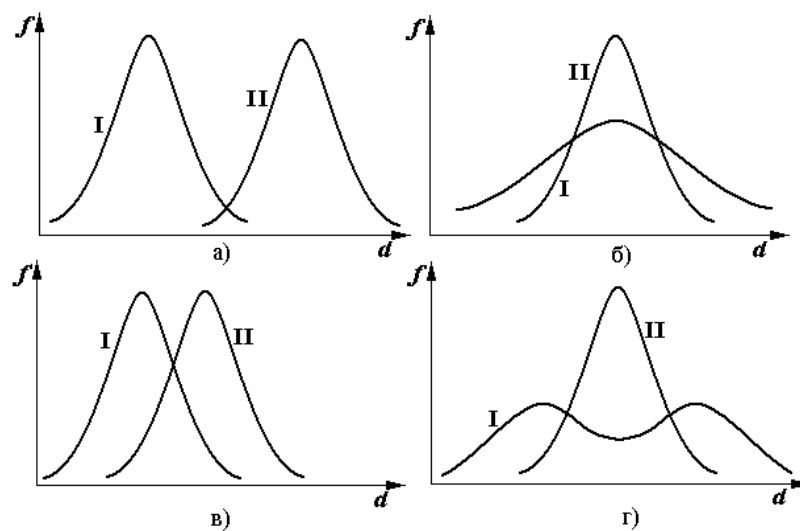


Рис. 4.3. Сравнение гранулометрических кривых разных порошков:  
а – з – варианты заданий для контроля знаний

#### Контрольные вопросы

1. Что такое величина?
2. Характеристики случайной величины.
3. Качественно сравните предложенные гранулометрические кривые двух порошков (рис. 4.3) и их характеристики (мода, размах значений); чем они отличаются, что у них одинаково?

#### Список литературы

1. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М. : Мир, 1980. – С. 610.

Лабораторная работа 5

### ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ РАСТВОРОВ

*Цель работы:* изучить процессы, сопровождающие протекание электрического тока через растворы.

*Приборы и принадлежности:* гальваническая ванна, источник постоянного тока, амперметр, весы аналитические, равновесы, образцы.

*Электрический ток* – это направленное движение заряженных частиц. Электропроводность материалов зависит от концентрации в них носителей тока (электронов, ионов) и их подвижности.

*Подвижность зарядов* – скорость их направленного движения, отнесённая к величине напряжённости электрического поля.

К проводникам второго рода относятся электролиты, представляющие жидкие и твёрдые вещества, обладающие ионной проводимостью. К жидким электролитам относятся расплавы солей и растворы солей оснований и кислот.

*Раствор* – это твёрдая или жидкая однородная система, состоящая из двух или более компонентов (составных частей), относительные количества которых могут изменяться в широких пределах. Растворитель и растворённые вещества равномерно распределены в такой среде в виде молекул, атомов или ионов. Обычно за растворитель принимают тот компонент, который по свойствам и своему строению близок к раствору (часто его больше и по количеству). В процессе растворения кристаллов в жидкости её молекулы, находящиеся в тепловом колебательном движении, выбивают атомы с поверхности твёрдого тела и они диффундируют в раствор. Этот процесс обратим – одновременно идёт выпадение кристаллов из раствора:

**растворение ↔ кристаллизация.**

Если скорость этих процессов равна – мы получаем насыщенный раствор.

В 1833 – 1834 годах Майкл Фарадей обнаружил, что при протекании электрического тока через электролит происходит превращение вещества и сформулировал свои законы электролиза:

1. Массы превращённых веществ ( $m$ ) пропорциональны количеству электричества ( $q$ ), прошедшего через электролит:

$$m = kq,$$

где  $k$  – электрохимический эквивалент.

2. Массы различных веществ, превращённых в результате протекания прохождения через электролит одного и того же количества электричества пропорциональны химическим эквивалентам ( $A$ ) этих веществ:

$$k = A / F,$$

где  $F = e N_A = (9,648456 \pm 0,000027) \cdot 10^4$  к/моль – число Фарадея;  $e$  – заряд электрона;  $N_A$  – число Авогадро.

Гальваническая ванна представляет сосуд, заполненный раствором электролита, в который помещены два электрода, соединённых с полюсами источника постоянного тока. При включении прибора анионы, не переставая хаотически двигаться





3	900								
4	1200								

- Графики зависимости  $\Delta m = f(q)$ .
- Результаты расчёта среднего химического эквивалента меди.
- Выводы о характере превращений при протекании электрического тока через гальваническую ванну.

### Контрольные вопросы

- Что такое растворы?
- Полярные и неполярные вещества.
- Что происходит при растворении веществ в полярных и неполярных жидкостях?
- Электрический ток в растворах.
- Законы Фарадея для электролиза.
- Применение электролиза в технике.

### Список литературы

- Глинка, Н.Л. Общая химия : учебник для нехимических вузов / Н.Л. Глинка. – М. : Химия, 1988. – С. 231 – 234, 293 – 299.
- Карапетьянц, М.Х. Общая и неорганическая химия : учебник для вузов / М.Х. Карапетьянц, С.И. Дракин. – М. : Химия, 1993. – С. 262 – 265.

Лабораторная работа 6

### ИЗУЧЕНИЕ ЛАЗЕРА

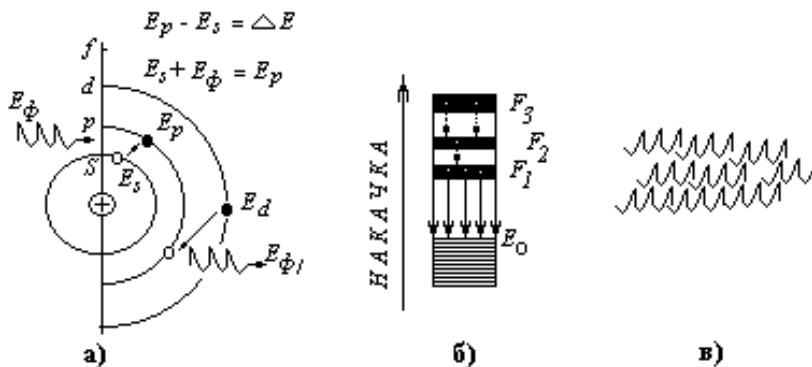
*Цель работы:* знакомство с физическим принципом работы лазера; изучить оптический квантовый генератор (ОКГ) как самоорганизующуюся систему; изучить спектральные характеристики ОКГ и области применения лазеров (лазерные технологии).

*Оборудование, приборы, материалы:* оптический квантовый генератор типа ЛГИ-21, ЛЖИ или ИЛГИ-101, спектрофотометр СФ42, calorиметр ИКТ-1Н.

### Методические указания

Понятие "лазер" обозначает сейчас поток фотонов (луч света), имеющих практически одинаковую частоту (длину волны) и согласованных по фазе. Такой свет называют когерентным. Физическая сущность базируется на квантовом строении атомов.

В простейшем случае строение атома (рис. 6.1) представляется в виде положительного ядра, вокруг которого в устойчивых энергетических состояниях (на стационарных орбитах) располагаются электроны. Такие состояния обозначают буквенным рядом  $s, p, d, f$ . Энергия электронов может быть обозначена как  $E_s, E_p, E_d$  и т.д.



**Рис. 6.1. Схема строения атома и энергетические зоны:**  
 а – схема энергетических состояний атома; б – схема энергетических зон;  
 в – когерентный поток света

В атомной структуре электроны стремятся иметь меньшую энергию и располагаться на более низких уровнях. Например, электрон (рис. 6.1, а) более устойчив в состоянии с энергией  $E_s$  ( $s$  – энергетический уровень). Ближайшее более высокое энергетическое состояние для него может быть  $E_p$  (соответствует уровню  $p$ ), однако это состояние может быть достигнуто только в том случае, если он приобретёт дополнительную энергию  $\Delta E = E_p - E_s$ . Такая ситуация может произойти при взаимодействии рассматриваемого электрона с фотоном, имеющим энергию  $E_\phi$ . Фотон поглощается электроном и его энергия становится  $E_p = E_s + E_\phi$ . В возбуждённом состоянии (на уровне  $p$ ) электрон может находиться вполне определённое (ограниченное) время, которое называется временем жизни (порядка микросекунд). По истечении этого времени электрон вынужден возвратиться на более низкий уровень. Возвращение электрона на более низкий уровень связано с выделением энергии, соответствующей разности энергий рассматриваемых уровней, например, для электрона, находящегося на  $d$  уровне и переходящего на уровень  $p$ , будет  $\Delta E' = E_d - E_p$ . Эта энергия будет выделяться в виде фотона  $E_\phi' = \Delta E'$  (волновой пакет условно

показан на рис. 6.1, а). Процессы возбуждения и его снятия поглощением и выделением фотонов происходят постоянно и определяют то, что называют **спонтанным** излучением.

Рассмотренная структура атома существенно изменяется при объединении группы атомов в коллектив. В этом случае электроны разных атомов должны занимать положение вблизи устойчивого уровня, поскольку в коллективе не может быть одинаковых энергий более чем для двух электронов. Как показано на рис. 6.1, б, каждый уровень несколько расширяется ("размазывается") и уже называется зоной. Энергетическая структура большого коллектива атомов будет представлять чередование разрешённых и запрещённых зон, как показано на рис. 6.1, б.

В кристаллах излучение света также может быть спонтанным. Так, при нагревании поверхность материала начинает светиться (обычно при температурах выше 600...700 °С).

Пример. При нагревании электрическим током вольфрамовой спирали в лампе накаливания электроны металла возбуждаются, переходя на разные уровни возбуждения. Вскоре они самопроизвольно возвращаются на основной уровень, отдавая избыточную энергию в виде квантов света с разной энергией. В результате образуется некогерентный (белый) свет, часть энергии выделяется в виде тепла. Чем выше температура спирали, тем сильнее спектр лампы накаливания будет смещаться в сторону коротких (синих) волн.

Лазерное излучение базируется на зонной структуре кристалла. Обычно это диэлектрик, в запрещённой зоне которого за счёт легирования создают основной энергетический уровень и уровни возбуждения.

Пример. В кристалле рубина, основой которого является окись алюминия, создаются примесные уровни атомов хрома, придающего кристаллу красный цвет.

Процесс возникновения лазерного излучения можно представить следующим образом.

Если производить быстрый подвод лучевой энергии к выбранному телу (на рис. 6.1, б показано стрелкой с надписью **накачка**), то большая доля электронов окажется в верхних разрешённых зонах – энергии  $F_1, F_2, F_3$ , что называется **инверсией заселённости**. Переход из зоны в зону происходит безизлучательный (избыток энергии выделяется в виде тепла). Взаимодействие электронов в этом случае приводит к накоплению электронов в нижней зоне  $F_1$  (у неё большое время жизни электронов). К концу времени жизни практически все возбуждённые электроны окажутся в этой зоне.

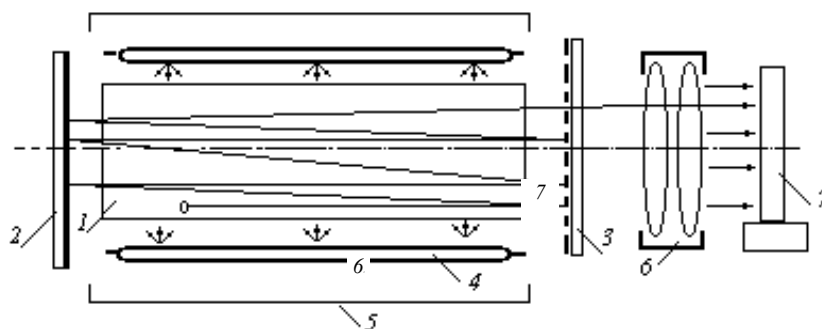
Такое положение очень неустойчиво. Если у какого-то из электронов на инверсном уровне  $F_1$  случайно истекает время жизни, он самопроизвольно переходит на основной уровень, отдавая лишнюю энергию в виде фотона света  $h\nu = F_1 - E_0$ . Образующийся случайный **фотон способен вызвать вынужденный переход** остальных электронов с уровня инверсии на основной уровень. Это сопровождается выделением лавины фотонов в очень короткий промежуток времени таким образом, что все фотоны будут иметь одинаковую фазу электромагнитных колебаний и фиксированную (одну или несколько) частоту. Такое излучение называется **вынужденным**, а состояние (рис. 6.1, в) электромагнитного потока (луча света) называется **когерентным**. Высокая мощность излучения ОКГ объясняется тем, что время излучения составляет микросекунды, за которые выделяется заметная энергия.

Пример. При накачке энергии  $E = 1000$  Дж за время  $\tau = 1$  с мощность  $W$  составляет 1000 Вт (1 кВт). Коэффициент полезного действия лазера примерно равен 10 %. Значит, энергия излучения лазера составит 100 Дж, но время импульса – 10 мкс. Тогда мощность  $W = E / \tau = 100 \text{ Дж} / 10 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 10 \cdot 10^6 \text{ Вт}$  (10 000 кВт).

Название "лазер" происходит от первых букв английского выражения LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATING OF EMISSION RADIATION.

### Устройство оптического квантового генератора (ОКГ)

Формирование когерентного светового потока осуществляется в устройстве, которое называется оптический квантовый генератор. Основные его элементы показаны схематически на рис. 6.2.



**Рис. 6.2. Схема оптического квантового генератора:**

- 1 – рабочее тело (газ, жидкость, твёрдое тело); 2 – отражательное зеркало;
- 3 – полупрозрачное зеркало; 4 – лампы накачки; 5 – отражатели;
- 6 – внешняя оптическая система; 7 – мишень

Основной частью конструкции является рабочее место 1. Это может быть газ, жидкость и твёрдое тело. Рабочее тело должно быть прозрачным для излучения и иметь параллельные поверхности (слева и справа). В торцах этого компонента установлены зеркало 2 с высокой отражательной способностью и полупрозрачное зеркало 3 с 50 %-ной пропускной способностью. Вокруг рабочего тела 1 располагаются лампы накачки 4 и отражатели 5 для большей концентрации света на рабочем теле. Эта конструкция и может быть названа резонатором. За пределами резонатора установлена внешняя оптическая система 6 для управления выходящим световым потоком и мишень 7, являющаяся объектом воздействия светом.

Механизм возникновения светового потока можно представить следующим образом.

При включении ламп накачки происходит облучение рабочего тела интенсивным светом. При этом происходит возбуждение не самого рабочего тела  $I$ , например стекла (стекло прозрачно для широкого диапазона световых частот), а примеси, находящейся в этой среде. В примеси и возникает инверсия заселённости (накачка), по окончании времени жизни происходит случайный переход одного из возбуждённых электронов на основной нижний уровень и выделение фотона в любом направлении. Если фотон выделяется в направлении продольной оси резонатора, то он оказывается "активным", к нему присоединяются фотоны от других электронов, которые лавинно переходят в основной уровень. Выделение фотонов происходит в фазе первого фотона, т.е. все фотоны такого потока имеют одну фазу. Поскольку электроны переходят с одного излучательного уровня на один уровень (или несколько) нижнего состояния, то электромагнитный поток будет иметь и одинаковую длину волны.

Двигающийся поток отражается последовательно от зеркал 2, 3, образуя между ними стоячую волну. Энергия этой стоячей волны увеличивается за счёт дополнительного подсоединения фотонов от других атомов. Практически большая часть фотонов от всех возбуждённых электронов оказывается в виде переизлучающегося между зеркалами электромагнитного (светового) потока. При смещении стоячей волны по поверхности полупрозрачного зеркала 3 на прозрачное место (отсутствие отражательной пленки) происходит выход излучения за пределы резонатора и далее через оптическую систему 6 на мишень 7.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться по описанию с физикой процесса и устройством оптического квантового генератора.
2. Ознакомиться с конструкцией гелий-неонового ОКГ и техникой работы с ним.
3. Ознакомиться с системой измерения интенсивности и спектральных характеристик лазера:
  - с калориметром ИКТ–1Н;
  - со спектрофотометром СФ42.
4. Установить ОКГ на оптическую линейку, выставить в продольном направлении, включить питание лазера, визуально убедиться в наличии излучения и его направлении (вдоль оптической линейки), выключить лазер.
5. Установить калориметр на оптической линейке таким образом, чтобы приёмник примерно находился на уровне лазерного луча.
6. Включить калориметр на панели системного блока, проверить его работу.
7. Включить ОКГ, точно выставить приёмник ИКТ–1Н.
8. Включить ИКТ–1Н, произвести измерения интенсивности после включения ОКГ, выключить ОКГ. Повторить измерения 5–6 раз, зарегистрировать показания, усреднить.
9. Определить спектральную характеристику лазерного излучения гелий-неонового ОКГ:
  - направить луч лазера в приёмник спектрофотометра;
  - зарегистрировать интенсивность;
  - регистрировать интенсивность при различных положениях дифракционной решётки;
  - построить распределение длина волны – интенсивность.
10. Закончить работу выключением приборов в порядке обратном относительно включения.

### Содержание отчёта

1. Схема ОКГ, блок схему установки.
2. Результаты измерений.

### Контрольные вопросы

1. Свойства лазерного излучения.
2. Структурная схема лазера.
3. Принцип квантового усиления.
4. Классификация лазеров по видам веществ активной среды.
5. Применение лазеров.
6. Понятие о голографии.

### Список литературы

1. Епифанов, Г.И. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ЭВА: учебное пособие для вузов / Г.И. Епифанов, Ю.А. Мома. – М. : Советское радио, 1979. – С. 333 – 346.