

Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Кафедра моделирования и системного анализа (МиСА)

Бобенко Надежда Георгиевна  
Пономарев Александр Николаевич

## **Материаловедение**

Методические рекомендации к лабораторным и практическим занятиям

Томск 2014

Н.Г. Бобенко, А.Н. Пономарев.

Материаловедение / Методические рекомендации к лабораторным и практическим занятиям – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Кафедра моделирования и системного анализа, 2014. – 27 с.

© Бобенко Н.Г., Пономарев А.Н. 2014.

© ТУСУР, МиСА, 2014.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

## Оглавление

Занятие 1. Введение.....	4
Занятие 2 Атомно-кристаллическое строение вещества.....	6
Занятие 3. Фазовая структура вещества.....	9
Занятие 4. Тепловые свойства вещества.....	10
Занятие 5. Ползучесть и пластическая деформация вещества. ....	12
Занятие 6. Свойства сегно- и пьезоэлектриков.....	14
Занятие 7. Сверхпроводимость материалов. ....	15
Занятие 8. Свойства полупроводниковых материалов.....	17
Занятие 9. Магнитные свойства материаловедения.....	19
Приложение №1. Типы химической связи. ....	21
Приложение 2. Типы кристаллических решеток. ....	22
Приложение 3. Примерный список итоговых тестовых заданий по предмету.....	23

## Занятие 1. Введение

**Цель:** получение навыков по классифицированию материалов по типу химической связи, структуре.

### Задача 1:

Определить какие типы связи характерны для следующих соединений. Объяснить почему и какими свойствами данные материалы обладают:  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Li}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Nb}$ .

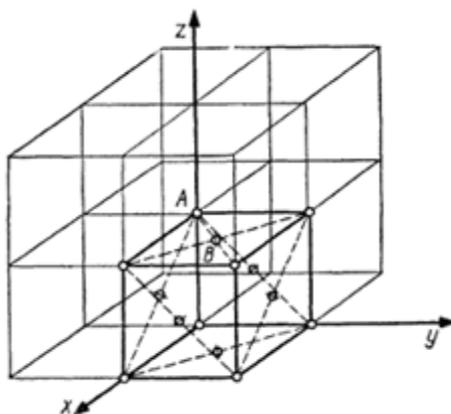
Указание к решению задачи:

1. Ознакомьтесь с теорией, представленной в Приложении 1.
2. Воспользовавшись таблицей Менделеева, определите к каким веществам относятся простые соединения и составные элементы сложных соединений.
3. По составу и принадлежности к той или иной группе определите вид связи, характерной для данного вещества.

### Задача 2:

Определить число  $n$  узлов, приходящихся на одну элементарную ячейку в гранцентрированной кубической решетке.

Решение:



Выделим элементарную ячейку в кубической решетке и определим, скольким соседним элементарным ячейкам принадлежит тот или иной узел выделенной ячейки. В этой ячейке имеются узлы двух типов: А (находящиеся в вершинах куба) и В (находящиеся на гранях куба в точке пересечения диагоналей).

Узел А принадлежит одновременно восьми элементарным ячейкам. Следовательно, в данную ячейку узел А входит с долей  $1/8$ . Узел В входит одновременно только в две ячейки и, следовательно, в данную ячейку узел В входит с долей  $1/2$ . Если учесть, что число узлов типа А в ячейке равно восьми, а число узлов типа В равно шести, т. е. числу граней, то общее число узлов, приходящихся на одну элементарную ячейку в гранецентрированной решетке,

$$n = (1/8)*8 + (1/2)*6 = 1 + 3 = 4 \text{ узла.}$$

Так как число узлов равно числу атомов, то в соответствующей структуре на элементарную ячейку приходится четыре атома.

#### Задача 3:

Определить какие типы связи характерны для следующих соединений. Объяснить почему и какими свойствами данные материалы обладают:  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $HCl$ ,  $Pb$ ,  $Na$ ,  $\beta$ - $Ti$ ,  $W$ ,  $Cr$ ,  $Va$ .

#### Задача 4:

Определить число  $n$  узлов, приходящихся на одну элементарную ячейку в:

- а) плотноупакованной кубической решетке,
- б) объёмно-центрированной кубической решетке,
- в) базо-центрированной,
- г) примитивной.

## Занятие 2 Атомно-кристаллическое строение вещества.

**Цель:** получение навыков определения строения вещества, построение атомных плоскостей, узлов, определение векторов трансляции.

### Задача 1:

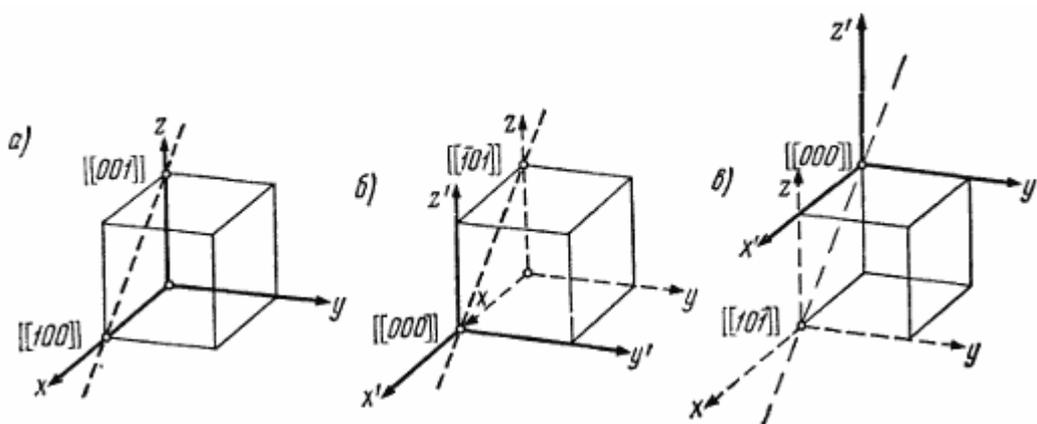
Написать индексы направления прямой, проходящей через узлы  $[[100]]$  и  $[[001]]$  кубической примитивной решетки.

### Решение:

Задачу можно решить двумя способами. Аналитическим и графическим.

1 способ:

Изобразим кубическую примитивную ячейку отметим на ней узлы с индексами  $[[100]]$  и  $[[001]]$  и проведем через эти узлы прямую (Рис а). Если бы прямая проходила через начало координат, то ее индексы совпадали с искомыми. Этого можно добиться, перенеся один из узлов в начало координат. Координаты второго узла и будут искомыми. Переносить можно как первый (Рис б), так и второй узел (Рис в).



2 способ:

Напишем узлы в виде  $[[m_1, n_1, p_1]]$ ,  $[[m_2, n_2, p_2]]$ . Тогда можем записать уравнение для прямой в виде

$$\frac{x - m_1}{m_2 - m_1} = \frac{y - n_1}{n_2 - n_1} = \frac{z - p_1}{p_2 - p_1}$$

Теперь перепишем уравнение, подставив цифры вместо соответствующих векторов в знаменателе. Получим, что:

$$m_2 - m_1 = 0 - 1 = -1$$

$$n_2 - n_1 = 0 - 0 = 0$$

$$p_2 - p_1 = 1 - 0 = 1$$

Таким образом, искомые индексы [1 0 1].

### Задача 2.

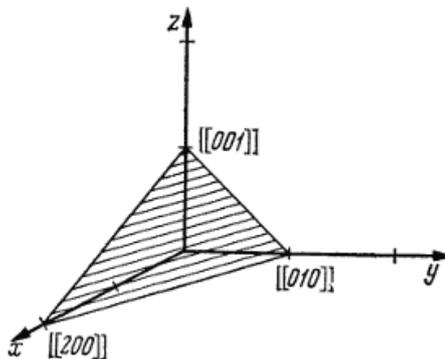
Написать индексы Миллера для плоскости, содержащей узлы с индексами [[200]], [[010]] и [[001]]. Решетка кубическая, примитивная.

### Решение:

Возможны два способа решения задачи.

*1-й способ* применим в тех случаях, когда узлы, принадлежащие плоскости, лежат одновременно и на осях координат (т. е. известны отрезки, отсекаемые плоскостью на осях координат).

В данном случае узлы, принадлежащие плоскости, лежат на осях координат, и отрезки (в единицах постоянной решетки), отсекаемые на осях координат этой плоскостью, соответственно будут (рис. ) 2, 1, 1.



В соответствии с общим правилом нахождения индексов Миллера напишем обратные значения полученных чисел  $1/2$ ;  $1/1$ ;  $1/1$  и приведем их к наименьшему целому кратному этих чисел. Для этого умножим числа на два. Полученная совокупность значений, заключенная в круглые скобки, и есть искомые индексы Миллера (1, 2, 2).

*2-й способ* (аналитический) особенно удобен тогда, когда известные узлы не лежат на осях координат. Этот способ является общим и применим во всех случаях.

Известно, что индексы Миллера равны наименьшим целочисленным коэффициентам при переменных в уравнении плоскости. Поэтому решение задачи по определению индексов Миллера сводится, по существу, к отысканию уравнения плоскости.

### Задача 3

Вычислить период  $l$  идентичности вдоль прямой [111] в решетке кристалла NaCl, если плотность  $\rho$  кристалла равна  $2,17 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

### Задача 4.

Система плоскостей в примитивной кубической решетке задана индексами Миллера (221). Найти наименьшие отрезки, отсекаемые плоскостью на осях координат, и изобразить эту плоскость графически.

### Задача 5.

Вычислить угол  $\varphi$  между нормальными к плоскостям (в кубической решетке), заданных индексами Миллера (111) и (111).

### **Занятие 3. Фазовая структура вещества**

**Цель:** Определение фазовой структуры металлов и сплавов.

Студентами делаются доклады следующим темам:

1. Связь между структурой и свойствами сплавов.
2. Процесс кристаллизации расплавов металлов.
3. Твердые растворы замещения.
4. Твердые растворы внедрения.

Проводиться контрольная работа по предыдущим темам.

## Занятие 4. Тепловые свойства вещества

**Цель:** научиться определять количество теплоты, теплоемкость и энергию материалов.

### Задача 1.

Определить максимальную частоту  $\omega_{\max}$  собственных колебаний в кристалле золота по теории Дебая. Характеристическая температура  $\theta_D$  равна 180 К.

### Решение:

Характеристическая температура Дебая находится по формуле:

$$\theta_D = \frac{\hbar \omega_{\max}}{k}$$

Отсюда максимальная частота

$$\omega_{\max} = \frac{k\theta_D}{\hbar} = 2,4 * 10^{13} \text{ Гц}$$

### Задача 2.

Молярная теплоемкость кристалла с одномерной решеткой выражается формулой  $C_m = 3R$  [...]. Найти предельное выражение молярной теплоемкости кристалла при низких температурах ( $T \ll \theta_D$ ).

### Задача 3.

Определить количество теплоты  $\Delta Q$ , необходимое для нагревания кристалла NaCl массой  $m=20$  г на  $\Delta T=2$  К, в двух случаях, если нагревание происходит от температуры: 1)  $T_1=\theta_D$ ; 2)  $T_2=2$  К. Характеристическую температуру Дебая  $\theta_D$  для NaCl принять равной 320 К.

### Задача 4.

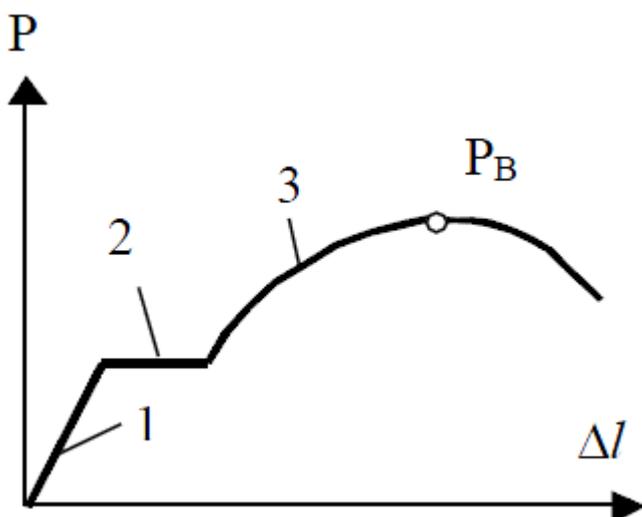
Определить энергию  $U$  и теплоемкость  $C$  системы, состоящей из  $N=10^{25}$  классических трехмерных независимых гармонических осцилляторов. Температура  $T=300$  К.

## Занятие 5. Ползучесть и пластическая деформация вещества.

**Цель:** определение закономерности изменения свойств вещества в зависимости от состава и температуры.

### Задача 1.

Указать какие изменения происходят в микроструктуре металла образца при растяжении соответственно на участках 1,2,3 и в точке  $P_B$  (она же  $P_{max}$ ) диаграммы.



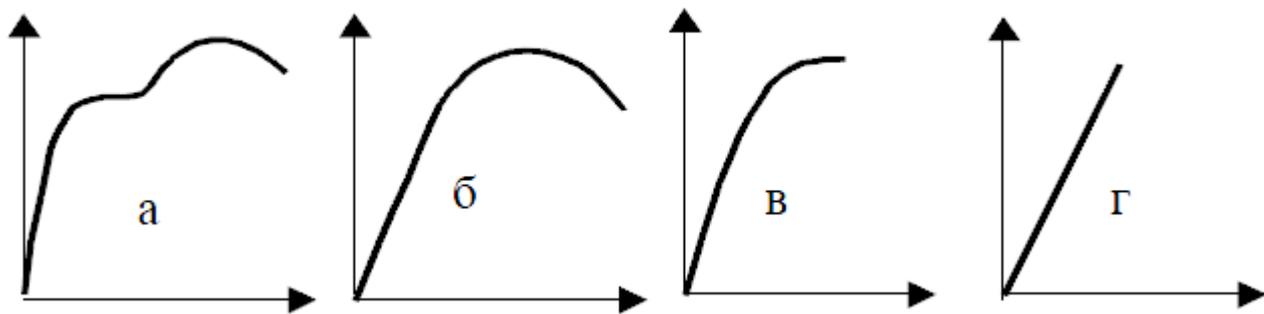
Какие прочностные свойства металла определяют при испытании растяжением? В чем различие при обработке результатов испытания образцов из низко – и высокоуглеродистой стали?

### Задача 2.

Какие пластические свойства металла определяют при испытании растяжением? Как влияют абсолютные размеры образцов на численные значения характеристик пластичности?

Обоснуйте свою точку зрения.

### Задача 3.



Какая из приведённых диаграмм растяжения соответствует наиболее хрупкому материалу? Из какого материала, по Вашему мнению, целесообразно изготавливать детали, работающие в условиях растяжения, сжатия, интенсивного изнашивания?

Обоснуйте свою точку зрения.

### Задача 4.

Нарисуйте схематично кривые растяжения двух металлов:

- а) с одинаковой прочностью, но с разной пластичностью;
- б) с одинаковой пластичностью, но с разной прочностью.

В качестве показателя пластичности принять абсолютное удлинение.

## **Занятие 6. Свойства сегно- и пьезоэлектриков**

*Цель:* Определение основных параметров сегнето- и пьезоэлектриков и установление закономерности изменения их от частоты и температуры.

Студентами делаются доклады следующим темам:

1. Фазовый переход в сегнетоэлектриках
2. Сегнетоэлектричество
3. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах
4. Пьезоэлектрический эффект
5. Пьезокерамика и перспективы ее применения.

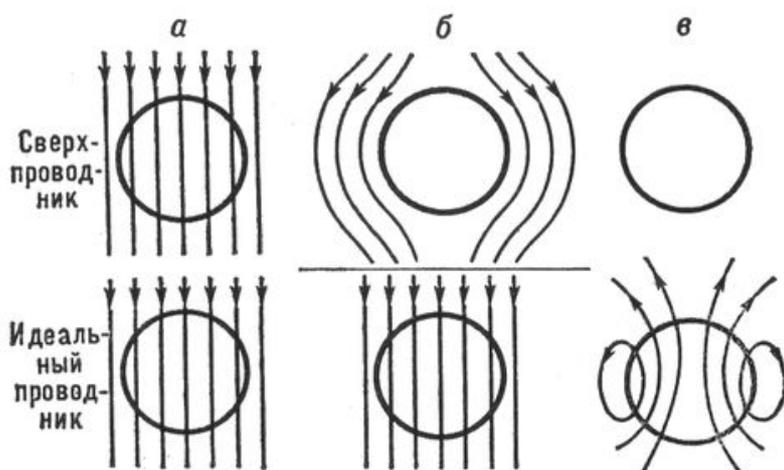
Проводится контрольная работа по предыдущим темам.

## Занятие 7. Сверхпроводимость материалов.

**Цель:** определение температуры для различных материалов, при которой наблюдается сверхпроводимость.

### Задача 1.

На рисунке (а, б, в), на котором схематически изображено распределение поля вблизи односвязного металлического образца, определите какой из рисунков (а, б, в) соответствует:



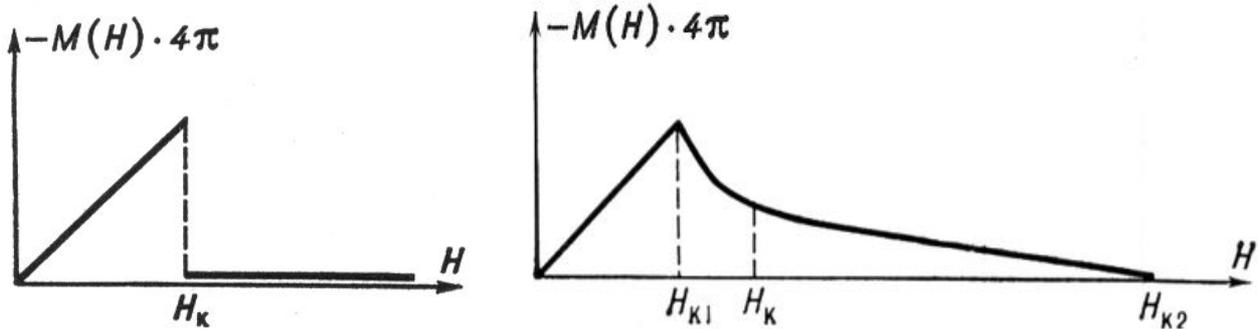
1) образец находится в нормальном состоянии, внешнее поле свободно проникает в глубь металла;

2) образец охлаждается ниже  $T_c$ , магнитное поле выталкивается из сверхпроводника (верхний рисунок), тогда как в случае идеального проводника распределение поля оставалось бы неизменным (нижний рисунок);

3) внешнее поле выключается, при этом исчезает и намагниченность сверхпроводника.

### Задача 2.

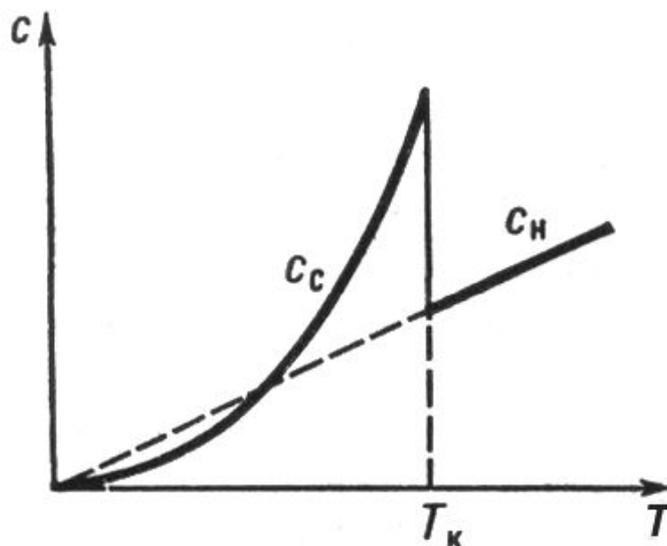
На рисунках представлены кривые фазового перехода для проводников 1го и 2го рода.



Определите какой рисунок иллюстрирует наблюдаемый скачок для какого проводника. Опишите различие количественных и качественных характеристик этих двух проводников.

### Задача 3.

На рисунке изображен скачок теплоёмкости сверхпроводника в точке перехода ( $T_k$ ) в отсутствие внешнего магнитного поля ( $C_s$  и  $C_n$  — теплоёмкость в сверхпроводящем и нормальном состояниях).



Какой формулой определяется угол наклона кривой из сверхпроводящего состояния в нормальное? Как называется такой переход? От чего зависит угол наклона этой кривой?

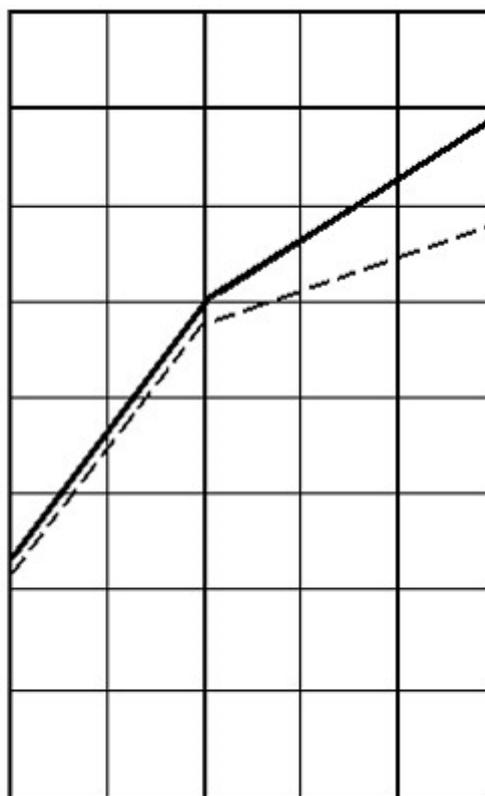
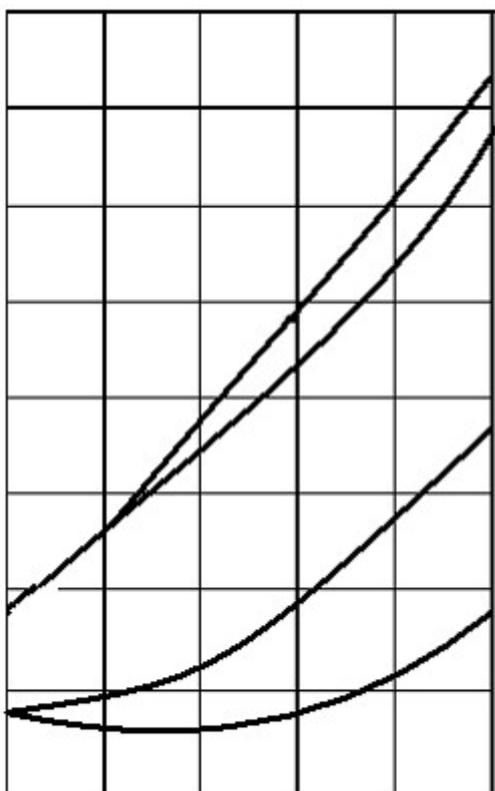
## Занятие 8. Свойства полупроводниковых материалов.

**Цель:** определение основных диэлектрических параметров пассивных диэлектриков и установление закономерности их изменения от температуры и частоты.

### Задача 1.

Какой тип подвижных носителей электроны или дырки у следующих веществ: Si, Ga, GaAs, GaP. С чем это связано и как тип носителей влияет на свойства полупроводников.

### Задача 2.



На рисунке изображены зависимость ширины запрещенной зоны от состава твердых растворов на основе соединений АПВV ( $T=300\text{K}$ ). По графику определите в каком случае

- 1) соединения-партнеры имеют одинаковую зонную структуру;
- 2) соединения-партнеры имеют различную зонную структуру.

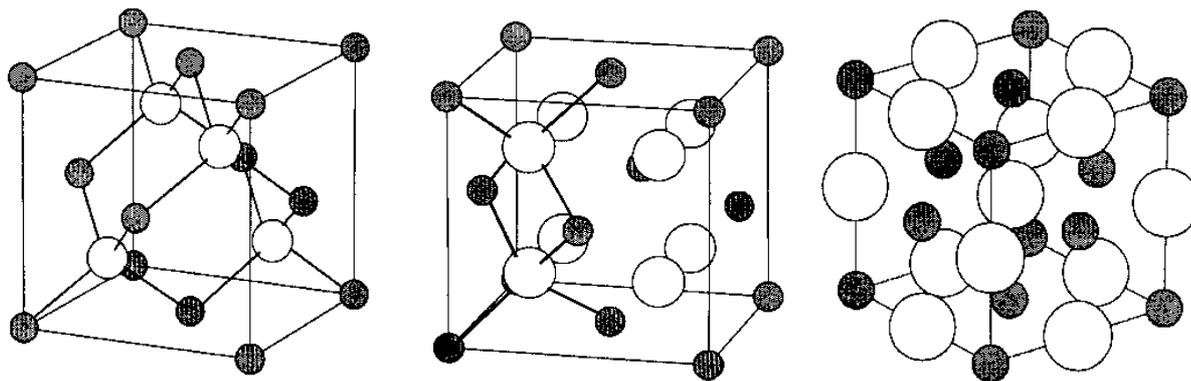
### Задача 3.

Полупроводники делятся на 3 типа: нормально-валентные:  $b=0$ ,  $(eA+eX)/m=8$ , полианионные :  $b \neq 0$ ,  $(eA+eX)/m+b=8$ , поликатионные :  $b \neq 0$ ,  $(eA+eX)/m-b=8$ .

Определите к каким типам относятся следующие вещества: GaAs, InP, InSb), CdSb, CoAs<sub>3</sub>, KGe, GaTe.

### Задача 4.

На рисунках представлены 3 вида кристаллических решеток полупроводников 3 типов (ZnS, CaF<sub>2</sub>, NaCl). Определите какому элементу какая решетка соответствует. Ответ обоснуйте.



## Занятие 9. Магнитные свойства материаловедения

**Цель:** определение основных параметров ферро- и ферромагнитных материалов и установление закономерностей применения их в переменных магнитных полях и от температуры.

### Задача 1.

Определить концентрацию  $n$  свободных электронов в металле при температуре  $T=0$  К. Энергию Ферми  $\epsilon$  принять равной 1 эВ.

### Решение

Уровень Ферми в металле при температуре  $T=0$  определяется по формуле:

$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{\frac{2}{3}}$$

Здесь  $m$ -масса электрона,  $E_F$ -элементарному заряду,  $\hbar$ -постоянная планка, деленная на  $2\pi$ . Если выразить отсюда  $n$  и подставить все данные, то

$$n = \frac{1}{3\pi^2} \left( \frac{2mE_F}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 4,54 * 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

### Задача 2.

Собственный полупроводник (германий) имеет при некоторой температуре удельное сопротивление  $\rho=0,48 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Определить концентрацию  $n$  носителей заряда, если подвижности  $b_n$  и  $b_p$  электронов и дырок соответственно равны 0,36 и 0,16  $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .

### Решение :

Удельную проводимость можно найти по формуле:

$$\gamma = qn(b_n + b_p)$$

С другой стороны  $\gamma = \frac{1}{\rho}$

Тогда объединив две формулы и подставив данные из задачи, получим:

$$n = \frac{\gamma}{q(b_n + b_p)} = \frac{1}{\rho q(b_n + b_p)} = 2,5 * 10^{19} \text{ м}^{-3}$$

### Задача 3.

Образец из германия n-типа в виде пластины длиной  $L=10$  см и шириной  $l=6$  мм помещен в однородное магнитное поле ( $B=0,1$  Тл) перпендикулярно линиям магнитной индукции. При напряжении  $U=250$  В, приложенном к концам пластины, возникает холловская разность потенциалов  $U_H=8,8$  мВ. Определить: 1) постоянную Холла  $R_H$ ; 2) концентрацию  $n_n$  носителей тока. Удельную проводимость  $\gamma$  германия принять равной  $80$  См/м.

### Задача 4.

Образец из вещества, содержащего эквивалентные ядра (протоны), находится в однородном внешнем магнитном поле ( $B=1$  Тл). Определить: 1) относительную разность заселенностей энергетических уровней при температуре  $T=300$  К; 2) частоту  $\nu_0$ , при которой будет происходить ядерный магнитный резонанс. Экранирующим действием электронных оболочек и соседних ядер пренебречь.

### Задача 5.

Удельная проводимость  $\gamma$  кремния с примесями равна  $112$  См/м. Определить подвижность  $b_p$  дырок и их концентрацию  $n_p$ , если постоянная Холла  $R_H=3,66*10^{-4}$  м<sup>3</sup>/Кл. Принять, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью.

## Приложение №1. Типы химической связи.

**Химическая связь** — явление взаимодействия атомов, обусловленное перекрыванием электронных облаков связывающихся частиц, которое сопровождается уменьшением полной энергии системы.

Типы химической связи:

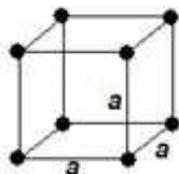
**1. Металлическая связь** — химическая связь, обусловленная наличием относительно свободных электронов. Характерна как для чистых металлов, так и их сплавов и интерметаллических соединений.

**2. Ковалентная связь** (атомная связь, гомеоплярная связь) — химическая связь, образованная перекрытием (обобществлением) пары валентных электронных облаков. Обеспечивающие связь электронные облака (электроны) называются *общей электронной парой*. Бывает полярной, неполярной, семиполярной.

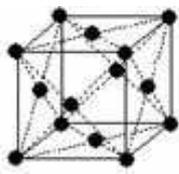
**3. Ионная связь** — прочная химическая связь, образующаяся между атомами с большой разностью ( $>1,7$  по шкале Полинга) электроотрицательностей, при которой общая электронная пара полностью переходит к атому с большей электроотрицательностью. Это притяжение ионов как разноименно заряженных тел. Примером может служить соединение CsF, в котором «степень ионности» составляет 97 %.

**4. Ван-дер-ваальсова связь** — силы межмолекулярного взаимодействия с энергией 0,8 — 8,16 кДж/моль. Этим термином первоначально обозначались все такие силы, но сейчас он обычно применяется к силам, возникающим при поляризации молекул и образовании диполей.

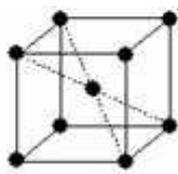
## Приложение 2. Типы кристаллических решеток.



Простая (примитивная)

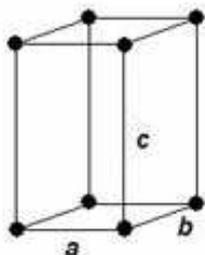


Гранецентрированная

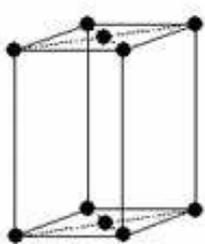


Объемноцентрированная

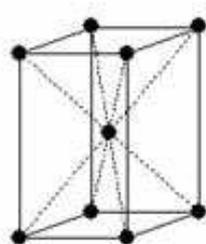
### Кубические решетки



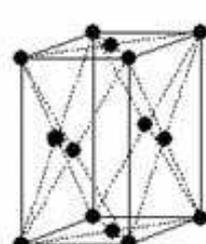
Простая (примитивная)



Базоцентрированная

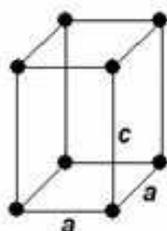


Объемноцентрированная

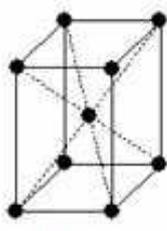


Гранецентрированная

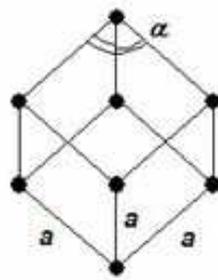
### Ромбические решетки



Простая (примитивная)

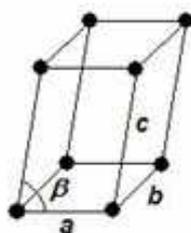


Объемноцентрированная

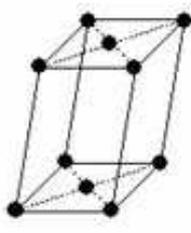


Простая (примитивная)

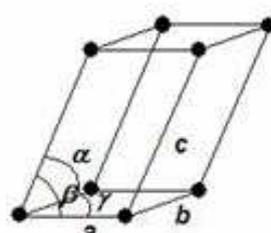
### Тетрагональные решетки



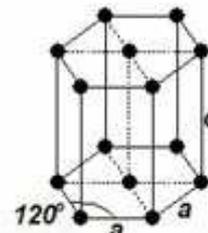
Простая (примитивная)



Базоцентрированная



Простая (примитивная)



Базоцентрированная

### Моноклинные решетки

### Ромбодрическая (тригональная) решетка

### Триклинная решетка

### Гексагональная решетка

## **Приложение 3. Примерный список итоговых тестовых заданий по предмету**

### **1. Молярная теплоёмкость кристалла при НИЗКИХ температурах**

- Не зависит от температуры и равна  $3R$
- Пропорциональна температуре
- Изменяется как квадрат температуры
- Изменяется как куб температуры

### **2. Сопротивление кристаллических проводников определяется**

- Рассеянием электронов на узлах кристаллической решётки
- Рассеянием электронов на неоднородностях кристаллической решётки
- Взаимодействием с дырками валентной зоны

### **2. Модель Дебая состоит в:**

- Представлении акустических волн в кристаллической решётке в виде идеального газа фононов
- Линеаризации дисперсионной зависимости  $\omega(k)$
- Ограничении максимальной частоты волн в кристаллической решётке значением, соответствующей температуре Дебая.

### **3. Число атомов, приходящееся на элементарную объёмно-центрированную ячейку кристалла, равно**

- Один
- Два
- Восемь
- Девять

### **4. Молярная теплоёмкость кристалла при ВЫСОКИХ температурах**

- Не зависит от температуры и равна  $3R$
- Пропорциональна температуре
- Изменяется как квадрат температуры
- Изменяется как куб температуры

**5. Физический смысл температуры Дебая:**

- Температура, при которой в кристалле возбуждаются фононы
- Температура, при которой энергетический спектр фононов начинает сказываться на теплоёмкости кристалла
- Температура, соответствующая максимально возможной энергии фононов
- Температура, соответствующая энергии Ферми в кристалле

**6. Фононы подобны фотонам, так как у них одинаковы (отметьте что):**

- Степень вырождения (количество возможных поляризаций).
- Статистика заполнения разрешённых состояний
- Максимальная частота.
- Скорость.

**7. Сопротивление примесного полупроводника n-типа при  $T=0$  К**

- Равно нулю
- Равно бесконечности
- Зависит от концентрации примеси
- Зависит от положения уровня Ферми

**8. Электронная теплоёмкость металлов при низких температурах**

- Пропорциональна  $T$
- Пропорциональна  $T^2$
- Пропорциональна  $T^3$
- Постоянна и не зависит от температуры

## **9. Электронная теплоёмкость металлов при комнатной температуре**

- Равна половине теплоёмкости решётки
- Равна теплоёмкости решётки согласно закону Делонга-Пти
- Много меньше теплоёмкости решётки
- Пропорциональна  $T^3$

## **10. Где расположена энергия Ферми у собственных полупроводников**

- Вблизи валентной зоны
- Вблизи зоны проводимости
- Вблизи середины запрещённой зоны
- Вблизи примесного уровня

## **11. Полупроводники**

- При нормальных температурах проводят электрический ток, а при низких являются изоляторами
- Выталкивают из себя магнитное поле при низких температурах
- Проводят ток только в одном направлении
- При нормальных температурах являются изоляторами

## **12. С увеличением температуры сопротивление полупроводников**

- Увеличивается
- Уменьшается
- Не изменяется
- Зависит от типа полупроводника

## **13. В сверхпроводниках типа свинца электроны связываются в куперовские пары**

- Посредством обмена виртуальными фотонами

- Посредством обмена виртуальными фононами
- За счёт магнитного взаимодействия электронных спинов
- Посредством обмена парой экситонов

**15. Средняя энергия  $E$ , приходящаяся на один электрон в металле при  $T=0$  равна**

- $E = 3kT/2$
- $E = E_F$  (где  $E_F$  - энергии Ферми)
- $E = 3E_F/5$  (где  $E_F$  - энергии Ферми)
- $E = 5E_F/3$  (где  $E_F$  - энергии Ферми)

**16. Какое из нижеприведённых утверждений является ложным:**

- В присутствии магнитного поля сверхпроводник ведёт себя как идеальный диамагнетик
- Существует критическое магнитное поле, разрушающее сверхпроводимость
- В случае сверхпроводника 2-го рода магнитное поле проникает в образец в виде отдельных нитей, окружённых линиями тока.
- Аномальные магнитные свойства сверхпроводника 2-го рода можно качественно объяснить, если принять, что его поверхностная энергия положительна.
- Существует критический ток, разрушающий сверхпроводимость

**17. Перекрытие валентной зоны и пустой зоны проводимости характерно для**

- Полупроводника
- Металла
- Диэлектрика
- Сверхпроводника

**18. Удельная проводимость металлов описывается формулой  $s = en\mu$ , где  $\mu$  – подвижность электронов. Что в данном случае  $n$ ?**

- Полная концентрация электронов в металле:  $n = n_0$

- Концентрация неспаренных электронов вблизи поверхности Ферми:  $n = (3kT/\mu)n_0$ , где  $\mu$  - энергия Ферми
- Концентрация электронов в зоне проводимости.