

# Свойства твердых тел

# Твердые тела

```
graph TD; A[Твердые тела] --> B[Кристаллы]; A --> C[Аморфные]; B --> D[Монокристаллы]; B --> E[Поликристаллы]; B --> F[Жидкие кристаллы];
```

**Кристаллы**

**Аморфные**

**Жидкие кристаллы**

**Поликристаллы**

**Монокристаллы**

# **Аморфные твердые тела**

- Не имеют кристаллической решетки**
- Не имеют температуры плавления**
- Изотропны**
- Обладают текучестью**
- Имеют только ближний порядок**
- Способны переходить в кристаллическое и жидкое состояние**
- Обладают текучестью**
- Имеют только ближний порядок**
- Способны переходить в кристаллическое и жидкое состояние**

# Кристаллические твердые тела

Кристаллическое строение, кристаллическая решетка

Имеют температуру плавления,  $t_{\text{плавления}} = \text{const}$

Медь,  $t_{\text{плавления}} = 1083^{\circ}\text{C}$ ; Цинк,  $t_{\text{плавления}} = 420^{\circ}\text{C}$

Алюминий,  $t_{\text{плавления}} = 600^{\circ}\text{C}$

Кремний,  $t_{\text{плавления}} = 1414,85^{\circ}\text{C}$  (1688 K)

Анизотропны



***Кристалл турмалина***



**Поликристаллический  
кремний**



**Монокристалл  
кремния**

# **Типы кристаллической решетки.**

**1. Ионные (NaCl)**

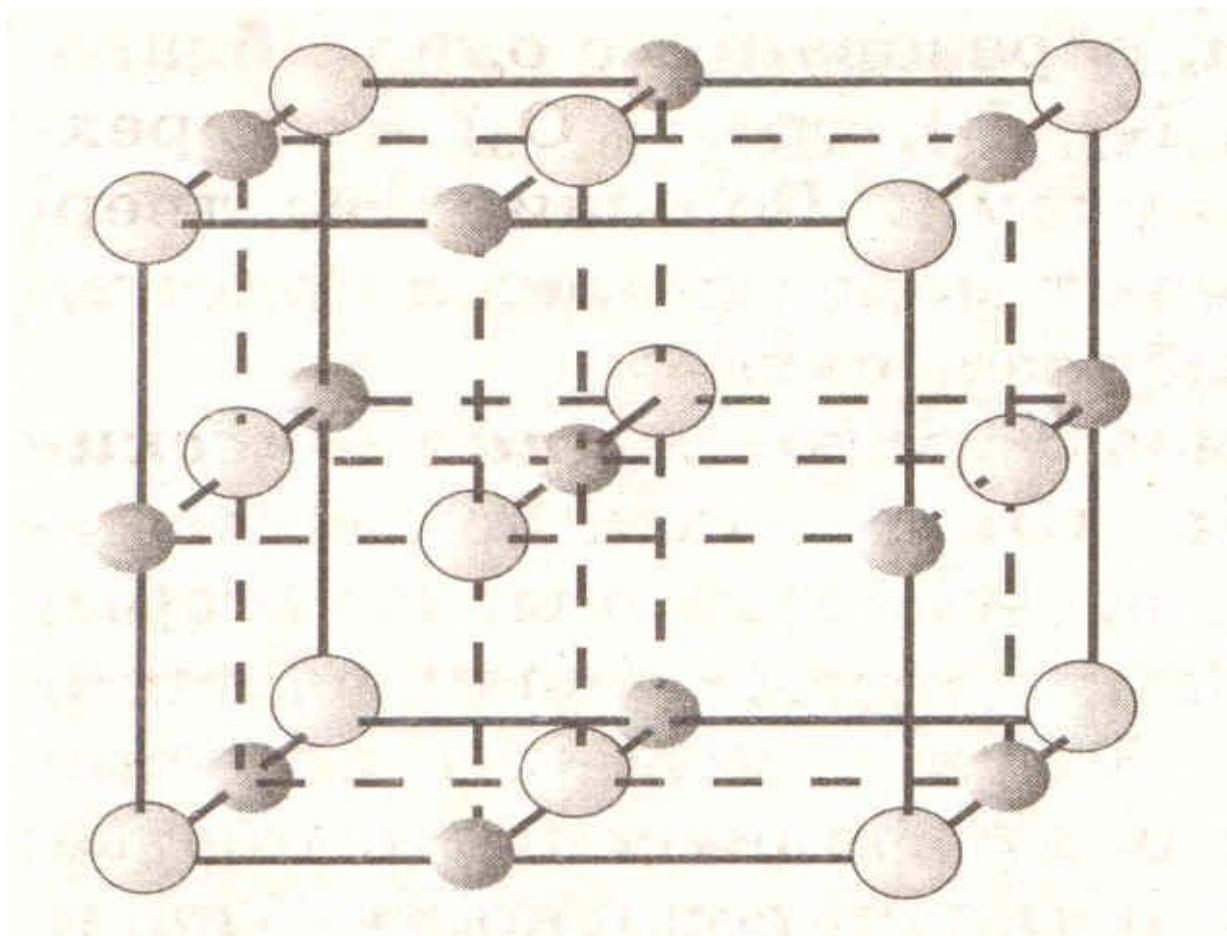
**2. Молекулярные (нафталин, парафин)**

**3. Атомные (графит, алмаз)**

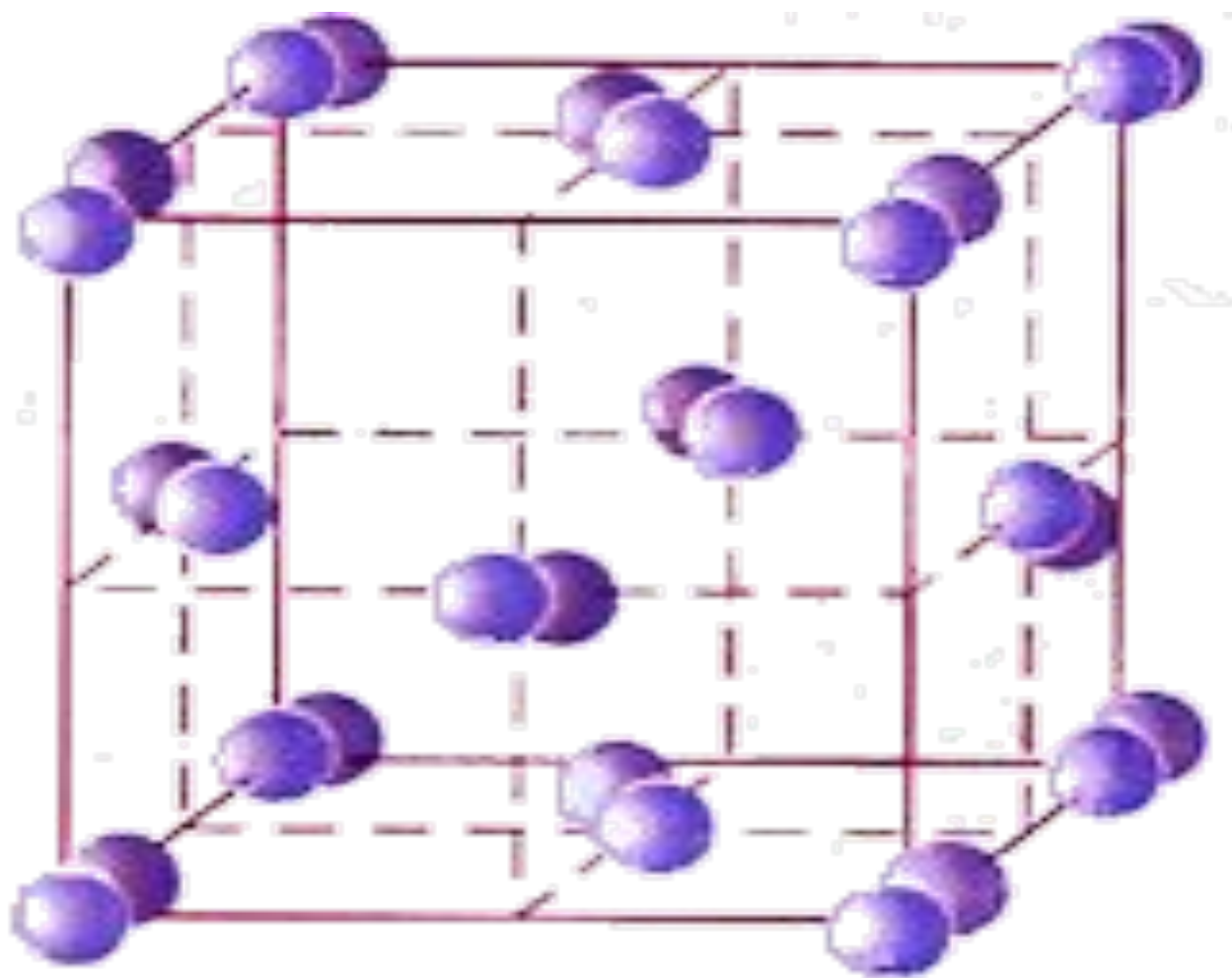
**4. Металлические (металлы)**

# Типы кристаллов

# Ионная кристаллическая решётка

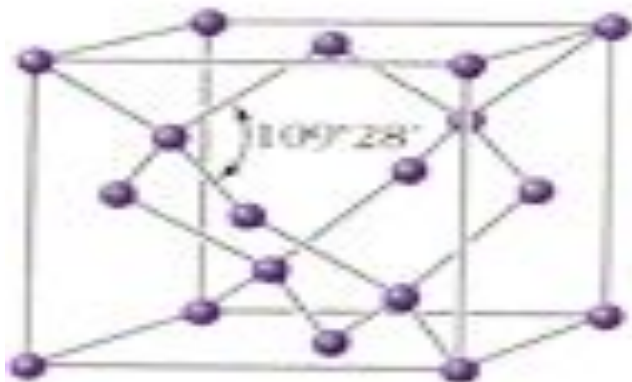
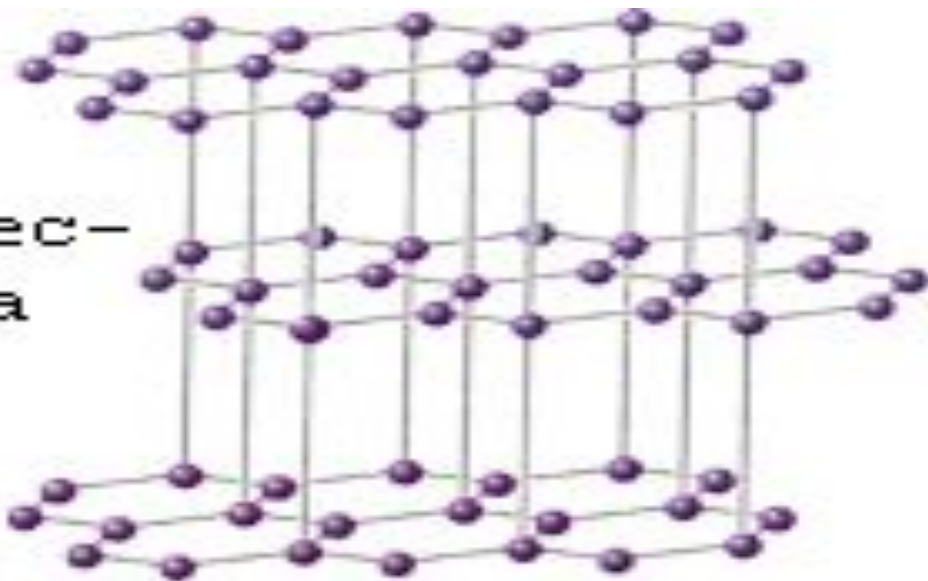


# Молекулярная кристаллическая решётка



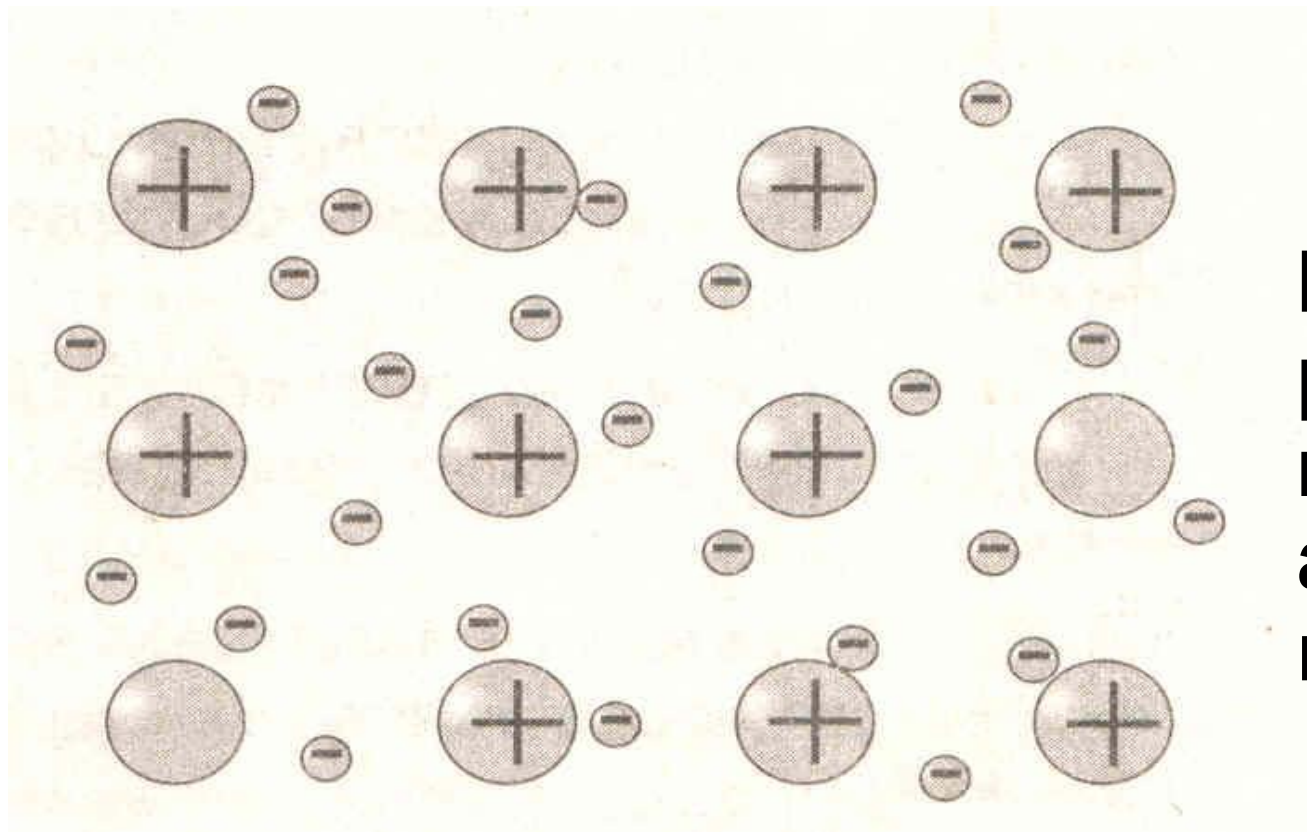
# Атомная кристаллическая решётка

Кристаллическая  
решётка  
графита



Кристаллическая  
решётка алмаза

# Металлическая кристаллическая решётка



**В узлах  
решётки  
находятся  
атомы и ионы  
металла**

Положение элементов в Периодической  
системе Д. И. Менделеева и типы  
кристаллических решеток  
их простых веществ

Таблица 6

| Период                                 | Г р у п п а   |    |     |    |                |                |                   |      |
|----------------------------------------|---------------|----|-----|----|----------------|----------------|-------------------|------|
|                                        | I             | II | III | IV | V              | VI             | VII               | VIII |
| I                                      |               |    |     |    |                |                | H <sub>2</sub>    | He   |
| II                                     | Li            | Be | B   | C  | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | F <sub>2</sub>    | Ne   |
| III                                    | Na            | Mg | Al  | Si | P <sub>4</sub> | S <sub>8</sub> | Cl <sub>2</sub>   | Ar   |
| IV                                     | K             | Ca | Ga  | Ge | As             | Se             | Br <sub>2</sub>   | Kr   |
| V                                      | Rb            | Sr | In  | Sn | Sb             | Te             | I <sub>2</sub>    | Xe   |
| Тип<br>кристал-<br>лической<br>решетки | Металлическая |    |     |    | Атомная        |                | Моле-<br>кулярная |      |

# Сравнительная характеристика

## Алмаз

Необычайно твердый

Прозрачный

Не проводит электрический ток  
(диэлектрик)

Имеет большую теплопроводность

Обработанные алмазы- брильянты

## Графит

Мягок (легко расщепляется)

Непрозрачен

Электропроводен  
(изготавливают электроды)

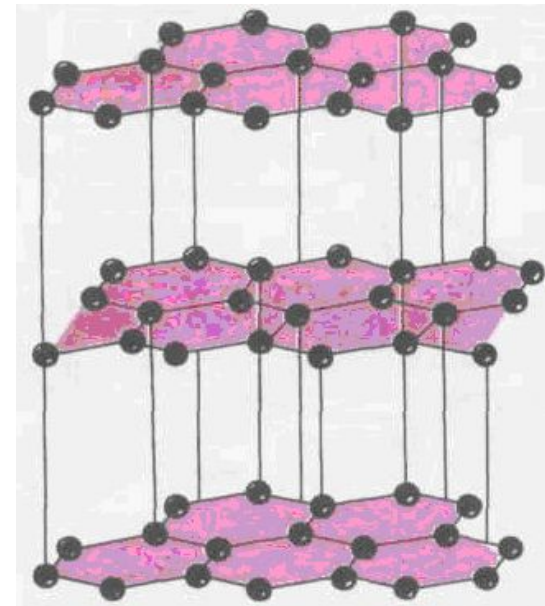
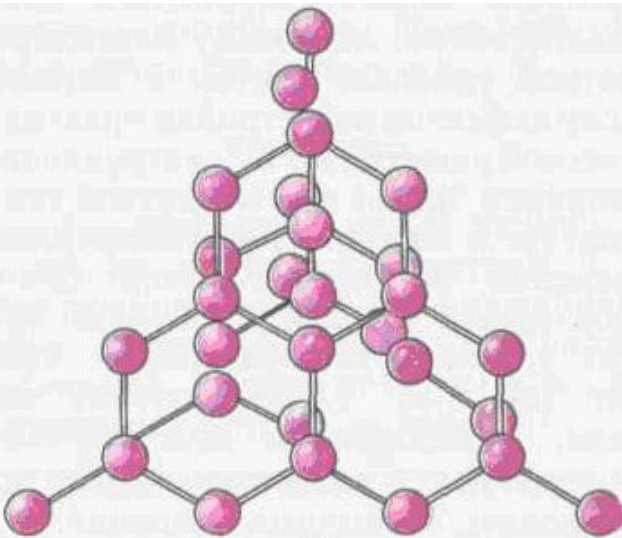
Жаропрочен

Не похож на драгоценный  
камень

Перестроение  
кристаллической решетки

$P=10\text{ ГПа}$

$t=2000^{\circ}\text{C}$



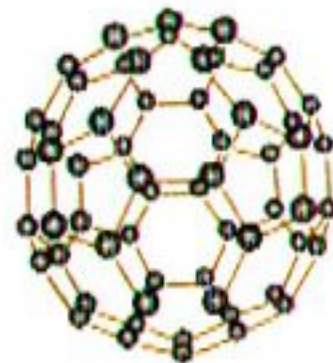
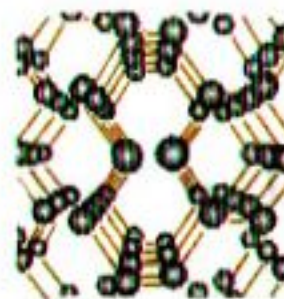
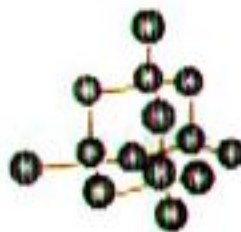
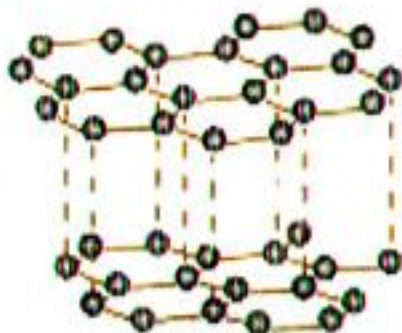
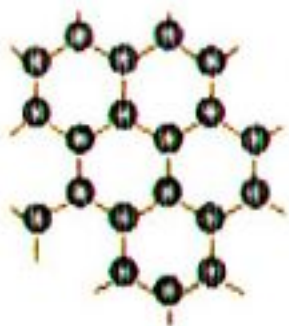
# Полиморфизм-существование различных кристаллических структур у одного и того же вещества

*Кристаллические структуры аллотропных модификаций углерода: а — графит, б — алмаз, в — фуллерен*

а

б

в



Один слой  
атомов  
углерода

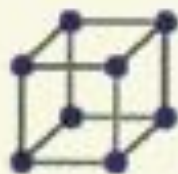
Взаимное  
расположение  
слоев

Малая  
часть  
структуры

Большая  
часть  
структуры

Фуллерен

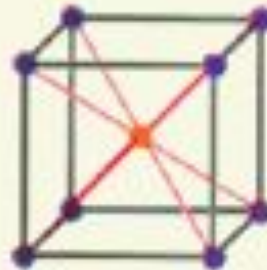
# Виды решеток



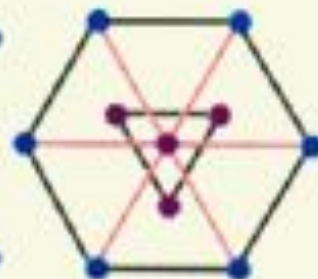
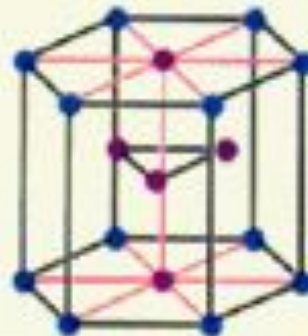
(1)



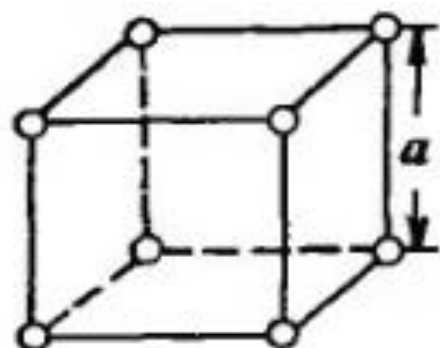
(2)



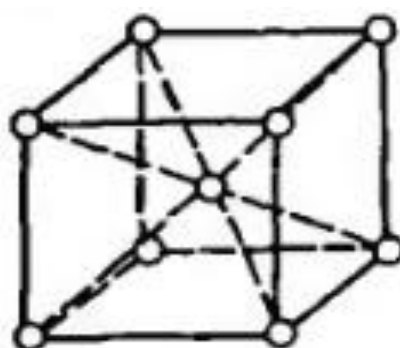
(3)



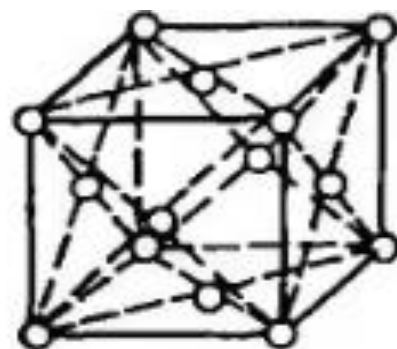
(4)



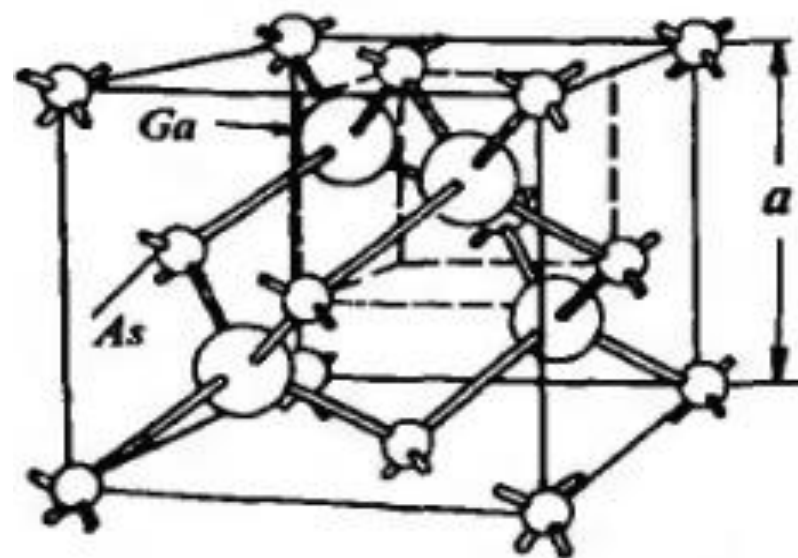
Простая  
кубическая  
(Р и т.д.)



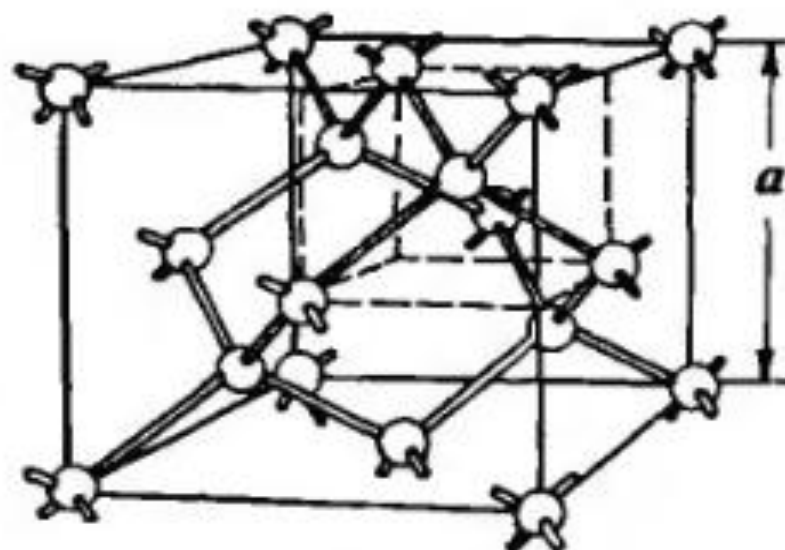
Объемноцен-  
трированная  
кубическая  
(Na, W и т.д.)



Гранецентри-  
рованная  
кубическая  
(Al, Au и т.д.)



Ячейка  
цинковой обманки  
(GaAs, GaP и т.д.)



Ячейка  
алмаза  
(C, Ge, Si и т.д.)

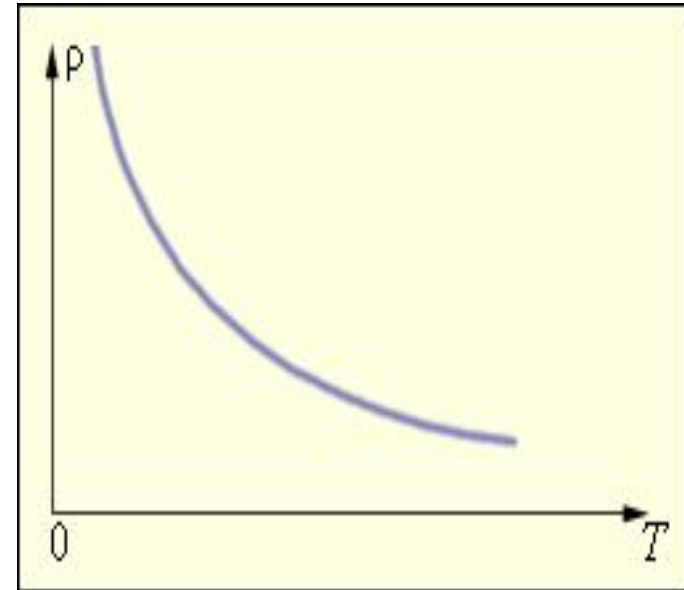
# **Физические свойства кристаллов.**

- 1. Механическая прочность**
- 2. Теплопроводность**
- 3. Электропроводность**
- 4. Оптические свойства**

***Свойства кристаллических веществ  
определяются структурой кристаллической  
решетки.***

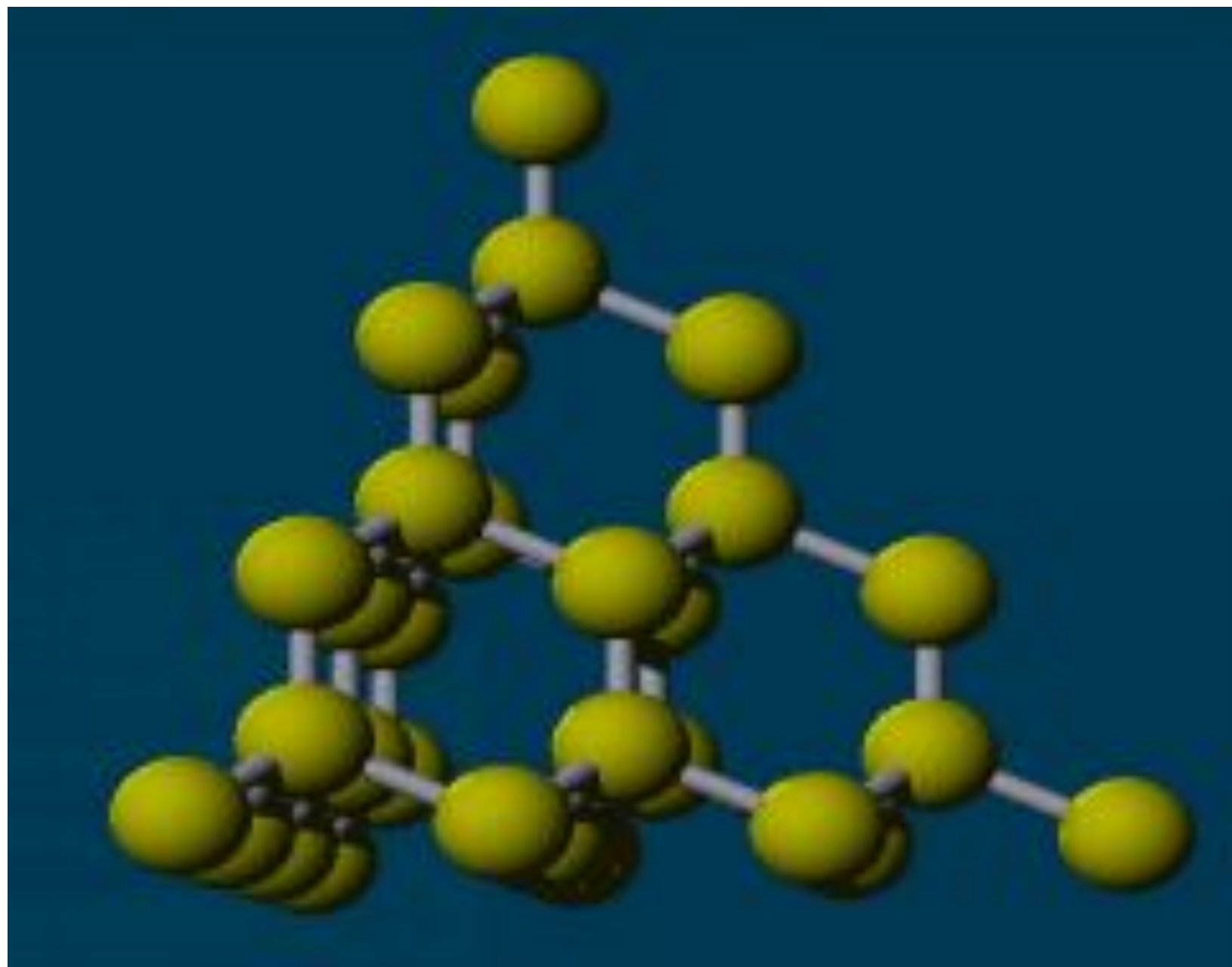
**Полупроводниками называются вещества, удельное сопротивление которых может изменяться в широких пределах и очень быстро убывает с повышением температуры.**

**Это означает, что электрическая проводимость увеличивается с повышением температуры. Полупроводники - кремний, германий, селен и соединения A3B5 или A2B6.**



**Кристаллы полупроводников имеют атомную кристаллическую решетку, где внешние электроны связаны с соседними атомами ковалентными связями.**

**При низких температурах у чистых полупроводников свободных электронов нет и он ведет себя как диэлектрик.**



# Удельная электрическая проводимость при комнатной температуре

|                |                                                       |
|----------------|-------------------------------------------------------|
| Металлы        | $10^6 - 10^4 \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$         |
| Полупроводники | $10^3 - 10^{-9} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$      |
| Диэлектрики    | $10^{-10} - 10^{-22} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$ |

Величина удельной электропроводности  $\sigma$  может быть определена из закона Ома в дифференциальной форме:

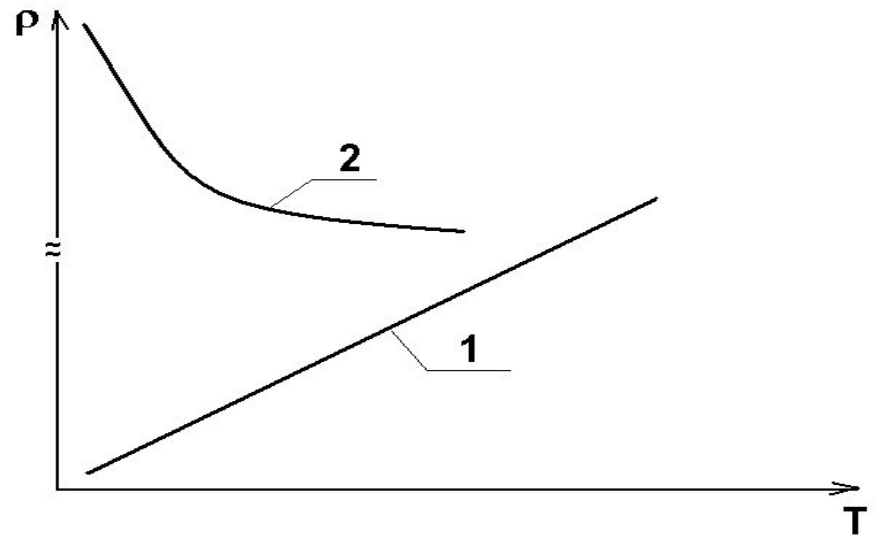
$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

где

$\vec{j}$  - вектор плотности электрического тока, а

$\vec{E}$  - вектор напряженности электрического поля.

**При увеличении температуры сопротивление металлов растёт по линейному закону в широком диапазоне температур, а для полупроводников с ростом температуры сопротивление быстро уменьшается по экспоненциальному закону**



**1 – металлы**

**2 - полупроводники**

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{k_0 T}\right)$$

$\sigma_0$  - значение электропроводности при некоторой температуре, задаваемой началом температурного интервала.

$k_0$  - постоянная Больцмана,  
 $T$  – абсолютная температура,

Величина энергии активации проводимости для полупроводников

$$\Delta E_a$$

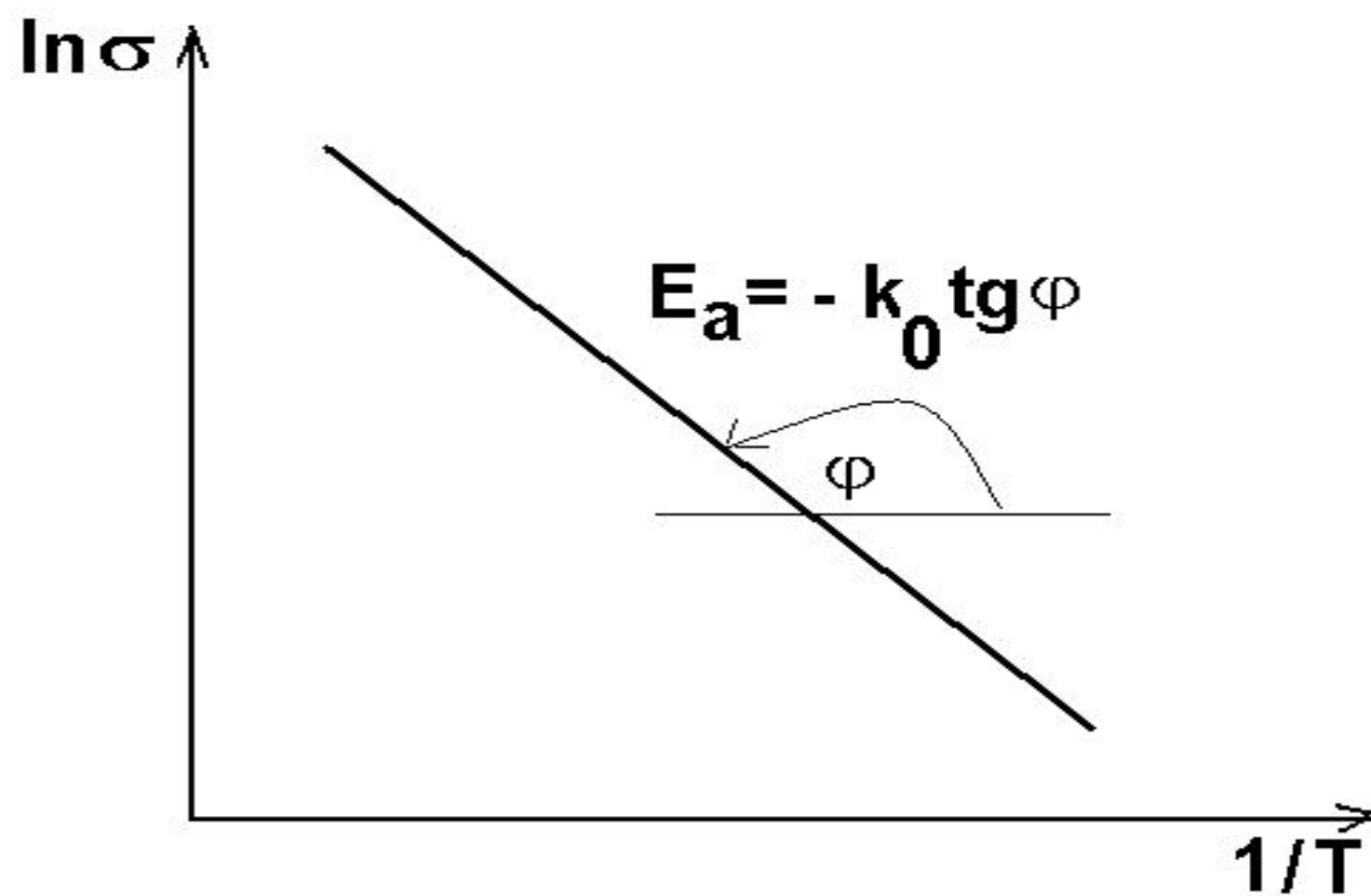
$$\Delta E_a = -k_0 \frac{d[\ln \sigma(T)]}{d(1/T)}$$

# Построение графика температурной зависимости проводимости

$$\ln \sigma = f(1/T)$$

дает прямую линию, тангенс угла наклона которой к оси абсцисс, умноженный на  $(-k_0)$

дает энергию активации проводимости



Если температура низкая, то

$$k_0 T \ll \Delta E_a$$

Это означает, что проводимость настолько малая величина, что данный полупроводник в этих условиях становится диэлектриком. Поэтому энергия активации проводимости представляет собой некоторую пороговую (критическую) величину для термической активации проводимости.

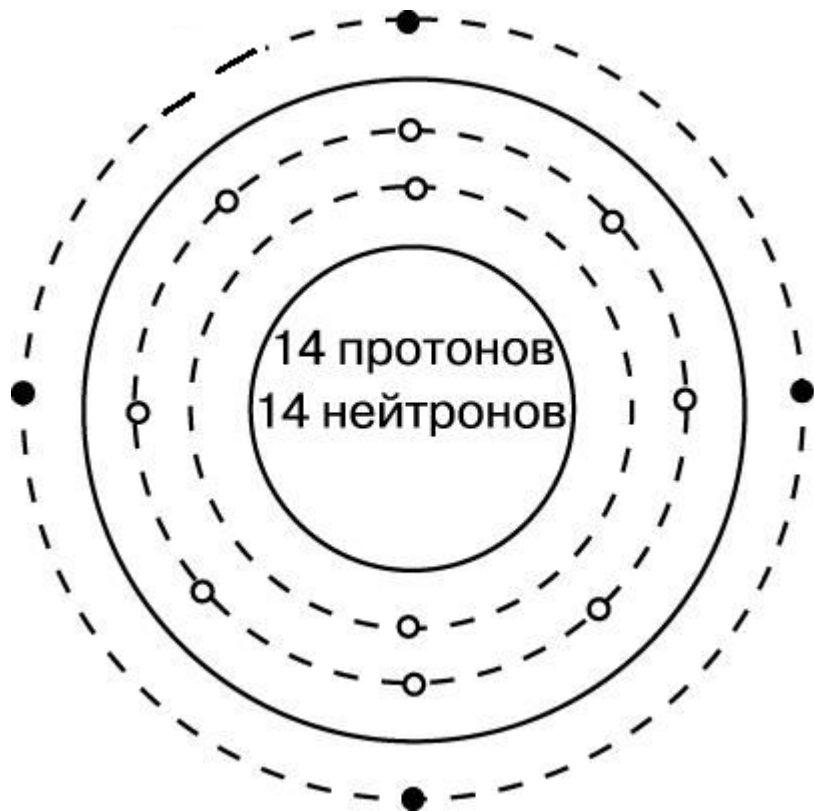
**Электропроводность** - это свойство переносить электрический ток, который представляет собой поток электронов, поэтому необходимо рассматривать поведение и свойства электронов в твердом теле.

Если приблизить отдельные атомы друг к другу и таким образом получить твердое тело, то его свойства и поведение электронов в нем будут определяться уже иными законами, чем для изолированного атома.

**В кристалле возникают силы взаимодействия между ядрами атомов, между электронами, принадлежащими разным атомам, и между всеми ядрами и всеми электронами.**

**Надо учитывать возможное перекрытие электронных оболочек соседних атомов, поэтому электроны могут оказаться на уровне "чужого" атома, причем такой переход не будет сопровождаться ни потерей, ни приобретением энергии. Электрон, таким образом, будет свободно перемещаться между атомами.**

**Такой возможностью обладают только электроны внешних оболочек (прежде всего валентные электроны).**



## ЭЛЕКТРОННЫЕ ОБОЛОЧКИ

атома кремния.

В образовании химических связей и в процессе проводимости могут участвовать только четыре электрона внешней оболочки (темные кружки), называемые валентными электронами. Десять внутренних электронов (светлые кружки) в таких процессах не принимают участия.

Имея в виду положения квантовой механики о невозможности определения однозначной траектории для электрона, говорят о вероятностном поведении электрона путем задания некоторой функции - волновой функции электрона, которая будет характеризовать вероятность нахождения электрона в момент времени  $t$  в точке пространства, описываемом радиусом-вектором  $\vec{r}$

$$\Psi(\vec{r}, t) = A \exp 2\pi i (\vec{k} \vec{r} - nt)$$

где  $n$  - частота,

$\vec{k}$  - волновой вектор, определяемый  
как  $\vec{k} = \vec{p}/h$

где  $\vec{p}$  - импульс электрона,  $h$  - постоянная  
Планка;  $i$  - в данном случае комплексная  
единица (корень квадратный из минуса  
единицы).

**Квадрат амплитуды волновой функции характеризует вероятность нахождения электрона в данной точке пространства, определяемой радиусом-вектором  $\vec{r}$**

Для определения поведения электрона при движении запишем уравнения Шредингера для частицы с одной степенью свободы

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dr^2} \psi(r) - V_0(r) \psi(r) = -E \psi(r)$$

где  $\psi(r)$  - волновая функция электрона,

$V_0(r)$  - потенциальная энергия электрона;  $E$  - полная энергия системы, т.е. ядра и электрона;

$r$  - радиус-вектор электрона.

Задачей теории является отыскание таких допущений, которые позволили бы найти приближенное решение уравнения Шредингера, сохранив его принципиальные черты, отличающие кристалл от отдельного изолированного атома.

Одно из таких приближений - адиабатическое (адиабатическим называется процесс, при котором не происходит обмена энергией с окружающей средой).

$$\psi = \psi_{\text{э}} + \psi_{\text{я}} \quad E = E_{\text{э}} + E_{\text{я}}$$

Следующим шагом к упрощению решения уравнения Шредингера является одноэлектронное приближение. Это приближение предполагает, что рассматривается движение только одного электрона, а все остальные электроны представляют собой некий эффективный заряд, определенным образом распределенный в пространстве.

# Контрольные вопросы

1. Дайте определение твердым телам и их свойствам
2. Назовите типы кристаллических решеток кристаллов
3. Назовите интервал значений удельной электропроводности для металлов, полупроводников и диэлектриков и напишите формулу температурной зависимости проводимости полупроводников.
4. Волновая функция электрона и уравнение Шредингера для частицы с одной степенью свободы.
5. Дайте определение понятиям «адиабатическое приближение» и «одноэлектронное приближение».