

## *Тема 4. Полупроводники. Сверхпроводимость.*

**П.1. Полупроводники.**

**П.2. Примесный полупроводник**

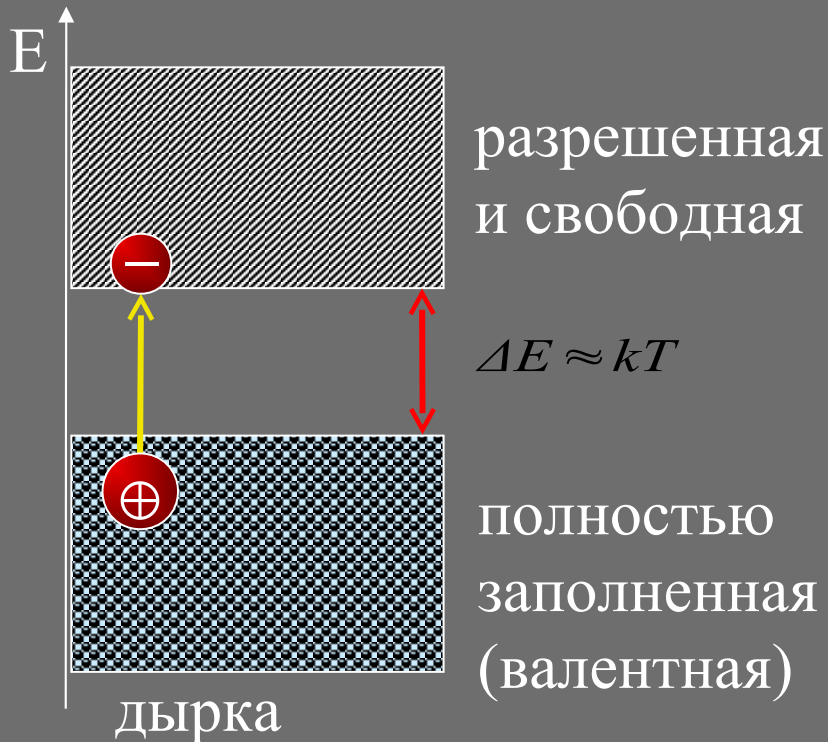
**П.3. Явление сверхпроводимости.**

**П.4. Модель явления сверхпроводимости.**

**П.5. Закономерности сверхпроводимости.**

## П.1. Полупроводники.

Собственным полупроводником называется вещество, у которого верхняя заполненная энергетическая зона полностью заполнена электронами и отделена от выше расположенной разрешенной зоны достаточно узкой запрещенной зоной.



«Дырка» это атом (ион), в котором отсутствует электрон.

Дырки дают доступные уровни энергии, освободившиеся в энергетических зонах.

ТЕСТ

Вопрос: Как влияет температура на электрические свойства собственного полупроводника?

Надо использовать распределение Ферми.

Без вывода запишем формулу для концентрации электронов проводимости при температуре  $T$ :

$$n = n_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E_{запр}}{k(T-T_0)}},$$

где  $n_0$  – концентрация при температуре  $T_0$ .

**ВЫВОД:** при увеличении температуры резко возрастает количество электронов, переходящих из нижней (валентной) зоны в верхнюю (зону проводимости).

Так же ведет себя и проводимость

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E_{запр}}{k(T-T_0)}}.$$

Проводимость полупроводника увеличивается при увеличении температуры, а у проводника уменьшается.

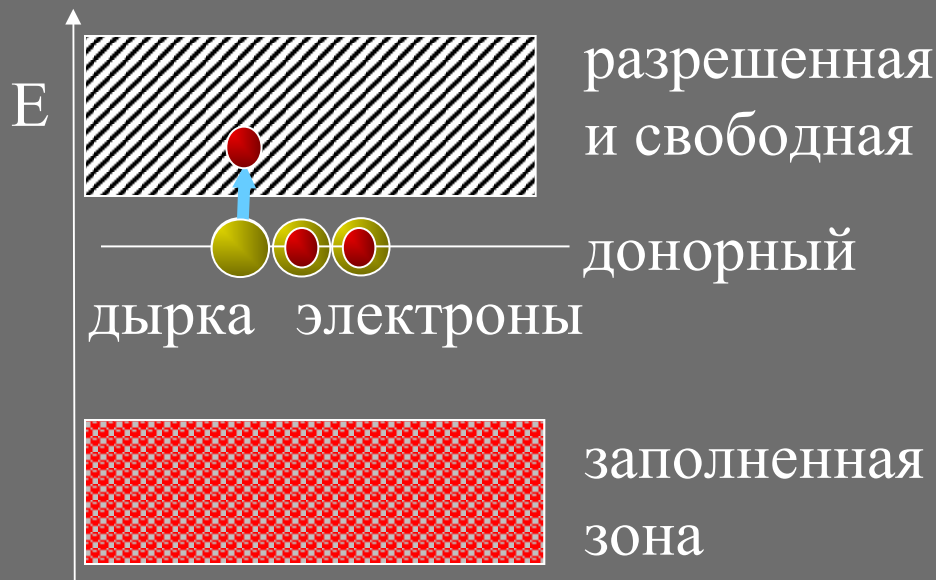
Замечание: Собственный полупроводник это весьма редкое вещество в природе, поскольку оно должно обладать весьма специфическим (особым) свойством его энергетических зон. Пример – германий.

## П.2. Примесный полупроводник

Проблема: Как превратить вещество из диэлектрика в полупроводник?

Идея: Надо добавить примесь, у которой есть особый энергетический уровень.

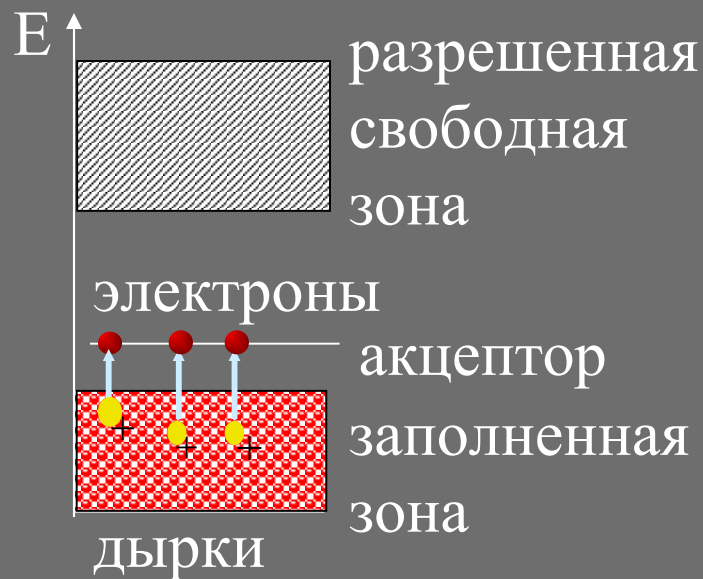
*1. Донорная примесь имеет энергетический уровень, который заполнен электронами и расположен близко к дну свободной разрешенной зоны.*



В результате теплового движения электроны с данного уровня примеси начнут переходить в верхнюю зону, которая станет зоной проводимости.

В полупроводнике с донорной примесью свободными заряженными частицами, переносящими ток, являются электроны, и его проводимость называется электронной (n - типа).

2. Акцепторной называется примесь, имеющая свободный энергетический уровень, расположенный достаточно близко к вершине полностью заполненной зоны основного материала.



Электроны, попавшие на уровень примеси в данном случае двигаться не могут, т.к. над ними расположена широкая запрещенная зона.

В акцепторном полупроводнике носителями тока будут дырки, а проводимость будет называться дырочной (p - типа).

### П.3. Явление сверхпроводимости.

Сверхпроводимость – явление скачкообразного уменьшения (до предельно малых величин) удельного сопротивления вещества при уменьшении его температуры.

До настоящего времени сверхпроводимость наблюдалась только при очень низких температурах  $T < 23,2^\circ\text{K}$ .

Сверхпроводимость была открыта в середине XX века.

Сейчас разрабатываются сверхпроводящие материалы, у которых сверхпроводимость возникала бы при температуре близкой к температуре жидкого азота ( $90^\circ\text{K}$ ).

Эта сверхпроводимость называется теплой, а сверхпроводники – теплыми.

Обычные сверхпроводники – металлы и сплавы.

У металлов температура перехода в сверхпроводящее состояние колеблется от  $0,35^{\circ}\text{K}$  (гафний) до  $9,2^{\circ}\text{K}$  (ниобий).

У сплавов можно добиться более высокой температуры:  $18^{\circ}\text{K}$  (сплав олова и ниобия).

Предполагается наличие сверхпроводимости при более высоких температурах у оксидных соединений. Такие вещества сейчас исследуют.

Пока, для перевода вещества в сверхпроводящее состояние используют жидкий гелий и водород, хотя это дорого и опасно.

Сверхпроводимость является очень полезным явлением, поскольку ее использование позволило бы резко уменьшить тепловые потери при передаче электроэнергии от источников к потребителям.



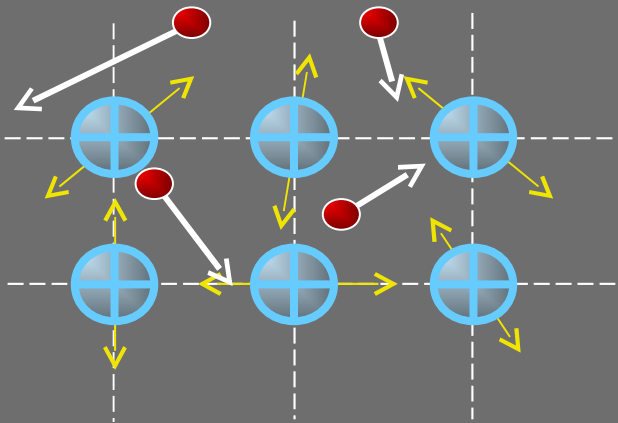
## П.4. Модель явления сверхпроводимости.

Одной из простейших моделей свободных электронов в металлах является ферми-газ.

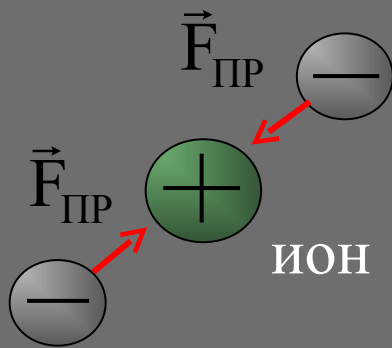
При очень низких температурах становится заметным новое взаимодействие между электронами и ионами.

Энергия этого взаимодействия невелика и проявляться оно будет тогда, когда тепловая энергия колебаний ионов будет меньше энергии связи электронов и ионов.

Структура проводника



При обычных температурах электроны движутся между ионами, сталкиваются с ними, что приводит к возникновению сопротивления при протекании тока (закон Ома).



Два электрона притягиваются к одному иону, и, следовательно, друг к другу. Это притяжение характеризуется энергией связи между электронами.

### Модель Бардина-Купера-Шриффера (БКШ).

Модели БКШ: электронный газ, состоящий из электронных пар (куперовские пары), может переходить в состояние, похожее на жидкое, т.е. конденсироваться (Бозе-конденсация).

Энергия взаимодействия электронной жидкости и кристаллической решетки имеет дискретные значения.

При низких температурах энергия теплового движения ионов недостаточна и не может передаваться свободным электронам, поэтому нет сопротивления движению куперовских пар и нет взаимодействия (столкновения) электронов с ионами. Удельное сопротивление вещества = 0, а проводимость = бесконечности.

Электронный газ находящийся в состоянии, когда сконденсированы куперовские пары свободных электронов, называется сверхпроводящей фазой электронного газа.

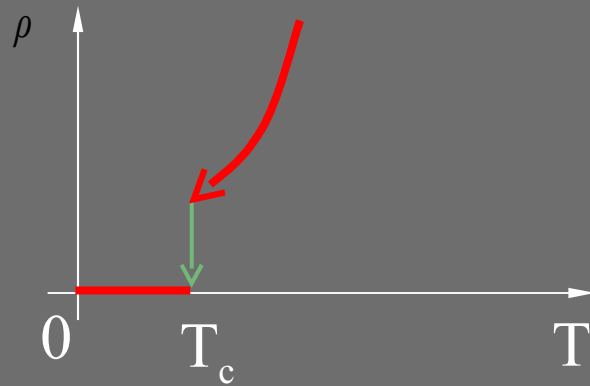
При повышении температуры энергия тепловых колебаний ионов становится больше энергии связи куперовских пар, сверхпроводящая фаза переходит в проводящую фазу, т.е. происходит фазовый переход.

Разрушение сверхпроводящего состояния возможно и в результате воздействия магнитного поля достаточной величины.

## П.5. Закономерности сверхпроводимости.

Закономерности, наблюдаемые экспериментально и объясненные на основе предложенной модели:

1. Зависимость удельного сопротивления от температуры имеет скачок при некоторой температуре, называемой критической  $T_c$ .

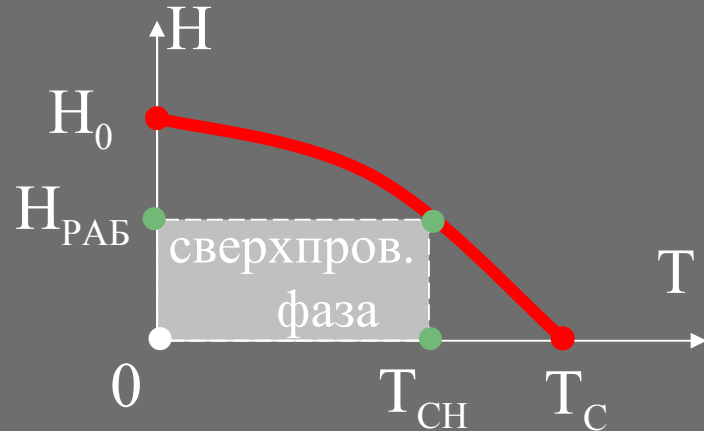


2. У изотопов одного и того же элемента, критическая температура  $T_c$  убывает с увеличением атомного веса

$$T_c \sim \frac{1}{\sqrt{A}}.$$

Для повышения  $T_c$  надо уменьшать атомный вес.

3. Имеется влияние магнитного поля (зависимость « $T_c$ » от напряженности магнитного поля):



$$\left(\frac{T_{CH}}{T_C}\right)^2 \leq 1 - \frac{H_{РАБ}}{H_0}.$$

Чтобы обеспечить работу сверхпроводника в магнитном поле с напряженностью « $H$ » (при  $0 < H < H_{РАБ}$ ), надо его охладить до  $T_{CH}$ , причем  $T_{CH} < T_C$ .

$$H_{РАБ} = H_0 \left[ 1 - \left(\frac{T_{CH}}{T_C}\right)^2 \right].$$

4. Существует максимум тока, который можно пропускать по сверхпроводящему проводу при данной температуре.

ТЕСТ

ТЕСТ

5. Если магнитное поле меньше критического для данной температуры, то внешнее магнитное поле не проникает в идеальный сверхпроводник.

В неидеальном сверхпроводнике глубина проникновения магнитного поля мала и определяется соотношением:

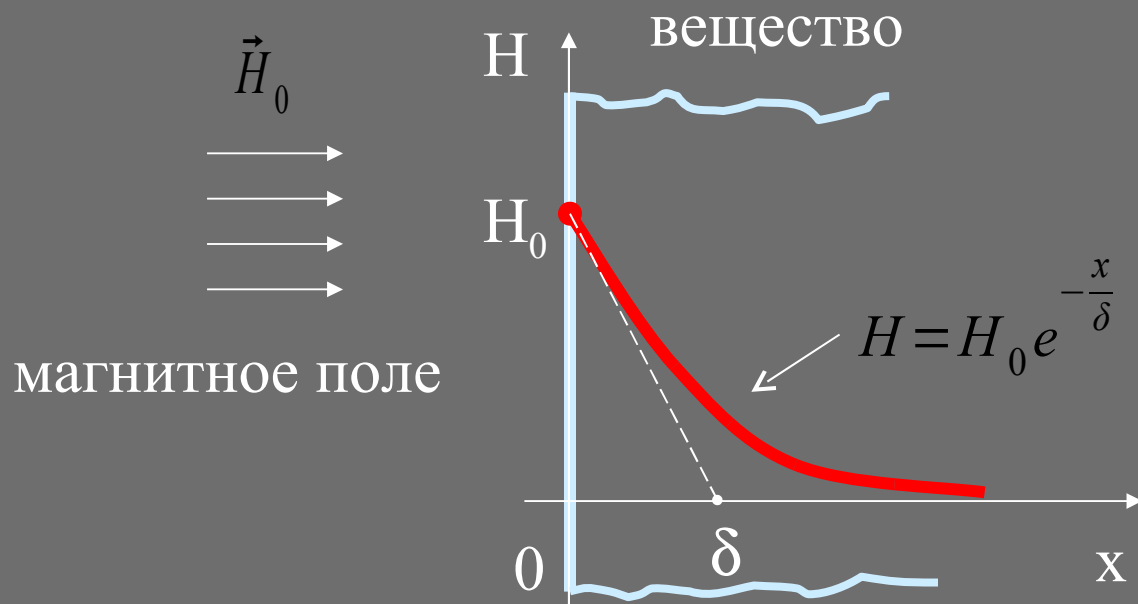
$$\delta = \frac{m_e c^2}{n_{\text{ЭЛ. ПАР}}} \approx 10^{-7} \text{ м} = 100 \text{ нм}.$$

где  $\delta$  - глубина проникновения (скин-слой);

$n_{\text{ЭЛ. ПАР}}$  - концентрация куперовских пар электронов;

$m_e$  - масса одного электрона.

Схематически изобразим, как проникает магнитное поле в сверхпроводящее вещество.



Замечание: Сверхпроводящее вещество можно применять для изготовления высокоэффективных магнитных экранов. Это защита от электромагнитных шумов.