

# Лекция 4

## Электропроводность твёрдых тел

Электропроводность металлов и полупроводников  
Влияние примесей на удельную проводимость  
Эффекты сильного поля  
Явление сверхпроводимости

лектор:  
Колосько Анатолий Григорьевич  
( [agkolosko@mail.ru](mailto:agkolosko@mail.ru) )

# Дрейф электронов

При приложении к проводнику электрического поля в нём возникает направленное движение электронов - так называемый **дрейф**, с постоянной дрейфовой скоростью  $v_{др}$ , которая зависит от напряжённости поля  $E$  и подвижности электронов в материале  $\mu$ :

$$v_{др} = -\mu \cdot E \quad \text{отсюда же определение подвижности:} \quad \mu = v_{др} / E$$

Возникающий при этом электрический ток  $I$  имеет плотность ( $j = I/S$ ):

$$j = -e \cdot n \cdot v_{др} = e \cdot n \cdot \mu \cdot E = \sigma \cdot E \quad \sigma = e \cdot n \cdot \mu$$

где  $e$  - модуль заряда электрона,  $n$  - концентрация электронов,  
 $\sigma$  - удельная электропроводность проводника,  
обратная ей величина  $\rho = 1/\sigma$  - удельное сопротивление.

**Среднее время пробега** - время ускорения электрона

в поле до столкновения с атомом решётки  
связано со скоростью дрейфа равенством:

$$v_{др} = e \cdot E \cdot \tau / m_e$$

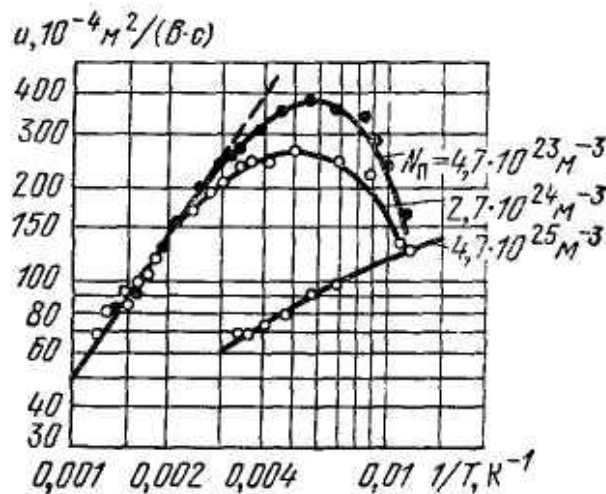
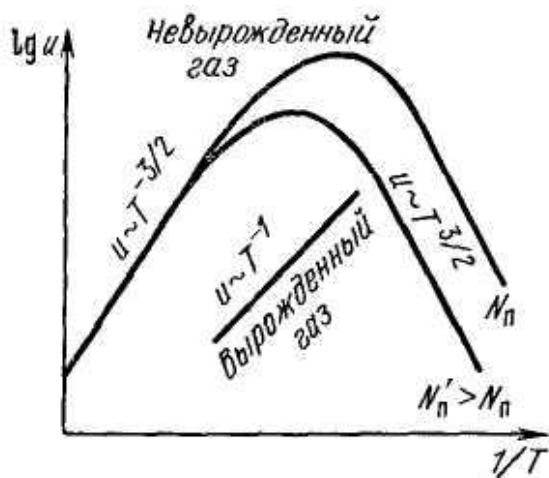
# Подвижность свободных носителей заряда

Появление электрического сопротивления связано с наличием в кристаллической решётке проводника различного рода дефектов.

В области **высоких температур** основное значение имеет рассеяние электронов

на тепловых колебаниях решётки (на фононах):

$$\mu \sim T^{-1}$$



ценного

С повышением концентрации примеси максимум кривой смещается в сторону высоких  $T$ .

При **низких температурах** рассеяние идёт в основном на ионизированных атомах примесей, которые отклоняют пролетающие мимо электроны.

для невырожденного газа

, а для вырожденного

$$\mu = \text{const}$$

# Электропроводность металлов

Так как в металлах концентрация вырожденного электронного газа  $n$  практически не зависит от  $T$ , то зависимость удельной электропроводности определяется

зависимостью подвижности электронов  $\mu$  от  $T$ :

$$\sigma(T) = e \cdot n \cdot \mu(T)$$

В достаточно чистом металле концентрация примесей мала и подвижность  $\mu$  вплоть до очень низких  $T$  определяется рассеянием электронов на фоновых

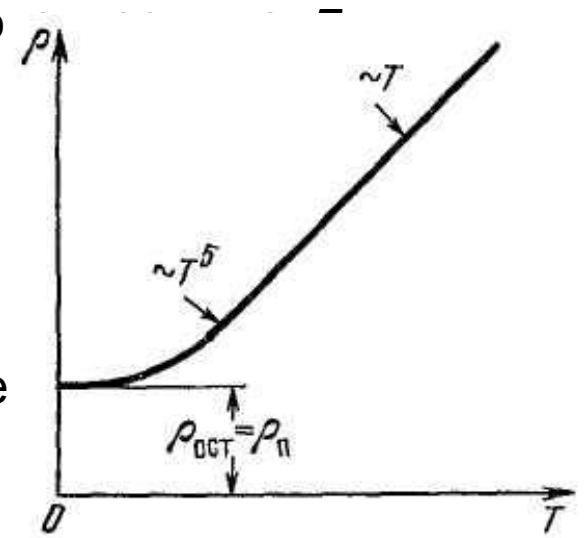
В области **высоких**  $T$ :

$$\rho = \rho_0 \left[ 1 + \alpha_\rho (T - T_0) \right]$$

поэтому выполняется:

где  $\rho_0$  и  $T_0$  - произвольная точка,  $\alpha_\rho$  - температурный коэффициент удельного сопр.

При  $T$  близких к 0 основное значение приобретает рассеяние на дефектах решётки



$$\rho = \rho_{ост} + \rho_{фононное}$$

(в основном на примесных атомах) поэтому  $\mu = \text{const}$  и сопротивление  $\rho$

# Проводимость металлов, сплавов и полупроводников

**У металлов** концентрация носителей заряда  $n$  практически не зависит от  $T$ , и температурная зависимость проводимости  $\sigma(T)$  определяется температурной зависимостью подвижности  $\mu(T)$ .

**Сплавы** имеют повышенное  $\rho$  в сравнении с компонентами, входящими в их состав, и меняется у них  $\rho$  с изменением  $T$  значительно слабее.

**В полупроводниках** концентрация носителей заряда  $n$  сильно зависит от  $T$  и температурная зависимость проводимости  $\sigma(T)$  определяется температурной зависимостью концентрации носителей заряда  $n(T)$ .

Проводимость п/п зависит от внешних факторов, сообщаящих электронам валентной зоны энергию, достаточную для их перехода в зону проводимости. Причём, чем меньше ширина запрещенной зоны  $E_g$  и выше температура  $T$ , тем больше электронов переходит в зону проводимости (тем больше  $n$ , и тем выше  $\sigma$ ).

# Электропроводность полупроводников

Полупроводники высокой степени очистки при не слишком низких температурах обладают **собственной электрической проводимостью**, которую обеспечивают

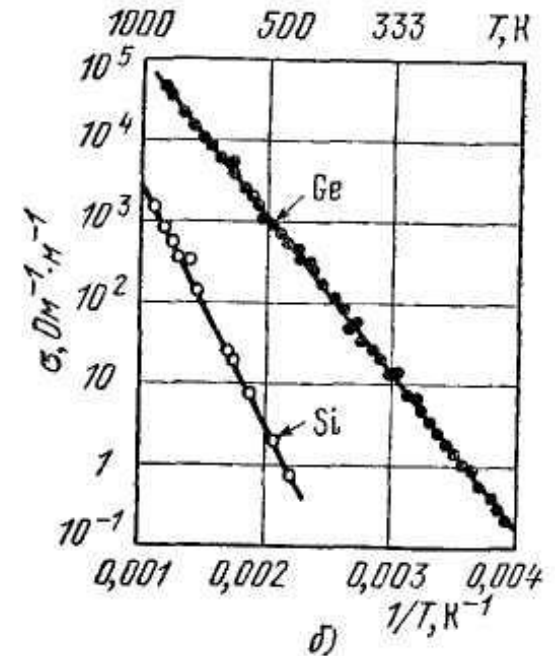
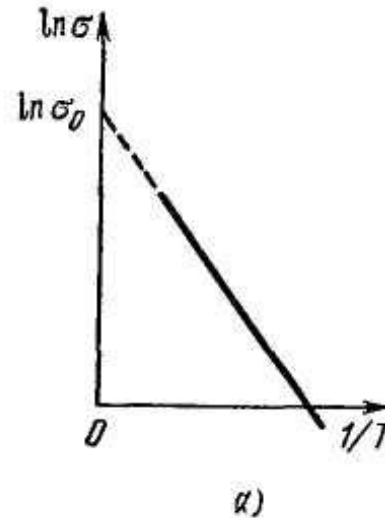
собственные электроны и дырки с кс

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

После подстановки соответствующих  $n_i$  и  $p_i$ ,  $\mu_n$  и  $\mu_p$  получим:

$$\sigma_i = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

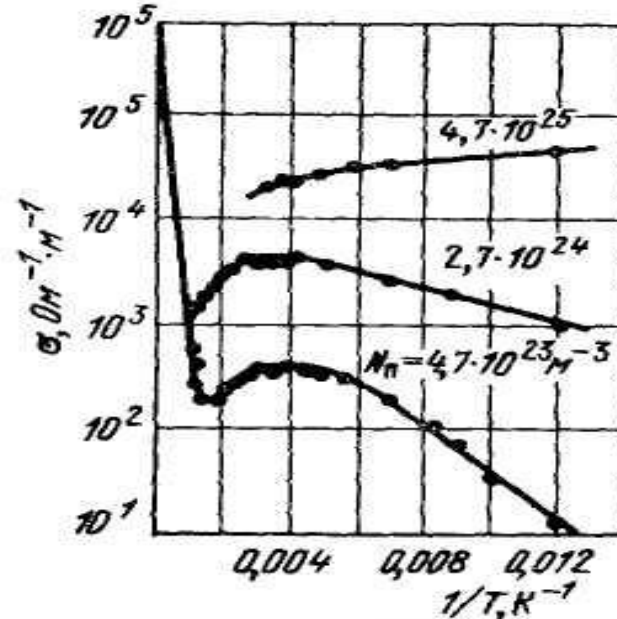
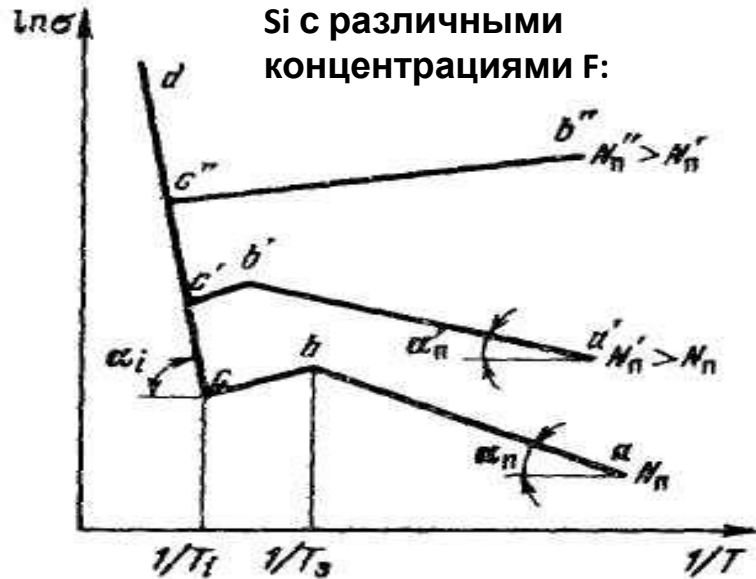
В полулогарифмических координатах:

$$\ln \sigma_i = \ln \sigma_0 - \left(\frac{E_g}{2k}\right) \cdot \frac{1}{T}$$


Прямая  $\ln \sigma_i(1/T)$  отсекает на оси ординат отрезок  $\ln \sigma_0$ , а тангенс угла её наклона  $-E_g/2k$ . Таким образом, экспериментально

# Примесная проводимость полупроводников

Зависимости  $\sigma(T)$  для примесного п/п, содержащего различные количества примеси:



При низких  $T$  (по температуре истощения примеси  $T$ ):

$$n = (N_c N_D)^{1/2} \exp(-E_D/2kT)$$

$$\sigma_n = \sigma_{n0} \exp(-E_D/2kT)$$

или  $\ln \sigma_n = \ln \sigma_{n0} - E_D/2kT$  коэффициент, слабо зависящий от  $T$ .

Из эксперимента по линии  $\ln \sigma(1/T)$  можно получить энергию активации примеси

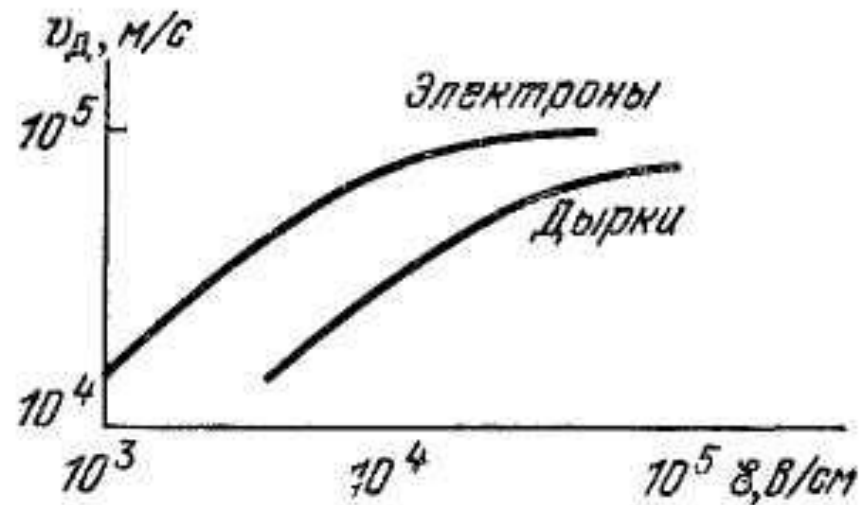
$$E_D$$

При  $T_i > T > T_s$  концентрация постоянная  $n = N_{пр}$ , а  $\sigma$  с ростом  $T$  падает из-за

# Эффекты сильного поля

Пока напряженность электрического поля  $E$  мала среднюю скорость теплового движения электронов  $\langle v \rangle$  можно считать const, подвижность носителей  $\mu$  и электропроводность  $\sigma$  также не зависят от поля, поэтому работает закон Ома: ток в проводнике  $I$  пропорционален приложенному напряжению  $U$ .

Сильное увеличение поля  $E$  приводит к существенному отклонению от закона Ома: дрейфовая скорость свободных носителей заряда растёт, стремясь к насыщению, что приводит к ряду интересных эффектов: **эффекту Ганна, ударной ионизации, электростатической ионизации, термоэлектронной ионизации и т.д.**



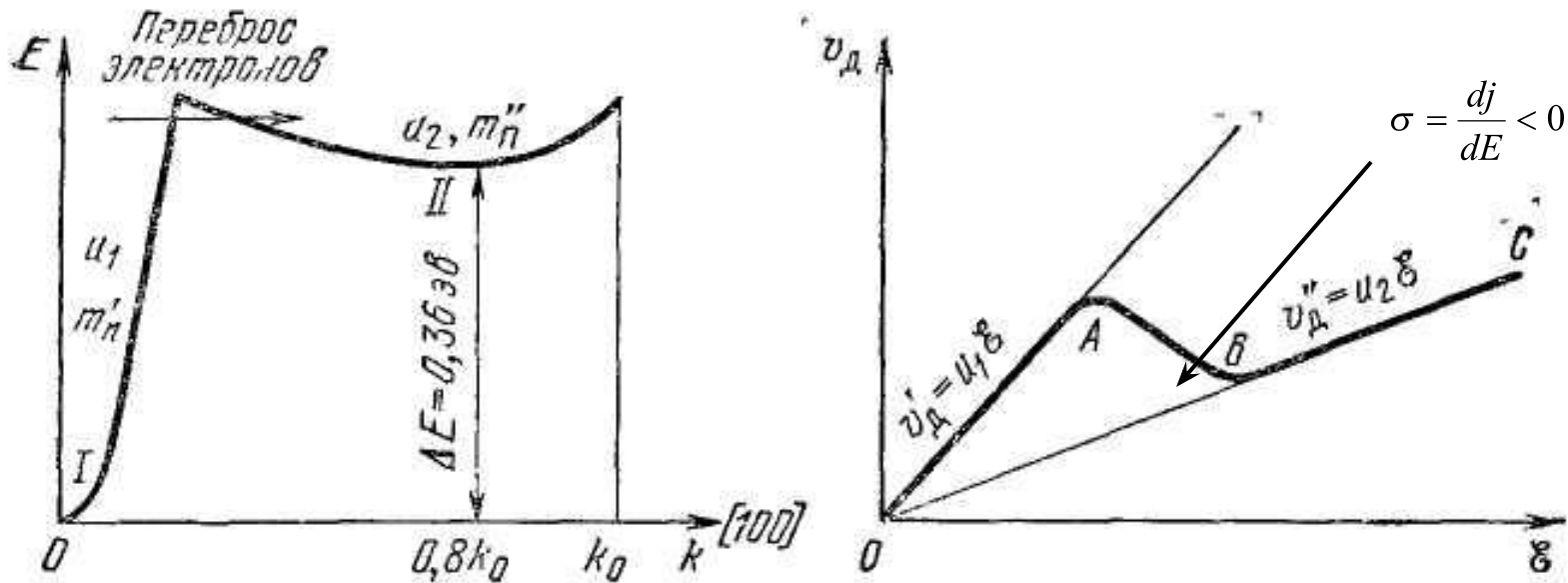


# Эффект Ганна в полупроводниках типа $A^{IV}B^V$

В зонной структуре GaAs имеются 2 энергетических min. При малых полях электроны

зоны проводимости размещаются в первом min и обладают  $\mu \approx 0,5 \text{ м}^2/\text{с/В}$ .

С увеличением поля электроны набирают кинетическую энергию и переходят в верхний min, где  $\mu \approx 0,01 \text{ м}^2/\text{с/В}$ , при этом их скорость дрейфа  $v$  резко падает.

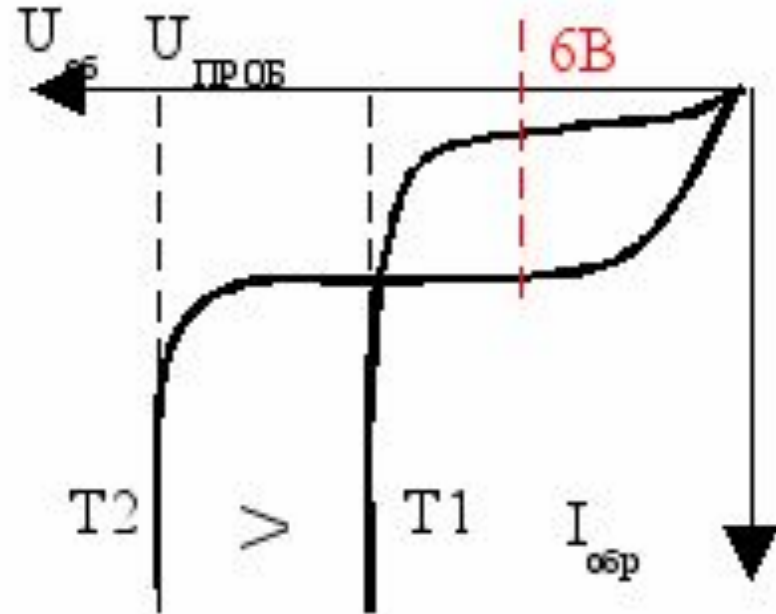
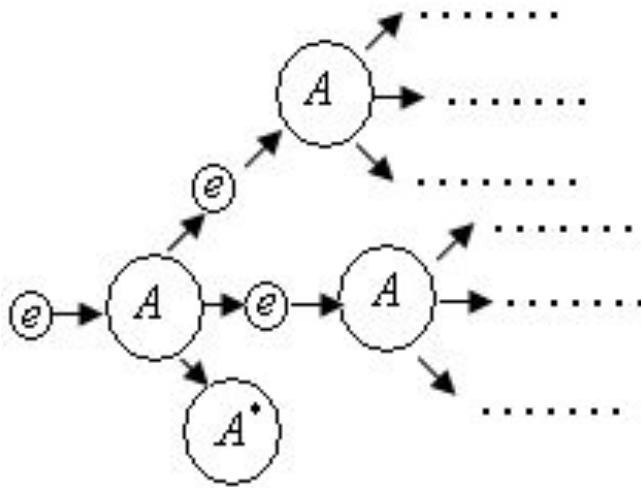


Отрицательная проводимость приводит к возникновению локальных скоплений заряда - доменов Ганна, которые "оттягивают" на себя большую часть внешнего  $U$ .

Генераторы Ганна, используя этот эффект, создают СВЧ колебания напряжения

# Ударная ионизация

В сильном электрическом поле электронный газ разогревается и электроны зоны проводимости могут приобрести энергию, достаточную для переброса других электронов (ударом) из валентной зоны в зону проводимости. Концентрация свободных носителей заряда при этом лавинно возрастает, приводя к электрическому пробое вещества (по



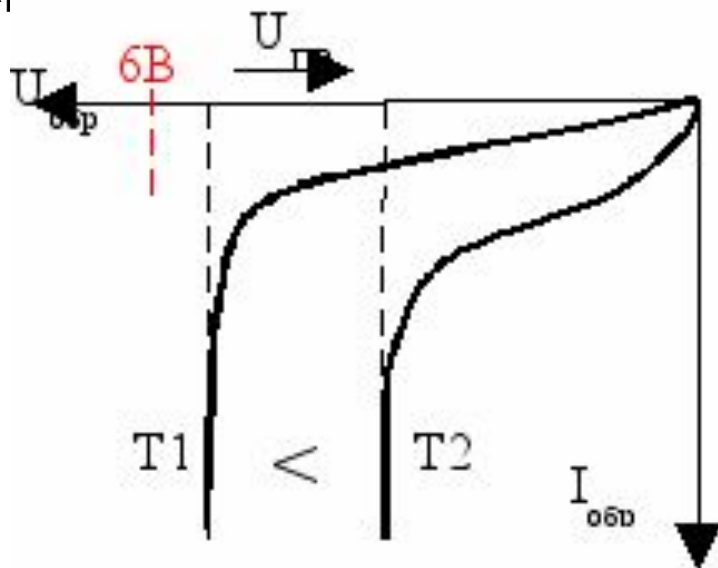
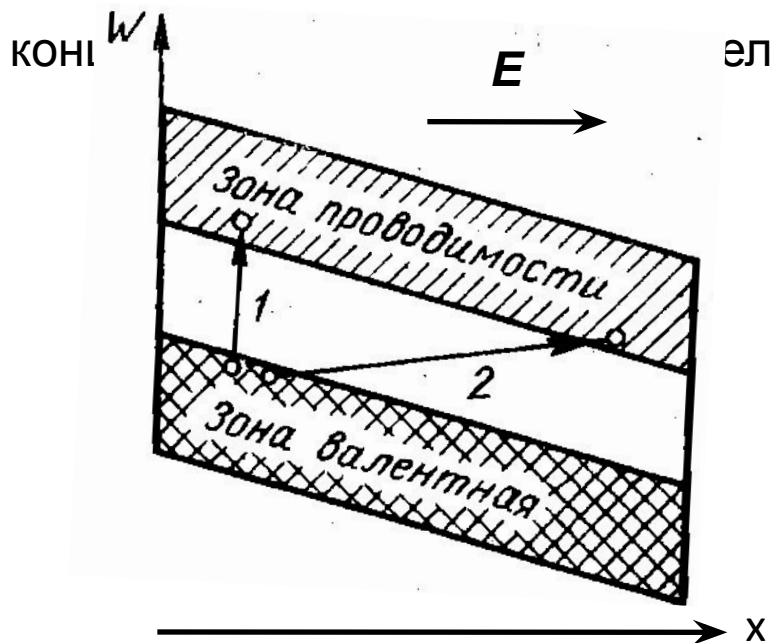
При увеличении  $T$  электроны проводимости чаще сталкиваются с атомами материала, не успевая набрать энергию ионизации, поэтому для лавинного

# Электростатическая ионизация (эффект Зинера)

В сильном электрическом поле возможен переход электронов из валентной зоны в

зону проводимости путем **туннелирования** через запрещенную зону, что повышает

концентрацию носителей заряда в области обедненной зоне.



Наклон энергетических зон происходит благодаря тому, что в электрическом поле  $E$

электрон приобретает дополнительную потенциальную энергию  $W$ , зависящую от

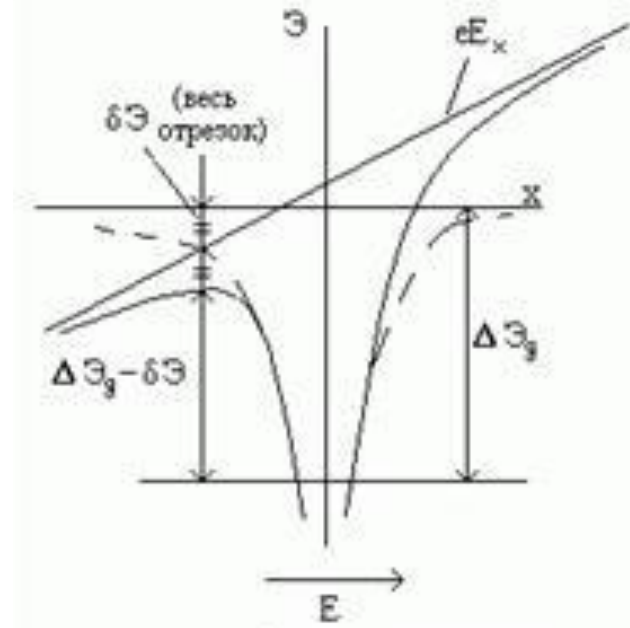
# Термоэлектронная ионизация Френкеля

Электрическое поле действует на электрон, связанный с атомом примеси, понижая потенциальный барьер, удерживающий его около атома (нагибая края потенциальной ямы), что приводит к увеличению вероятности перехода электрона в зону проводимости.

Рост концентрации электронов в зоне проводимости:

$$n_x = \sqrt{N_c N_d} \exp\left(-\frac{\Delta W_d - \delta W}{2kT}\right) =$$

$$n_{x0} \exp\left(\frac{\delta W}{2kT}\right)$$

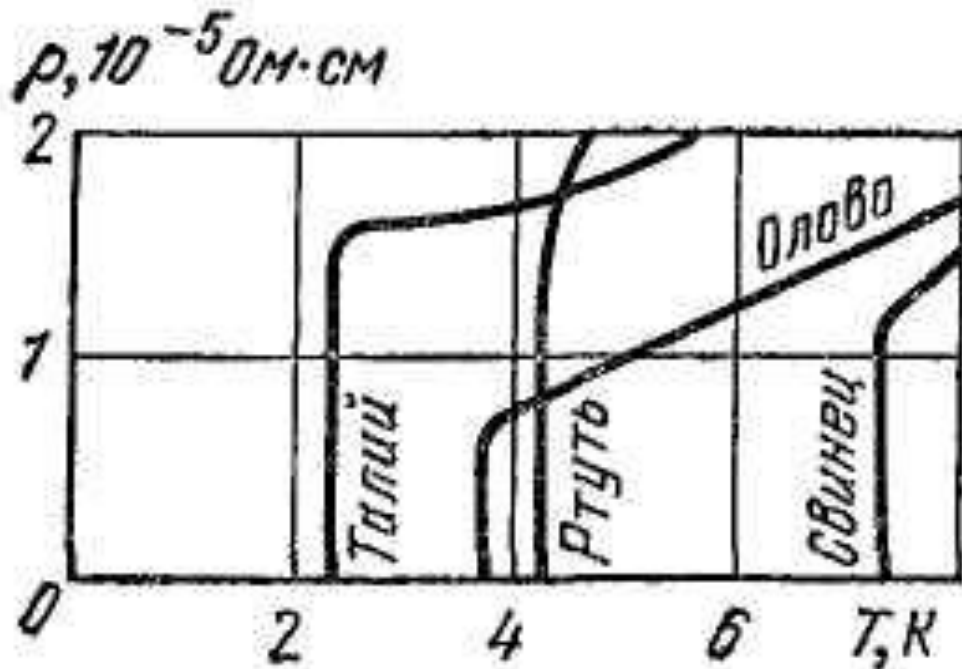


где уменьшение барьера связано  $\delta W = \alpha \sqrt{E}$  с электрическим полем:

# Явление сверхпроводимости

При постепенном понижении температуры у проводников наблюдается скачкообразное изменение сопротивления – переход в сверхпроводящее состояние,

в результате чего проводник приобретает идеальную проводимость ( $\rho \approx 0$ ).



У чистых металлов лучшими сверхпроводниками являются наиболее высокоомные: свинец, ниобий, олово, ртуть и др.

Свойства веществ при низких температурах используются в радиоэлектронике,

новая область науки, возникшая на этой базе, называется криоэлектроникой.

К криоэлектронным приборам относят криотронные переключатели, генераторы

# Последний слайд

*aaa*

Досвидания!