

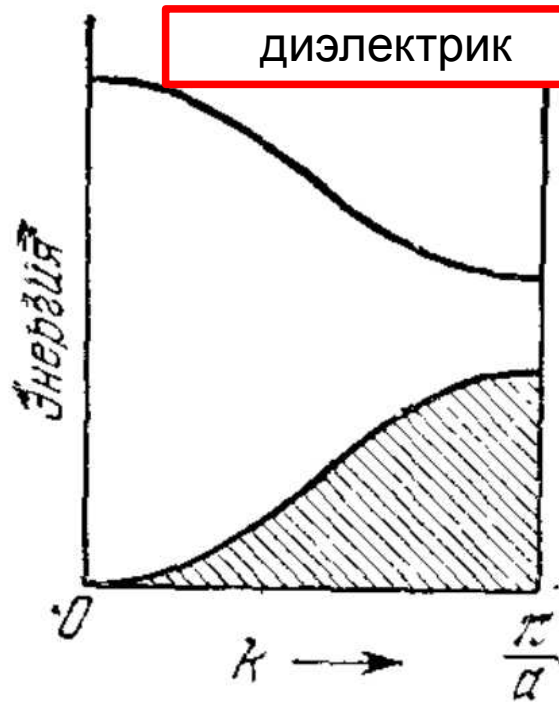
Квантовая макрофизика.

Лекция 6. Объёмные полупроводники.

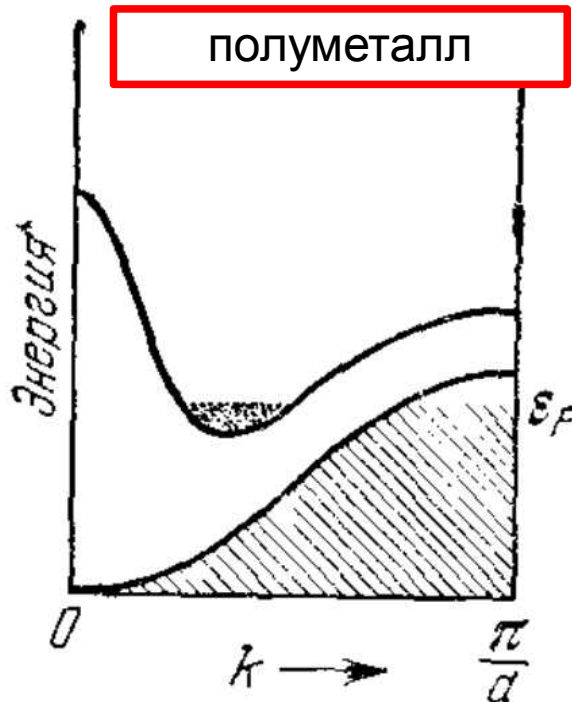
Часть 1: Чистые полупроводники

Металл... полуметалл... полупроводник...

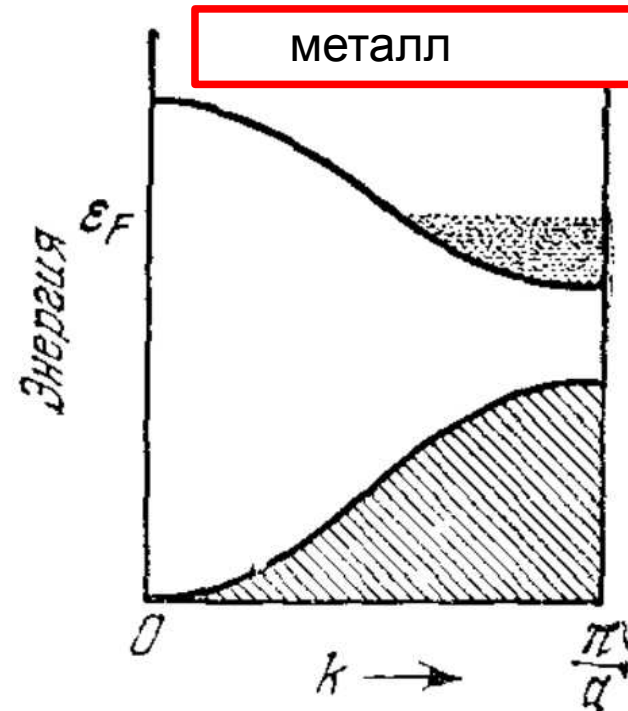
диэлектрик



а)



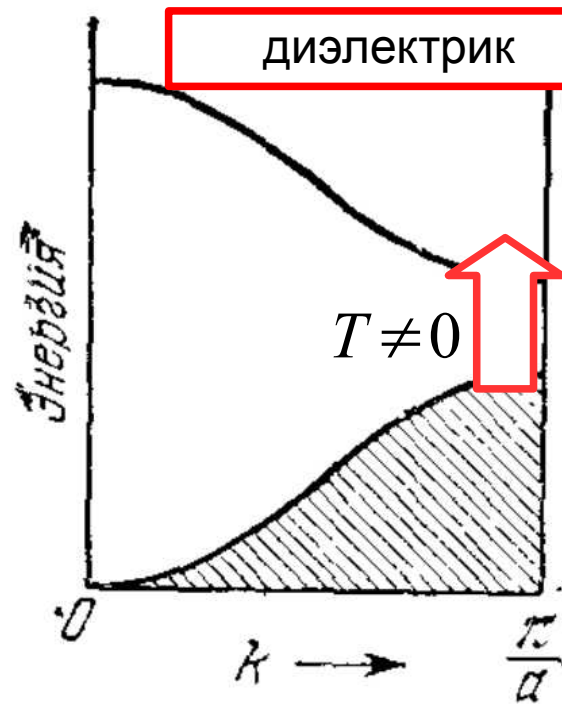
б)



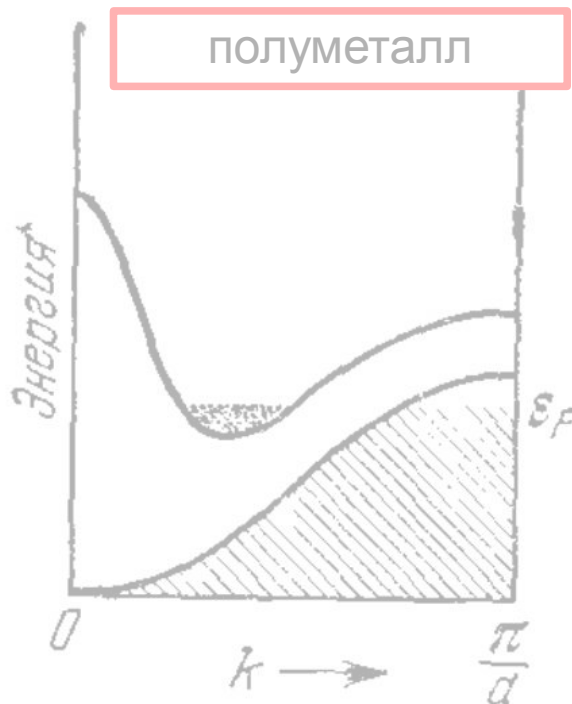
в)

Из книги Киттеля

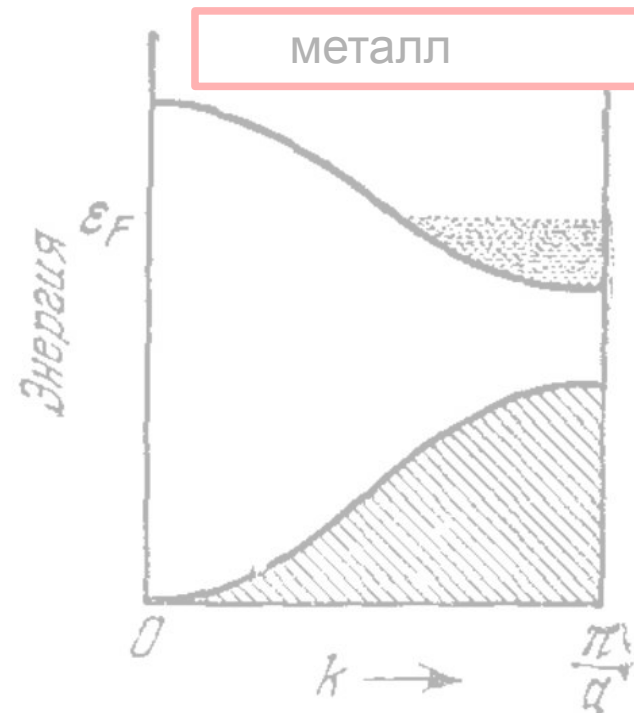
Металл... полуметалл... полупроводник... диэлектрик



а)



б)

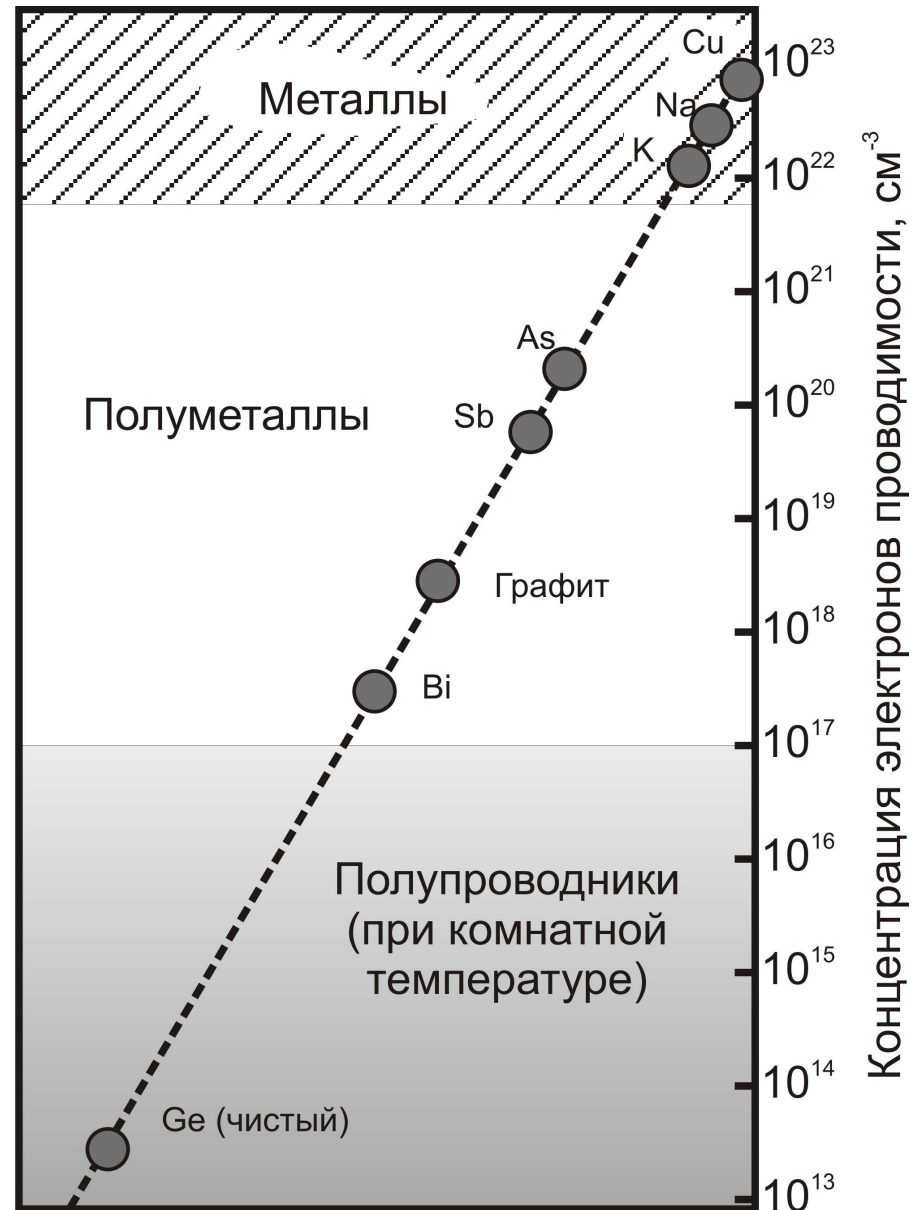
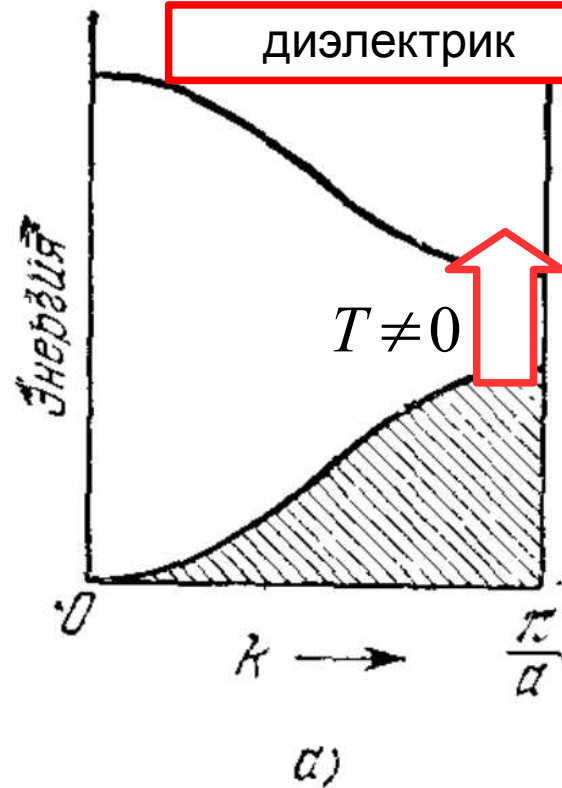


в)

Из книги Киттеля

Металл... полуметалл... полупроводник...

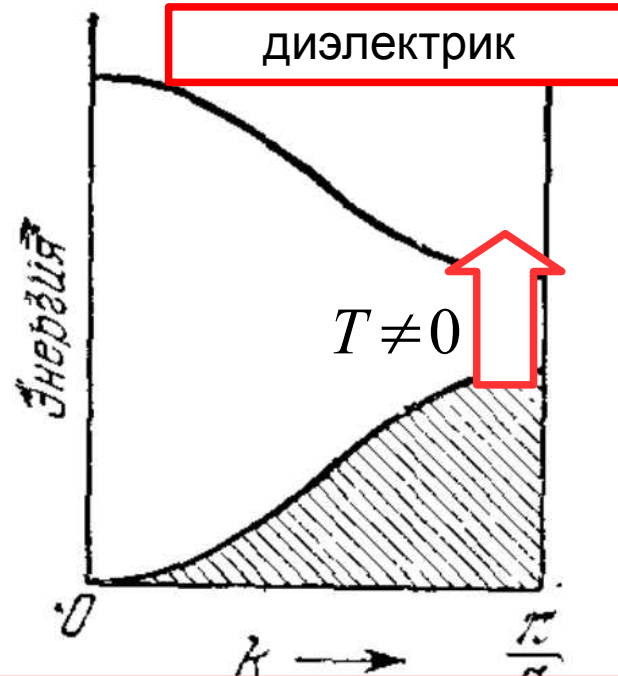
д



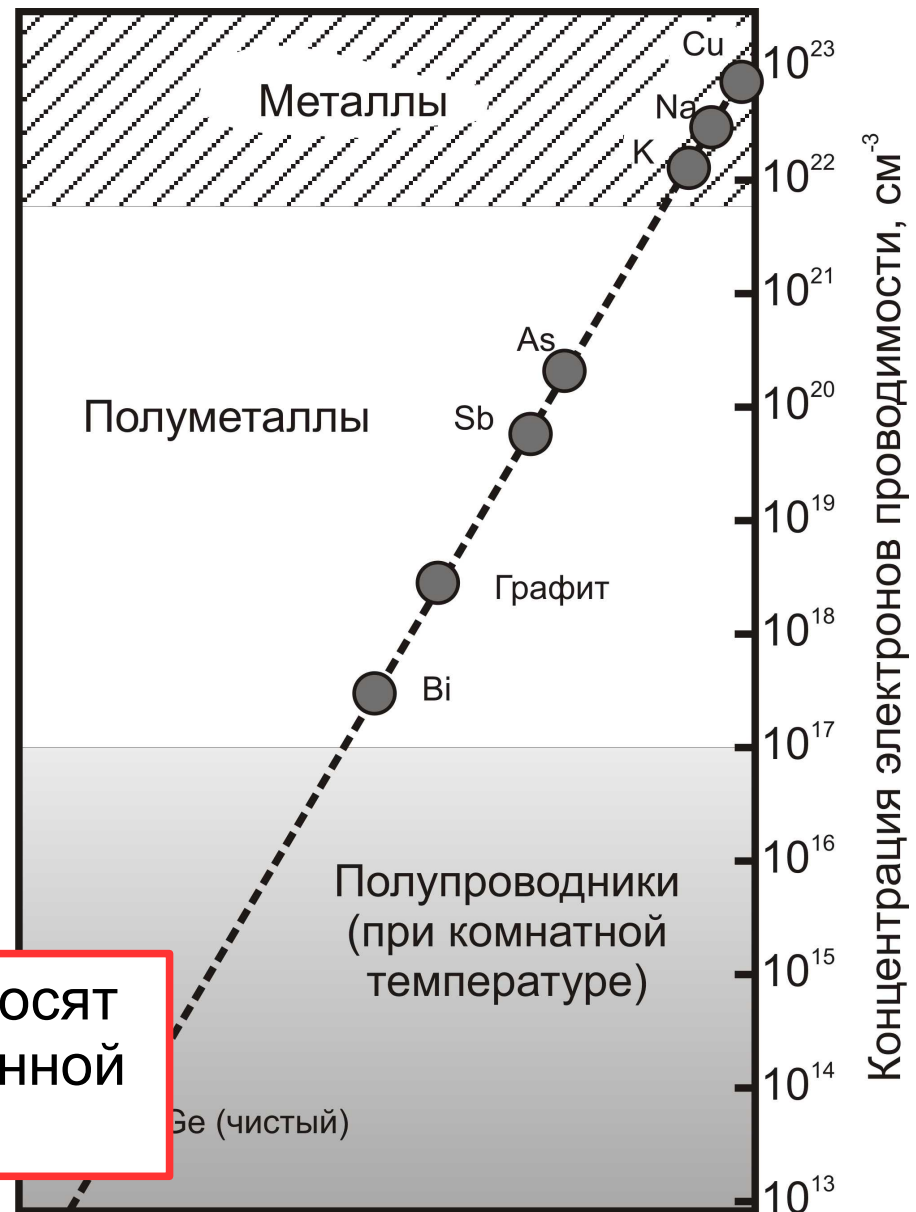
Киттеля

Металл... полуметалл... полупроводник...

д

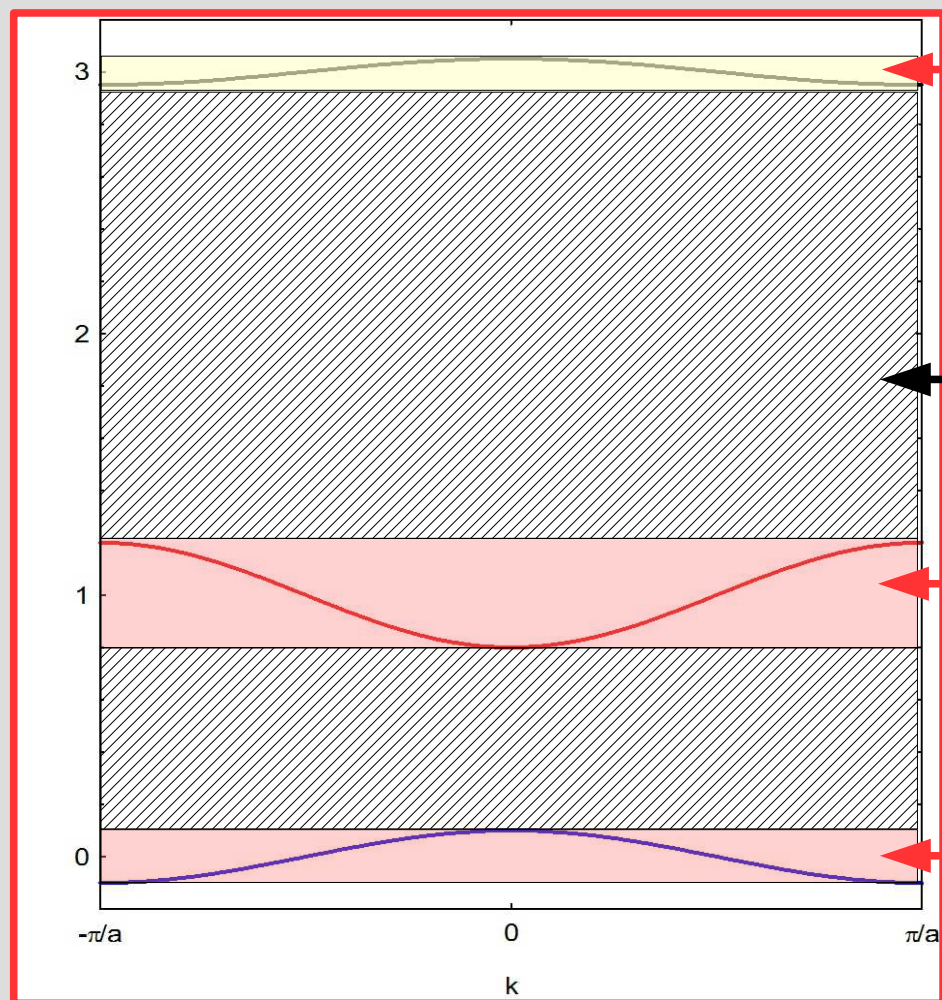


Условно, к полупроводникам относят диэлектрики с шириной запрещённой зоны меньше 3 эВ



Киттеля

Напоминание: Зонная структура полупроводника (диэлектрика)

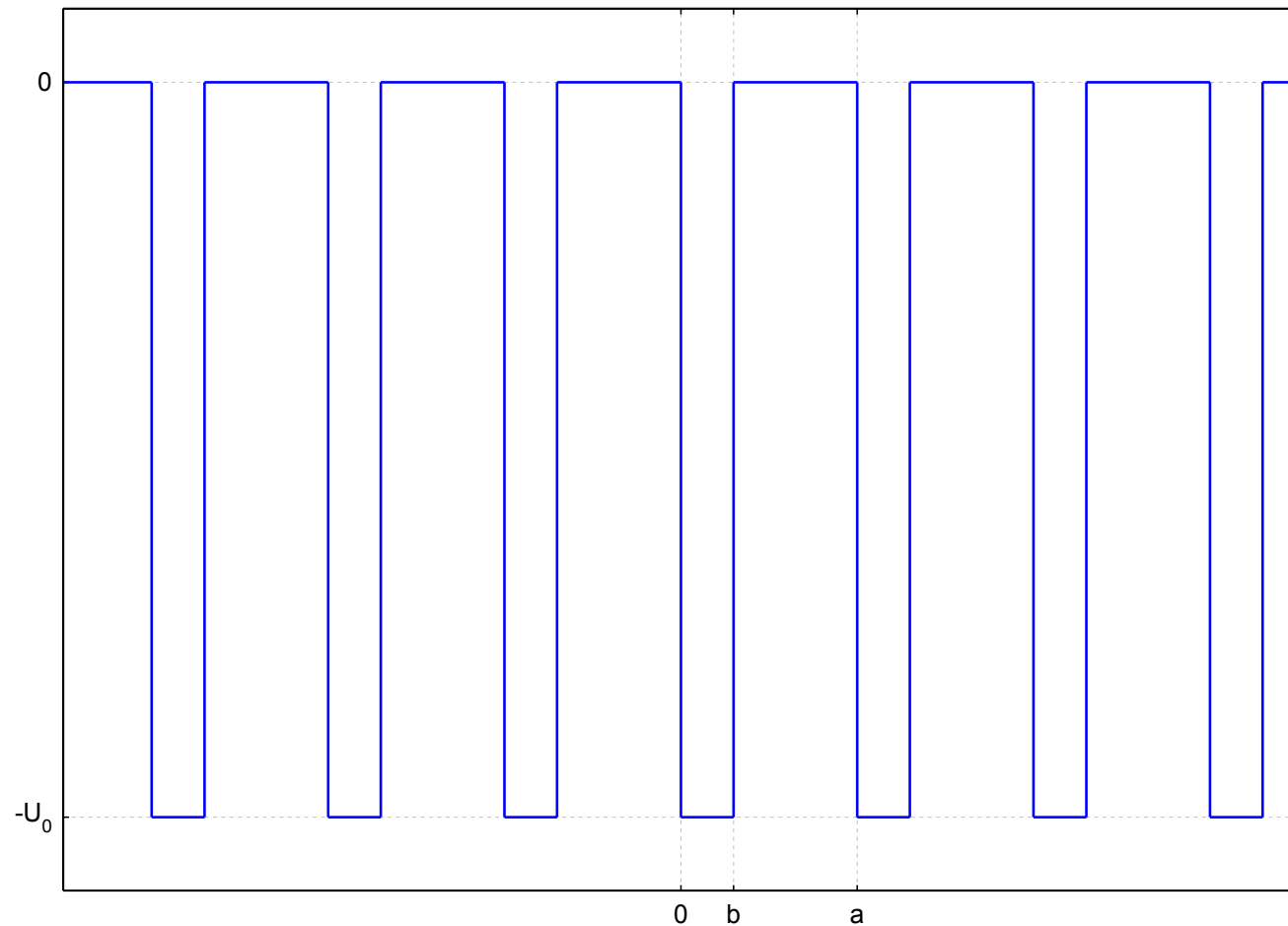


Свободная при $T=0$ зона проводимости

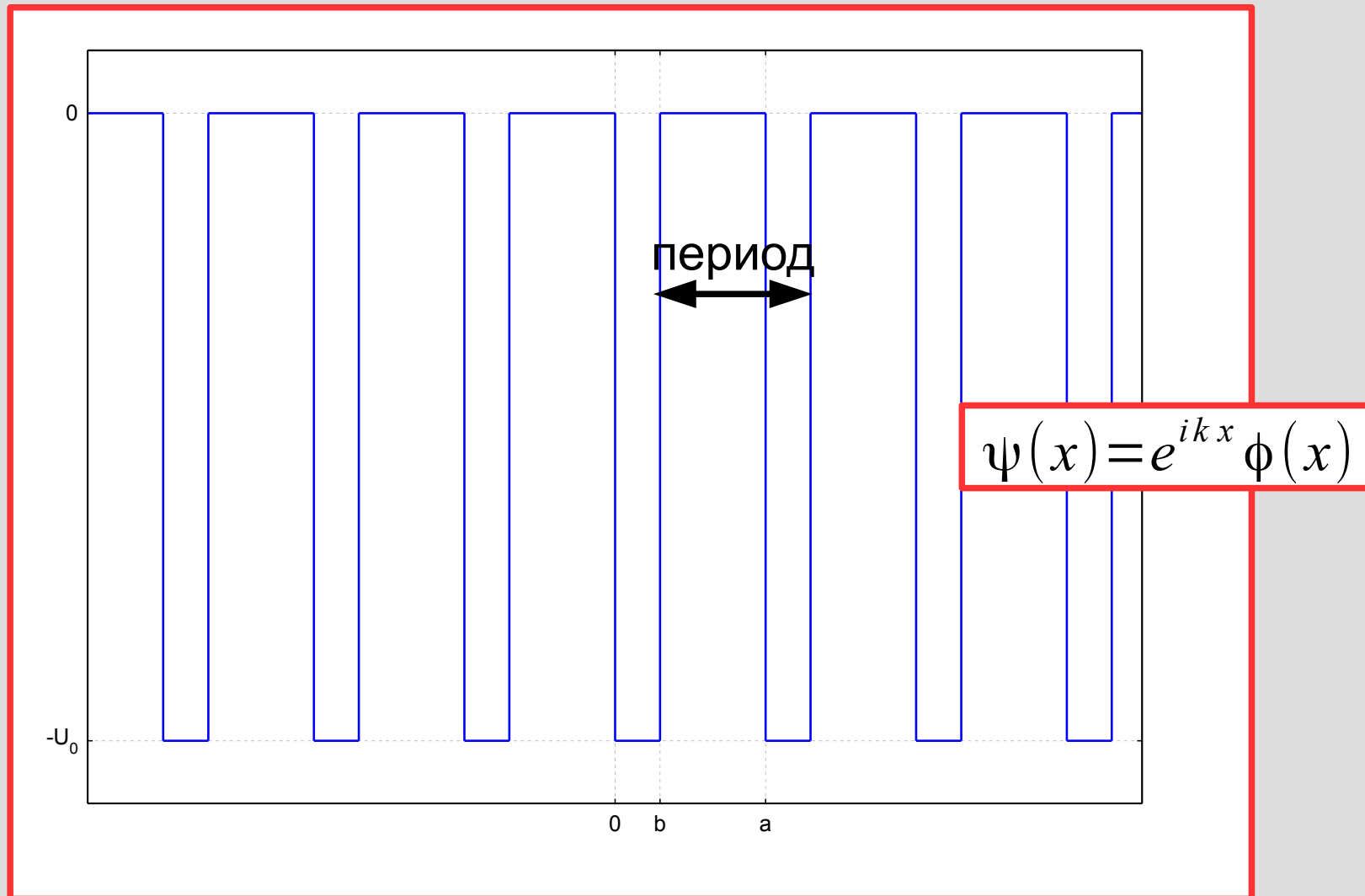
Запрещённая зона

Заполненные при $T=0$ зоны валентные

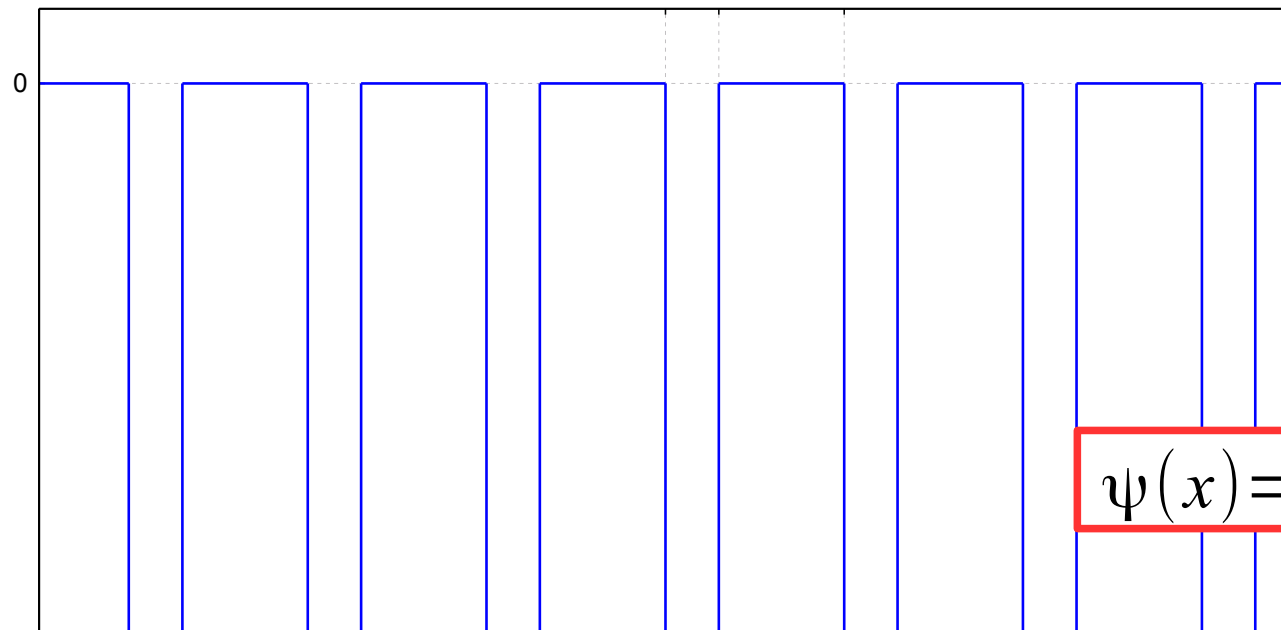
Возможность нулевой ширины запрещённой зоны: модель Кронига- Пенни.



Возможность нулевой ширины запрещённой зоны: модель Кронига- Пенни.



Возможность нулевой ширины запрещённой зоны: модель Кронига- Пенни.

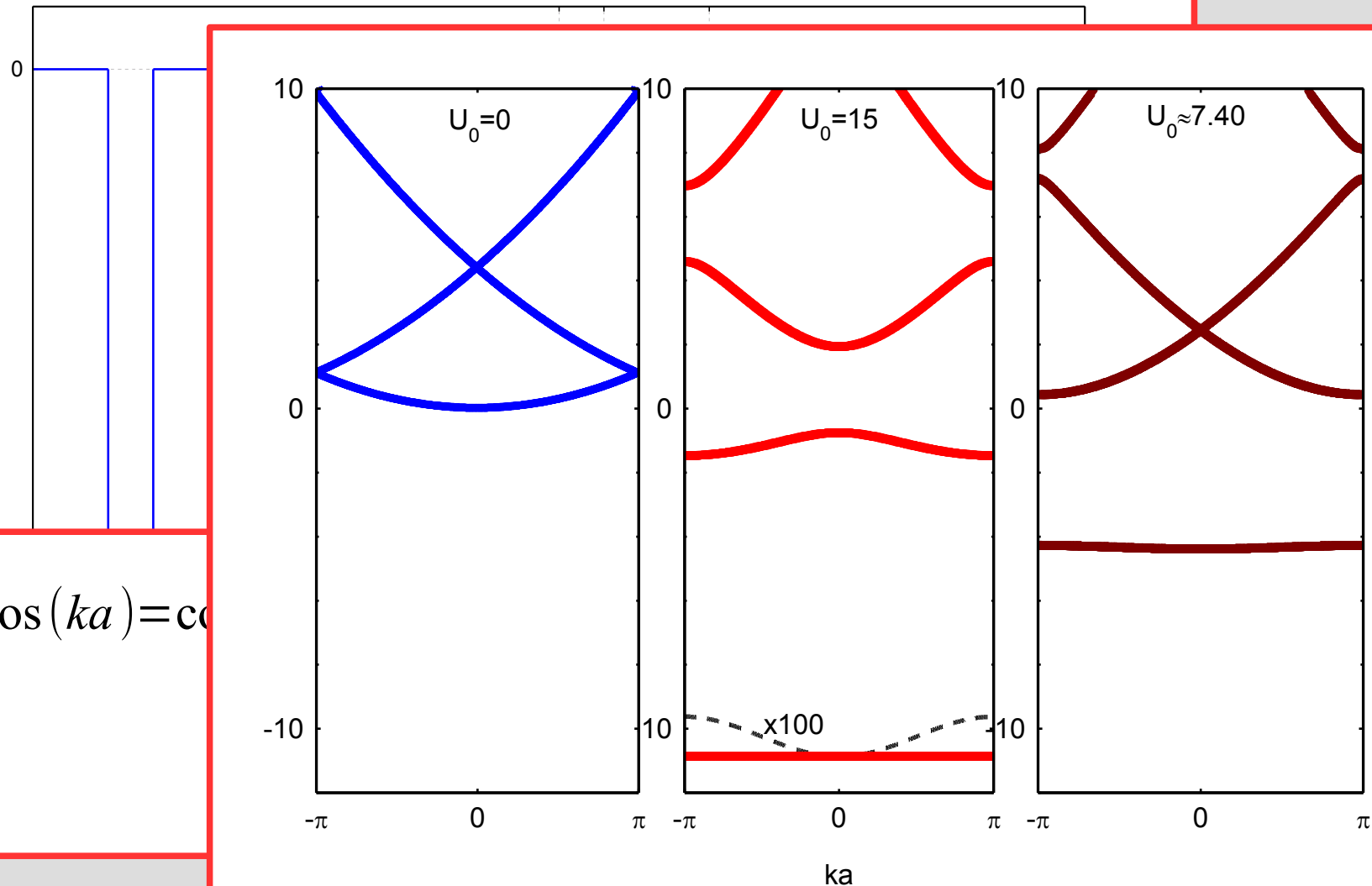


$$\psi(x) = e^{ikx} \phi(x)$$

$$\cos(ka) = \cos \left[\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (E + U_0)} b \right] ch \left[\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} |E|} (a - b) \right] -$$

$$- \frac{2E + U_0}{2\sqrt{|E|(E + U_0)}} \sin \left[\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (E + U_0)} b \right] sh \left[\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} |E|} (a - b) \right]$$

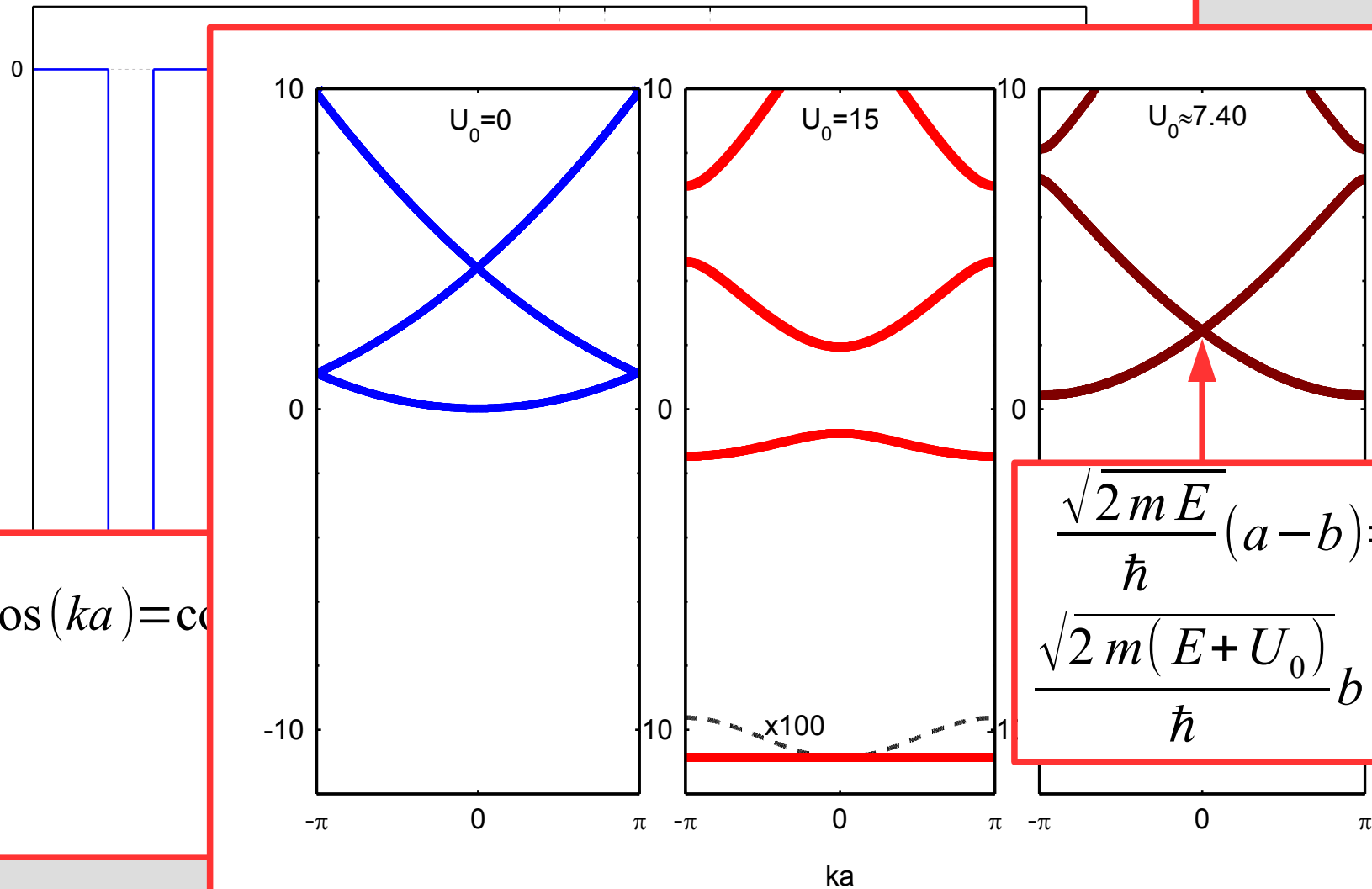
Возможность нулевой ширины запрещённой зоны: модель Кронига- Пенни.



$$\cos(ka) = \cos(b)$$

$$-b)$$

Возможность нулевой ширины запрещённой зоны: модель Кронига- Пенни.



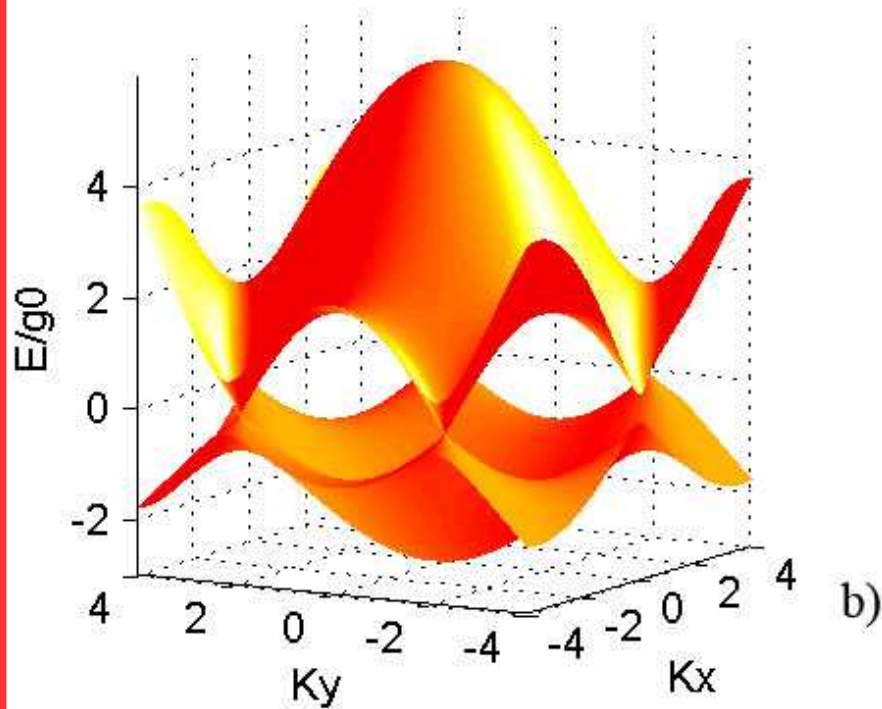
$$\cos(ka) = \cos(kb) \cos\left(\frac{\sqrt{2mE}a}{\hbar}\right) + \frac{U_0}{E} \sin(kb) \sin\left(\frac{\sqrt{2mE}a}{\hbar}\right)$$

$$\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}(a-b) = n\pi$$

$$\frac{\sqrt{2m(E+U_0)}}{\hbar}b = n'\pi$$

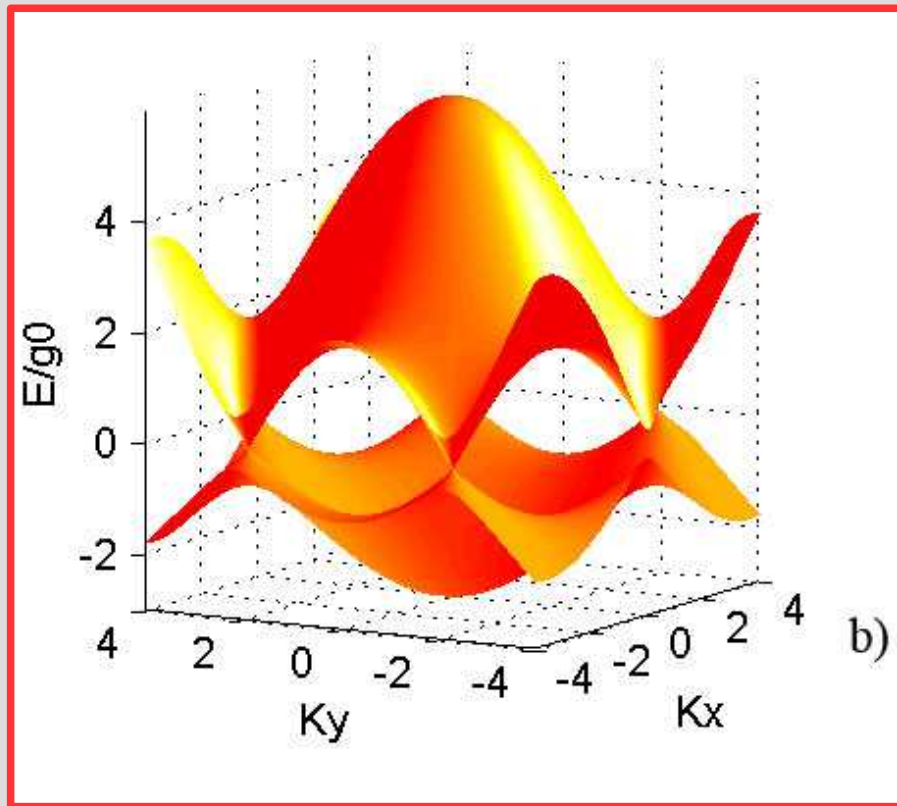
$-b)$

Возможность нулевой ширины запрещённой зоны: реальный мир.

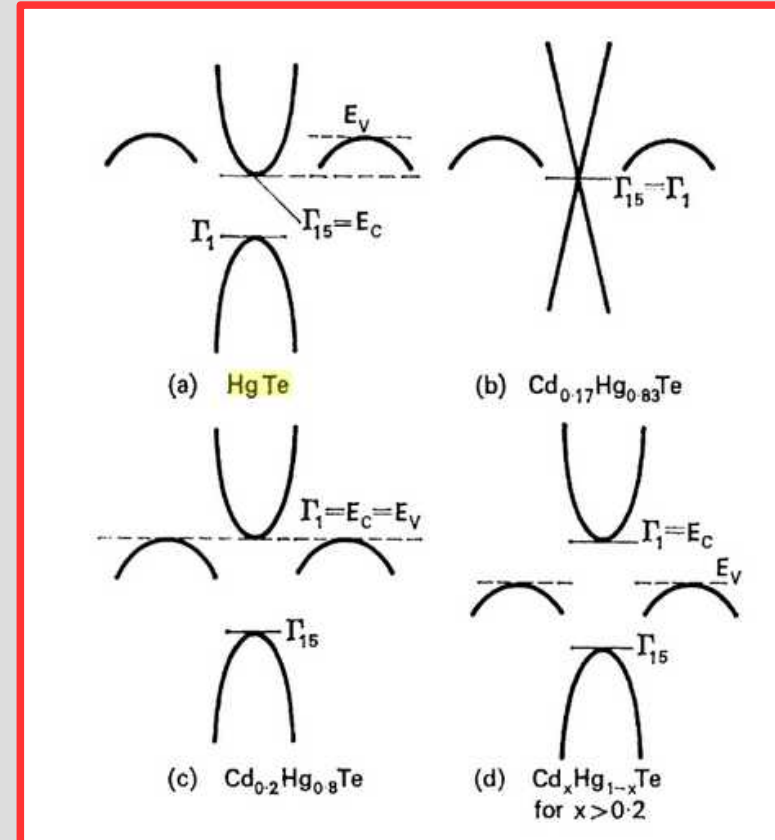


Спектр электронов в графене
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a5/Band_structure_CNT.jpg

Возможность нулевой ширины запрещённой зоны: реальный мир.

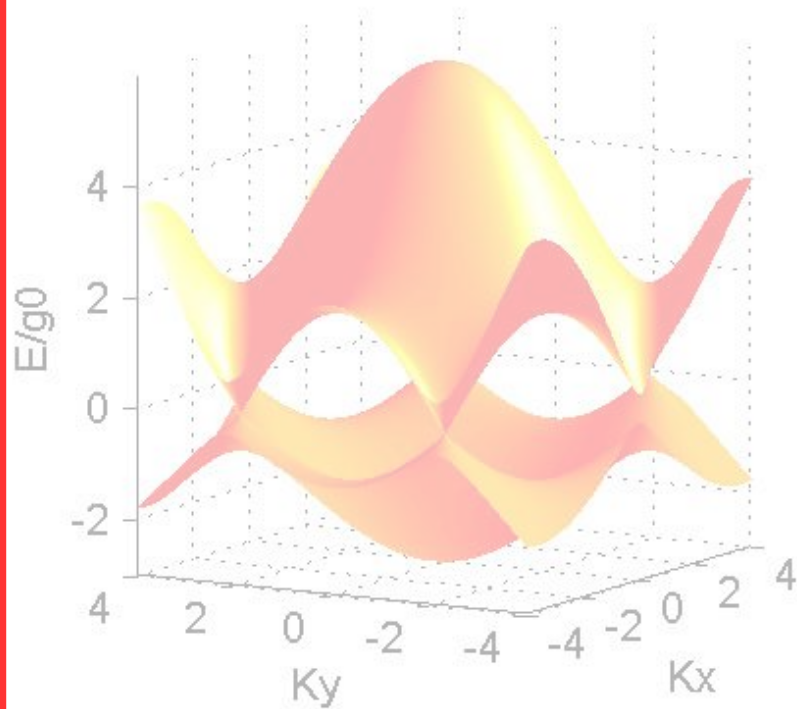


Спектр электронов в графене
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a5/Band_structure_CNT.jpg

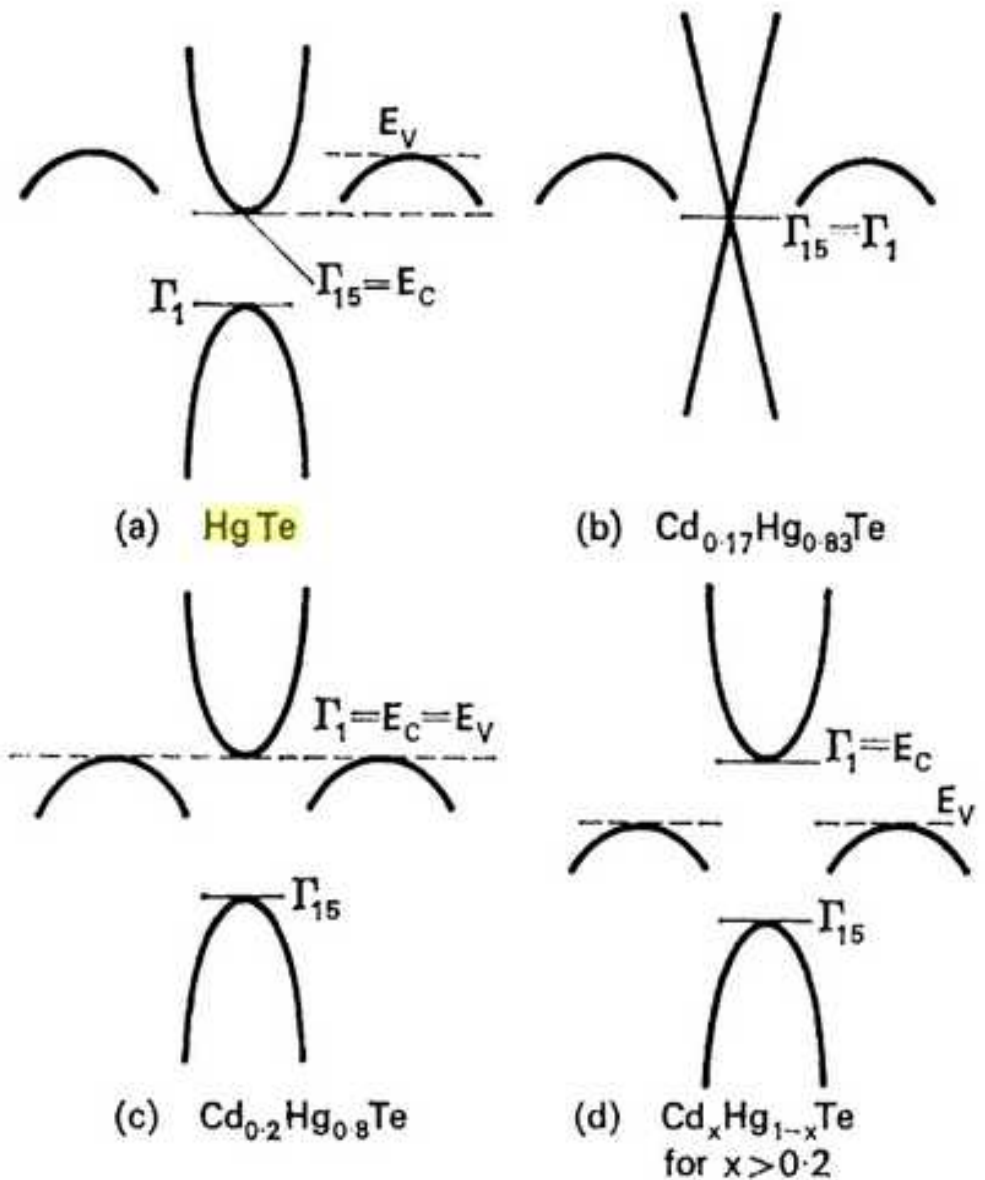


Спектры электронов (зонная структура) соединений Cd-Hg-Te для разной концентрации кадмия. (а) чистый HgTe, полуметалл с перекрытием зон (б) 17% Cd, полуметалл с линейным спектром электронов на некоторых ветвях спектра (с) 20% Cd, перекрытие зон пропало — полупроводник с нулевой запрещённой зоной и квадратичным спектром (д) более высокие концентрации кадмия, обычный полупроводник.

Возможность запрещённой з



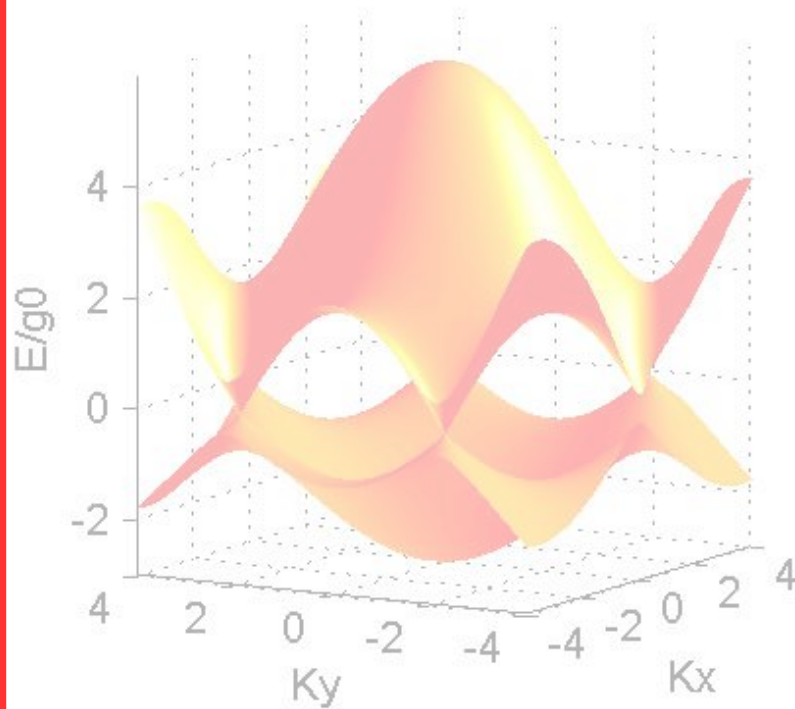
Спектр электронов в графене
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a5/Band_structure_CNT.jpg



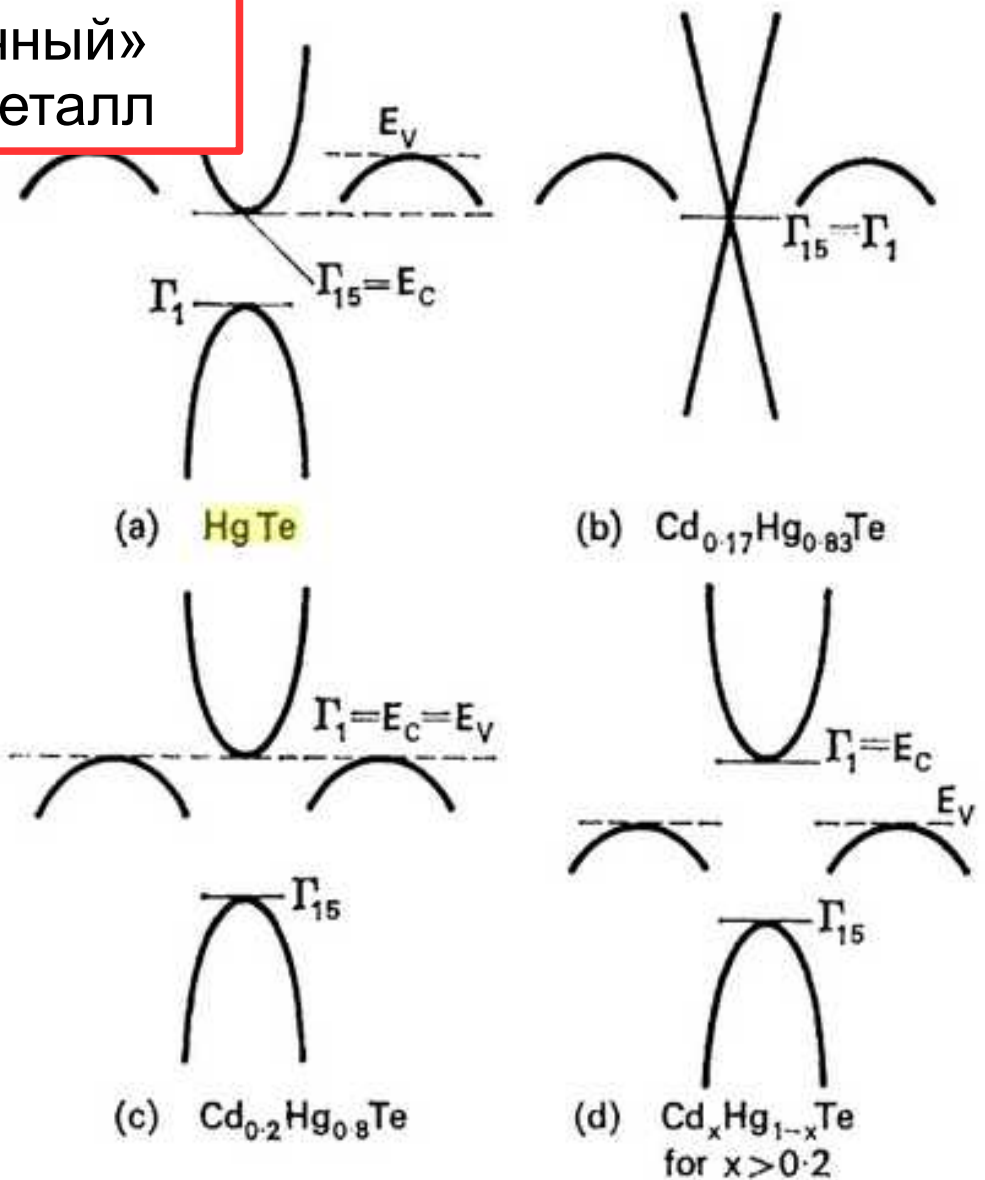
Спектры электронов (зонная структура) соединений Cd-Hg-Te для разной концентрации кадмия. (а) чистый HgTe, полуметалл с перекрытием зон (б) 17% Cd, полуметалл с линейным спектром электронов на некоторых ветвях спектра (с) 20% Cd, перекрытие зон пропало — полупроводник с нулевой запрещённой зоной и квадратичным спектром (д) более высокие концентрации кадмия, обычный полупроводник.

Возможна запрещённой зоной

«обычный»
полуметалл



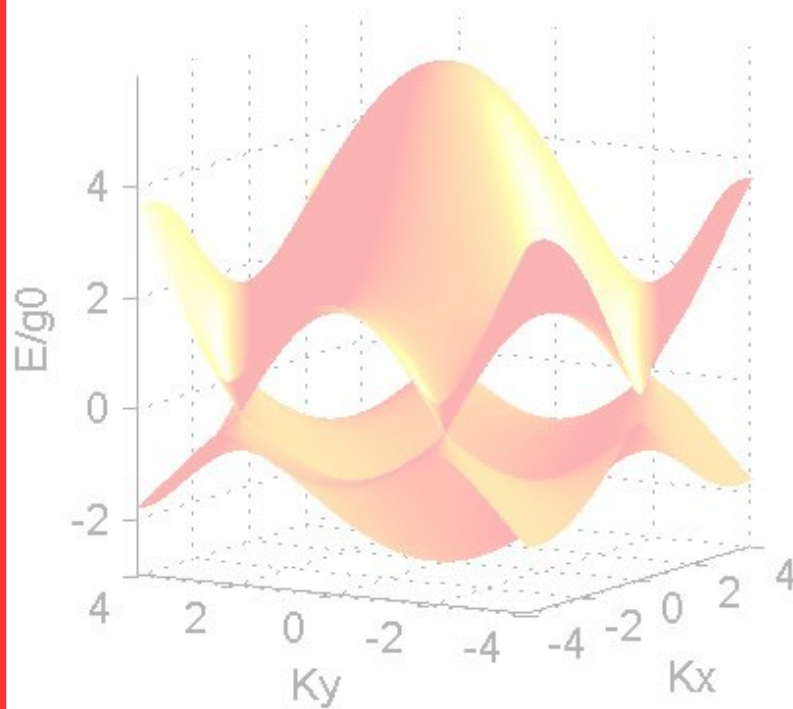
Спектр электронов в графене
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a5/Band_structure_CNT.jpg



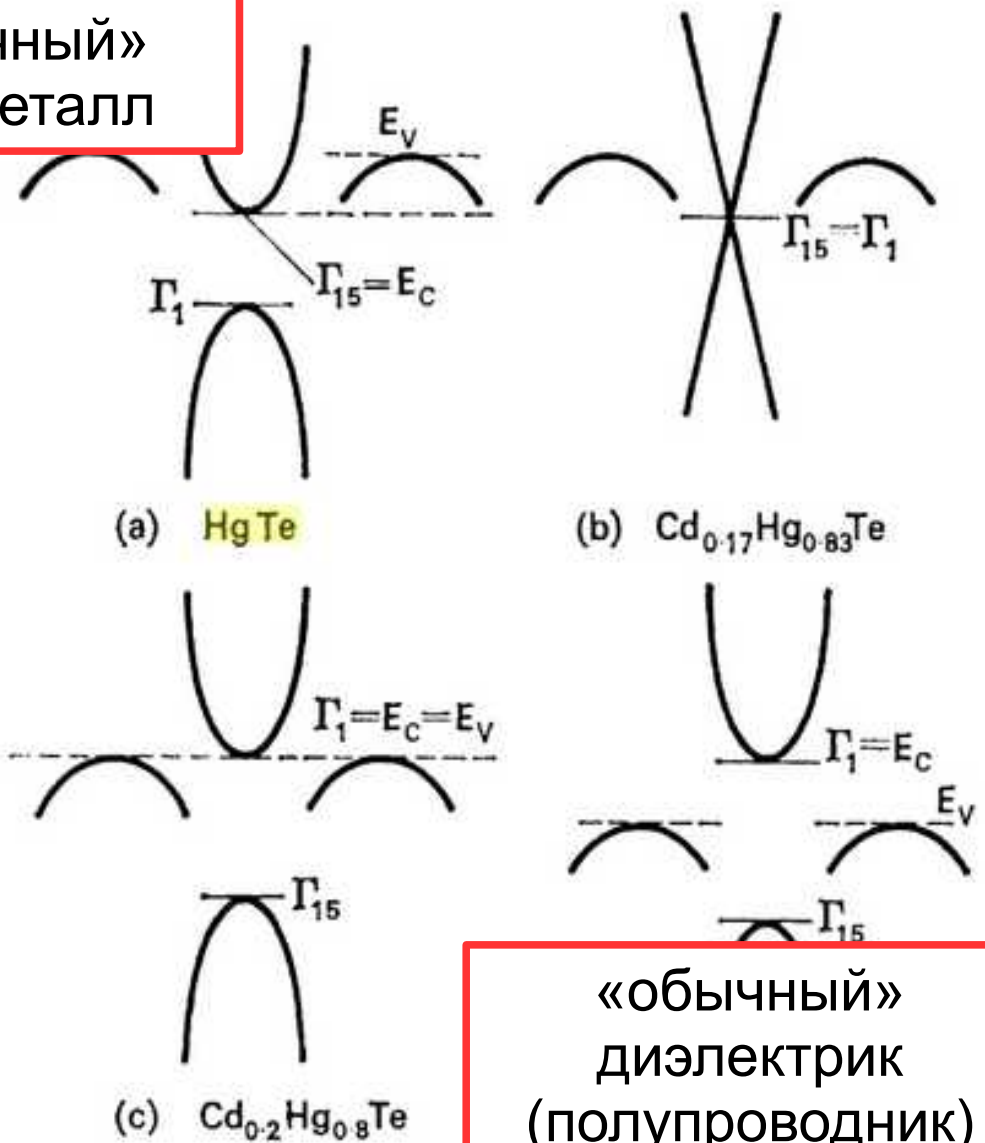
Спектры электронов (зонная структура) соединений Cd-Hg-Te для разной концентрации кадмия. (а) чистый HgTe, полуметалл с перекрытием зон (б) 17% Cd, полуметалл с линейным спектром электронов на некоторых ветвях спектра (с) 20% Cd, перекрытие зон пропало — полупроводник с нулевой запрещённой зоной и квадратичным спектром (д) более высокие концентрации кадмия, обычный полупроводник.

Возможна запрещённая зона

«обычный»
полуметалл



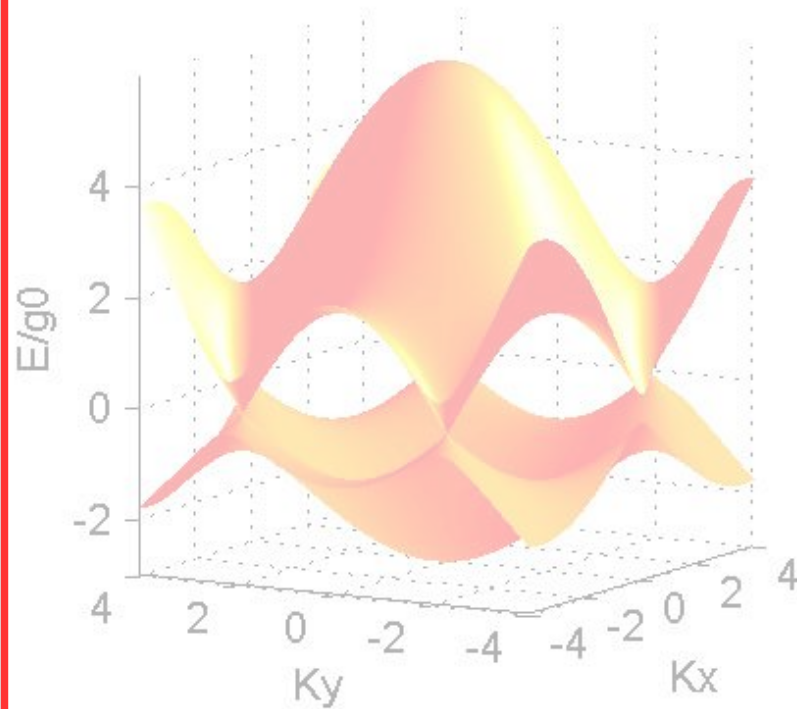
Спектр электронов в графене
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a5/Band_structure_CNT.jpg



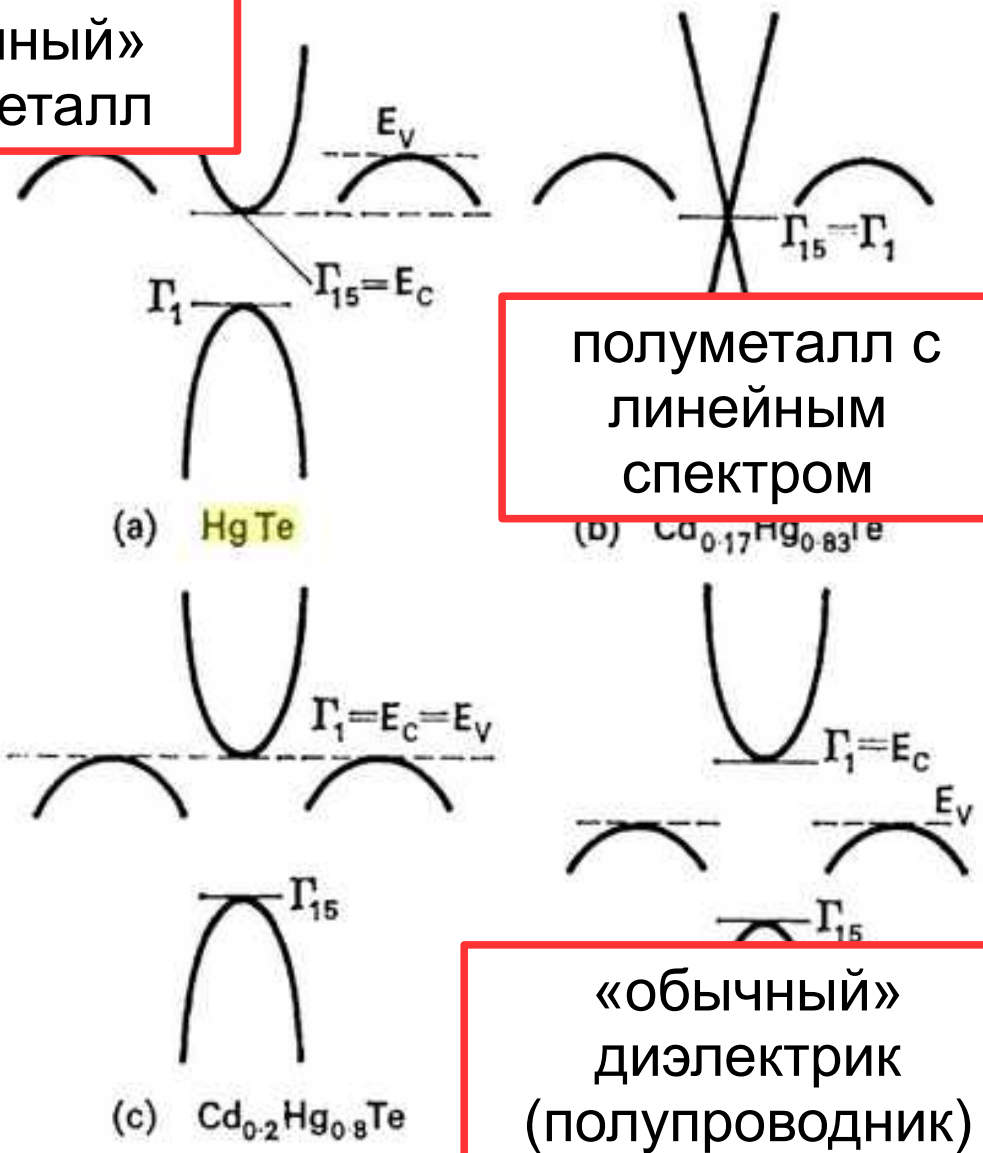
Спектры электронов (зонная структура) соединений Cd-Hg-Te для разной концентрации кадмия. (а) чистый HgTe, полуметалл с перекрытием зон (б) 17% Cd, полуметалл с линейным спектром электронов на некоторых ветвях спектра (с) 20% Cd, перекрытие зон пропало — полупроводник с нулевой запрещённой зоной и квадратичным спектром (д) более высокие концентрации кадмия, обычный полупроводник.

Возможна запрещённой зоной

«обычный»
полуметалл



Спектр электронов в графене
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a5/Band_structure_CNT.jpg



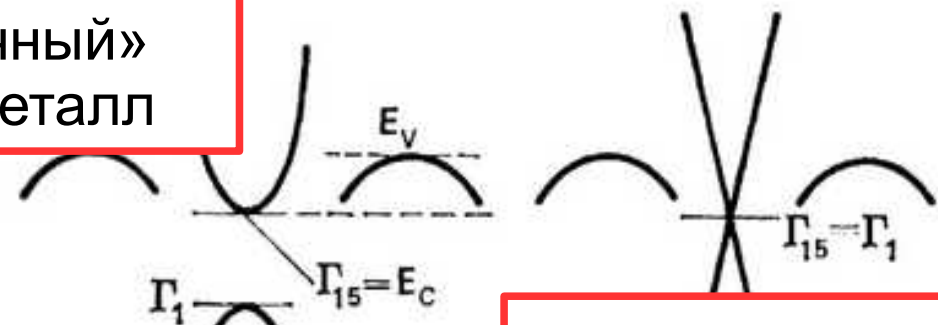
полуметалл с
линейным
спектром

«обычный»
диэлектрик
(полупроводник)

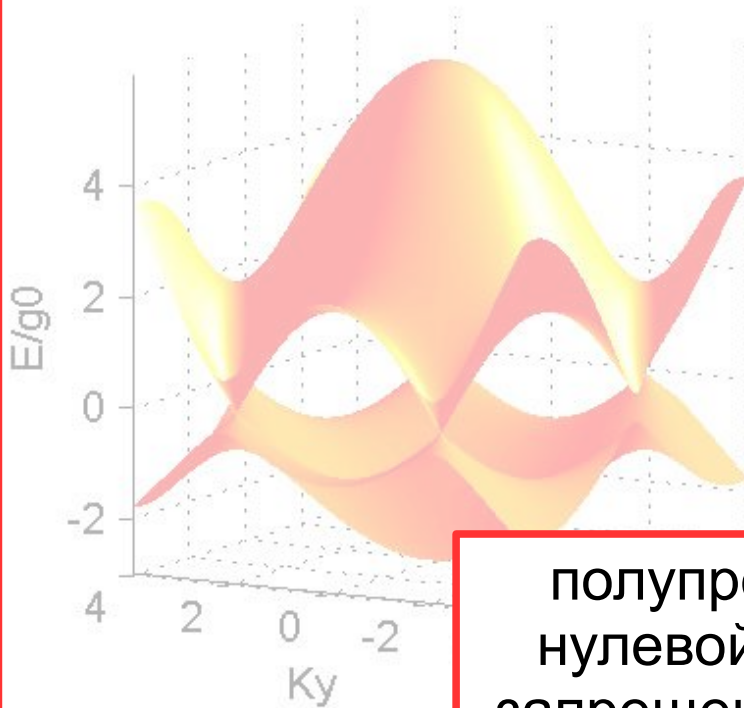
Спектры электронов (зонная структура) соединений Cd-Hg-Te для разной концентрации кадмия. (а) чистый HgTe, полуметалл с перекрытием зон (б) 17% Cd, полуметалл с линейным спектром электронов на некоторых ветвях спектра (с) 20% Cd, перекрытие зон пропало — полупроводник с нулевой запрещённой зоной и квадратичным спектром (д) более высокие концентрации кадмия, обычный полупроводник.

Возможна запрещённой зо

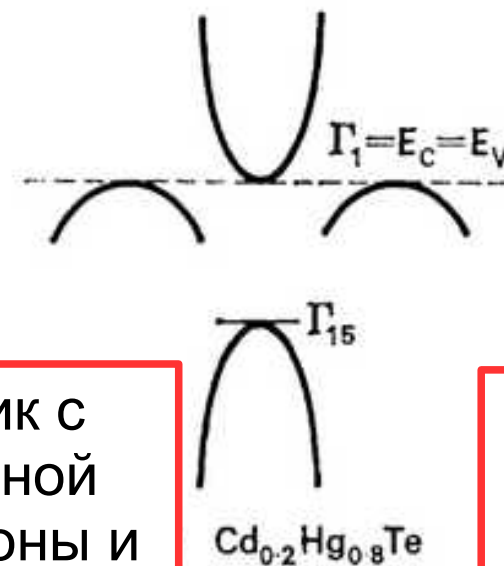
«обычный»
полуметалл



полуметалл с
линейным
спектром



полупроводник с
нулевой шириной
запрещенной зоны и
квадратичным
спектром

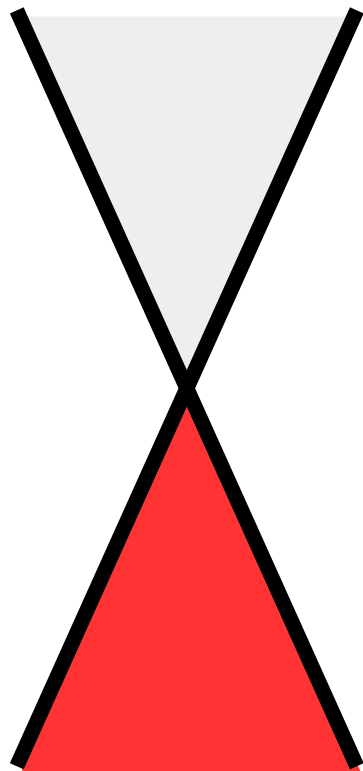


«обычный»
диэлектрик
(полупроводник)

Спектр электронов в графене
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/Band_structure_CNT.jpg

Спектры электронов (зонная структура) соединений Cd-Hg-Te для разной концентрации кадмия. (а) чистый HgTe, полуметалл с перекрытием зон (б) 17% Cd, полуметалл с линейным спектром электронов на некоторых ветвях спектра (с) 20% Cd, перекрытие зон пропало — полупроводник с нулевой запрещённой зоной и квадратичным спектром (д) более высокие концентрации кадмия, обычный полупроводник.

Нулевая ширина запрещённой зоны: особенности.

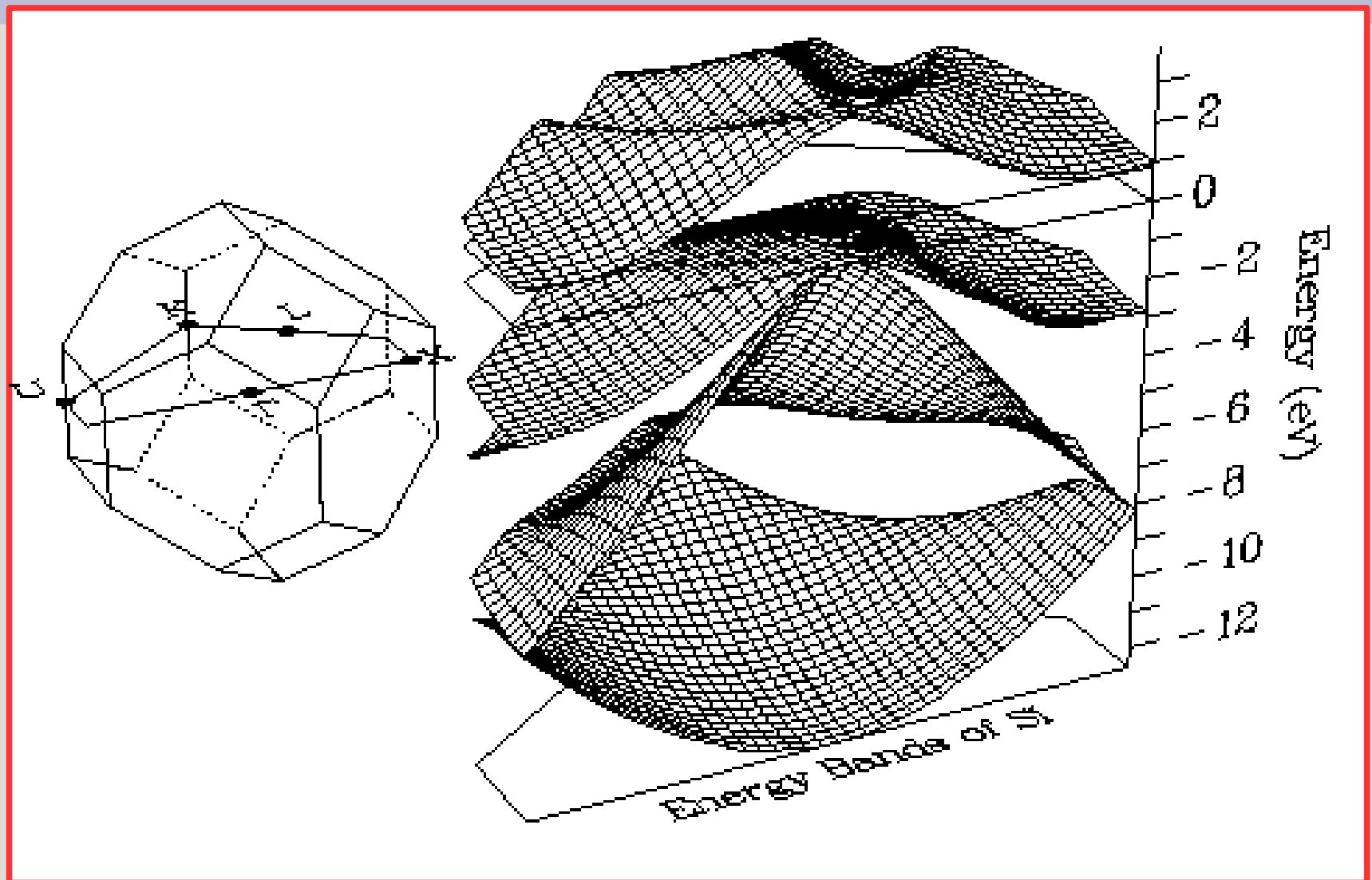


Как в металле: Спектр непрерывен, энергия Ферми=максимальной энергии заполненных состояний.

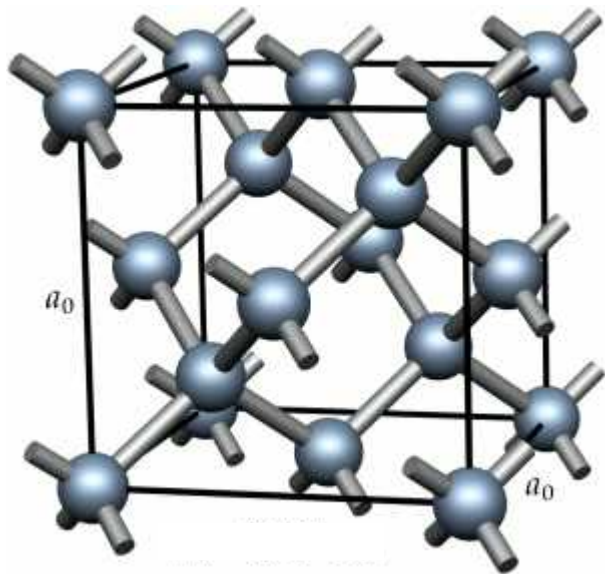
Не как в металле: (3D) Площадь поверхности Ферми=0!

$$\begin{aligned} D(E) &= \frac{dN}{dE} = \frac{dN}{dk} \frac{1}{dE/dk} = \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{dV_k}{dk} \frac{1}{\hbar V_{gp}} = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{S_k}{\hbar V_{gp}} \\ D(E_F) &= 0 \end{aligned}$$

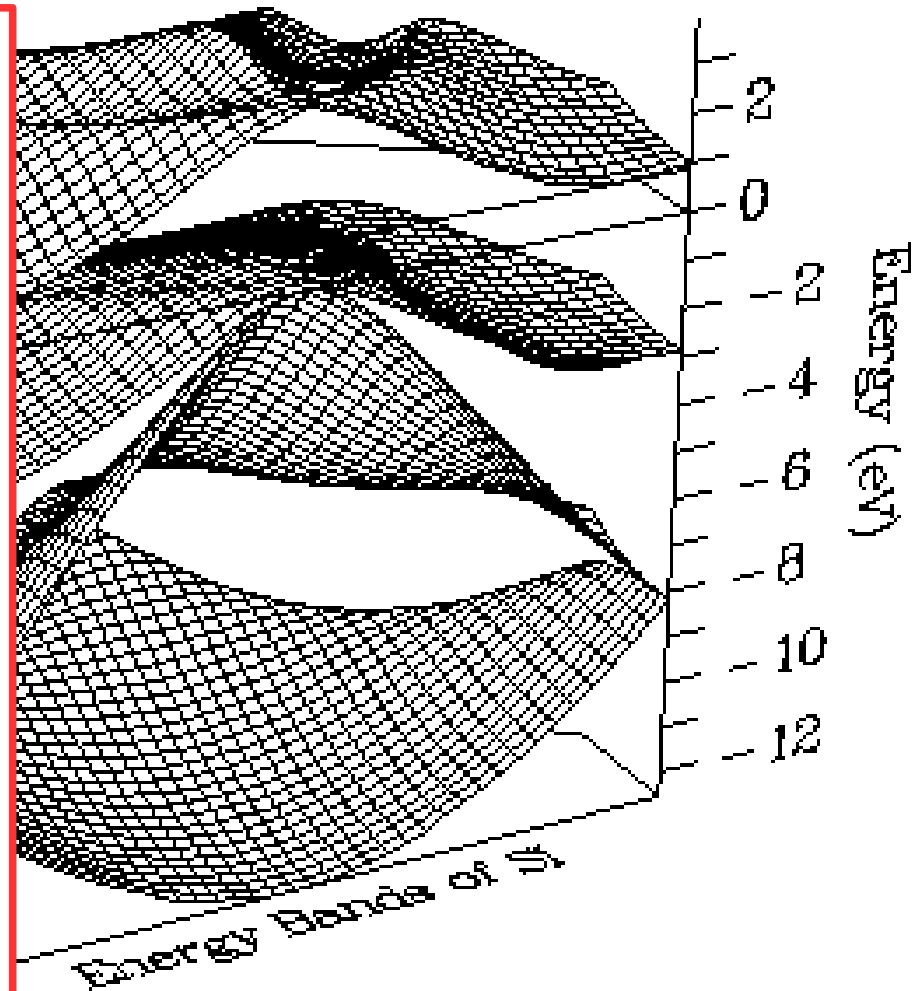
Зонная структура реального полупроводника: Кремний.



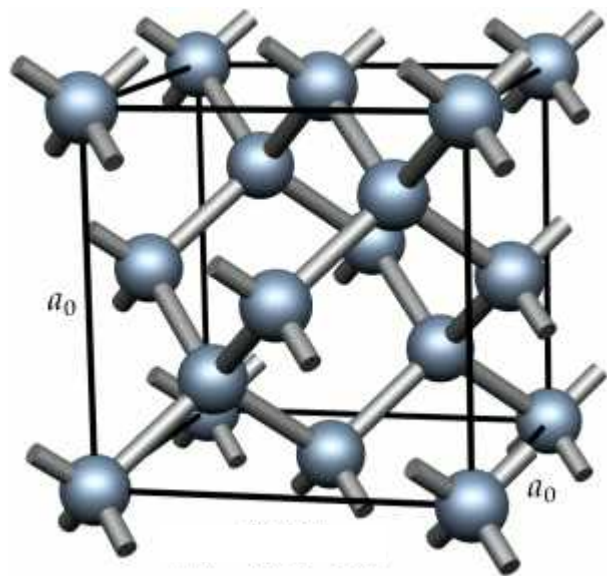
Зонная структура реального полупроводника: Кремний.



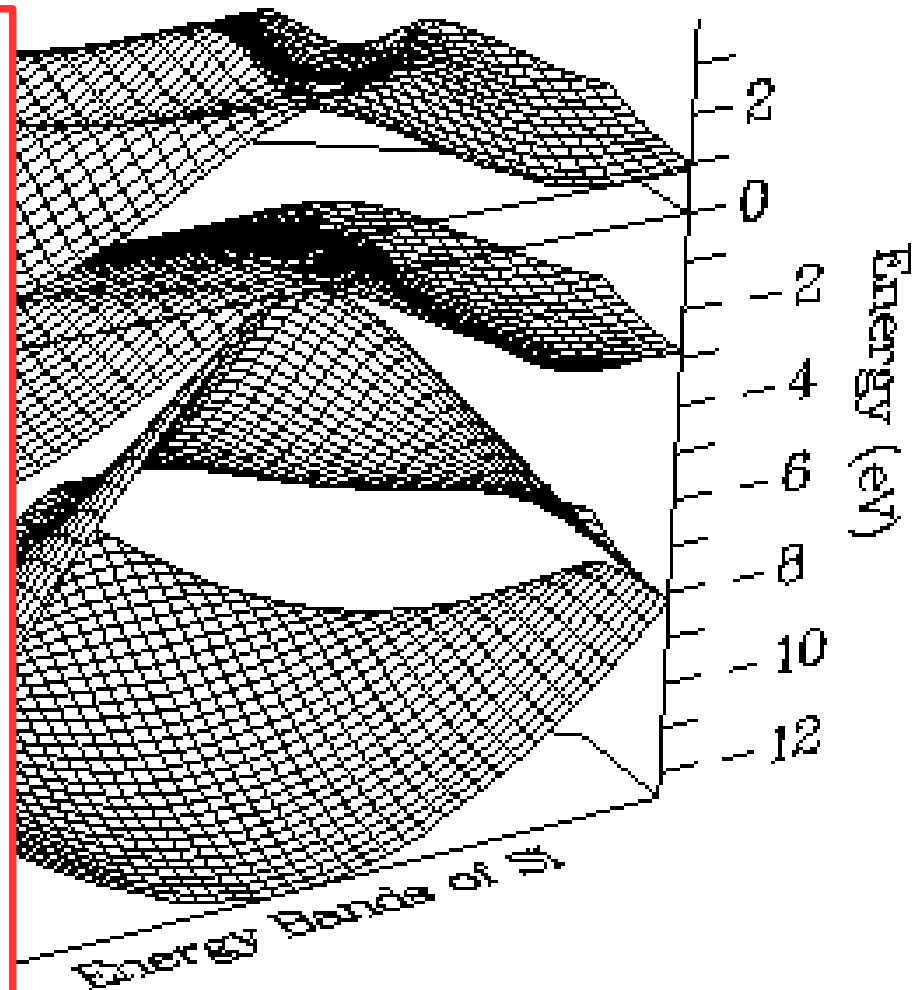
- Si: $3s^23p^2 + sp^3$ гибридизация = 4-кратно вырожденный уровень атома



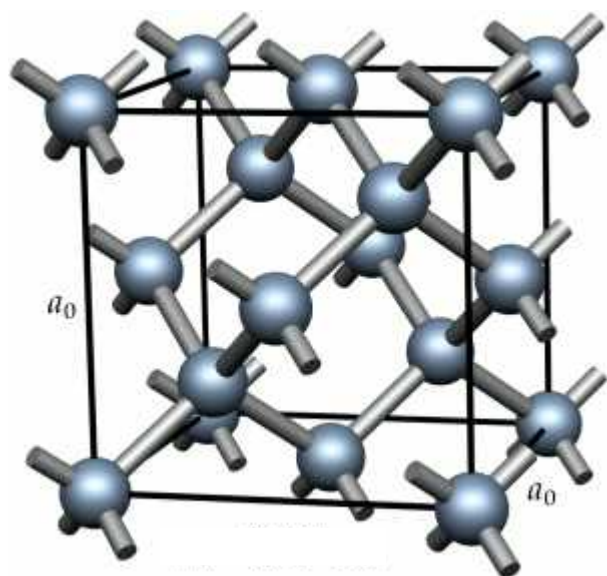
Зонная структура реального полупроводника: Кремний.



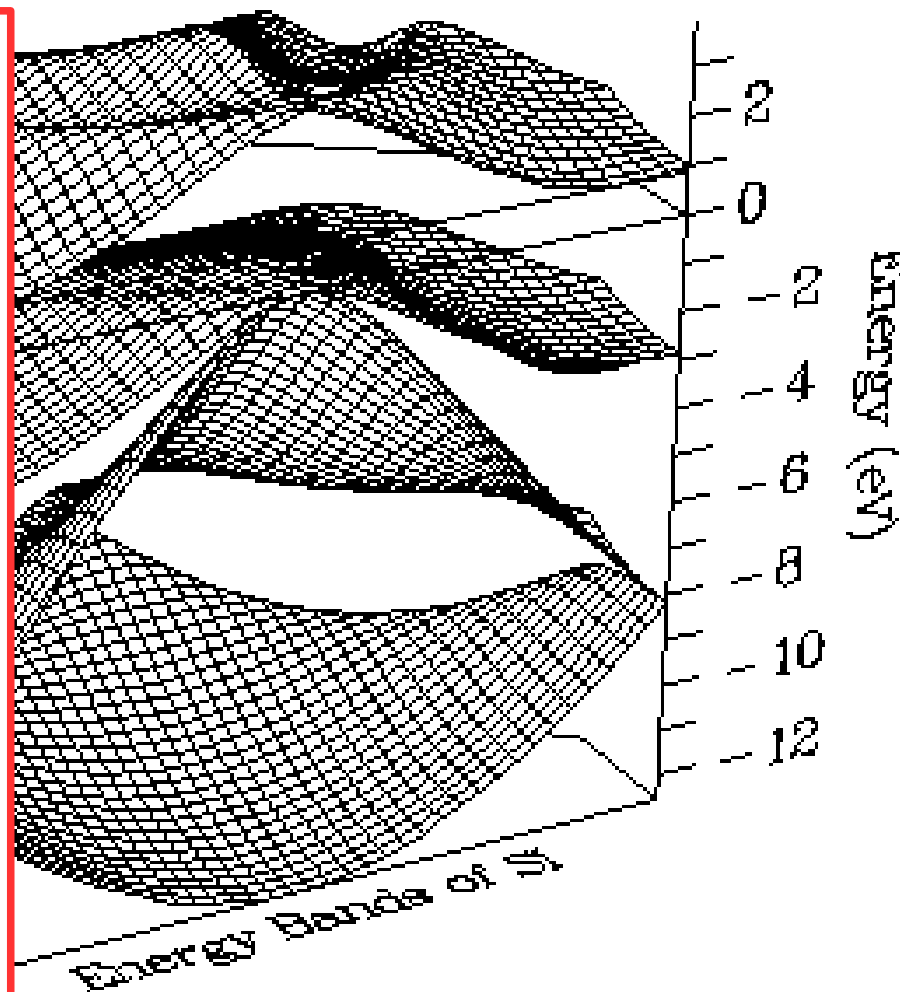
- Si: $3s^2 3p^2 + sp^3$ гибридизация = 4-кратно вырожденный уровень атома
- 2 атома в базисе, в паре атомов частичное снятие вырождения = 2 группы 4-кратно вырожденных уровней



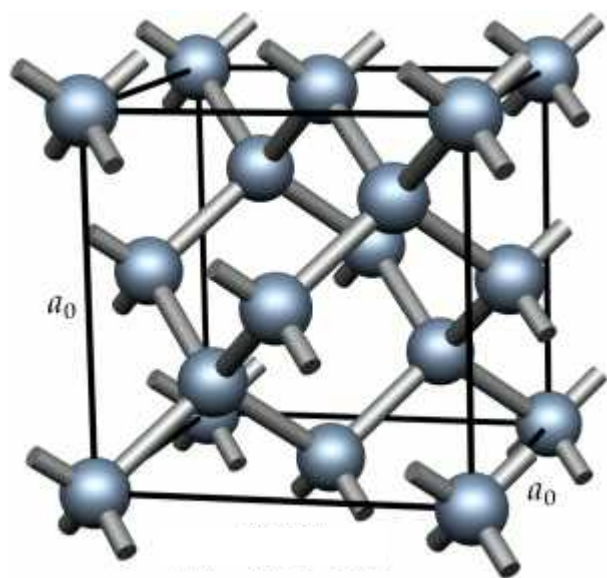
Зонная структура реального полупроводника: Кремний.



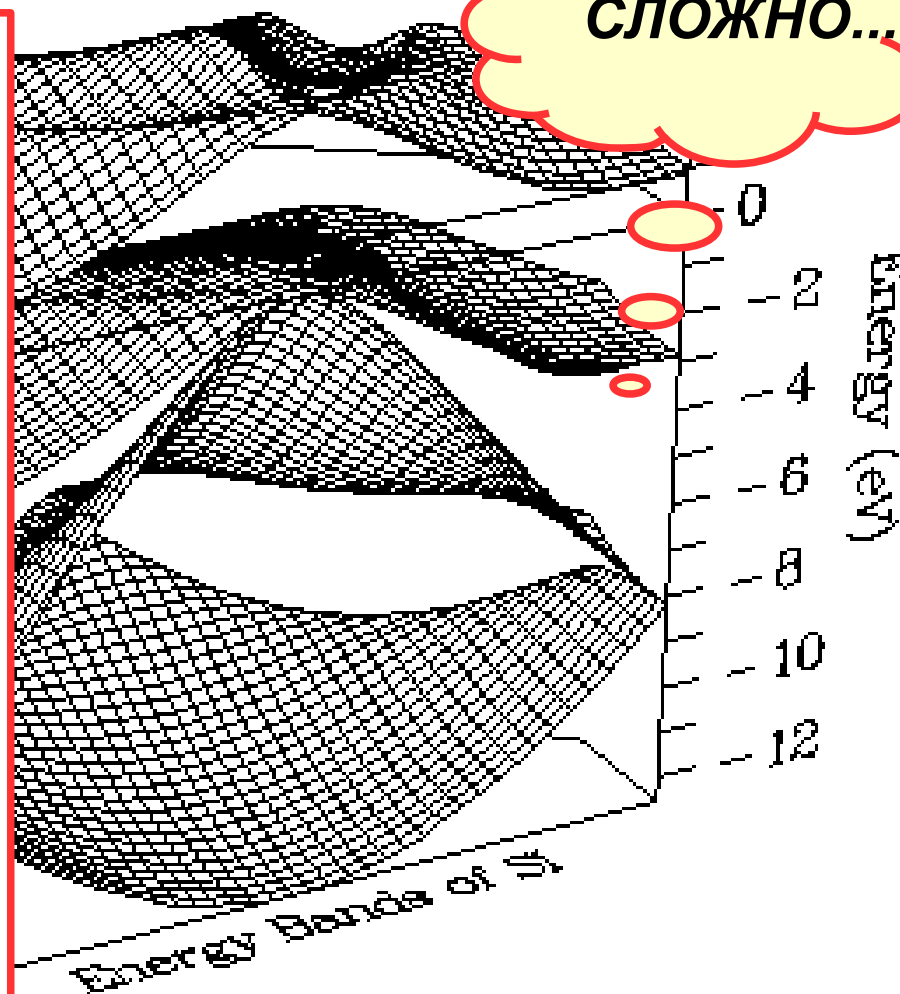
- Si: $3s^2 3p^2 + sp^3$ гибридизация = 4-кратно вырожденный уровень атома
- 2 атома в базисе, в паре атомов частичное снятие вырождения = 2 группы 4-кратно вырожденных уровней
- в кристалле образуются зоны...
- $8e/\text{прим.яч.}$ = полное заполнение нижних 4 зон



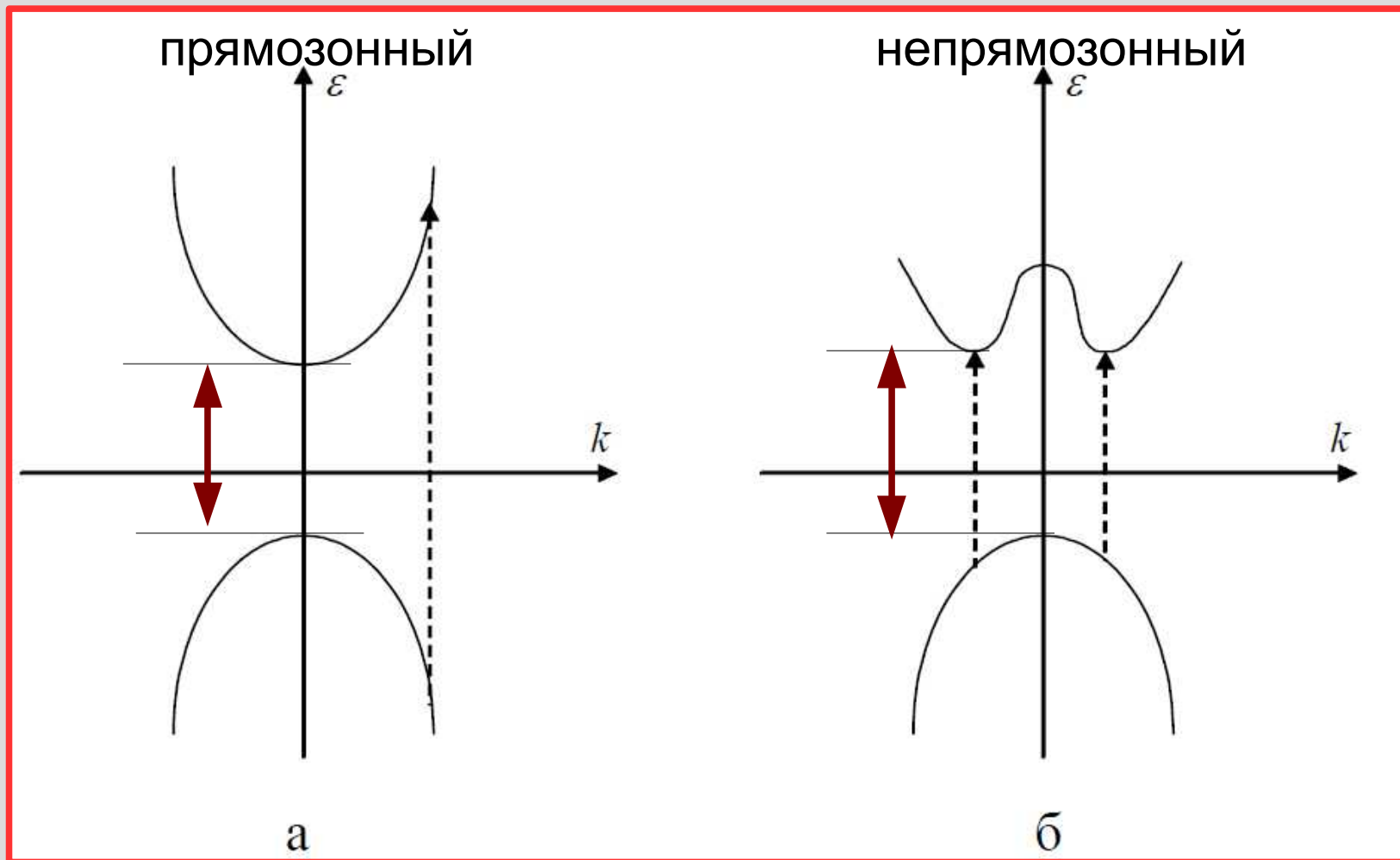
Зонная структура реального полупроводника: Кремний.



- Si: $3s^2 3p^2 + sp^3$ гибридизация = 4-кратно вырожденный уровень атома
- 2 атома в базисе, в паре атомов частичное снятие вырождения = 2 группы 4-кратно вырожденных уровней
- в кристалле образуются зоны...
- $8e/\text{прим.яч.}$ = полное заполнение нижних 4 зон

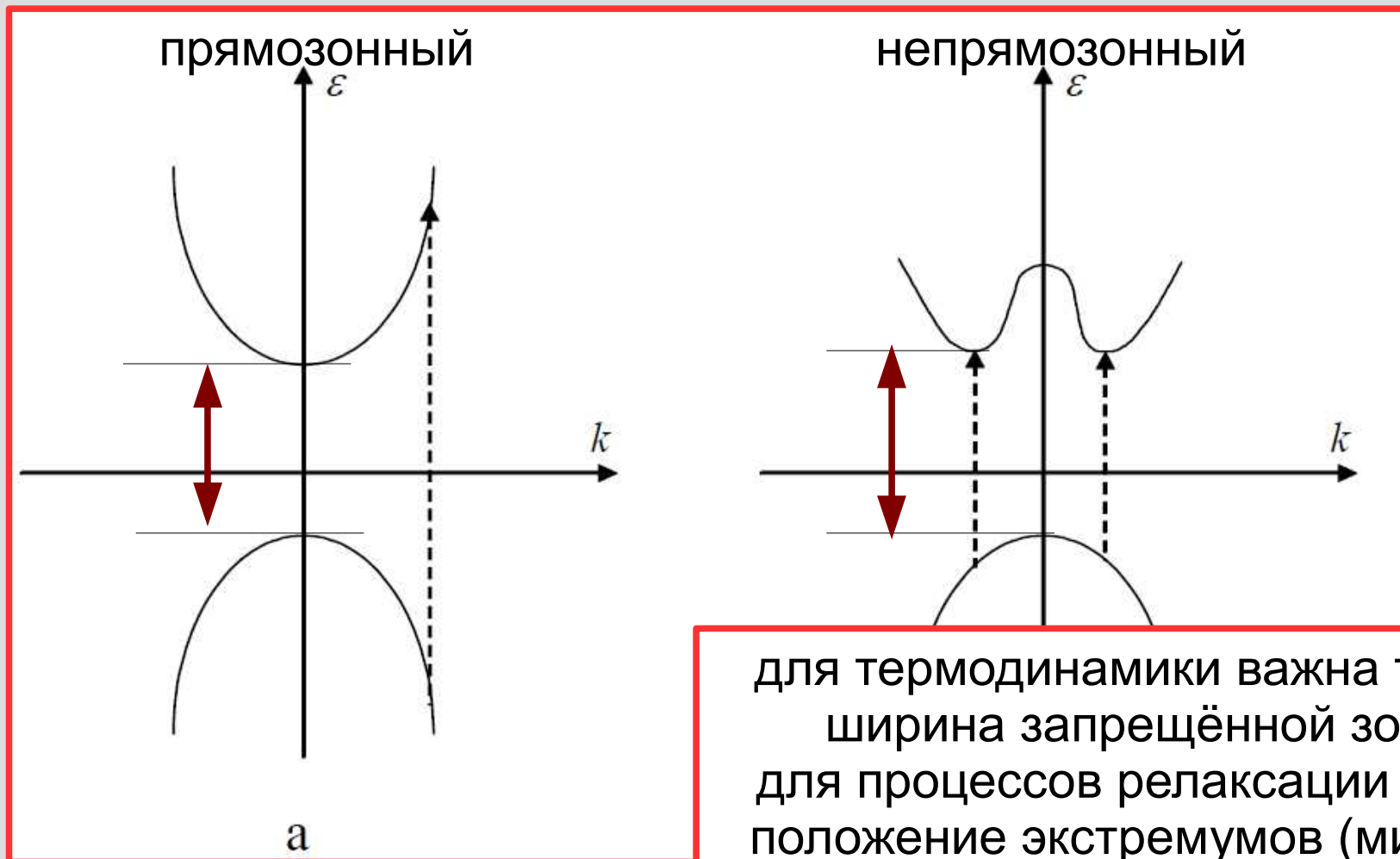


Прямозонный и непрямоzonный полупроводники.



Схематическое изображение полупроводника с прямой и непрямой запрещёнными зонами.
Пунктирные линии — возможные оптические переходы из валентной зоны в зону проводимости.

Прямозонный и непрямозонный полупроводники.

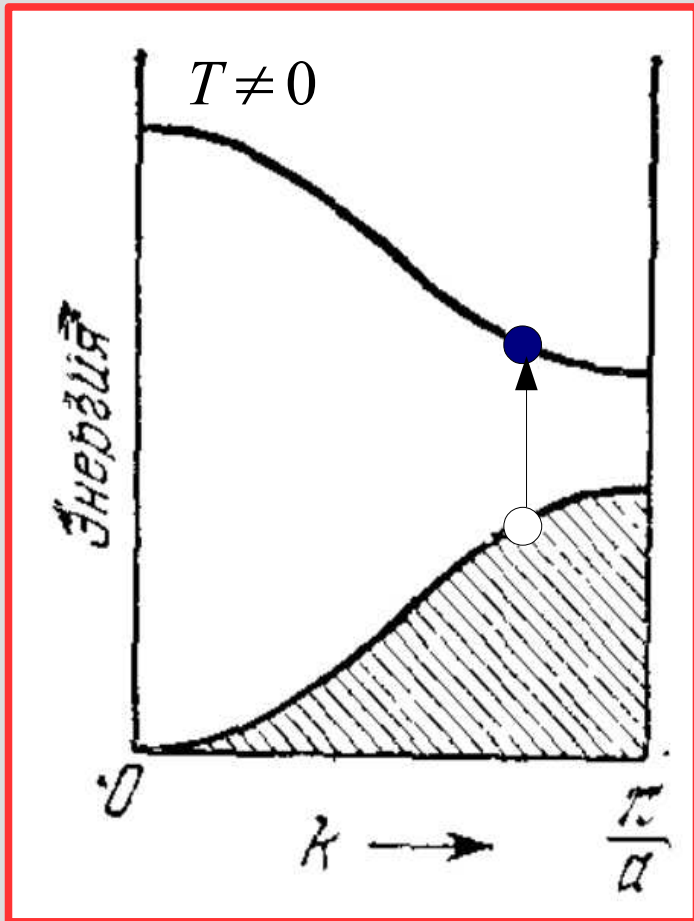


Схематическое изображение полупроводника с
Пунктирные линии — возможные оптические по

для термодинамики важна только
ширина запрещённой зоны,
для процессов релаксации важно
положение экстремумов (микро- и
нано-секунды в прямозонных,
секунды и часы в непрямозонных!)

Часть 2. Электроны и дырки в полупроводнике

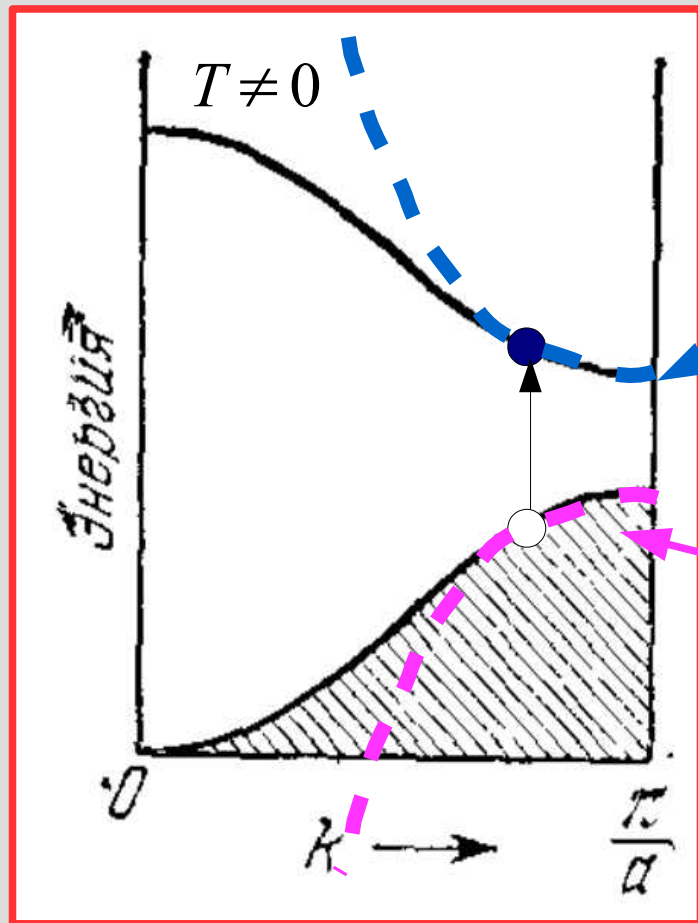
Электроны и дырки в полупроводнике.



$$T \sim 300\text{K} \ll \Delta \sim 0.2 \dots 1 \text{ эВ} \simeq 2000\text{K} \dots 10000\text{K}$$

На основе рис. из книги Ч.Киттеля

Электроны и дырки в полупроводнике.



$$T \sim 300\text{K} \ll \Delta \sim 0.2 \dots 1 \text{ эВ} \simeq 2000\text{K} \dots 10000\text{K}$$

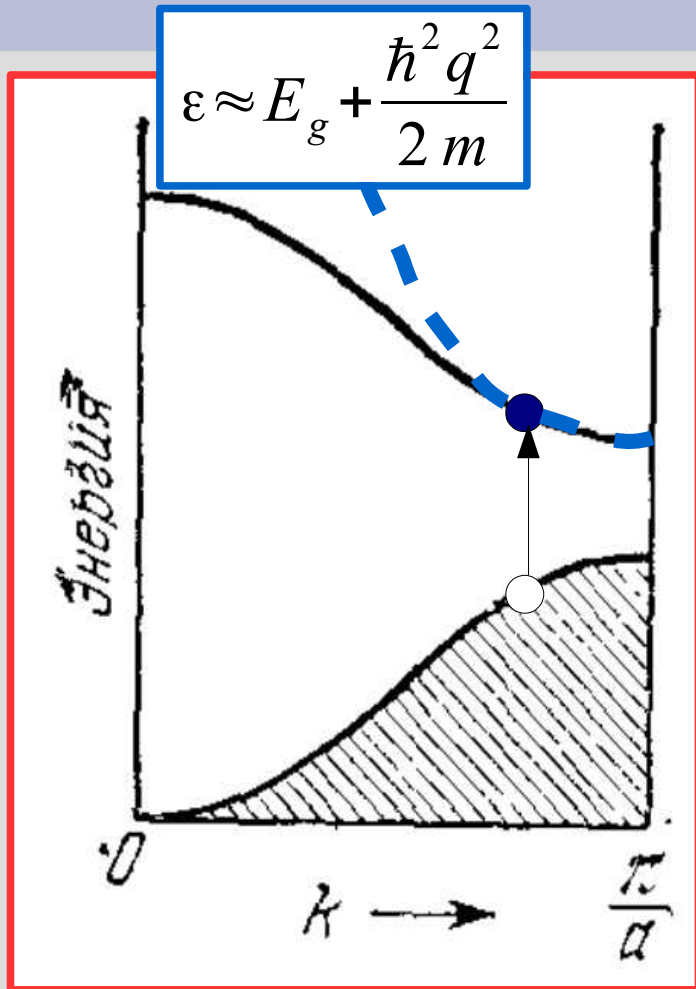
$$\varepsilon \approx E_g + \frac{\hbar^2 q^2}{2m}$$

$$\varepsilon = -\frac{\hbar^2 q^2}{2M}$$

Это ещё не «дырки» - это вакансии в валентной зоне!

На основе рис. из книги Ч.Киттеля

Концентрация электронов в зоне проводимости.

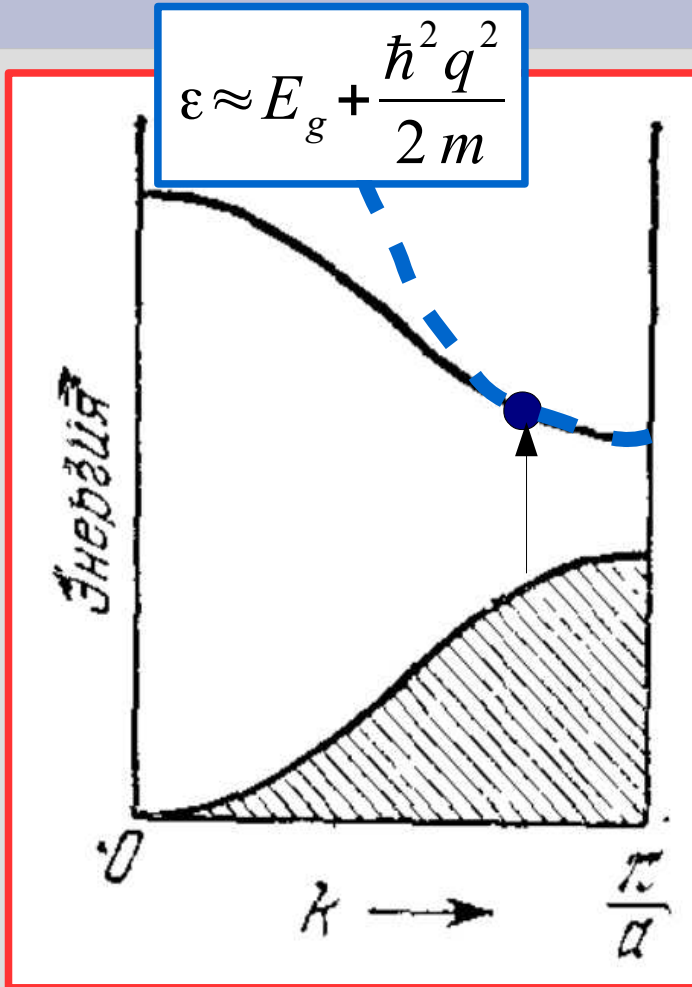


$$f_e = \frac{1}{e^{(\epsilon - \mu)/T} + 1}$$

$$n = \frac{N}{V} = 2 \int_0^\infty f_e \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} = 2 \int_0^\infty f_e(\epsilon) D(\epsilon) d\epsilon$$

На основе рис. из книги Ч.Киттеля

Концентрация электронов в зоне проводимости.



$$f_e = \frac{1}{e^{(\epsilon - \mu)/T} + 1}$$

$$n = \frac{N}{V} = 2 \int_0^\infty f_e \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} = 2 \int_0^\infty f_e(\epsilon) D(\epsilon) d\epsilon$$

В отличие от металлов для полупроводников важен режим **невыврожденного** газа носителей заряда

$$f_e \ll 1 \quad e^{(\epsilon - \mu)/T} \gg 1$$

Концентрация электронов в зоне проводимости.



$$\begin{aligned} 3D: D(E) &= \frac{dN}{dE} = \frac{dN}{dq} \frac{1}{dE/dq} = \\ &= \frac{4\pi q^2}{(2\pi)^3} \frac{m}{\hbar^2 q} = \frac{m^{3/2}}{\sqrt{2}\hbar^3 \pi^2} \sqrt{E - E_g} \end{aligned}$$

На основе рис. из книги Ч.Китте

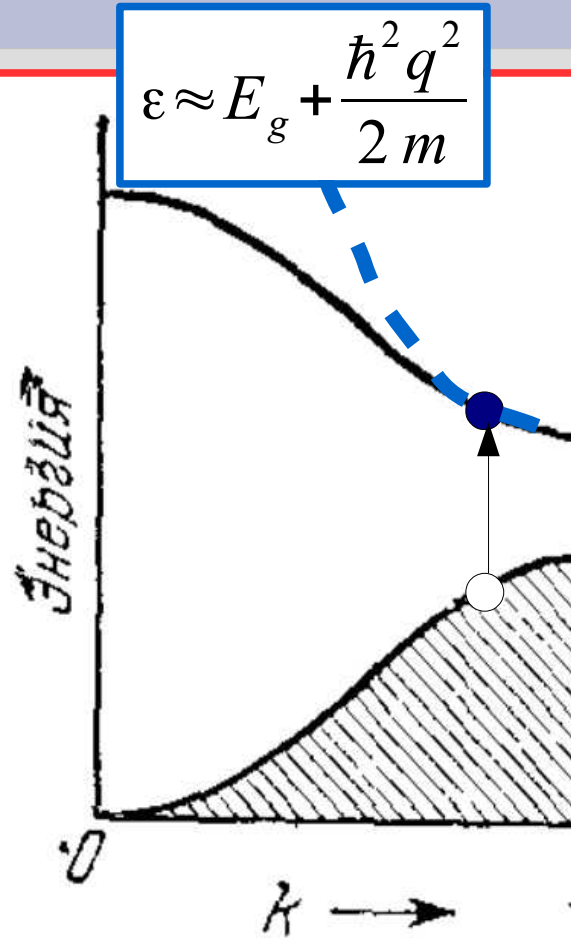
Концентрация электронов в зоне проводимости.



$$\begin{aligned}
 \text{3D: } D(E) &= \frac{dN}{dE} = \frac{dN}{dq} \frac{1}{dE/dq} = \\
 &= \frac{4\pi q^2}{(2\pi)^3} \frac{m}{\hbar^2 q} = \frac{m^{3/2}}{\sqrt{2}\hbar^3 \pi^2} \sqrt{E - E_g} \\
 n_e &\approx 2 \int_{E_g}^{\infty} e^{-E/T + \mu/T} D(E) dE = \\
 &= 2 \frac{m^{3/2}}{\sqrt{2}\hbar^3 \pi^2} e^{-(E_g - \mu)/T} T^{3/2} \int_0^{\infty} e^{-x} \sqrt{x} dx
 \end{aligned}$$

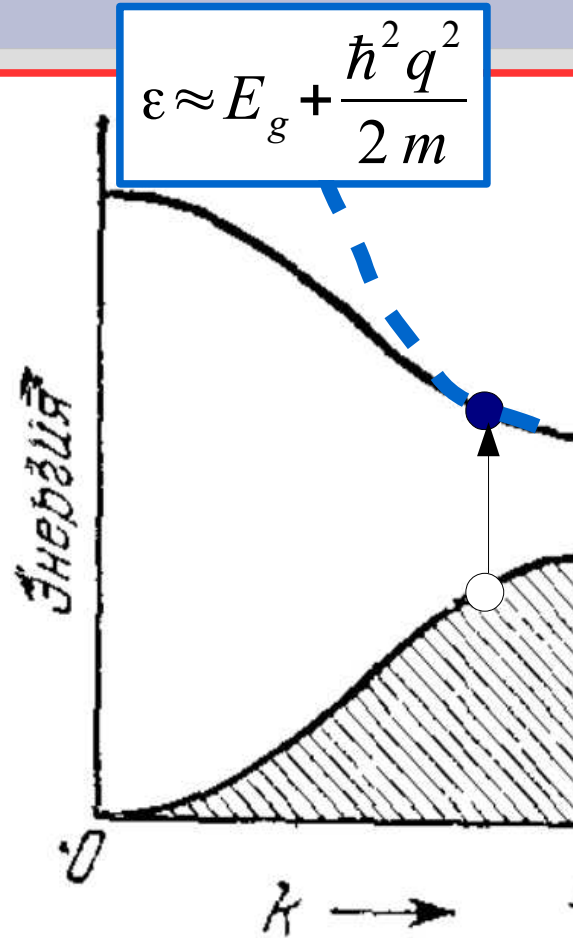
На основе рис. из книги Ч.Киттэ

Концентрация электронов в зоне проводимости.



$$\begin{aligned}
 \text{3D: } D(E) &= \frac{dN}{dE} = \frac{dN}{dq} \frac{1}{dE/dq} = \\
 &= \frac{4\pi q^2}{(2\pi)^3} \frac{m}{\hbar^2 q} = \frac{m^{3/2}}{\sqrt{2}\hbar^3 \pi^2} \sqrt{E - E_g} \\
 n_e &\approx 2 \int_{E_g}^{\infty} e^{-E/T + \mu/T} D(E) dE = \\
 &= 2 \frac{m^{3/2}}{\sqrt{2}\hbar^3 \pi^2} e^{-(E_g - \mu)/T} T^{3/2} \int_0^{\infty} e^{-x} \sqrt{x} dx \\
 &\quad \frac{\sqrt{\pi}}{2}
 \end{aligned}$$

Концентрация электронов в зоне проводимости.

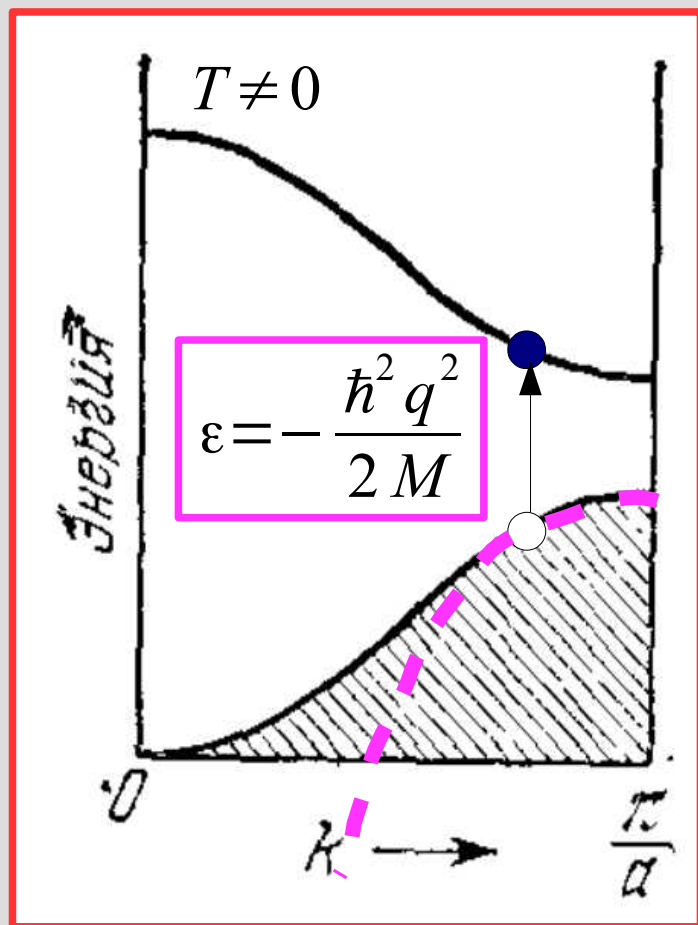


$$\begin{aligned}
 \text{3D: } D(E) &= \frac{dN}{dE} = \frac{dN}{dq} \frac{1}{dE/dq} = \\
 &= \frac{4\pi q^2}{(2\pi)^3} \frac{m}{\hbar^2 q} = \frac{m^{3/2}}{\sqrt{2}\hbar^3 \pi^2} \sqrt{E - E_g} \\
 n_e &\approx 2 \int_{E_g}^{\infty} e^{-E/T + \mu/T} D(E) dE = \\
 &= 2 \frac{m^{3/2}}{\sqrt{2}\hbar^3 \pi^2} e^{-(E_g - \mu)/T} T^{3/2} \int_0^{\infty} e^{-x} \sqrt{x} dx \\
 &\quad \frac{\sqrt{\pi}}{2}
 \end{aligned}$$

На основе рис. из книги Ч.Ки

$$n_e \approx 2 \left(\frac{mT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E_g - \mu)/T} = Q_e e^{-(E_g - \mu)/T}$$

Концентрация вакансий в валентной зоне.

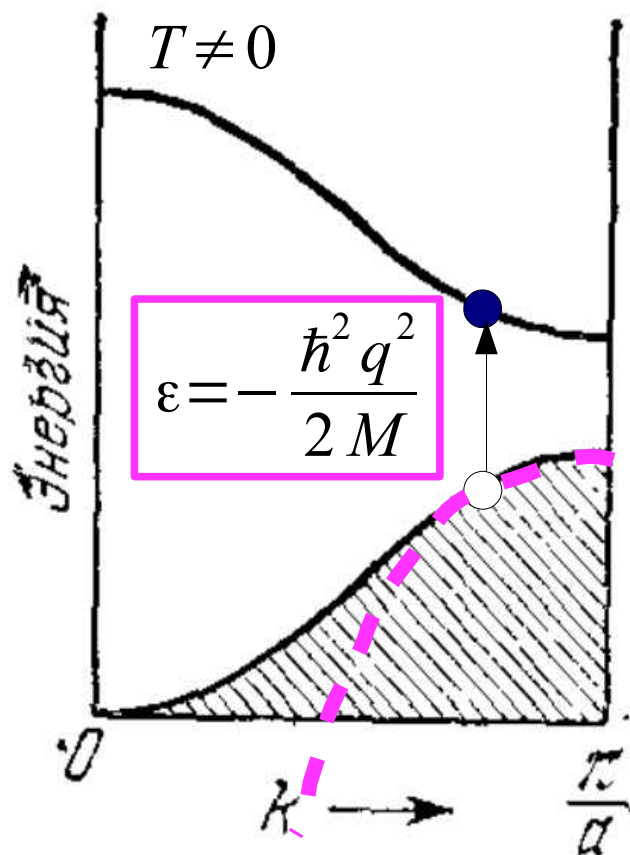


$$f_{vac} = 1 - \frac{1}{e^{(\varepsilon - \mu)/T} + 1} = \frac{1}{1 + e^{-(\varepsilon - \mu)/T}}$$

$$n = \frac{N}{V} = 2 \int_0^\infty f_{vac} \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} = 2 \int_0^\infty f_{vac}(\varepsilon) D(\varepsilon) d\varepsilon$$

На основе рис. из книги Ч.Киттеля

Концентрация вакансий в валентной зоне.



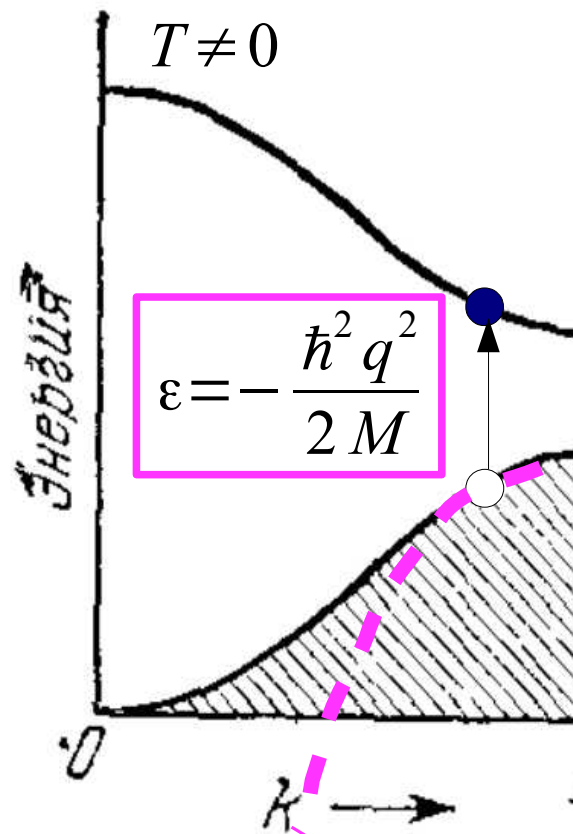
$$f_{vac} = 1 - \frac{1}{e^{(\varepsilon - \mu)/T} + 1} = \frac{1}{1 + e^{-(\varepsilon - \mu)/T}}$$

$$n = \frac{N}{V} = 2 \int_0^\infty f_{vac} \frac{d^3 q}{(2\pi)^3} = 2 \int_0^\infty f_{vac}(\varepsilon) D(\varepsilon) d\varepsilon$$

концентрация вакансий мала, обычно
режим **невырожденного** газа
носителей заряда

$$f_{vac} \ll 1 \quad e^{-(\varepsilon - \mu)/T} \gg 1$$

Концентрация вакансий в валентной зоне.



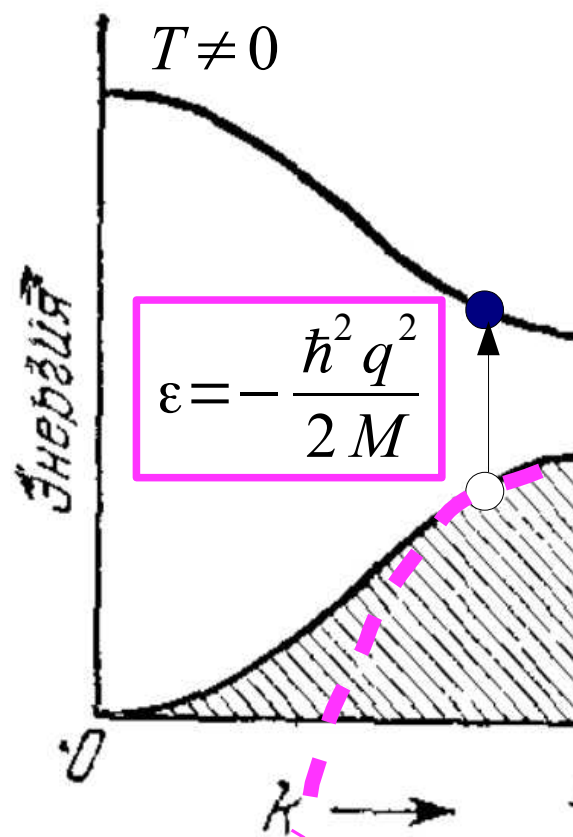
$$3D: D(E) = \frac{m^{3/2}}{\sqrt{2} \hbar^3 \pi^2} \sqrt{E}$$

$$n_{vac} \approx 2 \int_0^\infty e^{-E/T - \mu/T} D(E) dE =$$

$d\varepsilon$

0

Концентрация вакансий в валентной зоне.

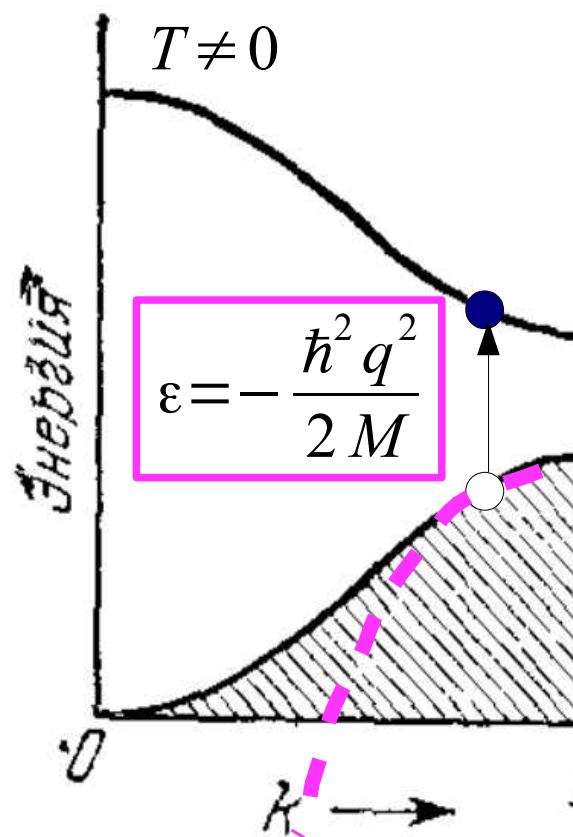


$$3D: D(E) = \frac{m^{3/2}}{\sqrt{2\hbar^3 \pi^2}} \sqrt{E}$$

$$n_{vac} \approx 2 \int_0^{\infty} e^{-E/T - \mu/T} D(E) dE =$$

$$= 2 \frac{m^{3/2}}{\sqrt{2\hbar^3 \pi^2}} e^{-\mu/T} T^{3/2} \int_0^{\infty} e^{-x} \sqrt{x} dx$$

Концентрация вакансий в валентной зоне.



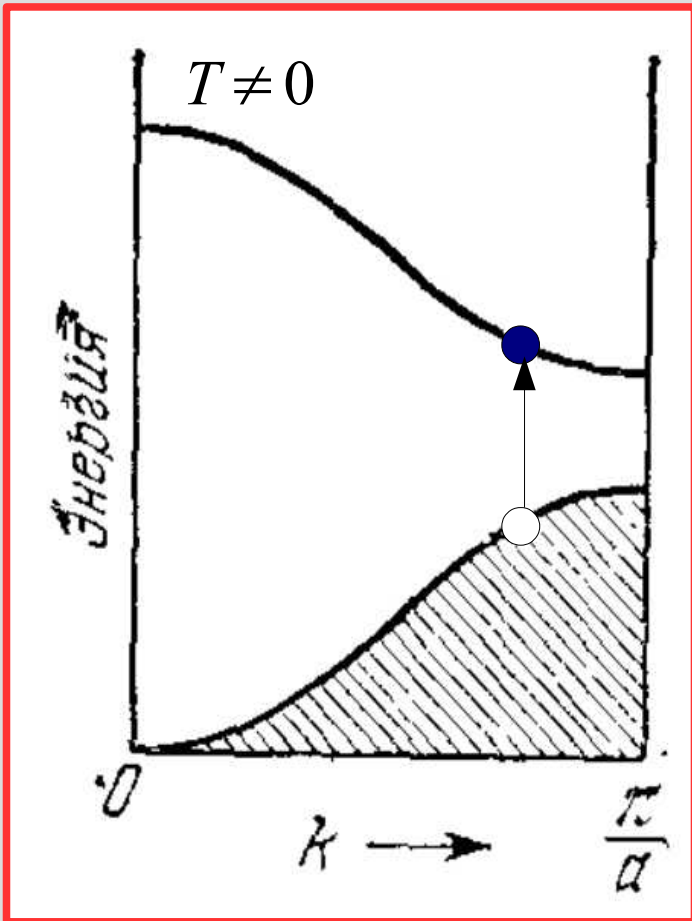
$$3D: D(E) = \frac{m^{3/2}}{\sqrt{2} \hbar^3 \pi^2} \sqrt{E}$$

$$n_{vac} \approx 2 \int_0^{\infty} e^{-E/T - \mu/T} D(E) dE =$$

$$= 2 \frac{m^{3/2}}{\sqrt{2} \hbar^3 \pi^2} e^{-\mu/T} T^{3/2} \int_0^{\infty} e^{-x} \sqrt{x} dx$$

$$n_{vac} \approx 2 \left(\frac{m T}{2 \pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/T} = Q_h e^{-\mu/T}$$

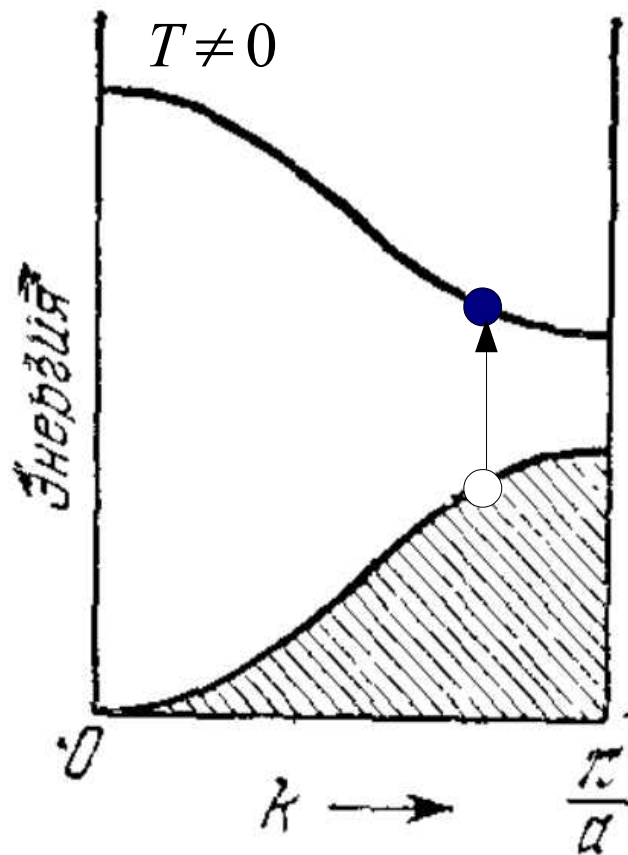
Дырки в полупроводнике.



Дырка = валентная зона без одного электрона

На основе рис. из книги Ч.Киттеля

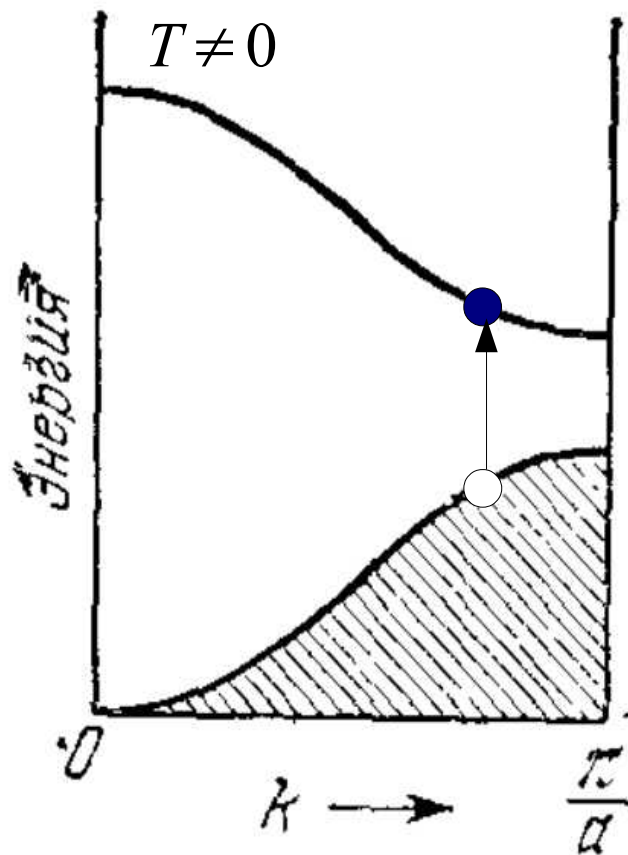
Дырки в полупроводнике.



Дырка = валентная зона без одного электрона

квазиимпульс вакансии: \vec{k}_{vac}

Дырки в полупроводнике.

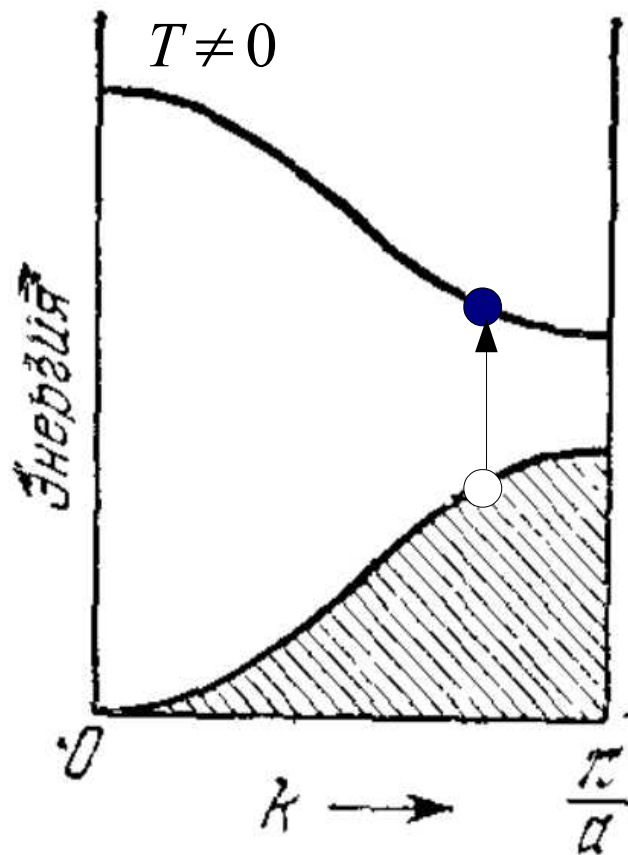


Дырка = валентная зона без одного электрона

квазиимпульс вакансии: \vec{k}_{vac}

квазиимпульс
заполненной зоны: 0

Дырки в полупроводнике.



Дырка = валентная зона без одного электрона

квазиимпульс вакансии: \vec{k}_{vac}

квазиимпульс
заполненной зоны: 0

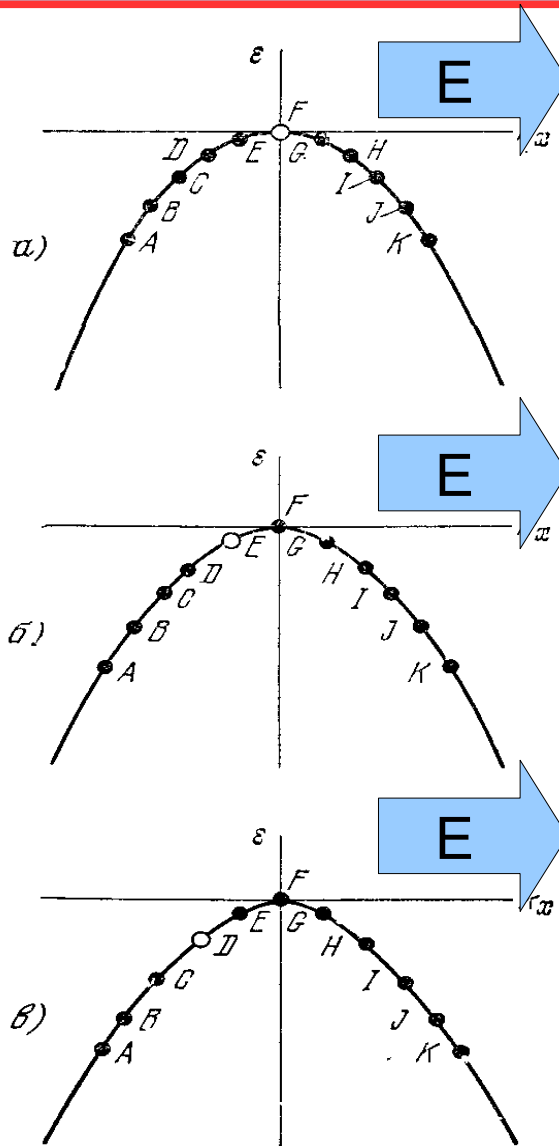
квазиимпульс дырки: $-\vec{k}_{vac}$

заряд дырки: $q > 0$

Дырки в полупроводнике.

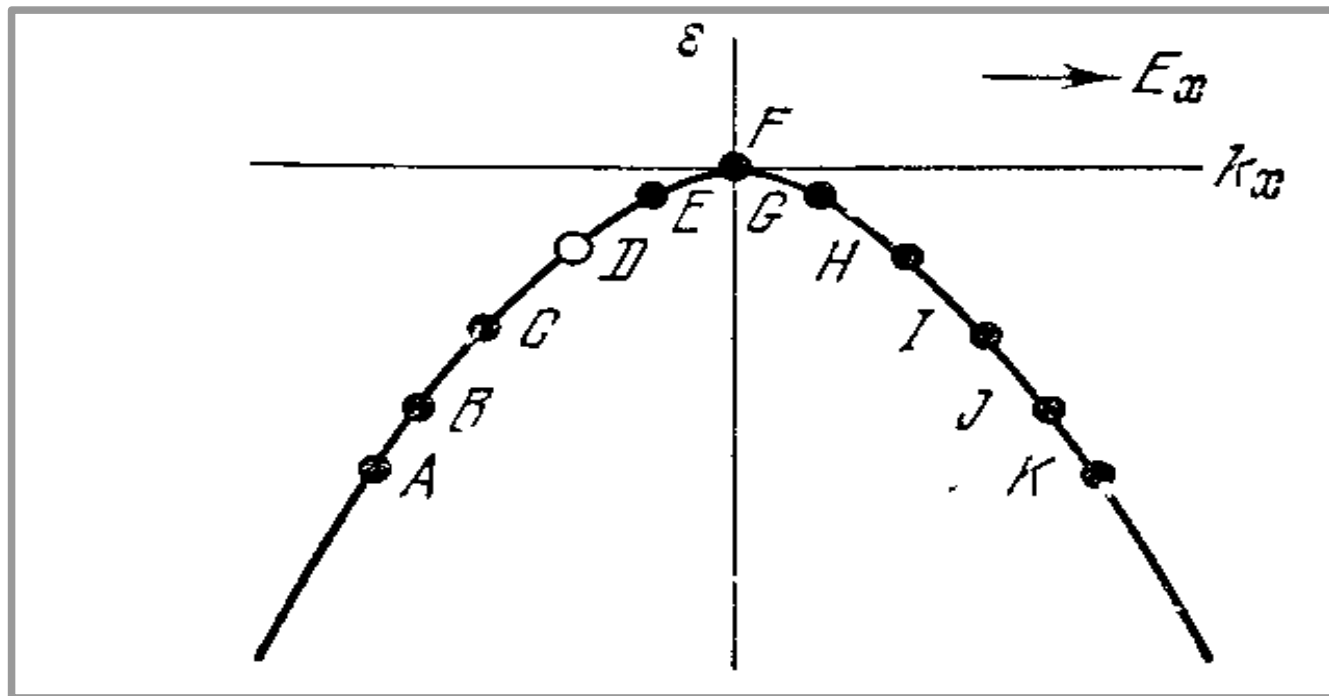
$$\hbar \frac{d \vec{q}}{d t} = -e \vec{E}$$

в электрическом
поле *вакансия*
движется с
электронами!

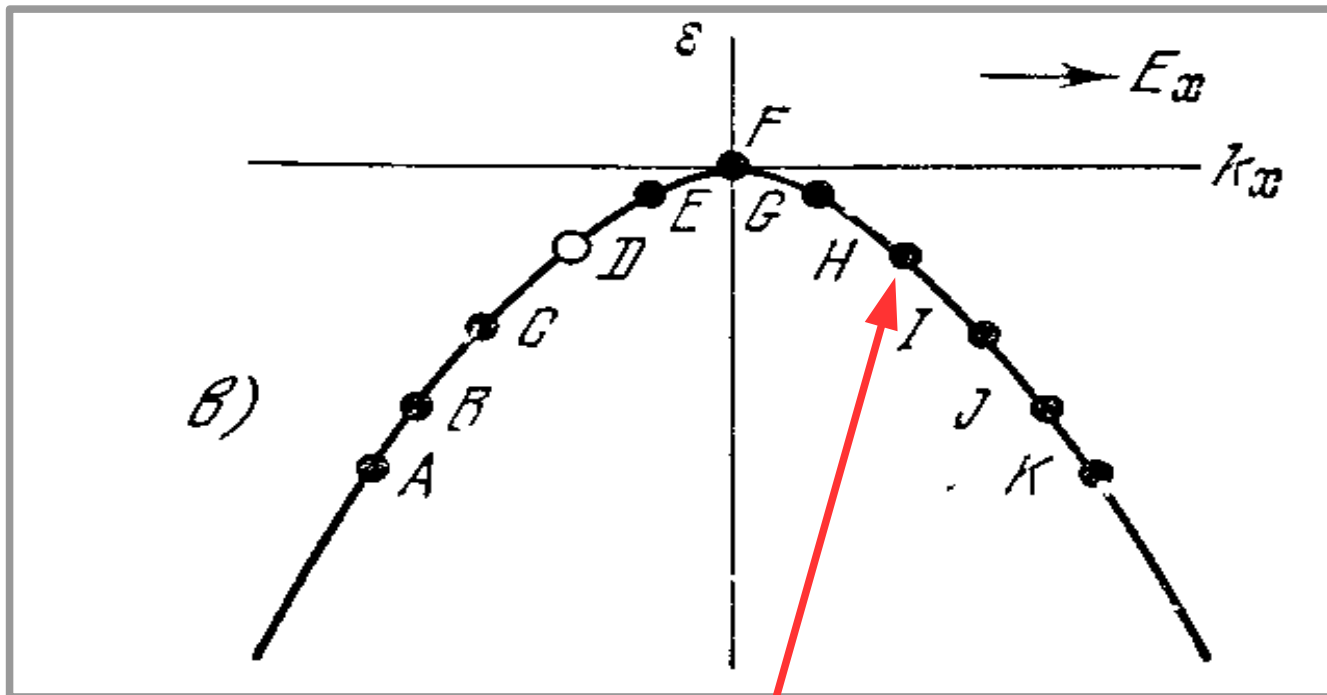


На основе рис

Дырки в полупроводнике.

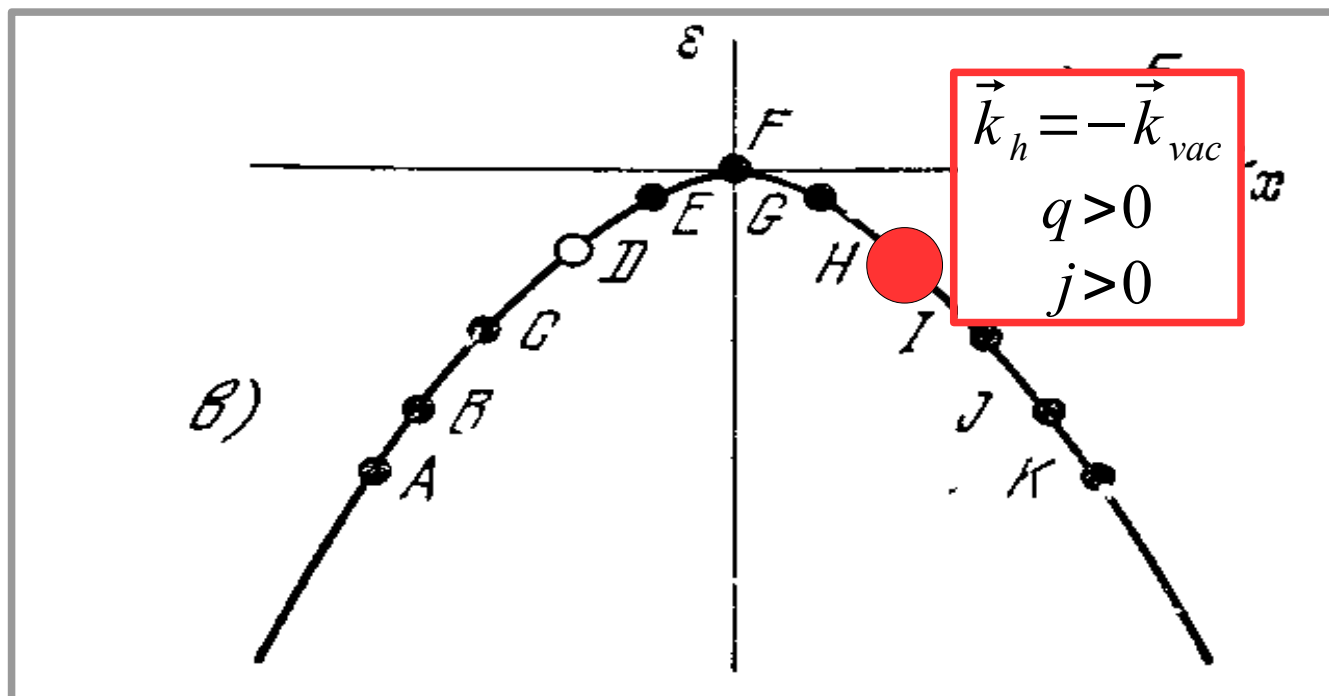


Дырки в полупроводнике.

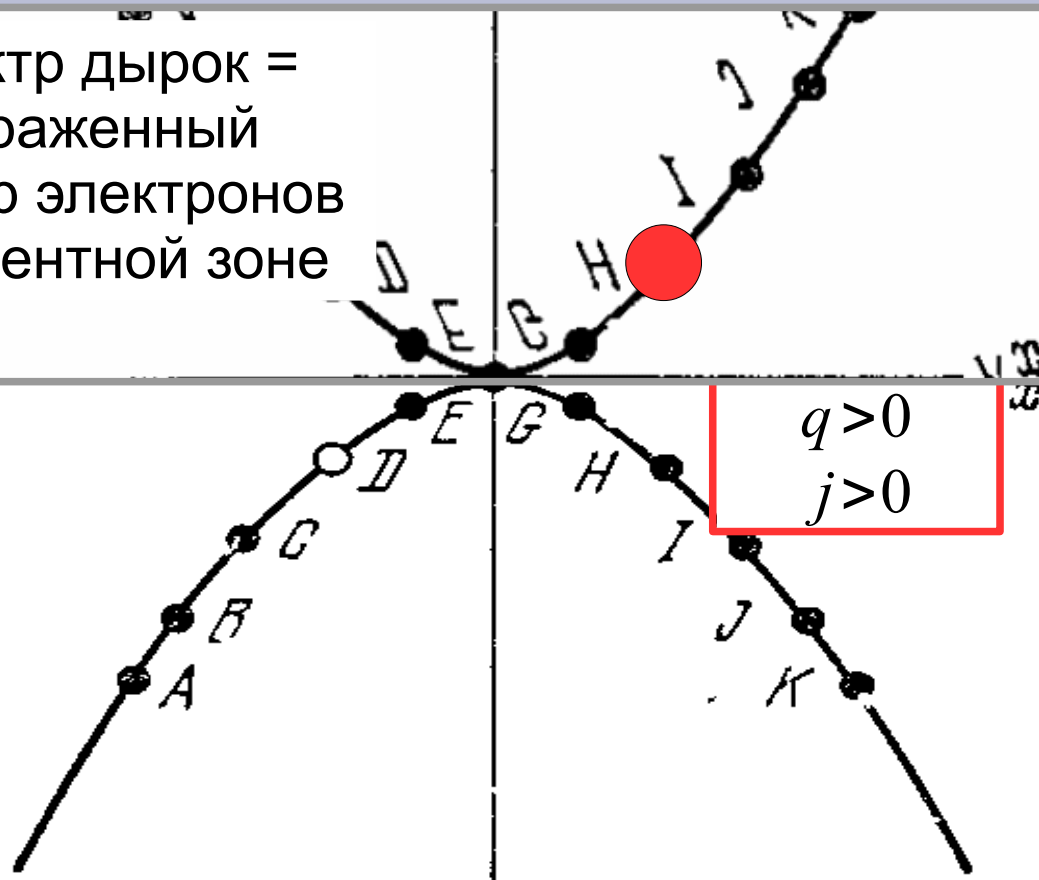


- Электрон «H» реально переносит заряд.
- Его групповая скорость: $V_{gp} = -\frac{d\varepsilon}{\hbar dk} < 0$
- Ток: $j > 0$

Дырки в полупроводнике.



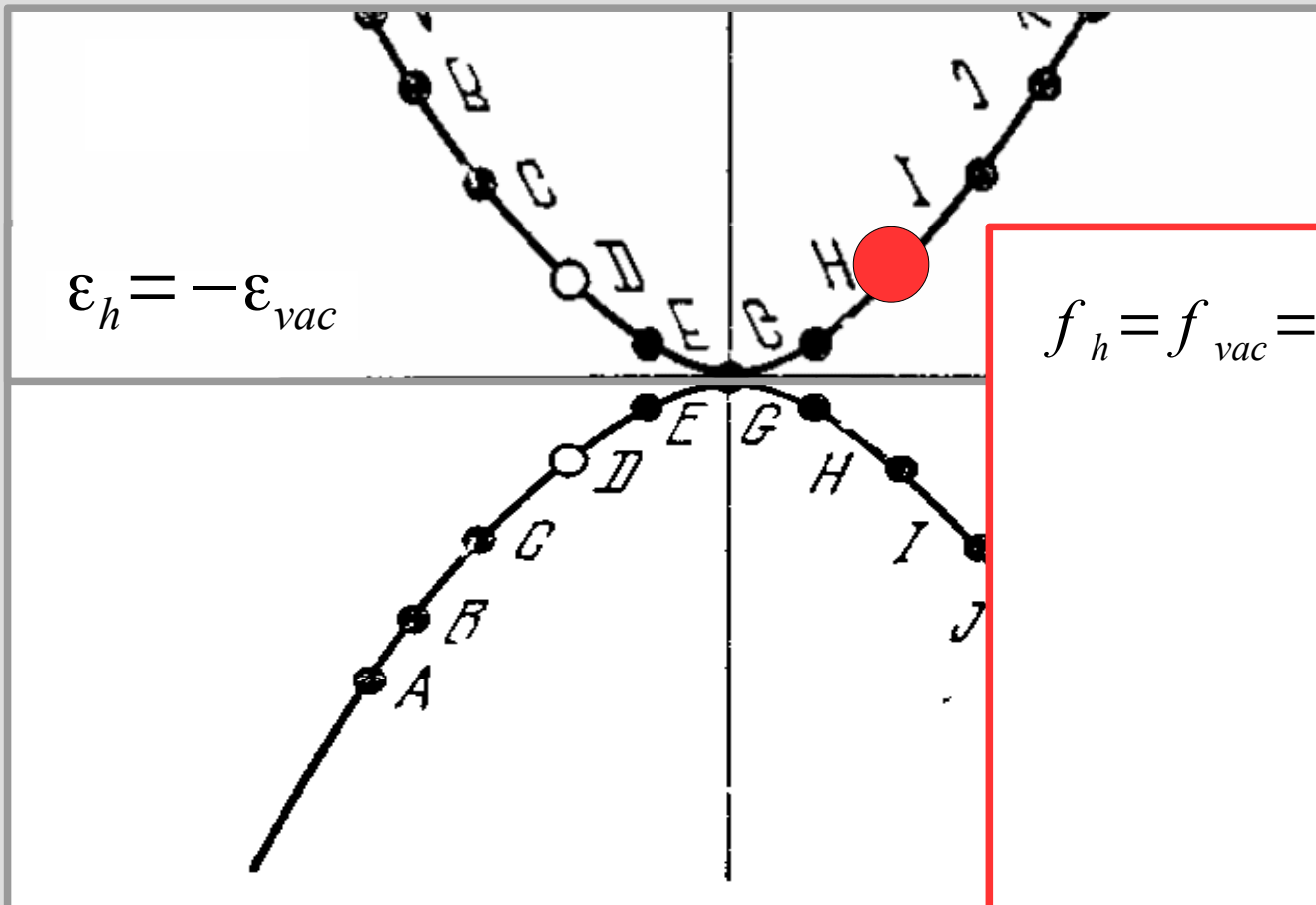
спектр дырок =
отраженный
спектр электронов
в валентной зоне



ике.

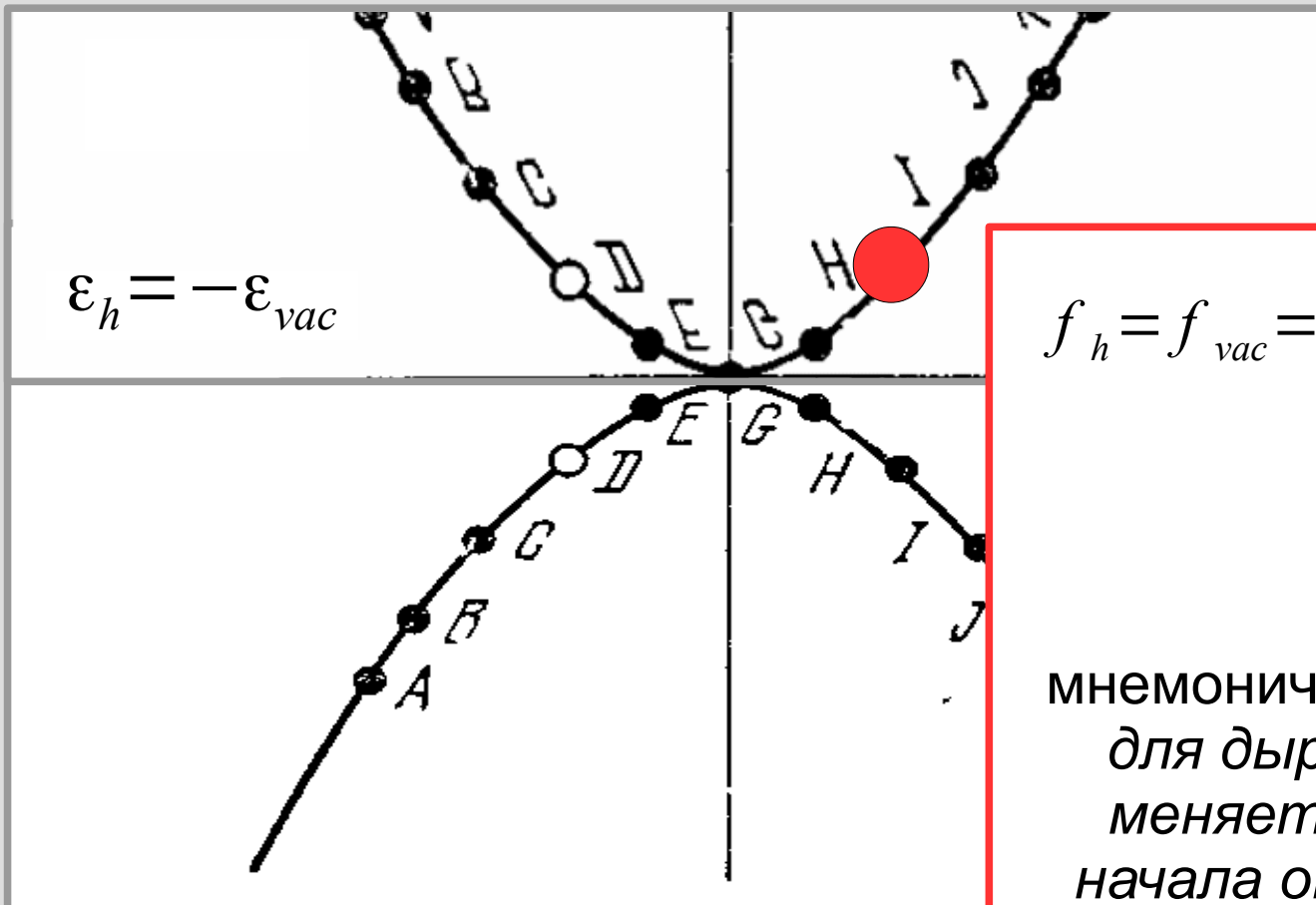
- $\epsilon_h = -\epsilon_{vac}$
- Минимум энергии дырки — в экстремуме, «дырки всплывают»

Функция распределения для дырок.



$$f_h = f_{vac} = 1 - f_e = \frac{1}{1 + e^{-(\epsilon_{vac} - \mu)/T}} = \frac{1}{e^{(\epsilon_h + \mu)/T} + 1}$$

Функция распределения для дырок.



$$f_h = f_{vac} = 1 - f_e = \frac{1}{1 + e^{-(\epsilon_{vac} - \mu)/T}} = \frac{1}{e^{(\epsilon_h + \mu)/T} + 1}$$

мнемоническое правило:
для дырок химпотенциал
меняет знак (при выборе
начала отсчёта энергии на
потолке валентной зоны)

Часть 3. Равновесные концентрации подвижных зарядов. «Правило рычага».

Равновесные концентрации носителей заряда в полупроводнике.

$$n_e \approx 2 \left(\frac{m_e T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E_g - \mu)/T} = Q_e e^{-(E_g - \mu)/T}$$

$$n_h \approx 2 \left(\frac{m_h T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/T} = Q_h e^{-\mu/T}$$

Статфактор зоны — эффективное число состояний в зоне

$$Q = 2.51 \cdot 10^{19} \left(\frac{m}{m_0} \times \frac{T[K]}{300 K} \right)^{3/2} 1/\text{см}^3$$

Равновесные концентрации носителей заряда в полупроводнике.

$$n_e \approx 2 \left(\frac{m_e T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E_g - \mu)/T} = Q_e e^{-(E_g - \mu)/T}$$

$$n_h \approx 2 \left(\frac{m_h T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/T} = Q_h e^{-\mu/T}$$

Правило рычага:

$$n_e \times n_h = Q_e Q_h e^{-E_g/T}$$

не зависит от положения уровня химпотенциала (пока оба газа носителей невырождены)

Равновесные концентрации носителей заряда в полупроводнике.

$$n_e \approx 2 \left(\frac{m_e T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E_g - \mu)/T} = Q_e e^{-(E_g - \mu)/T}$$

$$n_h \approx 2 \left(\frac{m_h T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/T} = Q_h e^{-\mu/T}$$

Условие электронейтральности:

$$n_e = n_h$$
$$Q_e e^{-(E_g - \mu)/T} = Q_h e^{-\mu/T}$$

уравнение на химпотенциал

Равновесные концентрации носителей заряда в полупроводнике.

$$n_e \approx 2 \left(\frac{m_e T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E_g - \mu)/T} = Q_e e^{-(E_g - \mu)/T}$$

$$n_h \approx 2 \left(\frac{m_h T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/T} = Q_h e^{-\mu/T}$$

$$e^{2\mu/T} = \frac{Q_h}{Q_e} e^{E_g/T} = \left(\frac{m_h}{m_e} \right)^{3/2} e^{E_g/T}$$
$$\mu = \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} T \ln \frac{m_h}{m_e}$$

Условие электронейтральности.

$$n_e = n_h$$
$$Q_e e^{-(E_g - \mu)/T} = Q_h e^{-\mu/T}$$

уравнение на химпотенциал

Равновесные концентрации носителей заряда в полупроводнике.

$$n_e \approx 2 \left(\frac{m_e T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E_g - \mu)/T} = Q_e e^{-(E_g - \mu)/T}$$

$$n_h \approx 2 \left(\frac{m_h T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/T} = Q_h e^{-\mu/T}$$

$$e^{2\mu/T} = \frac{Q_h}{Q_e} e^{E_g/T} = \left(\frac{m_h}{m_e} \right)^{3/2} e^{E_g/T}$$

$$\mu = \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} T \ln \frac{m_h}{m_e}$$

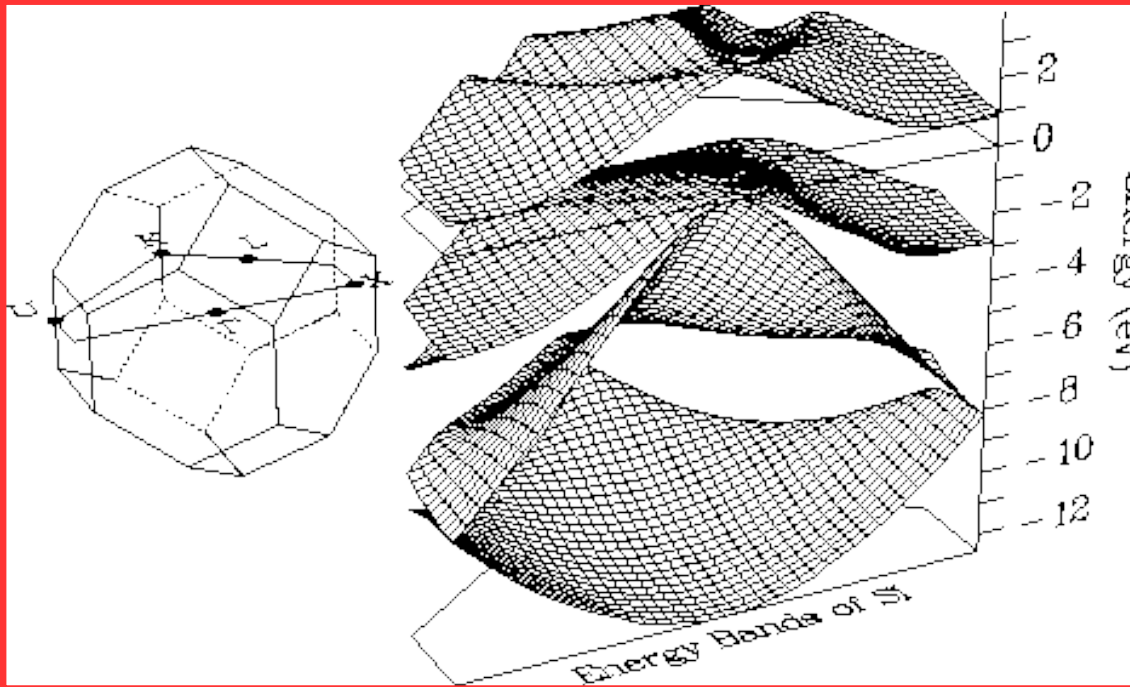
сти.

$$n_e = n_h = Q_e \exp \left[\frac{1}{T} \left(-\frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} T \ln \frac{m_h}{m_e} \right) \right] = \sqrt{Q_e Q_h} e^{-E_g/(2T)}$$

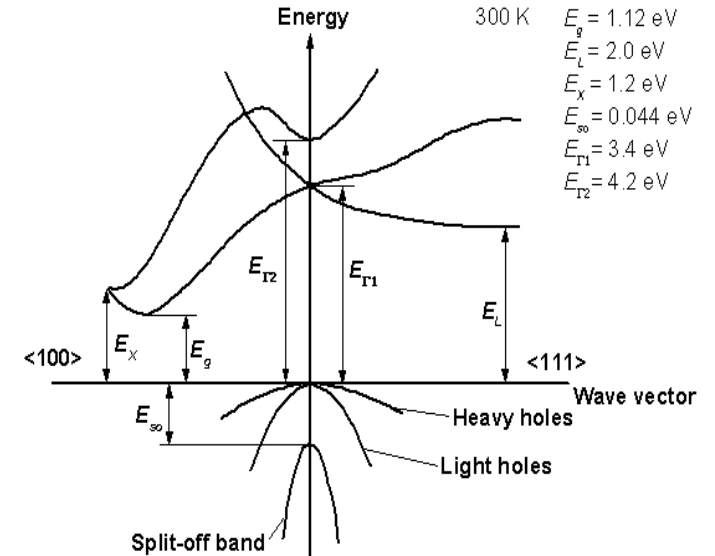
на химпотенциал

Часть 4. Зонные структуры реальных полупроводников: Si, GaAs

Кремний: непрямозонный полупроводник.



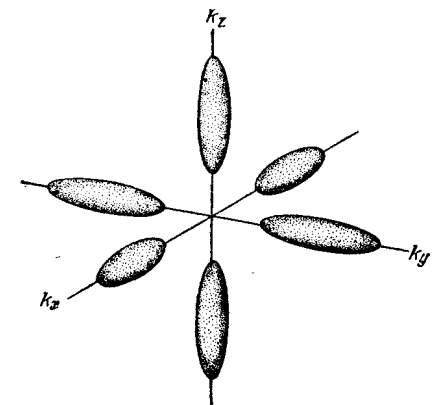
Сечение дисперсионных поверхностей кремния в направлениях [100] и [111].



Semiconductors on NSM , <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>

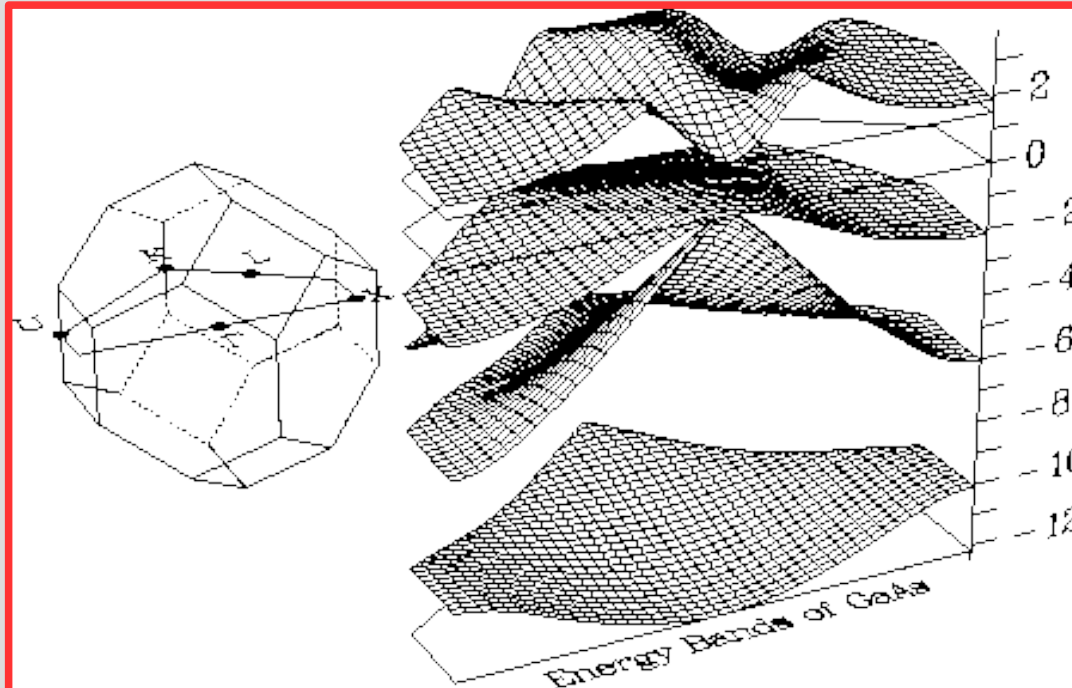
W. R. Frensley and N. G. Einspruch editors, *Heterostructures and Quantum Devices*, Academic Press, 1994

массы дырок: $0.49m_0$ и $0.16m_0$
 масса электронов:
 продольная $0.98m_0$, поперечная $0.19m_0$

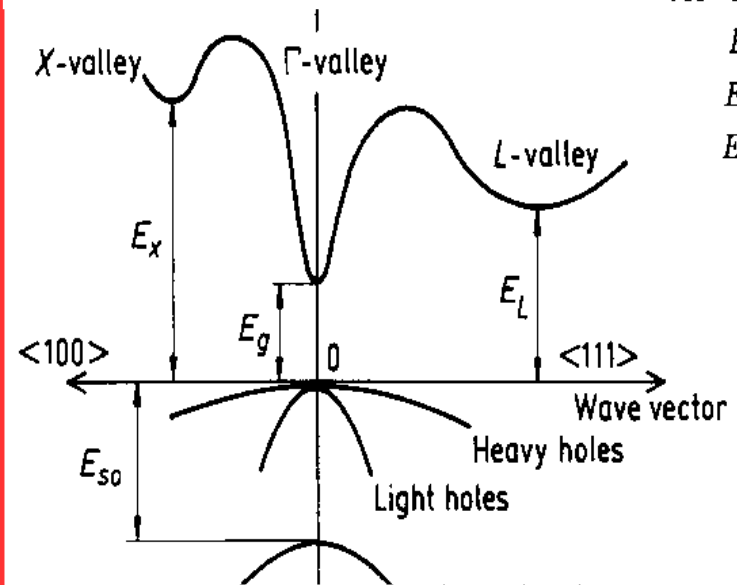


Из книги Киттеля.

Зонная структура реального полупроводника. Прямозонный полупроводник GaAs.



Сечение дисперсионных поверхностей арсенида галлия в направлениях $[100]$ и $[111]$.



0 K $E_g = 1.42$ eV

$E_L = 1.71$ eV

$E_X = 1.90$ eV

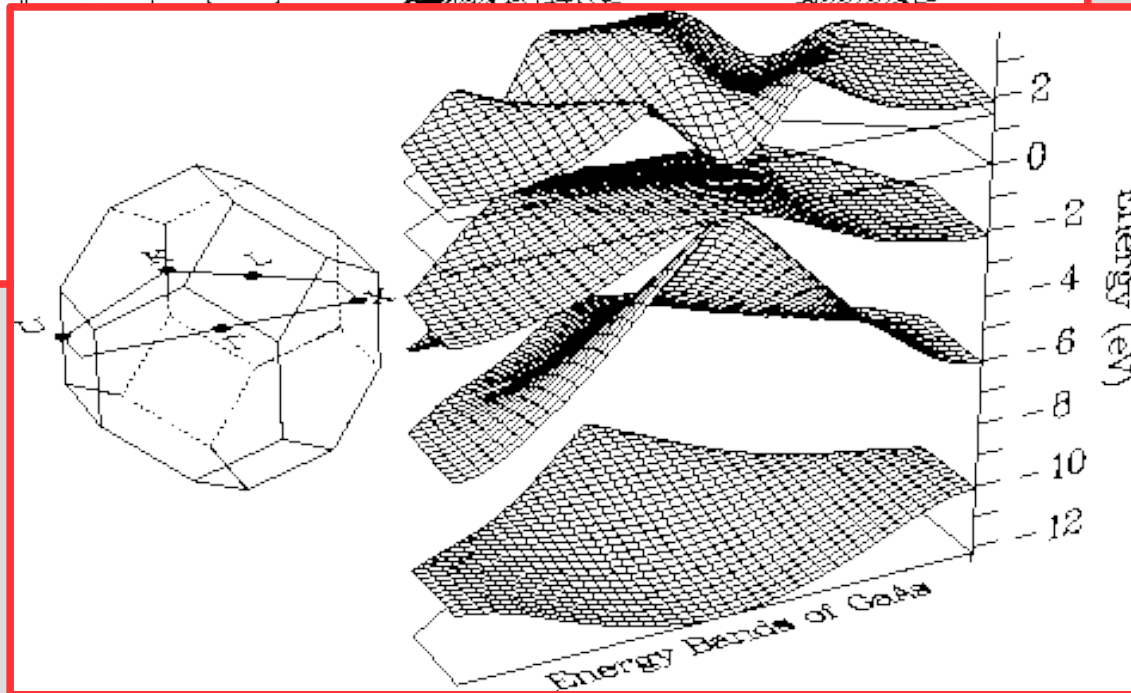
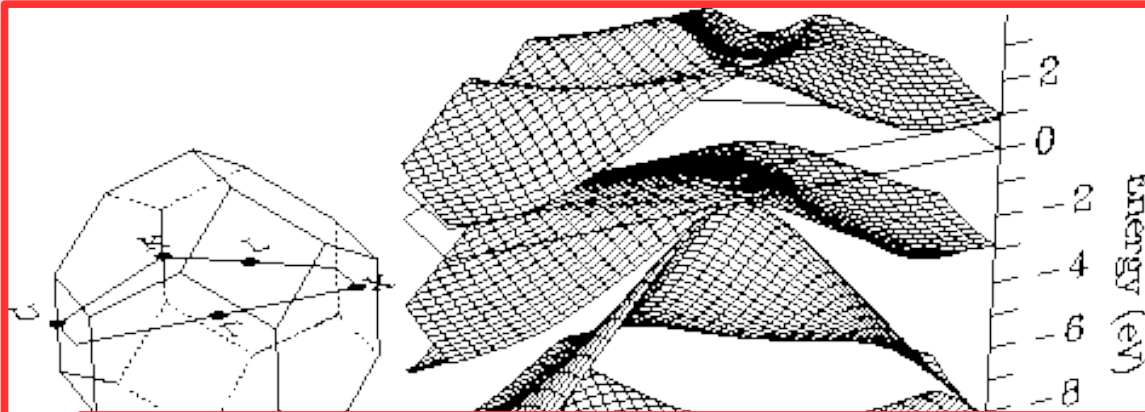
$E_{so} = 0.34$ eV

Semiconductors on NSM, <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>

W. R. Frensley and N. G. Einspruch editors, Heterostructures and Quantum Devices, Academic Press, 1994

массы дырок: $0.51m_0$ и $0.082m_0$
масса электронов: $0.063m_0$

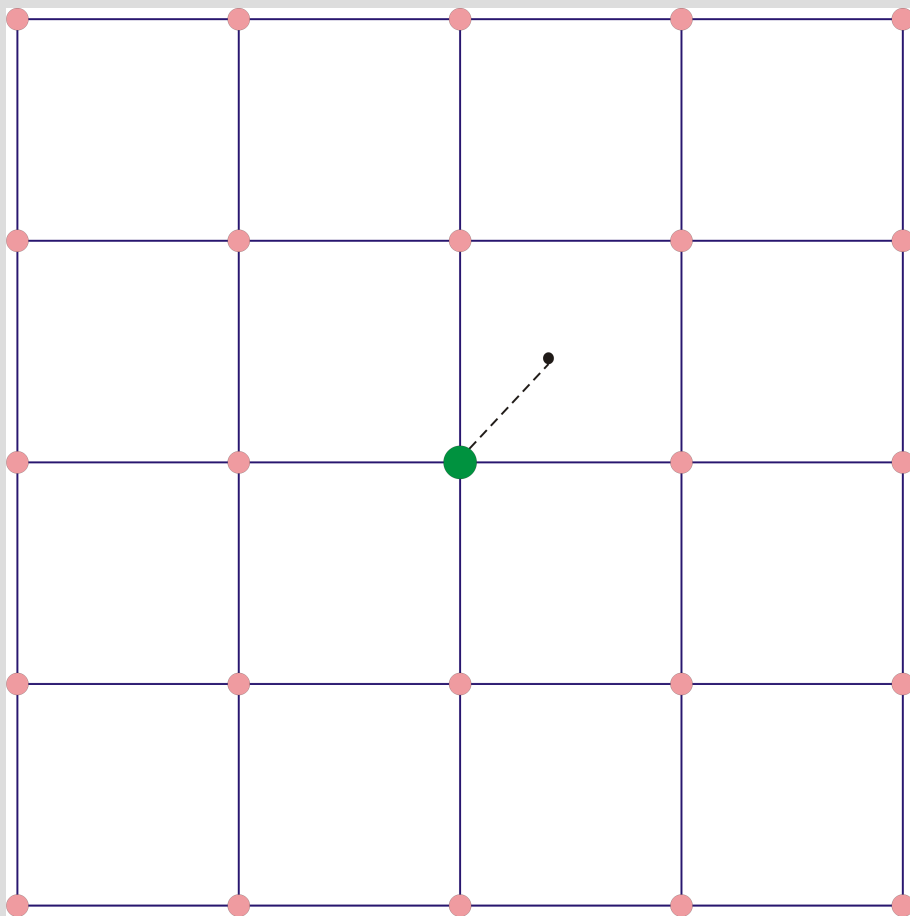
«Обычные» упрощения в нашем курсе



- Единственный тип электронов и дырок
- Единственный электронный и дырочный экстремум в спектре
- Изотропная эффективная масса

Часть 5: Слаболегированные полупроводники

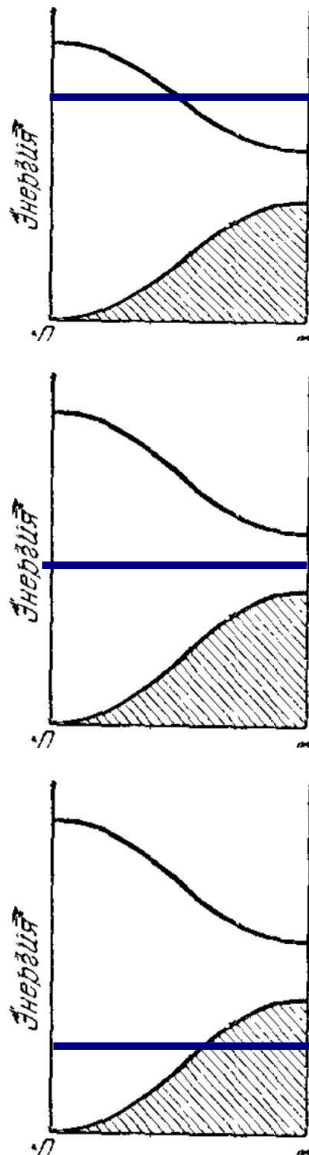
Примесной уровень для электронов



- при $T=0$ атом примеси содержит «лишний» электрон (донор) или готов принять электрон (акцептор)
- если примеси редки, энергии этих электронных состояний от k не зависят, сами состояния $N_{\text{прим}}$ кратно вырождены

электронов

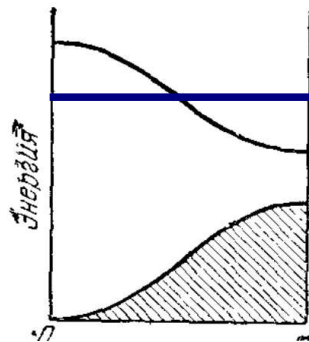
Пример: варианты
расположения донорного уровня



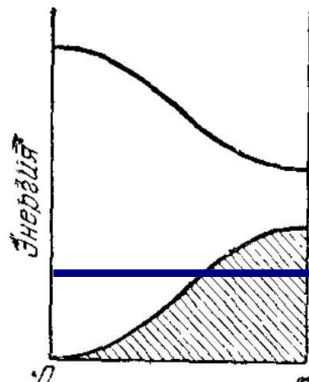
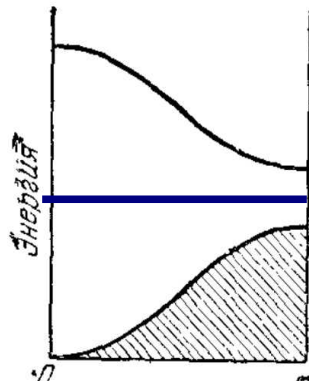
и $T=0$ атом примеси
содержит «лишний»
электрон (донор) или готов
принять электрон
(акцептор)
Если примеси редки,
энергии этих электронных
состояний от k не зависят,
то состояния N_d кратно
рождены

электронов

Пример: варианты
расположения донорного уровня



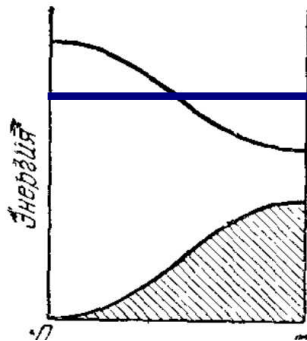
в зоне
проводимости —
слабый полуметалл



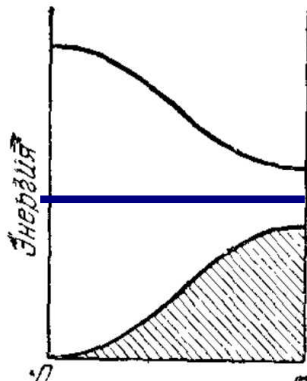
и $T=0$ атом примеси
держит «лишний»
электрон (донор) или готов
принять электрон
(акцептор)
если примеси редки,
энергии этих электронных
состояний от k не зависят,
если состояния N_d кратно
рождены

электронов

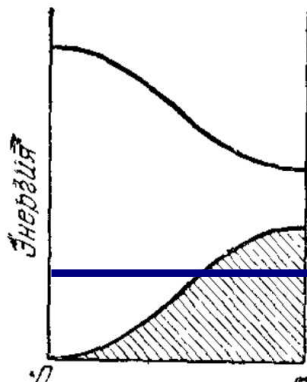
Пример: варианты
расположения донорного уровня



в зоне
проводимости —
слабый полуметалл



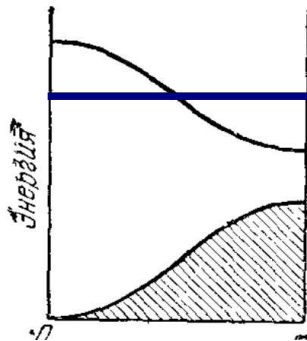
в запрещенной зоне
— интересный нам
случай, изменение
активации
электронов



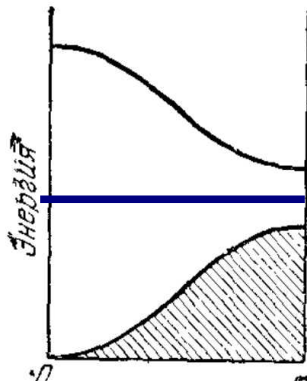
и $T=0$ атом примеси
держит «лишний»
электрон (донор) или готов
принять электрон
(акцептор)
если примеси редки,
энергии этих электронных
состояний от k не зависят,
если состояния N_d кратно
рождены

электронов

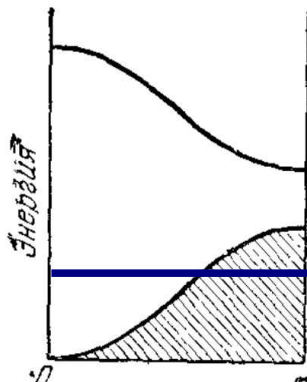
Пример: варианты
расположения донорного уровня



в зоне
проводимости —
слабый полуметалл



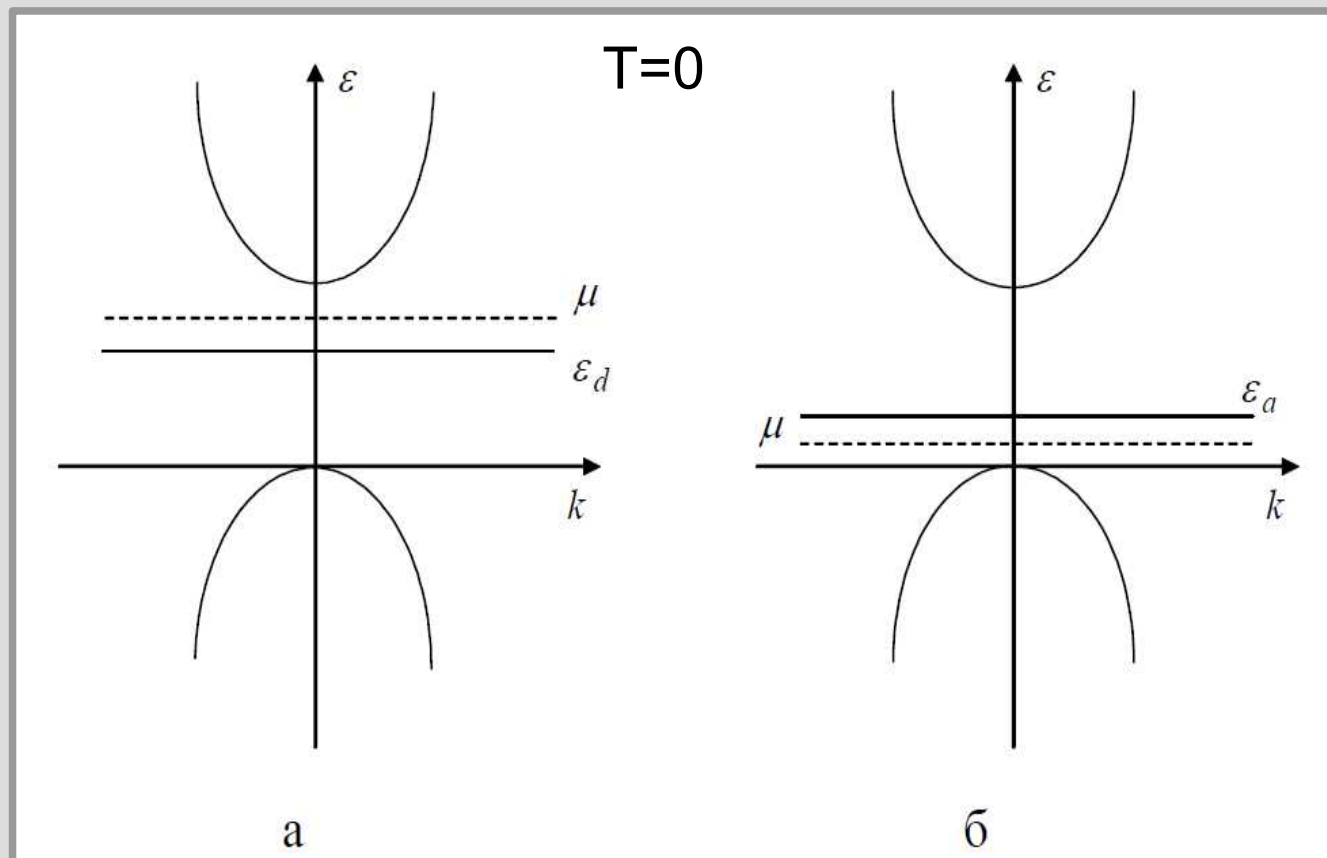
в запрещенной зоне
— интересный нам
случай, изменение
активации
электронов



в валентной зоне —
ничего не изменит

и $T=0$ атом примеси
держит «лишний»
электрон (донор) или готов
отдать электрон
(акцептор)
если примеси редки,
энергии этих электронных
состояний от k не зависят,
или состояния N_d кратно
рождены

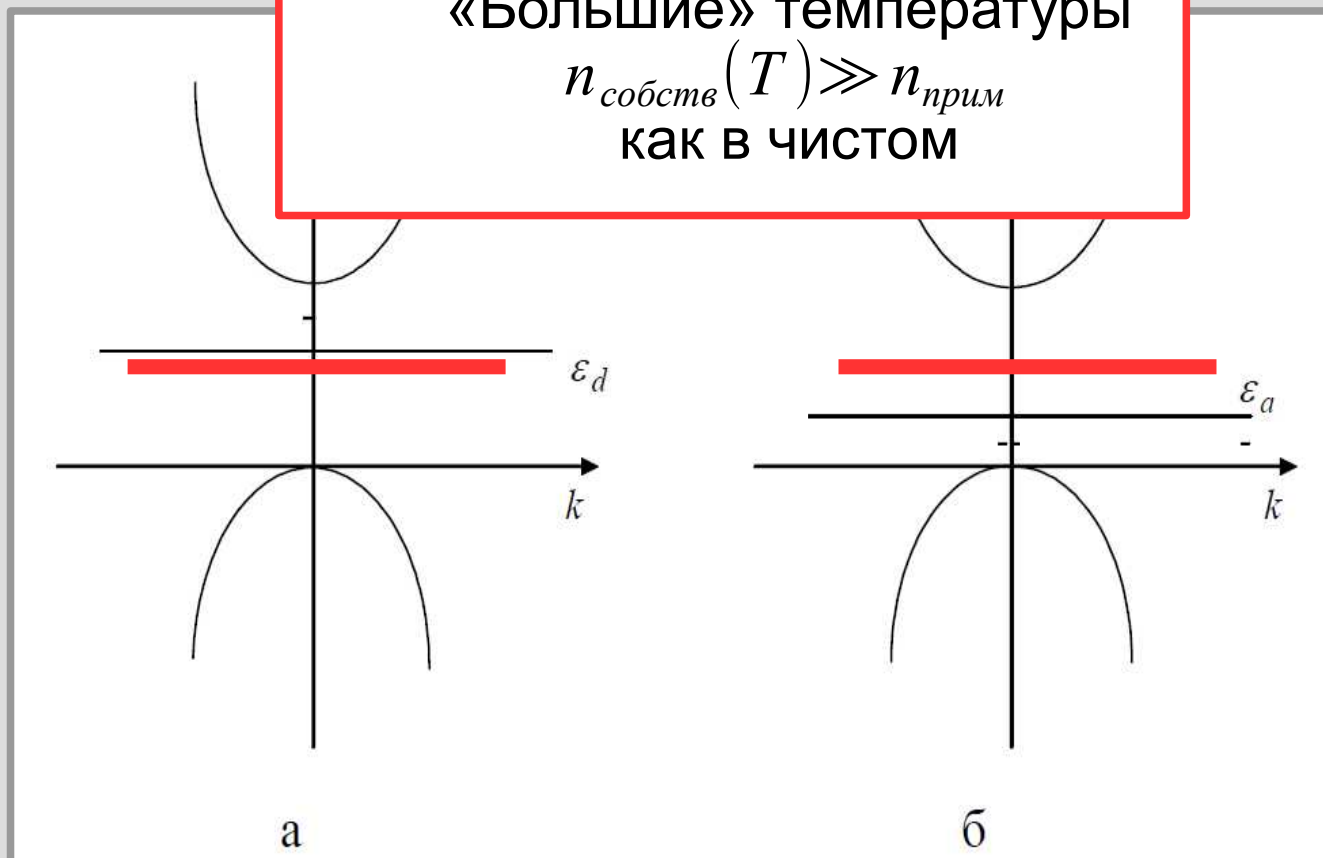
Химпотенциал слаболегированного полупроводника: качественные соображения.



Типичное положение примесного уровня в слаболегированном полупроводнике для донорной (а) и акцепторной (б) примеси

Химпотенциал слаболегированного полупроводника: качественные соображения.

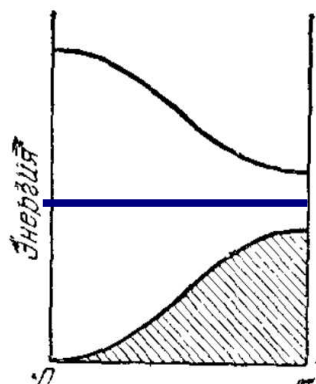
«Большие» температуры
 $n_{\text{собств}}(T) \gg n_{\text{прим}}$
как в чистом



Типичное положение примесного уровня в слаболегированном полупроводнике для донорной (а) и акцепторной (б) примеси

Правило рычага в легированных полупроводниках

$$n_e \times n_h = Q_e Q_h e^{-E_g/T} = 4 (m_e m_h)^{3/2} \left(\frac{T}{2 \pi \hbar^2} \right)^3 e^{-E_g/T}$$



часть электронов примесного уровня уходит в зону проводимости, часть занимает вакантные места в валентной зоне.

*Во сколько раз больше
подвижных электронов, во
столько же раз меньше
подвижных дырок*

Концентрация носителей в легированных полупроводниках.

концентрация ионизованных
акцепторов (принявших
электрон)

концентрация
ионизованных доноров
(отдавших электрон)

$$n_e + N_a = n_h + N_d$$

концентрация подвижных
электронов в зоне
проводимости

концентрация
подвижных дырок в
валентной зоне

Концентрация носителей в легированных полупроводниках.

концентрация ионизованных акцепторов (принявших электрон)

концентрация ионизованных доноров (отдавших электрон)

$$n_e + N_a = n_h + N_d$$

концентрация подвижных электронов в зоне проводимости

концентрация подвижных дырок в валентной зоне

$$n_e \approx 2 \left(\frac{m_e T}{2 \pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E_g - \mu)/T} = Q_e e^{-(E_g - \mu)/T}$$

$$n_h \approx 2 \left(\frac{m_h T}{2 \pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/T} = Q_h e^{-\mu/T}$$

$$N_d = N_d^{(0)} \left(1 - \frac{1}{e^{(\epsilon_d - \mu)/T} + 1} \right)$$

$$N_a = N_a^{(0)} \frac{1}{e^{(\epsilon_a - \mu)/T} + 1}$$

Концентрация носителей в легированных полупроводниках.

концентрация ионизованных акцепторов (принявших электрон)

концентрация ионизованных доноров (отдавших электрон)

$$n_e + N_a = n_h + N_d$$

концентрация электронов в проводящем состоянии

все концентрации определяются только положением уровня химпотенциала

концентрация дырок в валентном состоянии

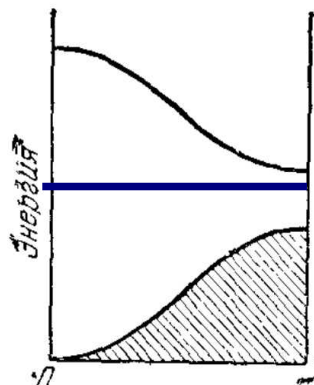
$$n_e \approx 2 \left(\frac{m_e T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E_g - \mu)/T} = Q_e e^{-(E_g - \mu)/T}$$

$$n_h \approx 2 \left(\frac{m_h T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/T} = Q_h e^{-\mu/T}$$

$$N_d = N_d^{(0)} \left(1 - \frac{1}{e^{(\epsilon_d - \mu)/T} + 1} \right)$$

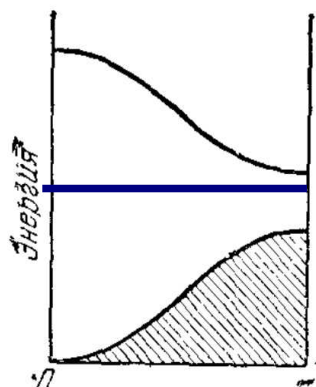
$$N_a = N_a^{(0)} \frac{1}{e^{(\epsilon_a - \mu)/T} + 1}$$

Концентрация носителей в легированных полупроводниках.



Модель: один «мелкий» донорный уровень, низкие температуры

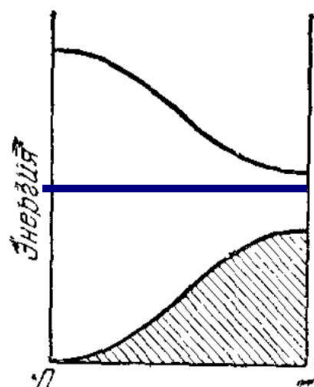
Концентрация носителей в легированных полупроводниках.



Модель: один «мелкий» донорный уровень, низкие температуры

$$Q_e e^{-(E_g - \mu)/T} = Q_h e^{-\mu/T} + N_d^{(0)} e^{-(\mu - E_d)/T} \approx N_d^{(0)} e^{-(\mu - E_d)/T}$$
$$\mu = \frac{E_g + E_d}{2} + \frac{T}{2} \ln \frac{N_d^{(0)}}{Q_e}$$

Концентрация носителей в легированных полупроводниках.



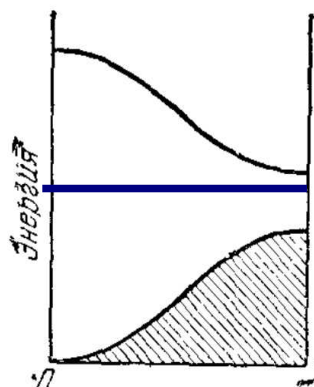
Модель: один «мелкий» донорный уровень, низкие температуры

$$Q_e e^{-(E_g - \mu)/T} = Q_h e^{-\mu/T} + N_d^{(0)} e^{-(\mu - E_d)/T} \approx N_d^{(0)} e^{-(\mu - E_d)/T}$$

$$\mu = \frac{E_g + E_d}{2} + \frac{T}{2} \ln \frac{N_d^{(0)}}{Q_e}$$

$$n_e = Q_e \exp \left(\frac{-E_g - E_d}{2T} + \frac{1}{2} \ln \frac{N_d^{(0)}}{Q_e} \right) = \sqrt{Q_e N_d^{(0)}} e^{-(E_g - E_d)/(2T)}$$

Концентрация носителей в легированных полупроводниках.



Модель: один «мелкий» донорный уровень, низкие температуры

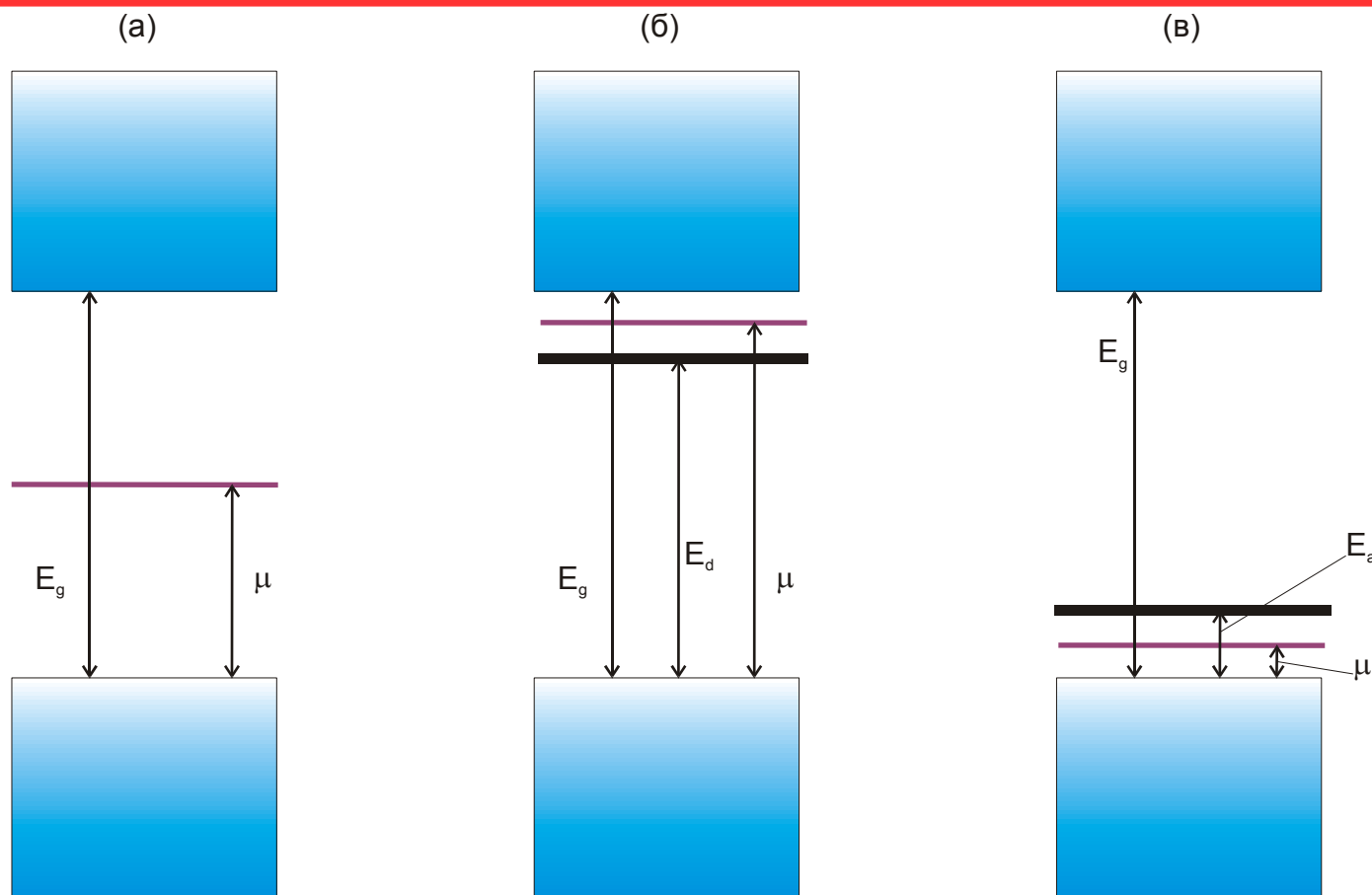
$$Q_e e^{-(E_g - \mu)/T} = Q_h e^{-\mu/T} + N_d^{(0)} e^{-(\mu - E_d)/T} \approx N_d^{(0)} e^{-(\mu - E_d)/T}$$

$$\mu = \frac{E_g + E_d}{2} + \frac{T}{2} \ln \frac{N_d^{(0)}}{Q_e}$$

$$n_e = Q_e \exp \left(\frac{-E_g - E_d}{2T} + \frac{1}{2} \ln \frac{N_d^{(0)}}{Q_e} \right) = \sqrt{Q_e N_d^{(0)}} e^{-(E_g - E_d)/(2T)}$$

$$\frac{n_e}{n_h} = \frac{n_e^2}{n_e n_h} = \frac{Q_e N_d^{(0)} e^{-(E_g - E_d)/T}}{Q_e Q_h e^{-E_g/T}} = \frac{N_d^{(0)}}{Q_h} e^{E_d/T}$$

Упрощённые энергетические диаграммы полупроводника.



Упрощённое изображение зонной схемы полупроводника: (а) чистый полупроводник, (б) полупроводник с примесью донорного типа, (в) полупроводник с примесью акцепторного типа. — ширина запрещённой зоны, — уровень химпотенциала, — уровни донорной и акцепторной примеси. Положение химпотенциала показано для случая . Положение минимального уровня энергии электрона в вакууме не показано.

