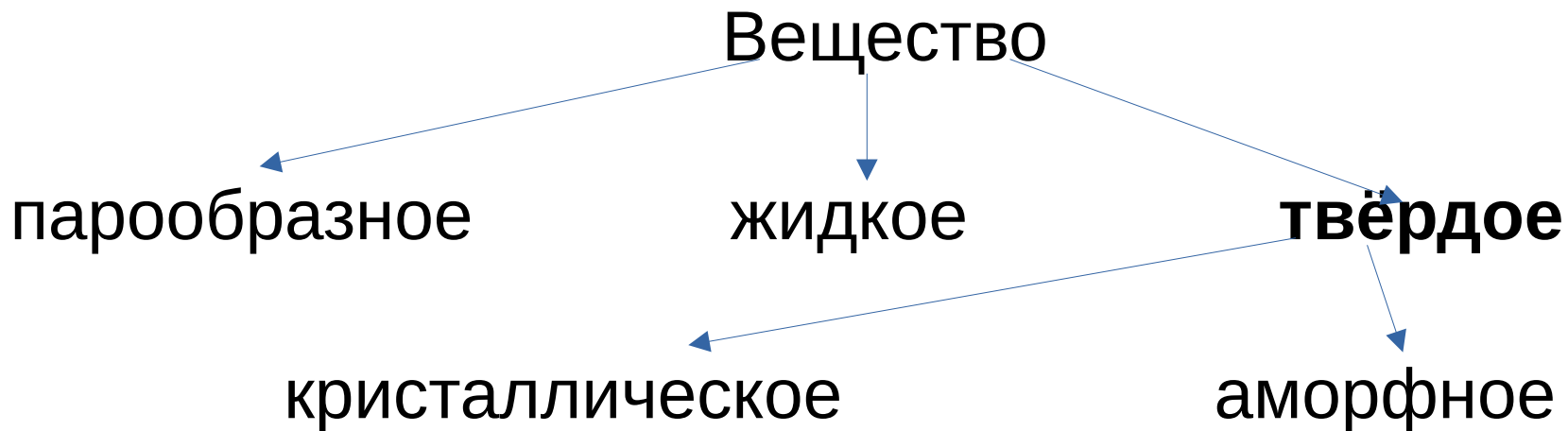


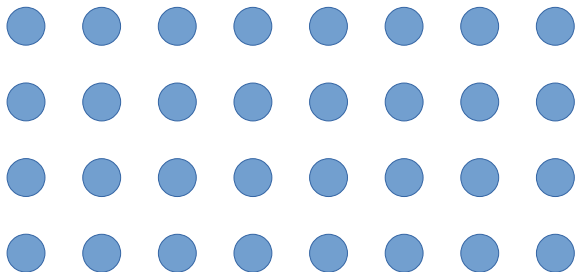
ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Основные физические явления, лежащие в
основе полупроводниковых приборов

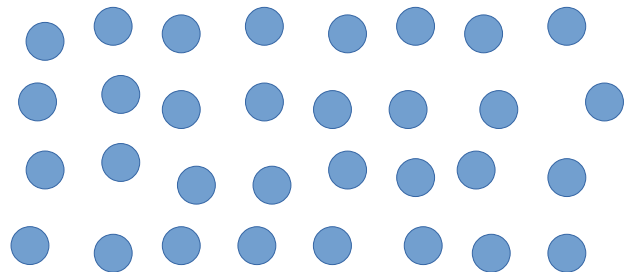
Кристаллическая структура



- Упорядоченная структура:
 - есть ближний порядок,
 - есть дальний порядок.



- Разупорядоченная структура:
 - есть ближний порядок,
 - нет дальнего порядка.

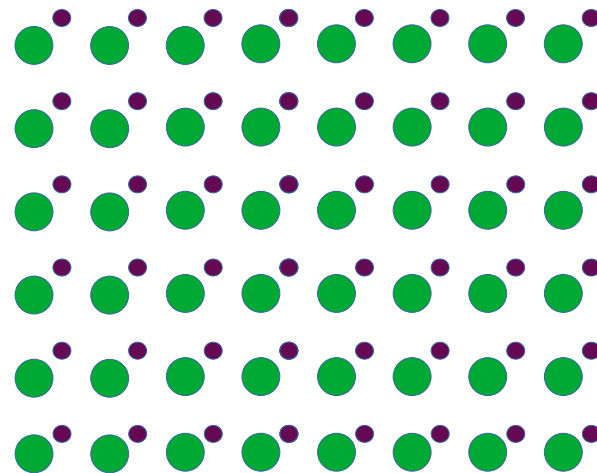
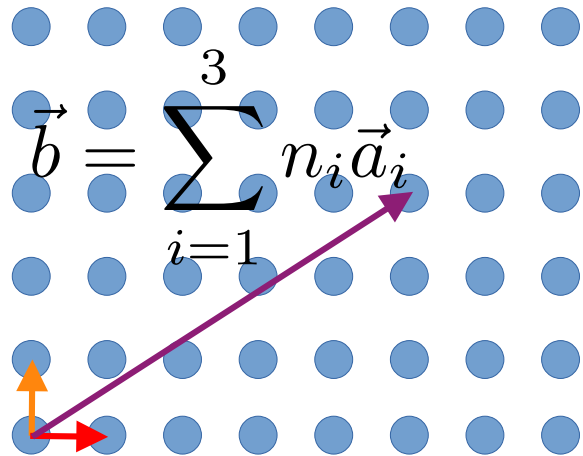


Кристаллическая структура

Кристаллическая решётка

Кристаллическая структура

Базис

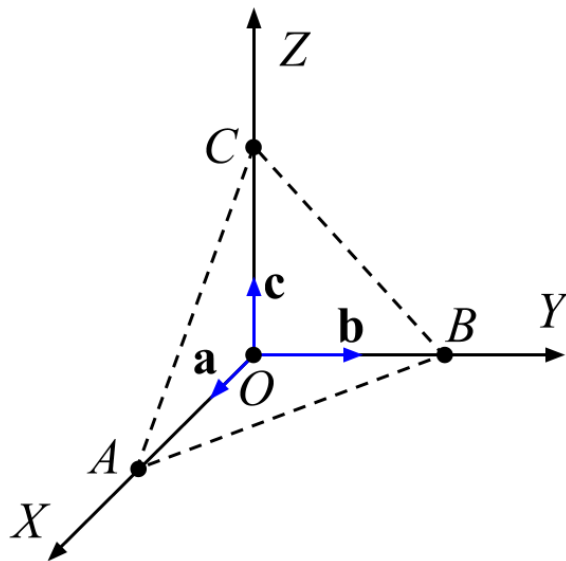
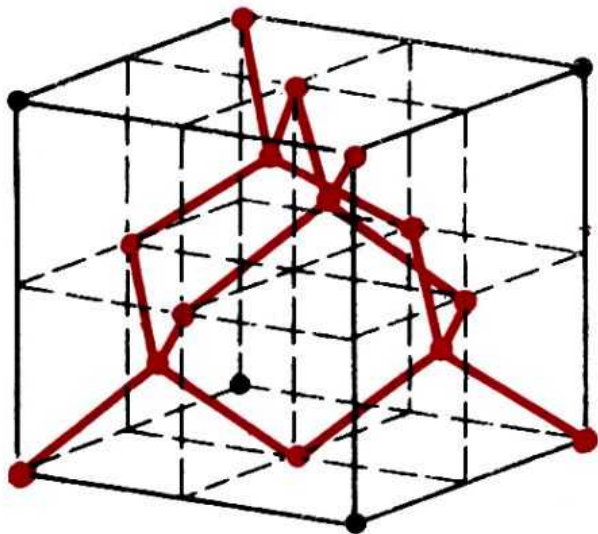


\vec{a}_i — основные или
трансляционные вектора

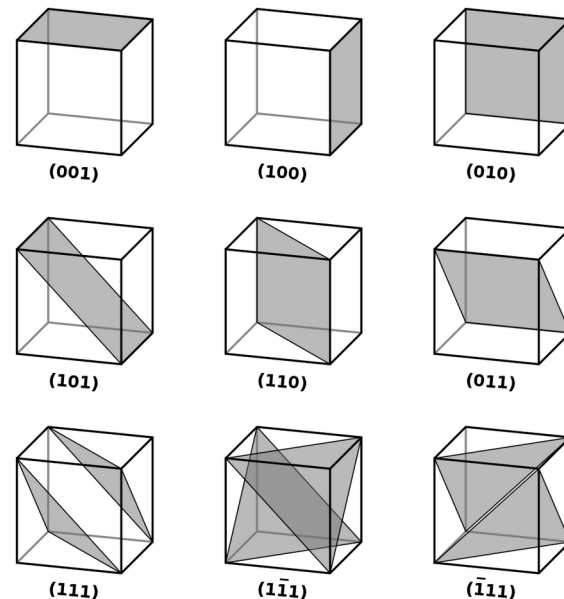
Из-за **анизотропии** у
(квази-)частиц
эффективная масса.

Кристаллическая структура

Решётка алмаза = ГЦК + 2 атома

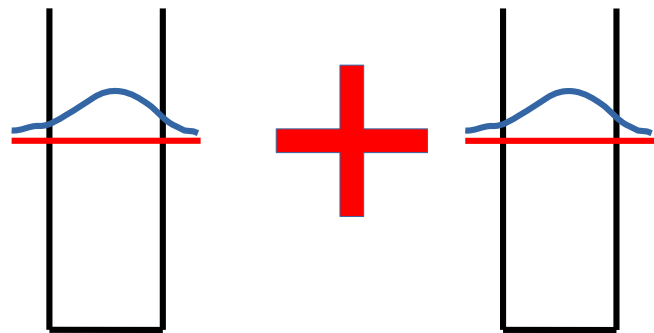


Индексы Миллера

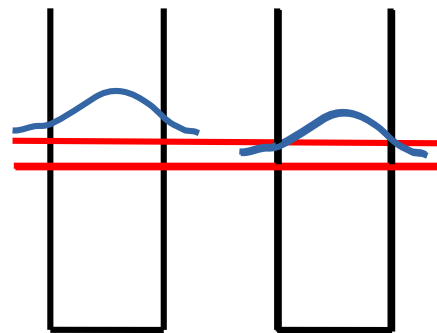


Кристаллическая структура

Атом – квантовая
яма для электронов



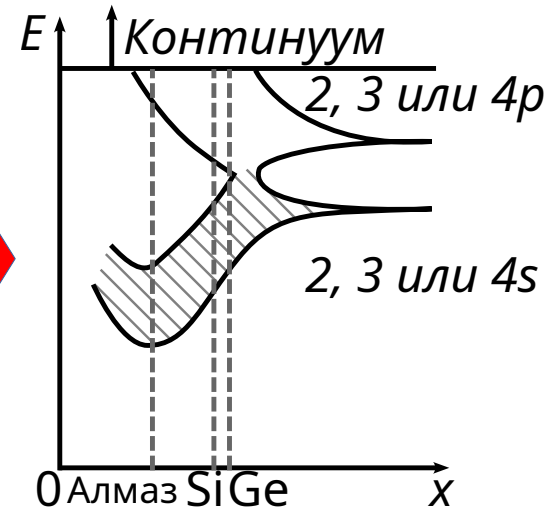
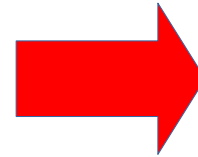
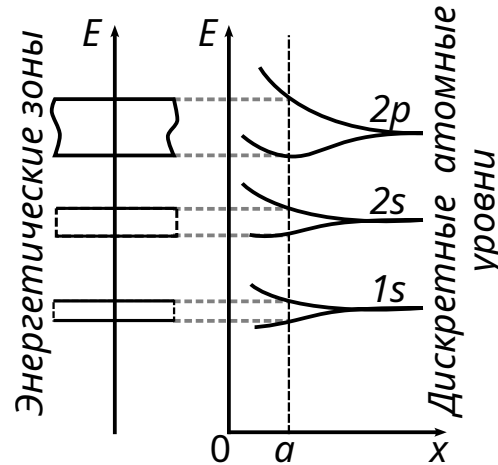
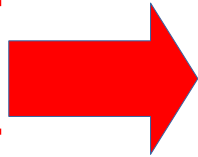
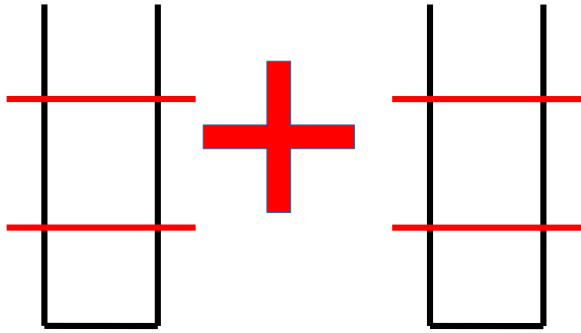
Молекула – квантовые
ямы для электронов



В системе из N ям будет N уровней
для электронов.

Кристаллическая структура

Атом – квантовая
яма для электронов

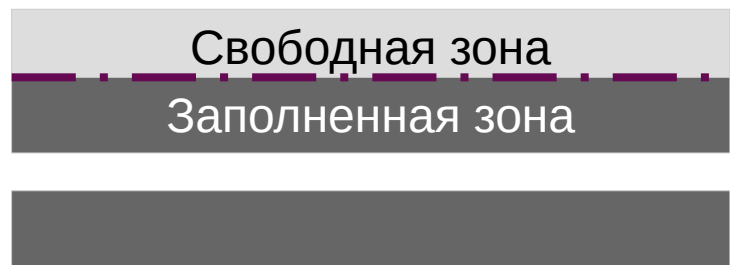


Энергетические зоны:

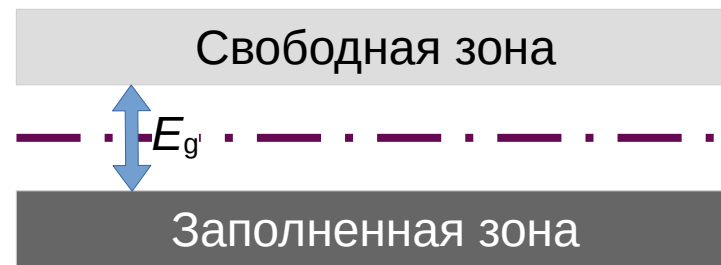
- разрешённые – квазинепрерывный дискретный ряд значений энергии,
- запрещённые.

Энергетическая структура т/т

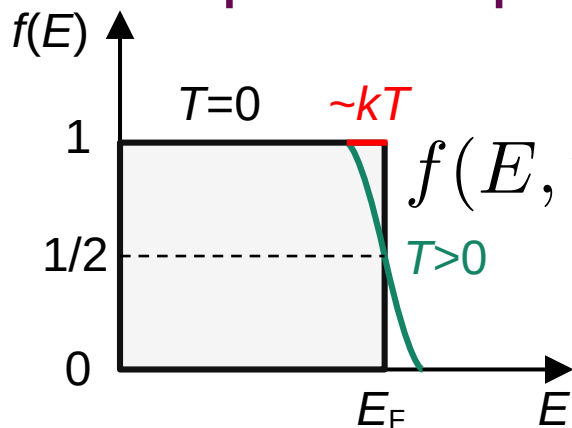
Металл



Диэлектрик



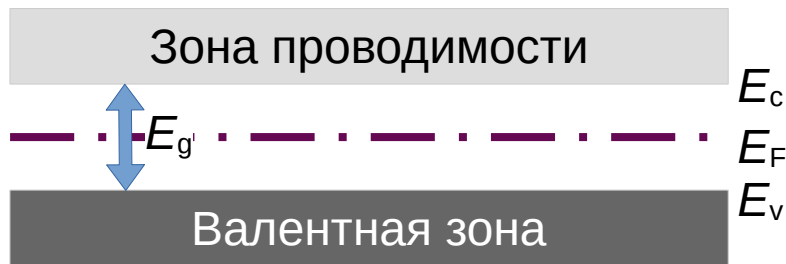
Энергия Ферми E_F



$$f(E, T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

Материал	E_g , эВ
Алмаз	~ 7
Si	1,124
SiO ₂	8-9
Ge	0,67
GaAs	1,42

Энергетическая структура п/п



Носители заряда:

- электроны «—»,
- дырки «+».

Квазичастицы:

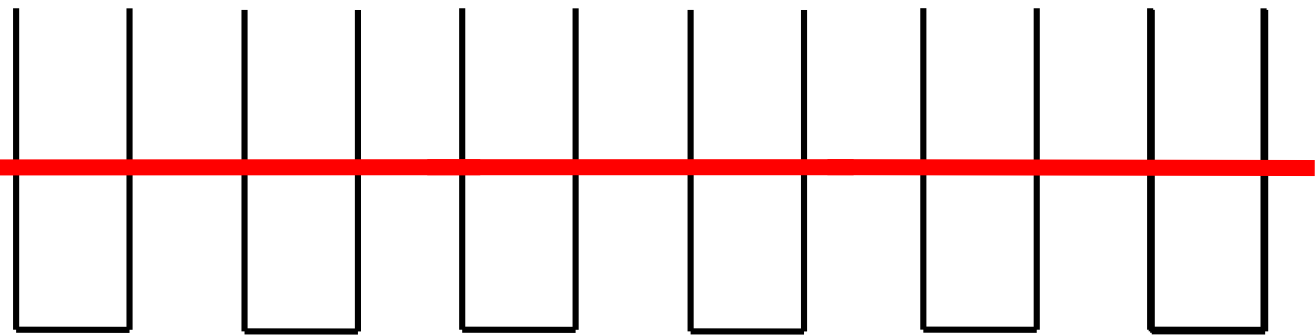
- электроны,
- дырки,
- экситоны,
- фононы,
- поляроны
- и др.

Электроны и дырки при встрече рекомбинируют.

Электрон-дырочная пара может быть сгенерирована при поглощении энергии (тепло, свет и др.).

Потенциал Кронига-Пенни

Периодический потенциал $U(x+a) = U(x)$



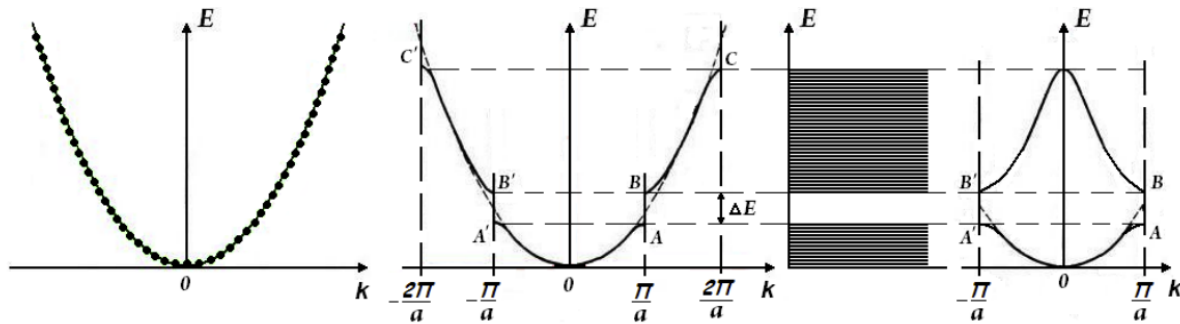
Эффективная масса
электрона в кристалле
не связана с массой
свободного электрона!

$$\frac{\hat{p}^2}{2m^*} \psi(x) + U(x) \psi(x) = E \psi(x)$$

$$\psi_q(x) = \varphi_q(x) \exp(iqx)$$

$$\varphi_q(x+a) = \varphi_q(x)$$

$$m^* = \left(\frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right)^{-1}$$



Тепловая генерация э-д пары



$$n = \int_{E_c}^{E_0} N_c(E) f(E, T) dE$$

$$p = \int_{E_1}^{E_v} N_v(E) (1 - f(E, T)) dE$$

$N_c(E)$ – плотность состояний в зоне проводимости.

$N_v(E)$ – плотность состояний в валентной зоне.

N_c – эффективная плотность состояний в зоне проводимости.

N_v – эффективная плотность состояний в валентной зоне.

$$n = N_c \exp \left(\frac{E_F - E_c}{kT} \right)$$

$$p = N_v \exp \left(\frac{E_v - E_F}{kT} \right)$$

Закон действующих масс

$$n \cdot p = n_i^2$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{(2\pi\hbar)^2} \right)^{3/2}$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{(2\pi\hbar)^2} \right)^{3/2}$$

$$n = p = n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp \left(-\frac{E_g}{2kT} \right)$$

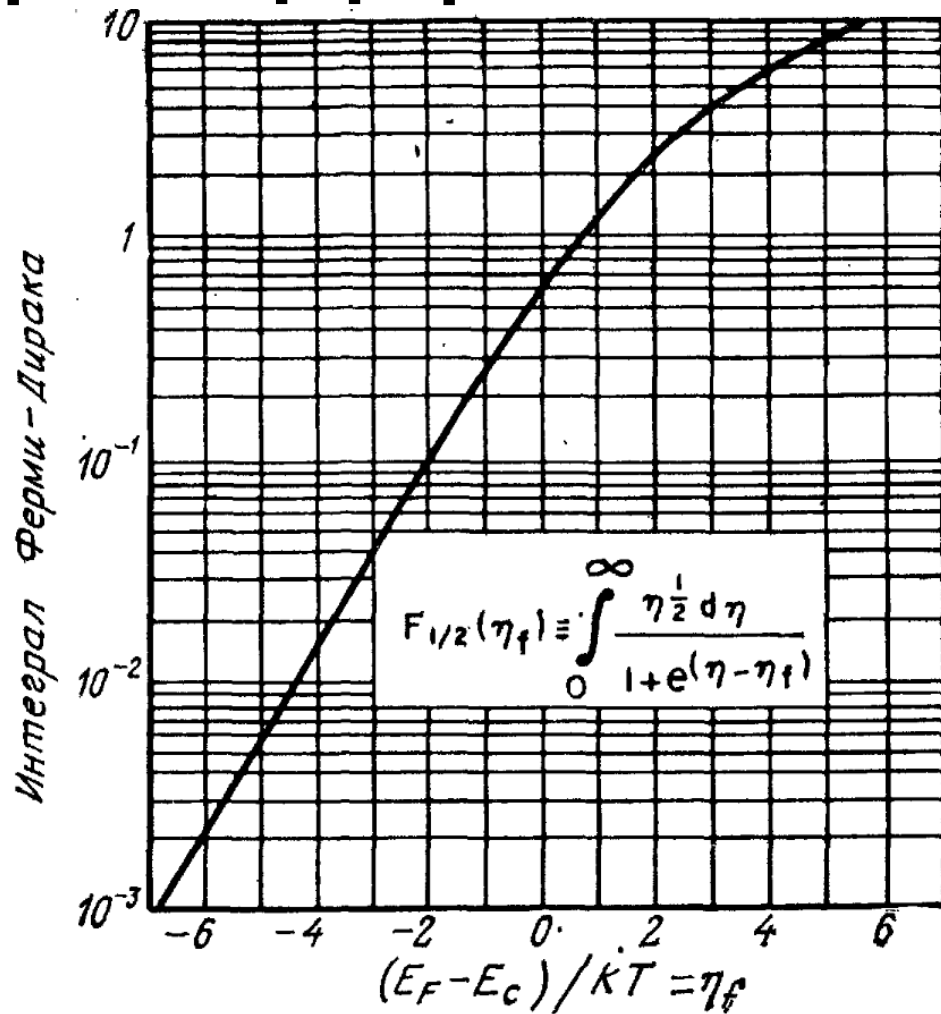
Интеграл Ферми-Дирака

$$n = N_c \frac{2}{\sqrt{\pi}} \mathcal{F}_{1/2} \left(\frac{E_F - E_c}{kT} \right)$$

$$p = N_v \frac{2}{\sqrt{\pi}} \mathcal{F}_{1/2} \left(\frac{E_v - E_F}{kT} \right)$$

Интеграл Ферми-Дирака

$$\mathcal{F}_\alpha(\eta_1) \equiv \int_0^{+\infty} \frac{\eta^\alpha d\eta}{1 + e^{\eta - \eta_1}}$$



Примеси в п/п

Закон действующих масс

$$n \cdot p = n_i^2$$



E_d – энергия донорных состояний.

$$n = N_d^+ = N_d \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g_n} \exp\left(\frac{E_d - E_F}{kT}\right)} \right)$$



E_a – энергия акцепторных состояний.

$$p = N_a^- = \frac{N_a}{1 + \frac{1}{g_p} \exp\left(\frac{E_a - E_F}{kT}\right)}$$

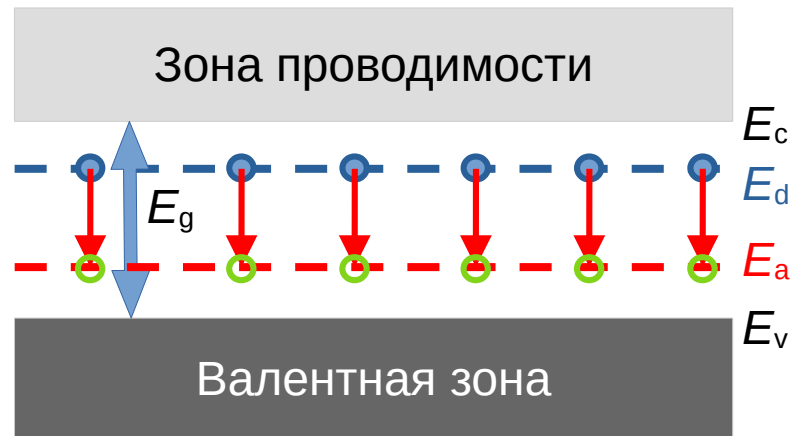
$g_{n/h}$ – фактор вырождения по спину примесного состояния.

Si: $g_n = 2$, $g_h = 4$.

Уравнение электронейтральности

$$n + N_a^- = p + N_d^+$$

Компенсация



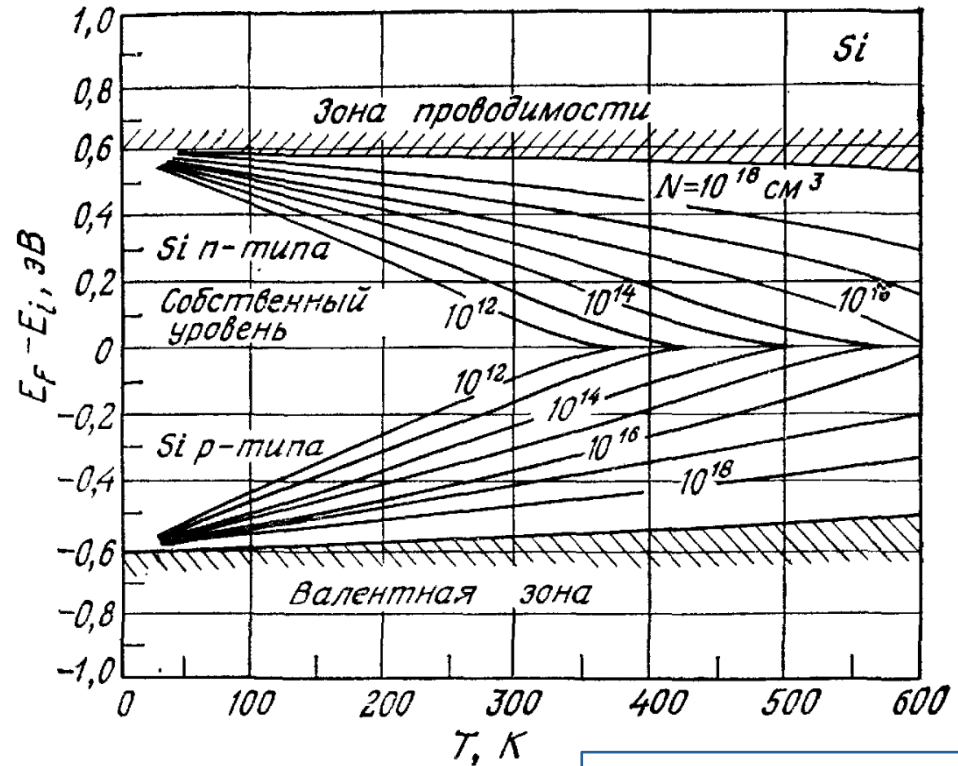
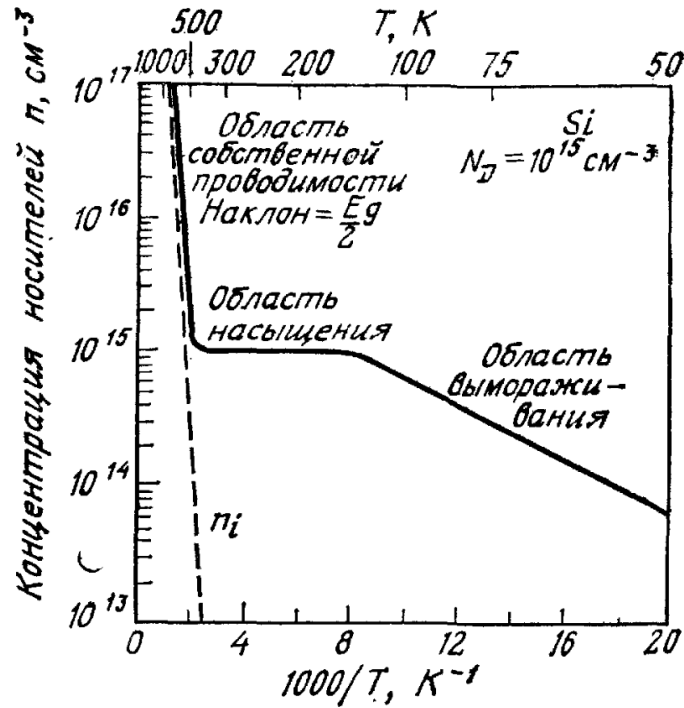
Уравнение электронейтральности

$$n + N_a^- = p + N_d^+$$

Закон действующих масс

$$n \cdot p = n_i^2$$

Температурные зависимости



Уравнение электронейтральности

$$n + N_a^- = p + N_d^+$$

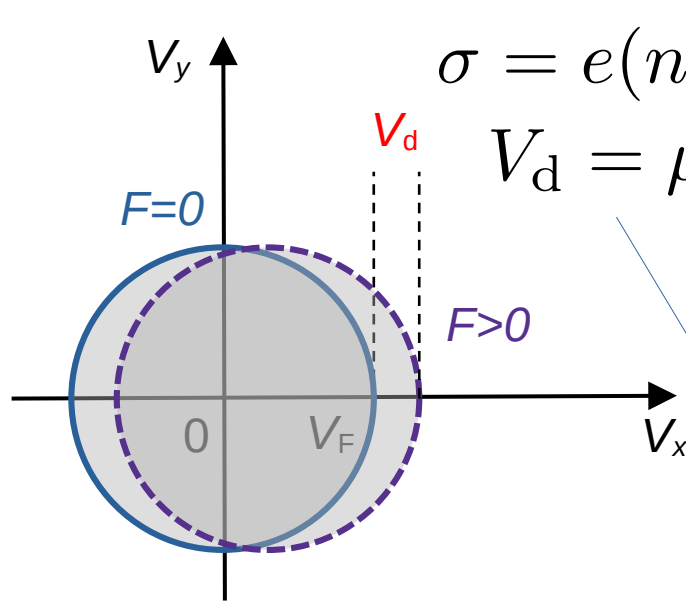
Закон действующих масс

$$n \cdot p = n_i^2$$

Задача №1: $E_F(T \in [10, 1000] \text{ K})$

- $N_d = N_a = 0$
- КЭФ $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$
- КДБ $N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$
- $N_d(P) = N_a(B) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Явления переноса. Дрейф



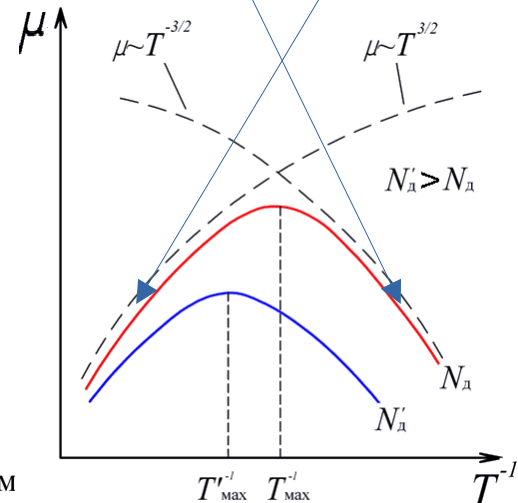
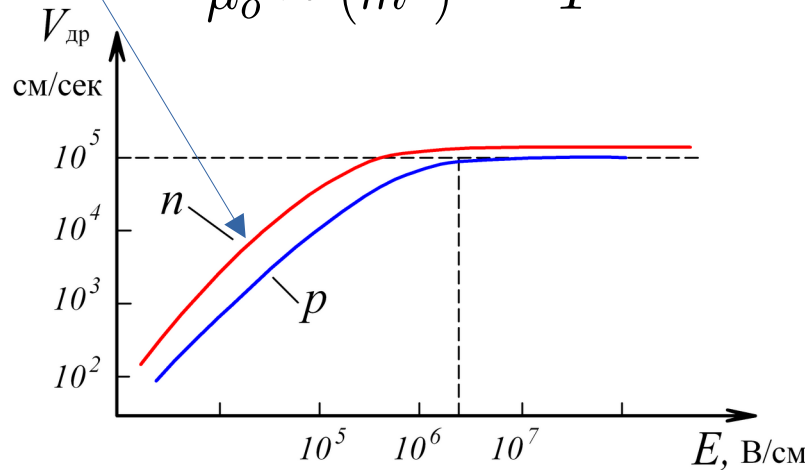
$$\sigma = e(n\mu_e + p\mu_p) \quad \mu = \frac{e\tau}{m^*} \quad \mu = \left(\frac{1}{\mu_l} + \frac{1}{\mu_i} \right)^{-1}$$

$$V_d = \mu F$$

$$\mu_i = \frac{64\sqrt{\pi}\varepsilon_s^2(2kT)^{3/2}}{N_i e^3 m^{*1/2}} \ln \left[1 + \left(\frac{12\pi\varepsilon_s kT}{e^2 N_i^{1/3}} \right)^2 \right]^{-1} \sim (m^*)^{-1/2} N_i^{-1} T^{3/2}$$

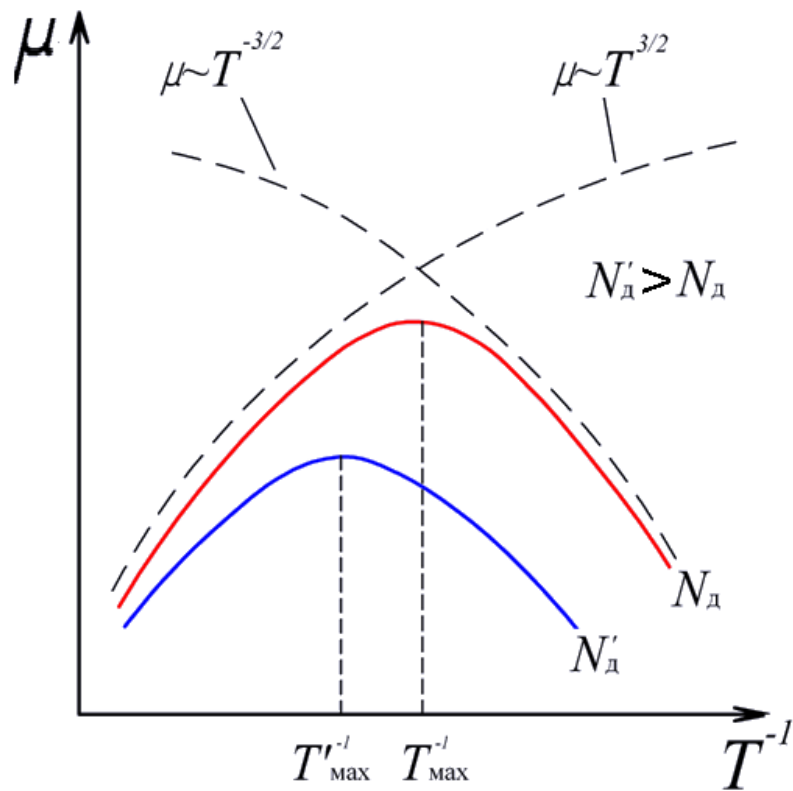
$$\mu_l = \frac{\sqrt{8\pi} e \hbar^4 C_{11}}{3 E_{ds} m^{*5/2} (kT)^{3/2}} \sim (m^*)^{-5/2} T^{-3/2}$$

$$\mu_o \sim (m^*)^{-3/2} T^{1/2}$$

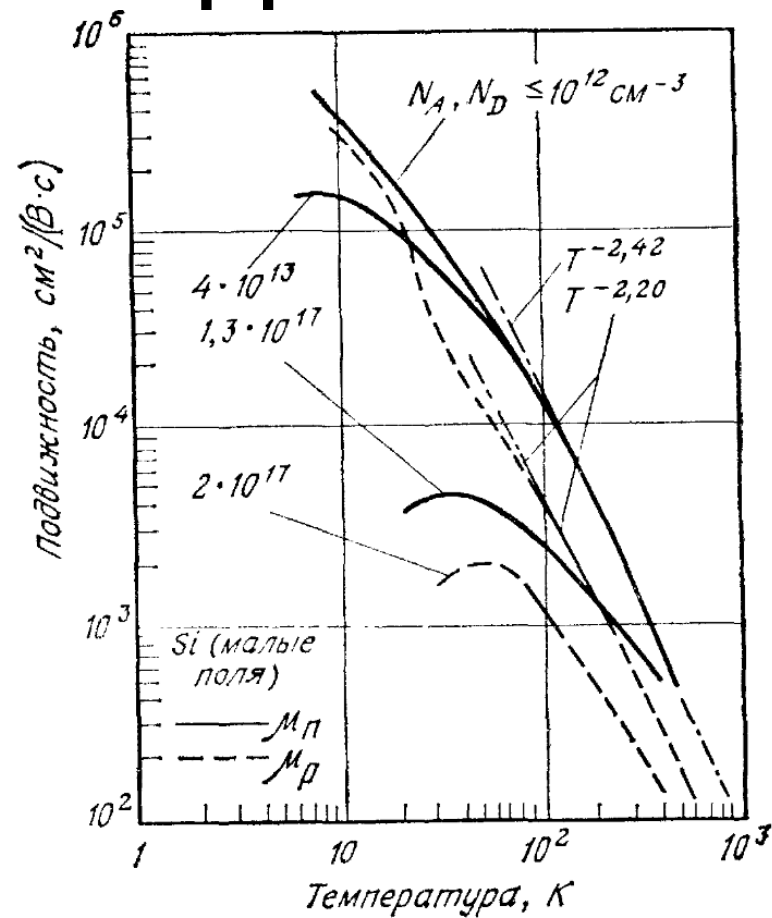


μ_i – при рассеянии на ионизованных атомах,
 μ_l – при рассеянии на продольных акустических фотонах,
 μ_o – при рассеянии на оптических фононах,
 τ – время свободного пробега,
 ε_s – диэлектрическая проницаемость п/п,
 N_i – концентрация ионизованных атомов
 C_{11} – средний продольный модуль упругости п/п,
 E_{ds} – смещение края зоны на единицу деформации.

Явления переноса. Подвижность



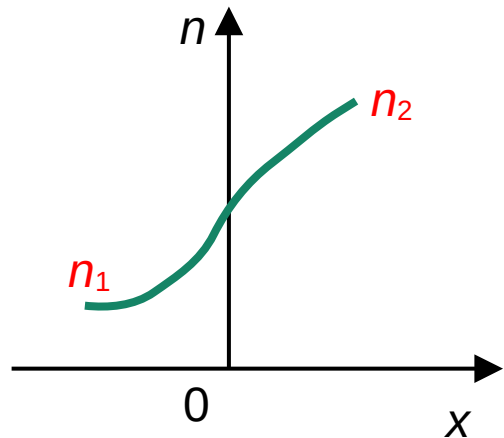
Теоретическая зависимость $\mu(T)$.



Экспериментальные зависимости $\mu(T)$ электронов и дырок в Si.

Явления переноса. Диффузия

Спонтанное перемещение из-за градиента концентрации.



$$j = elV_T \frac{dn}{dx}$$

$$\vec{j} = elV_T \nabla n$$

Соотношение Эйнштейна
(в натуральном виде)

$$D_n = 2 \frac{kT}{e} \mu_n \frac{\mathcal{F}_{1/2} \left(\frac{E_F - E_c}{kT} \right)}{\mathcal{F}_{-1/2} \left(\frac{E_F - E_c}{kT} \right)}$$

$$l = \sqrt{D\tau}$$

l – длина свободного пробега,
 τ – время свободного пробега,
 V_T – тепловая скорость,
 D – коэффициент диффузии.

Соотношение Эйнштейна
(для невырожденного газа)

$$D = \frac{kT}{e} \mu$$

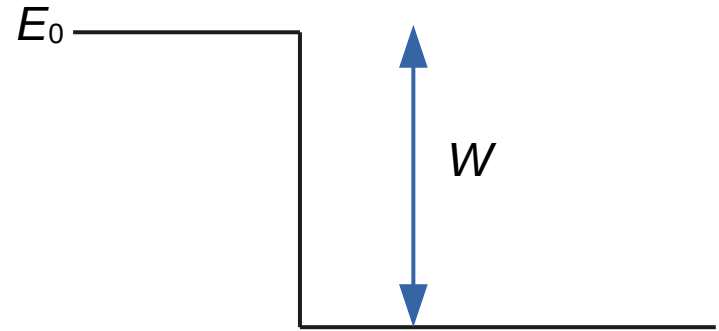
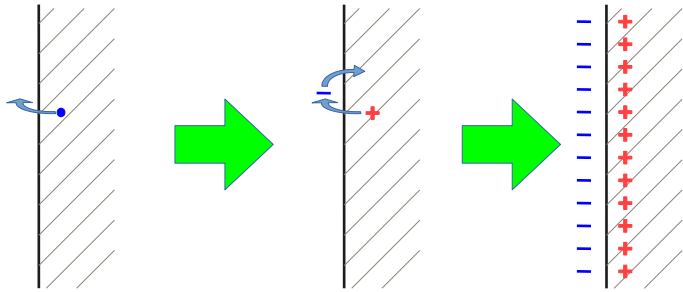
Соотношение Эйнштейна
(для вырожденного газа)

$$D = \frac{E_F}{e} \mu$$

Барьеры на границе

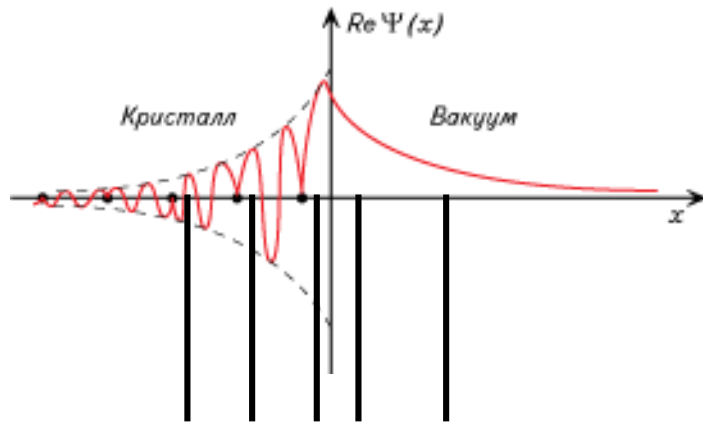
Двойной заряженный слой

Работа выхода

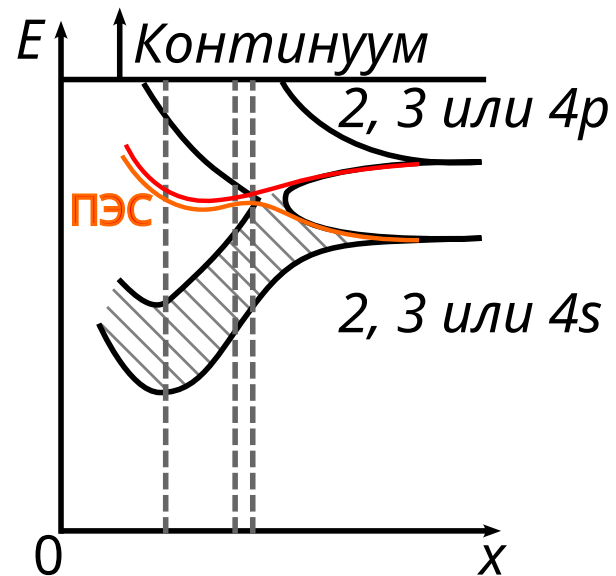


E_0 – уровень «вакуума»,
 W – работа выхода электрона

Поверхностные состояния

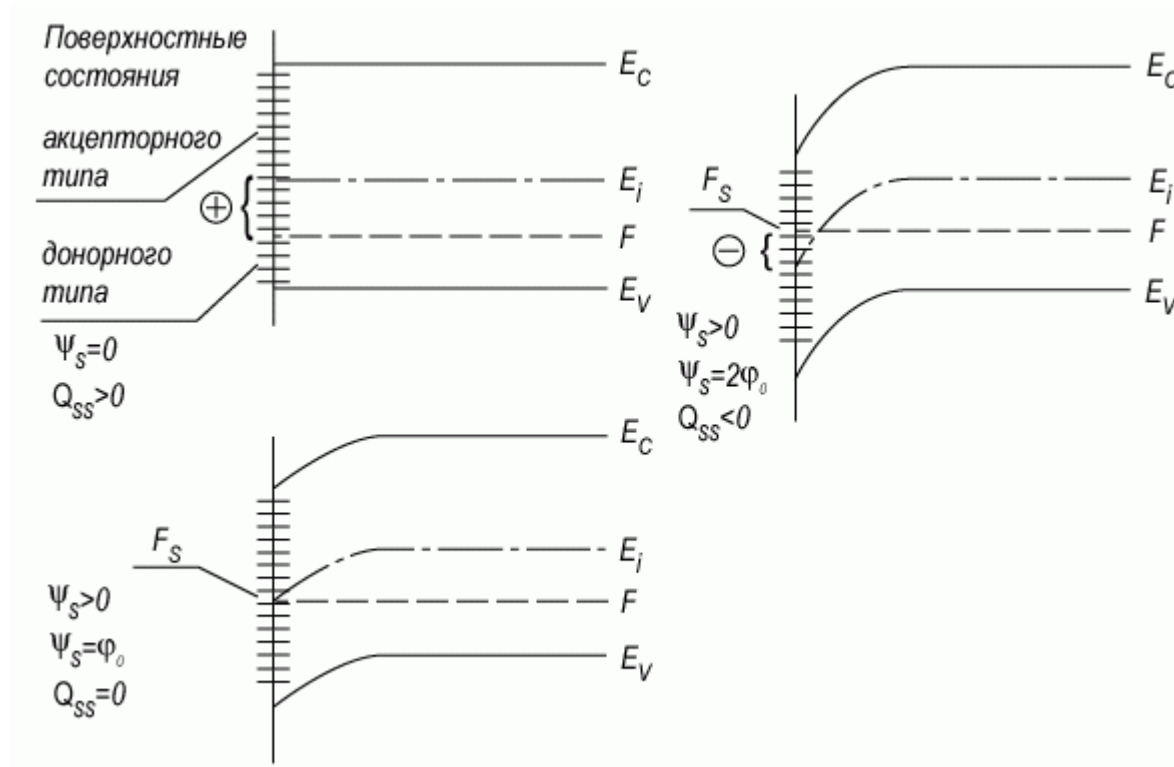


Поверхностные состояния Тамма (1932):
обрыв периодической одномерной
решётки полубесконечного кристалла как
последовательность дельтообразных
потенциальных барьеров, ограниченной
потенциальной «стенкой».



Поверхностные состояния Шокли (1939):
одномерная атомная цепочка с
равноотстоящим симметричными
потенциальными барьерами при
уменьшении расстояния между атомами.

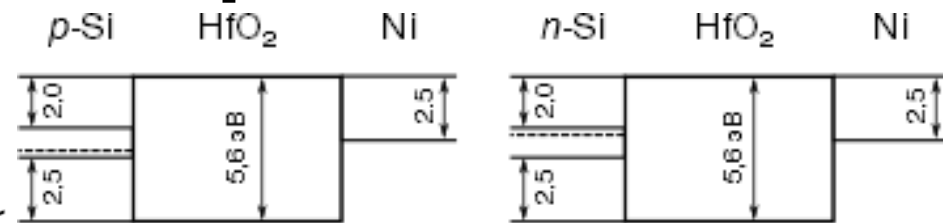
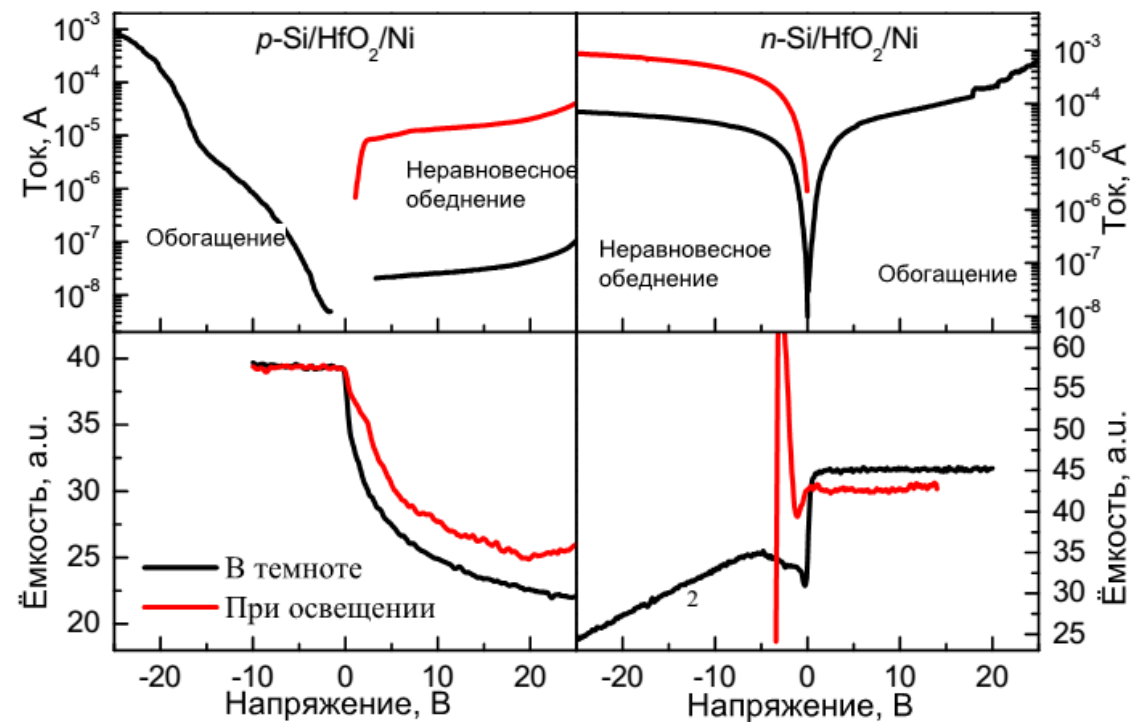
Изгибы зон на поверхности



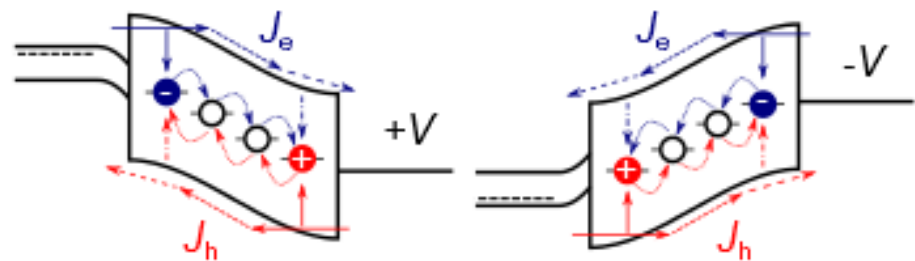
Зонная диаграмма ОПЗ полупроводника p -типа, показывающая заполнение поверхностных состояний при различных изгибах зон

Транспорт заряда в диэлектриках и на границах диэлектрик-полупроводник и диэлектрик-металл

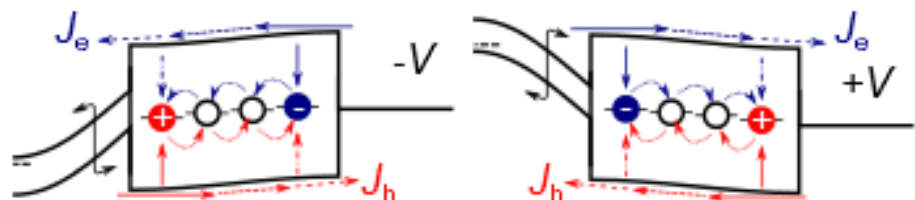
Транспорт. Биполярная проводимость



Режим обогащения



Режим (неравновесного) обеднения



Фотогенерация неосновных носителей заряда в Si увеличивает неравновесный ток неосновных носителей.

[Islamov D R et al., Appl. Phys. Lett. 99, 072109 (2011)]

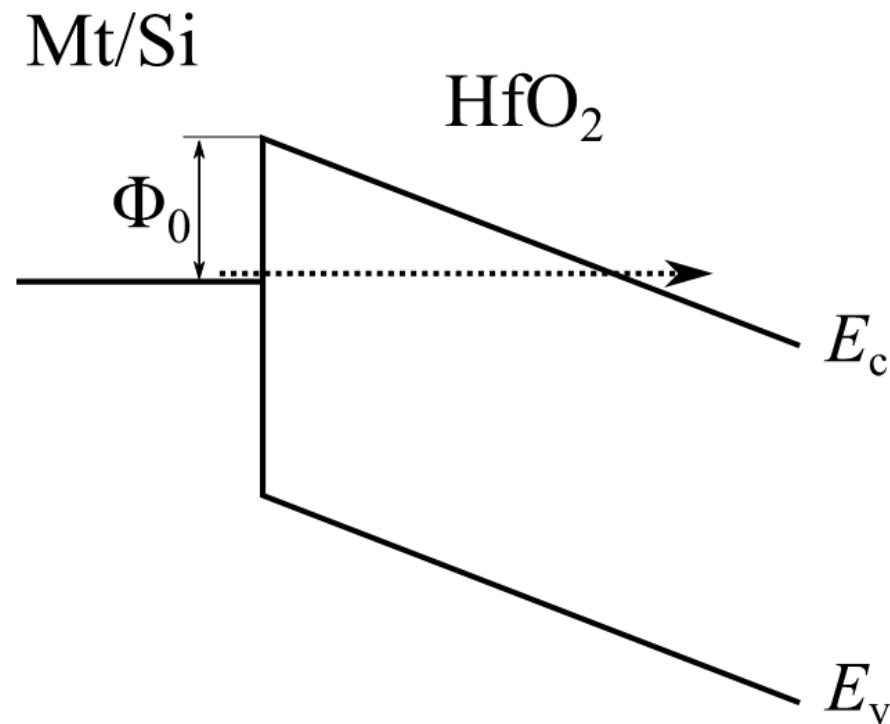
Туннельная эмиссия по Фаулеру-Нордгейму

Туннельная эмиссия по механизму Фаулера-Нордгейма

[Fowler R. H., Nordheim L., *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **119**, 173 (192

$$J = A F^2 \exp\left(-\frac{4}{3} \frac{\pi \sqrt{2 m^*}}{q F h} \Phi_0^{3/2}\right), A = \frac{q^3}{4 \pi h \Phi_0}$$

Слабая температурная зависимость.

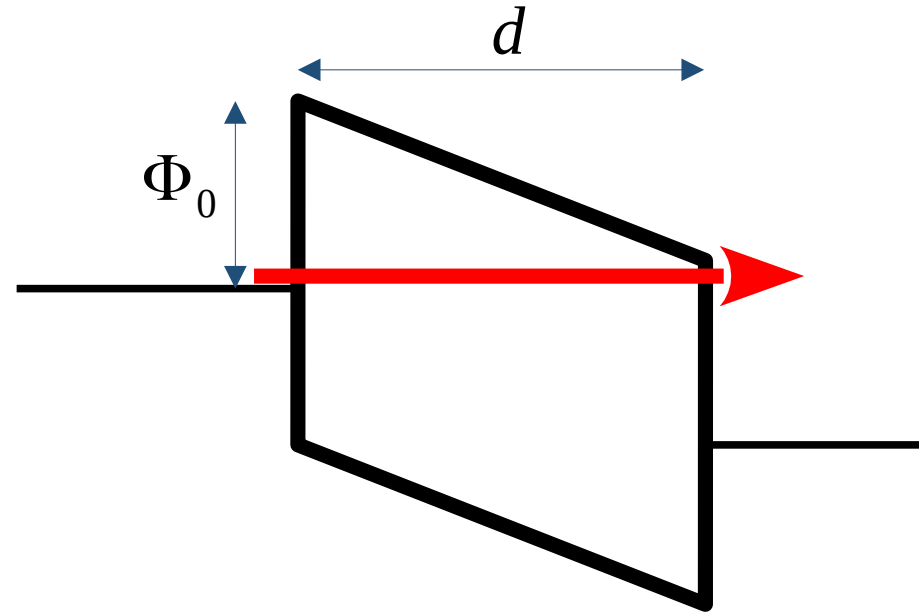


Прямое туннелирование

Прямое туннелирование через трапецевидный барьер.

[Schuegraf K. F., Hu C., *IEEE Transactions on Electron Devices* **41**, 761 (1994)]

$$J = \frac{q^3 F^2}{8 \pi h \Phi_0 B_1} \exp \left(-\frac{4 \sqrt{2 m^* \Phi_0^3 B_2}}{3 q F h} \right)$$
$$B_1 = \left(1 - \left(1 - \frac{q F d}{\Phi_0} \right)^{1/2} \right)^2$$
$$B_2 = \left(1 - \left(1 - \frac{q F d}{\Phi_0} \right)^{3/2} \right)$$

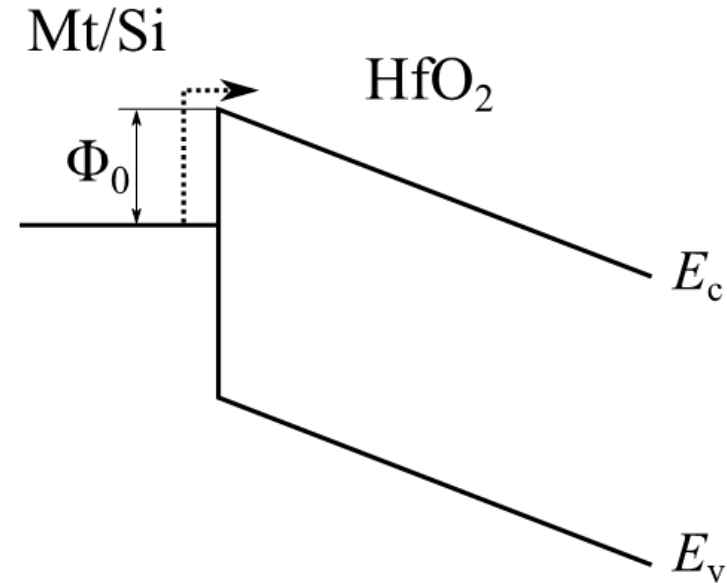


Слабая температурная зависимость.

МДП. Термическая инжекция по Шоттки

Термическая инжекция носителей заряда в диэлектрик по механизму Шоттки
[Schottky W., *Physikalische Zeitschrift* **15**, 872 (1914)]

$$J = A T^2 \exp \left(- \frac{\Phi_0 - \sqrt{\frac{q^3}{4 \pi \epsilon_\infty \epsilon_0} F}}{kT} \right)$$
$$A = \frac{4 \pi m^* k^2 q}{h^3}$$



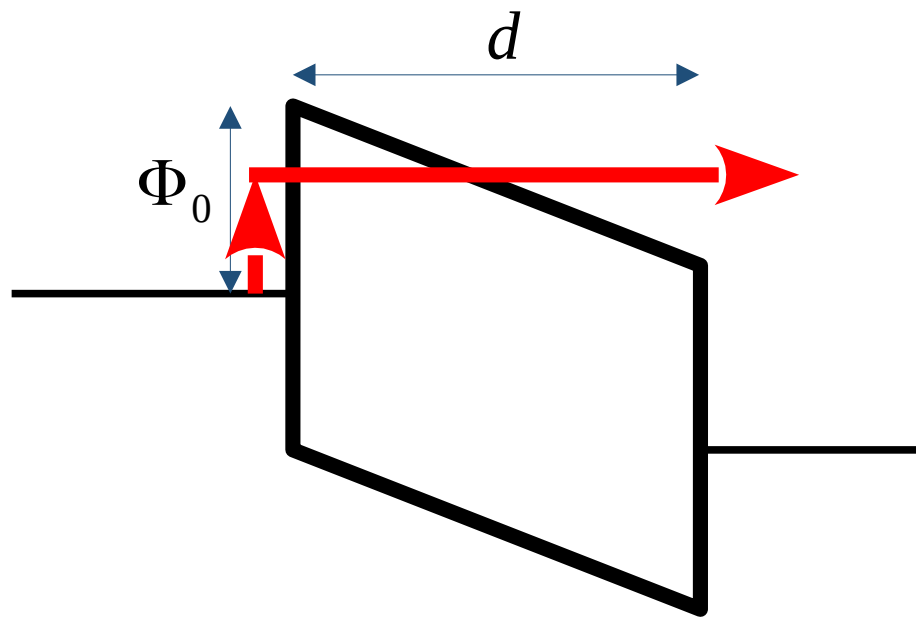
Экспоненциальная температурная зависимость.

Термически облегчённое туннелирование

Прямое туннелирование через трапецевидный барьер.

[Schuegraf K. F., Hu C., *IEEE Transactions on Electron Devices* **41**, 761 (1994)]

$$J = C F \exp \left(- \frac{\Phi_0 - \frac{1}{6} \left(\frac{q F h}{4 \pi k T \sqrt{m^*}} \right)^2}{k T} \right)$$
$$C = \sqrt{2 \pi m^* k T} \left(\frac{q}{h} \right)^2$$



Модель Френкеля

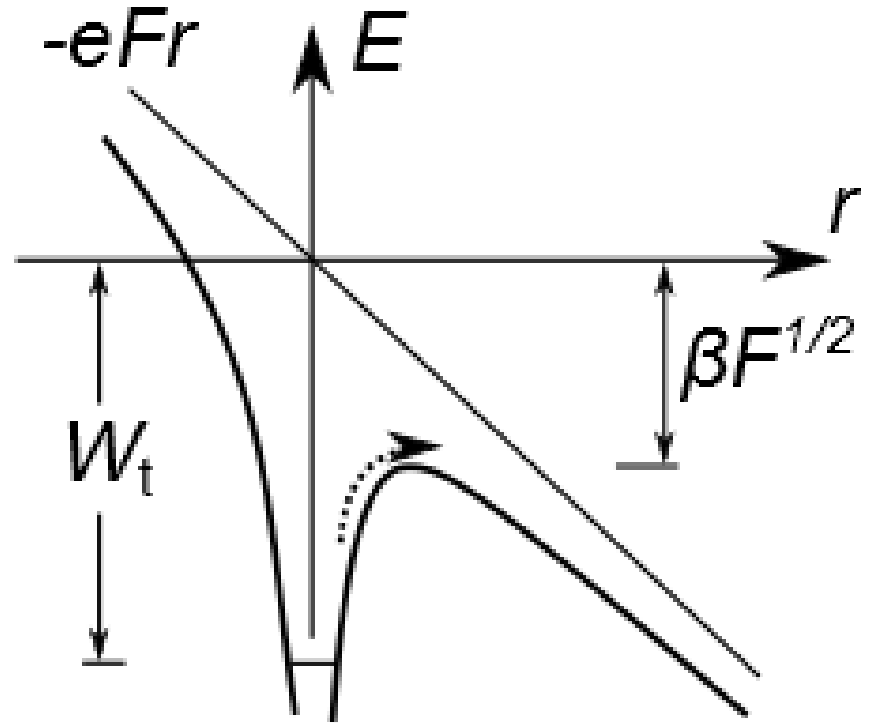
Ионизация заряженного центра при понижении энергетического барьера в электрическом поле

[Frenkel J, *Phys. Rev.* **54**, 647–648 (1938)]

$$P = \nu \exp \left(- \frac{W - \beta \sqrt{F}}{kT} \right)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{q^3}{\pi \epsilon_{\infty} \epsilon_0}}$$

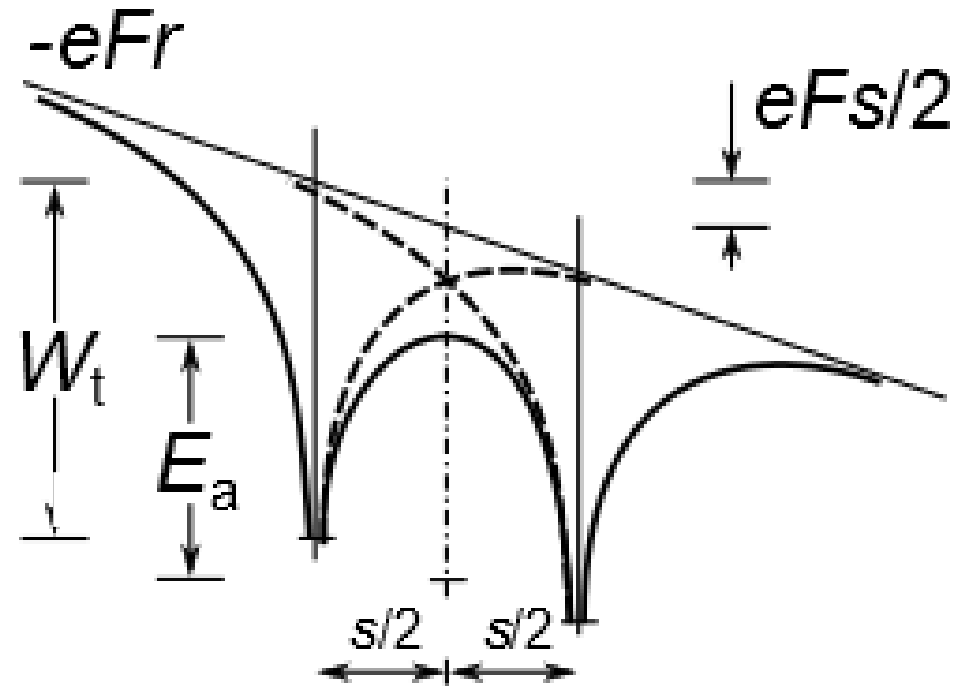
$$\nu = W/h$$



Модель Хилла (закон Пулла)

Перескок между перекрывающимися кулоновскими центрами при понижении энергетического барьера в электрическом поле [Hill R. M., *Phil. Mag.* **23**, 59–86 (1970)]

$$P = \nu \exp\left(-\frac{W - q^2 / \pi \varepsilon_{\infty} \varepsilon_0 s}{kT}\right) \exp\left(\frac{qFs}{2kT}\right)$$



Многофононная ионизация ловушки

Многофононная ионизация изолированной нейтральной

[Makram-Ebeid S., Lannoo M., *Phys. Rev. B* **28**, 6406 (1982)]

$$P = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{n W_{ph}}{kT} - S \coth \frac{W_{ph}}{kT}\right) I_n\left(\frac{S}{\sinh(W_{ph}/2kT)}\right) P_i(W_t + n W_{ph})$$

$$S = \frac{W_{opt} - W_t}{W_{ph}}$$

$$P_i(W) = \frac{qF}{2\sqrt{2m^*W}} \exp\left(-\frac{4}{3} \frac{\pi\sqrt{2m^*}}{qFh} W^{3/2}\right)$$

