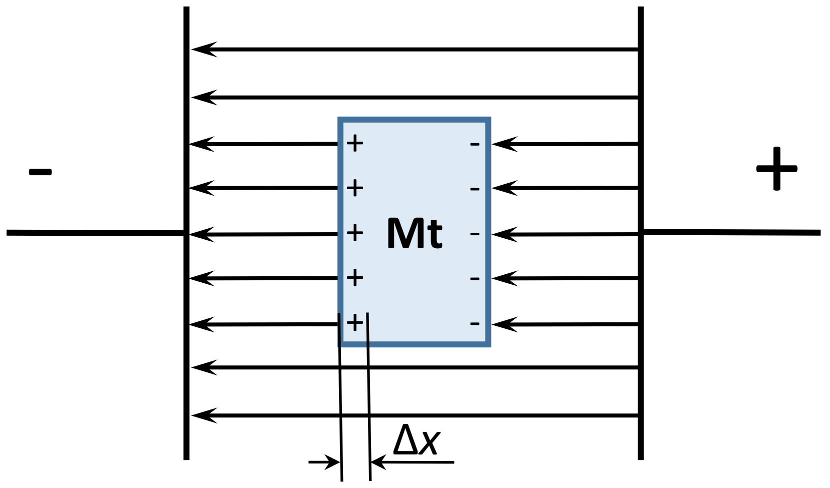
ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

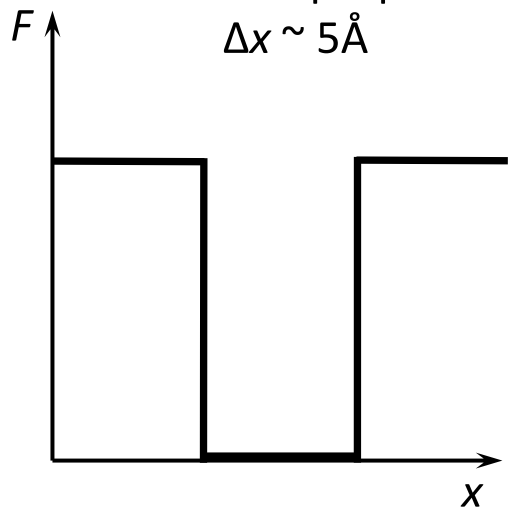
Контакт металл-полупроводник

Металл во внешнем электрическом поле



Плотность объёмного заряда $\rho = qN_0$.
N_0 – плотность остовов в приграничном слое.
$n_0 = N_0 \sim 10^{22}$ см$^{-3}$ – концентрация атомов.
Поверхностный заряд $\sigma = qN_0\Delta x$.

Из приграничного слоя Δx ушли все электроны.
$\Delta x \sim 5$Å

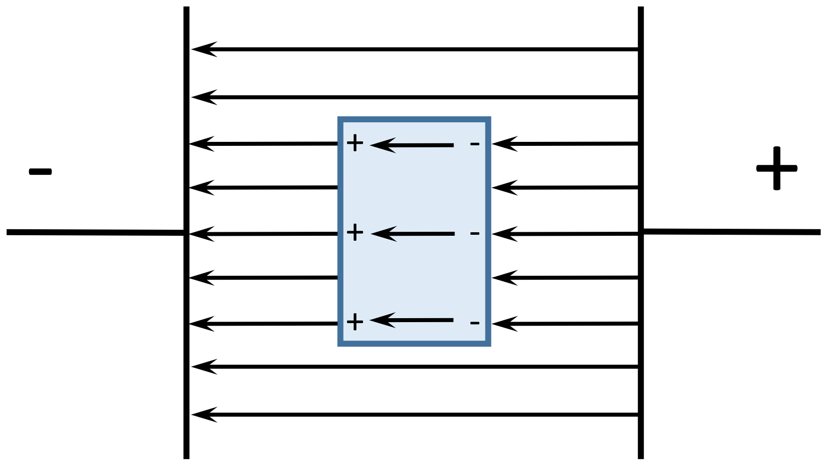


Электрическое поле
(поле экранировки) в приграничном слое

$$F = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{qN_0\Delta x}{2\varepsilon_0} = 450\,\frac{\text{МВ}}{\text{см}}$$

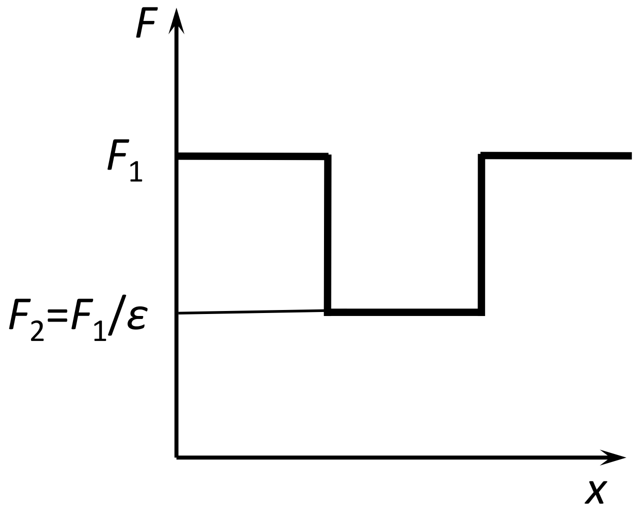
$$F_{\text{пробой}} = 5 \div 20\,\frac{\text{МВ}}{\text{см}}$$

Диэлектрик во внешнем электрическом поле



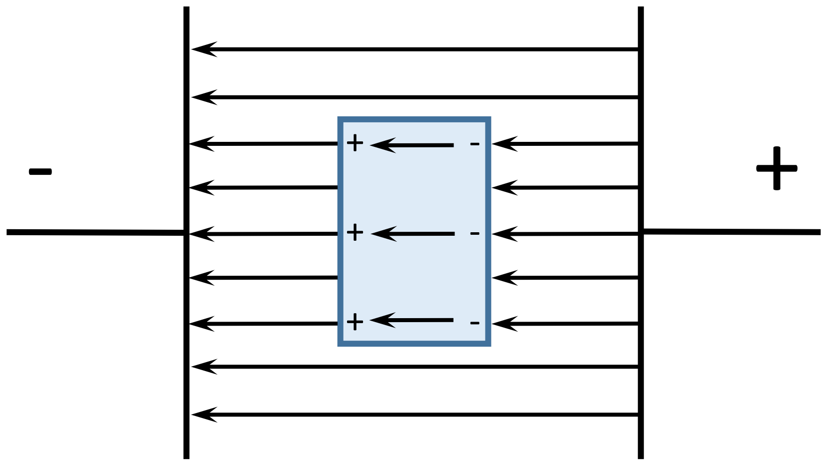
Электрическое поле в объёме диэлектрика меньше внешнего электрического поля в ε раз.

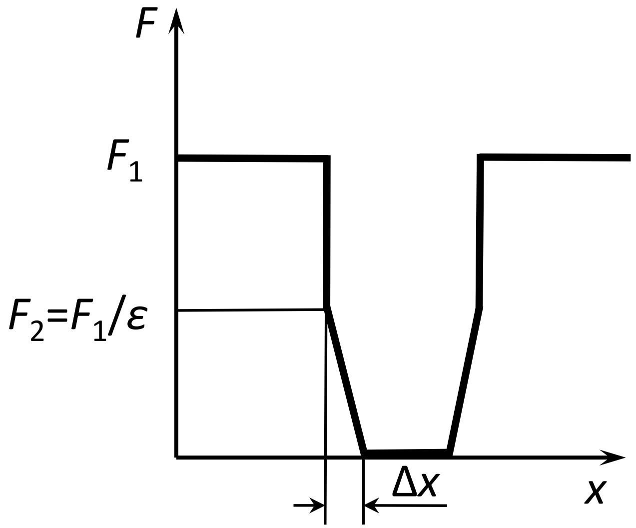
ε – диэлектрическая проницаемость.



Диэлектрическая среда поляризовалась. В объёме **диполи** скомпенсировали друг друга.

Полупроводник во внешнем электрическом поле





Из приграничного слоя Δx ушли все электроны (дырки) – слой обеднения.

Равновесие в электронных системах

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_\mathrm{F}}{kT}\right)}$$

Функция распределения Ферми-Дирака.

Дано: 2 электронные системы:

$f_{1,2}(E)$ – функция распределения

$g_{1,2}(E)$ – общая плотность состояний

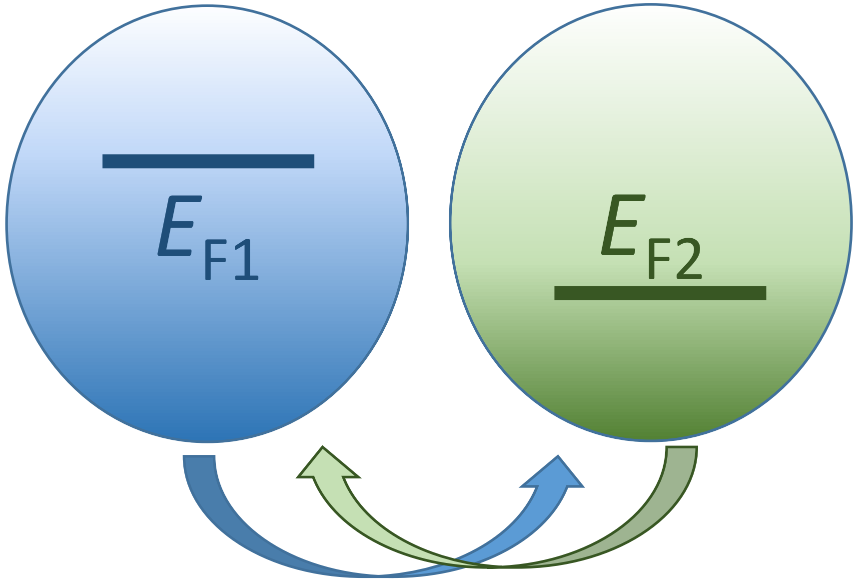
$n_{1,2}(E)$ – концентрация заполненных состояний

$v_{1,2}(E)$ – концентрация пустых состояний

$n_i(E) + v_i(E) = g_i(E)$

$n_i(E) = g_i(E)\, f_i(E)$

$v_i(E) = g_i(E)\,(1 - f_i(E))$



Взаимодействие 2-х систем приводит к появлению потоков частиц:

$n_1 v_2$ – поток из (1) в (2)

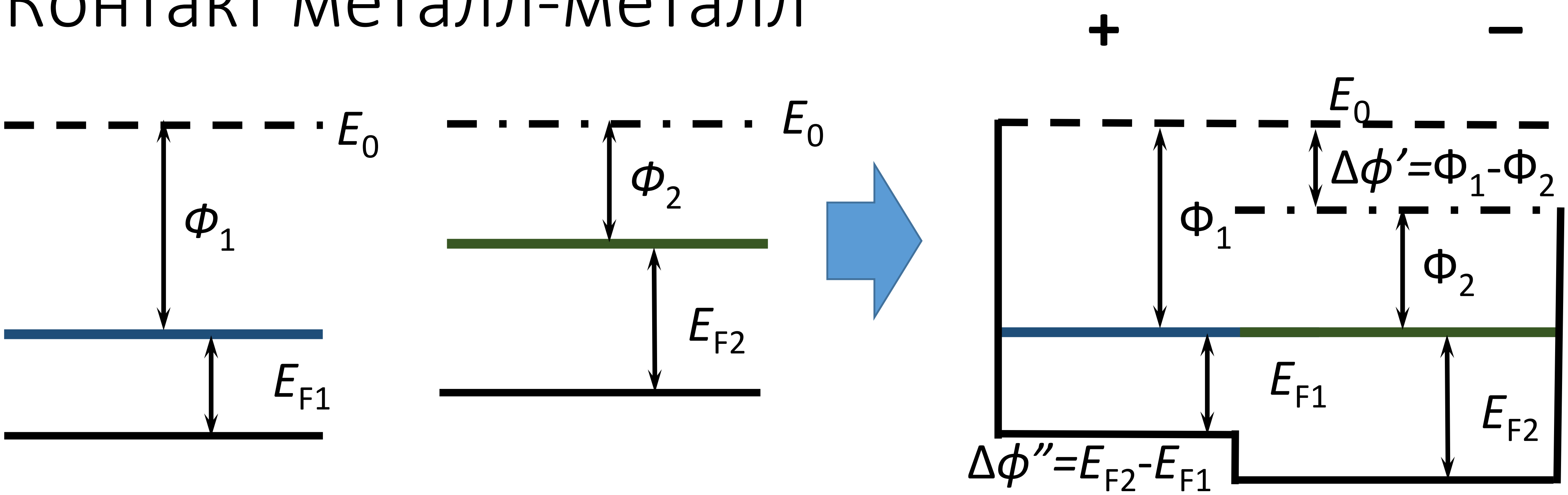
$n_2 v_1$ – поток из (2) в (1)

Равновесие ⇔ $n_1 v_2 = n_2 v_1 \Rightarrow g_1 f_1 g_2 (1 - f_2) = g_2 f_2 g_1 (1 - f_1) \Rightarrow f_1 - f_1 f_2 = f_2 - f_2 f_1 \Rightarrow f_1 = f_2$

$$\frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_{F1}}{kT}\right)} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_{F2}}{kT}\right)}$$

$$E_\mathrm{F1} = E_\mathrm{F2} \Rightarrow E_\mathrm{F} = \mathrm{const}$$

Контакт металл-металл

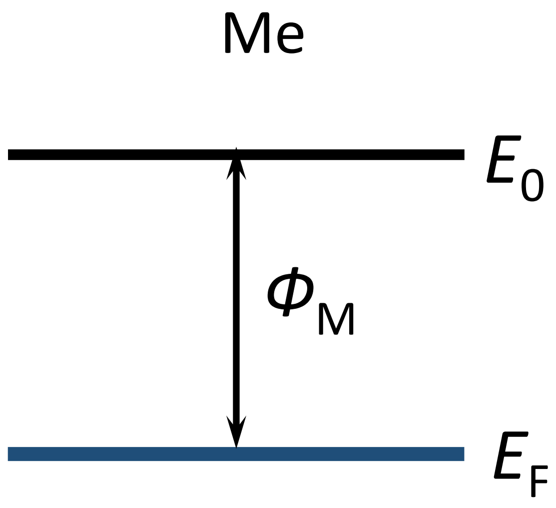


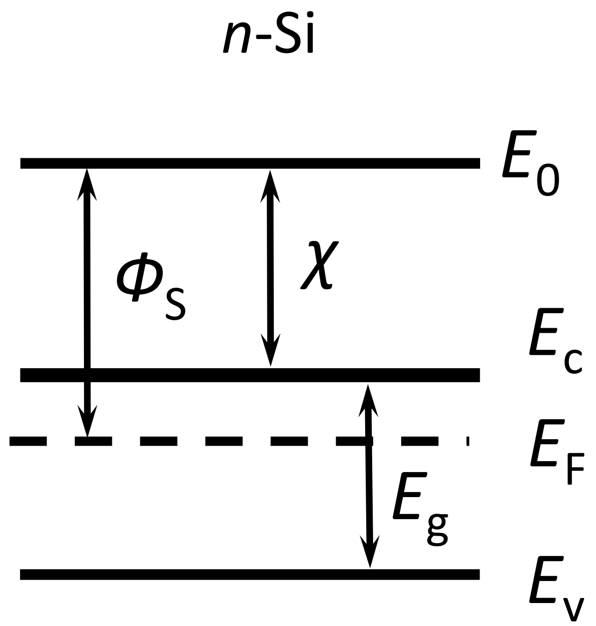
Совмещение уровней Ферми означает, что при T=0 суммы кинетической и потенциальной энергий электронов в металлах равны. При контакте кинетические энергии остаются прежними (и не равными), а потенциальные энергии меняются, что приводит к перераспределению заряда и контактной разности потенциалов $U = (\Phi_1 - \Phi_2)/q$.

При T>0 положение E_{Fi} меняется + диффузионные токи приводят к появлению термо-ЭДС.

Контакт металл-полупроводник

T = 300 К, kT = 25,8 мэВ





Φ – работа выхода, характеристика металла
χ – сродство, характеристика п/п и диэлектриков
$\xi = E_F - E_c$ – хим. потенциал (для п/п $\xi < 0$)

КЭФ-0,44: $N_d = 10^{16}$ см$^{-3}$

Si: χ = 4,05 эВ
E_g = 1,12 эВ

Au: Φ_M = 5,1 эВ (поликристалл)
5,47 эВ (100)
5,37 эВ (110)
5,31 эВ (111)

Уравнение электронейтральности:
$n = N_d^+ = N_d$ (при T=300 К).

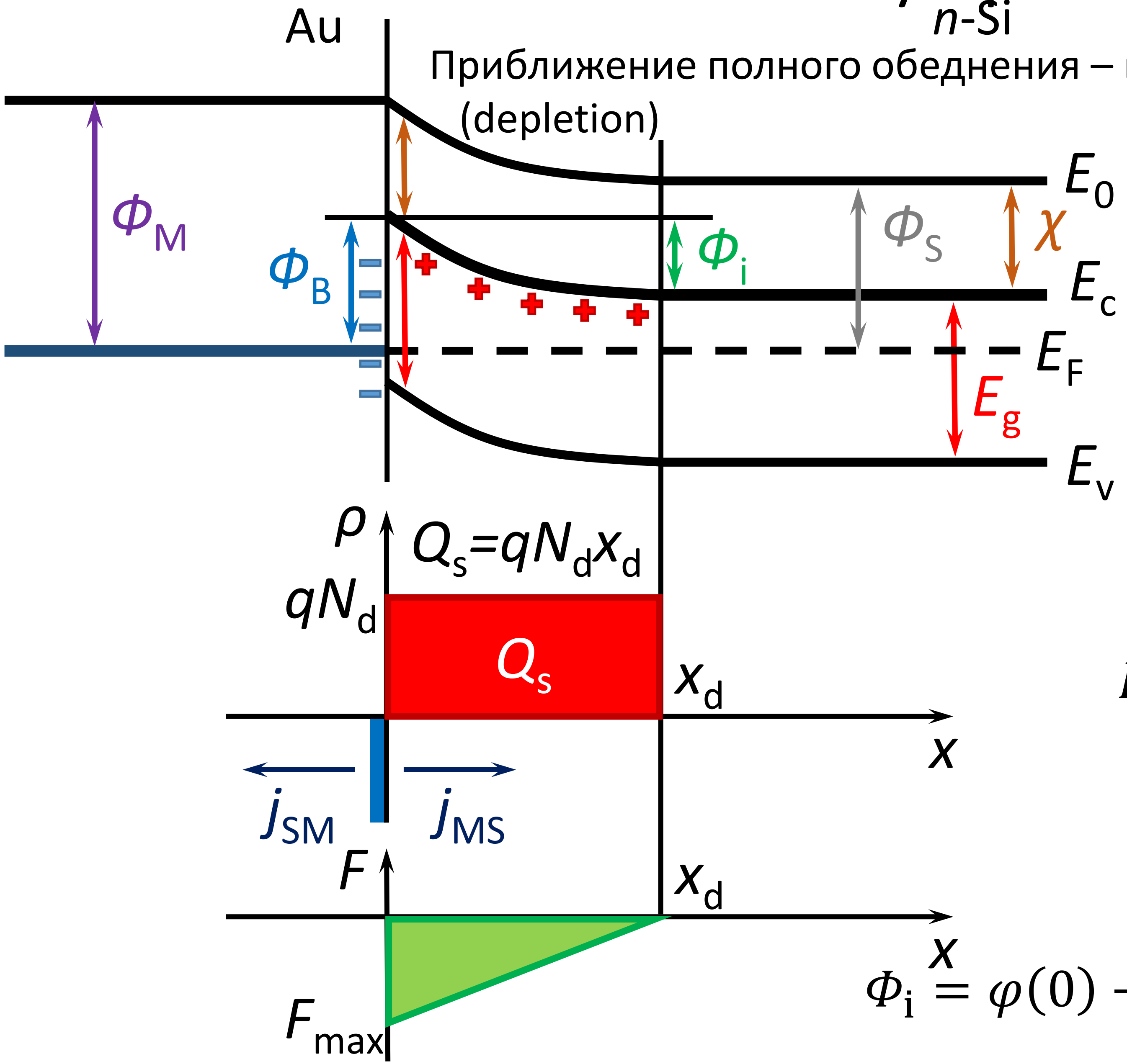
$$n = N_c \exp\left(\frac{\xi}{kT}\right) \Rightarrow \xi = kT \ln\frac{N_d}{N_c} = -0{,}204 \text{ эВ}$$

$$\Phi_S = \chi + |\xi| = 4{,}05 + 0{,}204 = 4{,}254 \text{ эВ} \Rightarrow \boldsymbol{\Phi_M > \Phi_S}$$

Контакт металл-полупроводник

$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_\mathrm{d}} \approx 2 \times 10^4\ \text{см}^{-3}, \frac{p}{N_\mathrm{d}} \sim 10^{-12}$

Приближение полного обеднения – все электроны ушли из слоя обеднения (depletion)



$$\Phi_\mathrm{B} = \Phi_\mathrm{M} - \chi = 5{,}1 - 4{,}05 = 1{,}05\ \text{эВ}$$

$$\Phi_\mathrm{i} = \Phi_\mathrm{B} - |\xi| = \Phi_\mathrm{M} - \chi - |\Phi_\mathrm{S} - \chi| = \Phi_\mathrm{M} - \Phi_\mathrm{S}$$

$$\Phi_\mathrm{i} = 5{,}1 - 4{,}254 = 0{,}846\ \text{эВ}$$

Область пространственного заряда (ОПЗ)

$$0 \le x \le x_\mathrm{d}$$

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0} \Rightarrow \frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

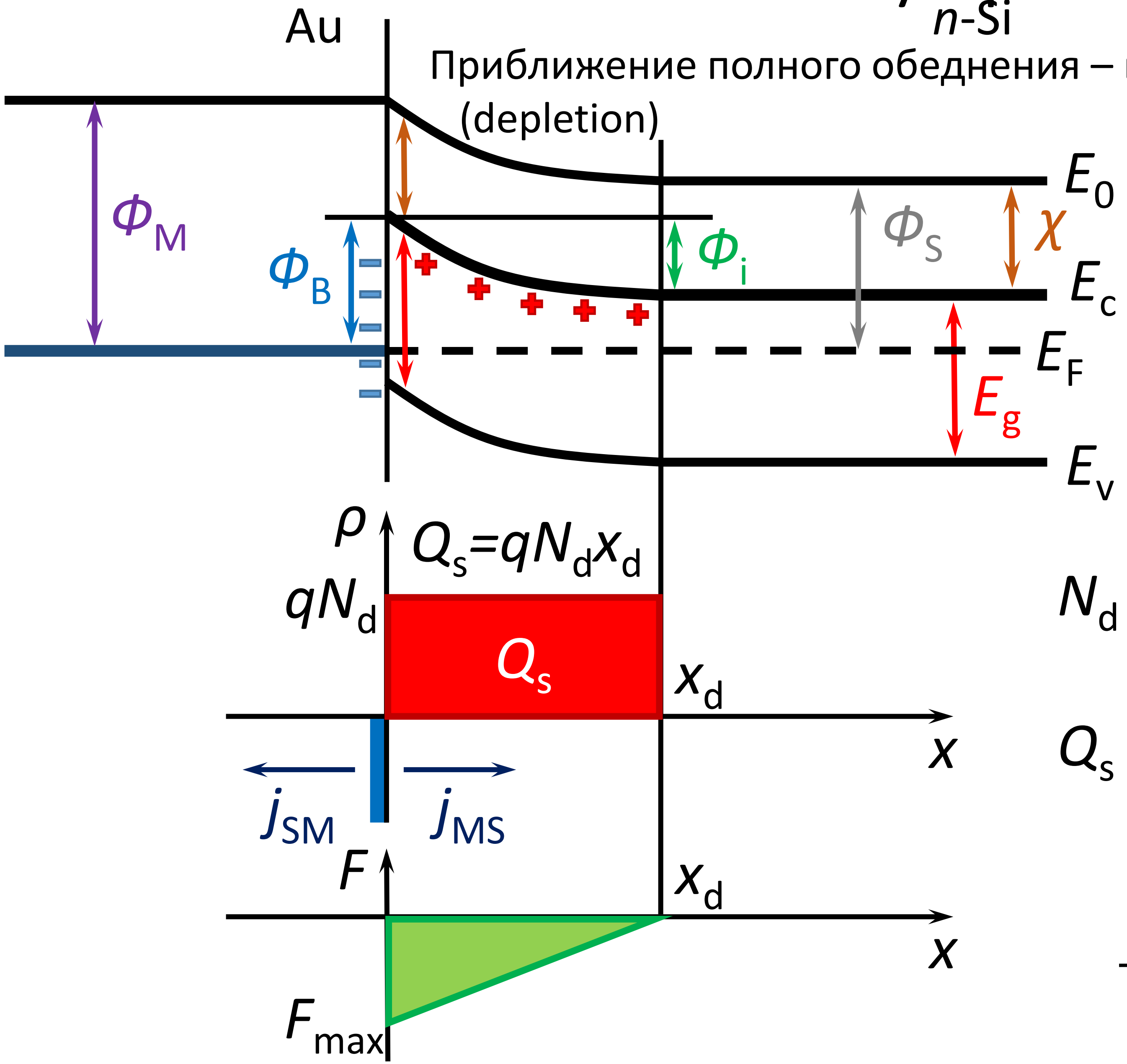
$$F(x) = F_\mathrm{max}\left(1 - \frac{x}{x_\mathrm{d}}\right), F_\mathrm{max} = \frac{qN_\mathrm{d}x_\mathrm{d}}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

$$\varphi(x) = \Phi_\mathrm{i}\left(\frac{x}{x_\mathrm{d}} - 1\right)^2$$

$$\Phi_\mathrm{i} = \varphi(0) - \varphi(x_\mathrm{d}) = \int_0^{x_\mathrm{d}} F(x)dx = \frac{1}{2}F_\mathrm{max}x_\mathrm{d} = \frac{qN_\mathrm{d}x_\mathrm{d}^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}$$

Контакт металл-полупроводник

Приближение полного обеднения – все электроны ушли из слоя обеднения (depletion)



Область пространственного заряда (ОПЗ)

$$0 \leq x \leq x_d$$

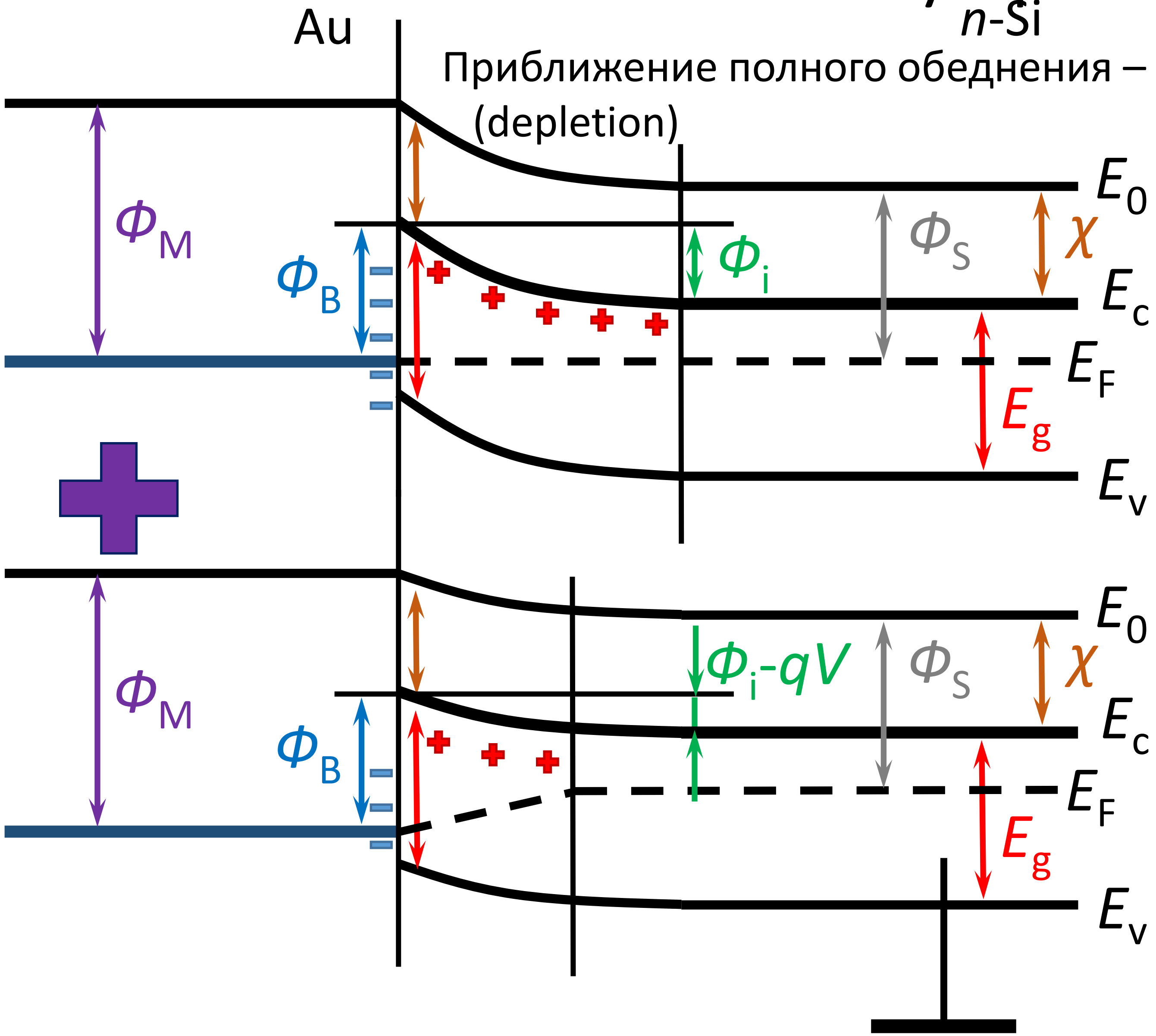
$$x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 \Phi_i}{q^2 N_d}}$$

$N_d = 10^{16}$ см$^{-3}$ $\quad$ $x_d = 300$ нм

$Q_s = 5{,}3\times10^{-9}$ Кл/см^2 = $3{,}3\times10^{11}$ эл/см^2

Контакт металл-полупроводник: смещение V>0

Приближение полного обеднения – все электроны ушли из слоя обеднения (depletion)



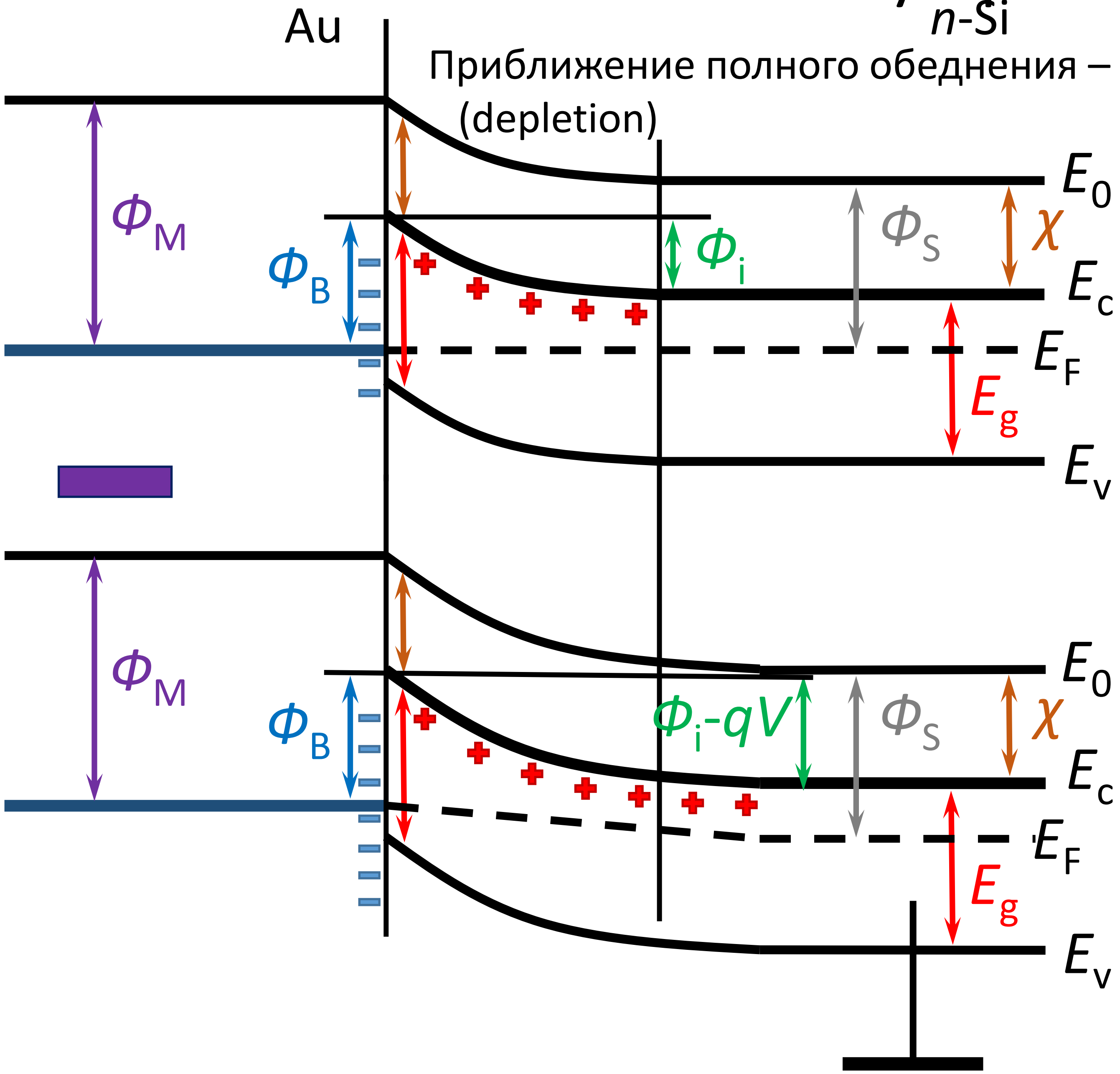
Область пространственного заряда (ОПЗ)

$$0 \leq x \leq x_d$$

$$x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\Phi_i - qV)}{q^2 N_d}}$$

Контакт металл-полупроводник: смещение V<0

Приближение полного обеднения – все электроны ушли из слоя обеднения (depletion)



Область пространственного заряда (ОПЗ)

$$0 \le x \le x_d$$

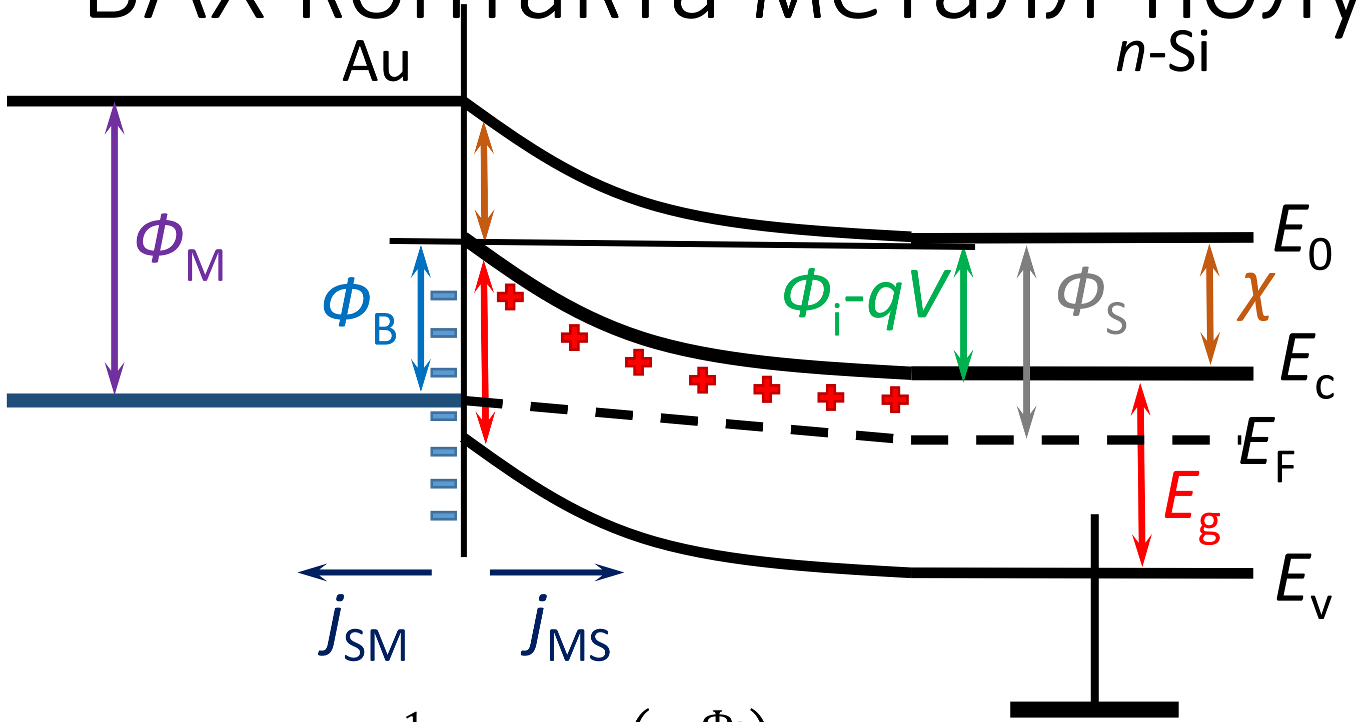
$$x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\Phi_i - qV)}{q^2 N_d}}$$

$$x_d(V<0) > x_d(V=0)$$

$$Q_S = \sqrt{2\varepsilon\varepsilon_0(\Phi_i - qV)N_d}$$

$$C_S = \left|\frac{dQ_S}{dV}\right| = \frac{q}{2}\sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 N_d}{\Phi_i - qV}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{x_d}$$

ВАХ контакта металл-полупроводник



$$j_x = \frac{1}{4} q n \langle V_T \rangle \qquad \langle V_T \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m^*}}$$

$$V = 0: \ |j_{SM}| = |j_{MS}| = \frac{1}{4} q n_s \langle V_T \rangle$$

$$n_s = N_c \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right) = \underbrace{N_c \exp\left(-\frac{\xi}{kT}\right)}_{N_d} \exp\left(-\frac{\Phi_i}{kT}\right)$$

$$n_s = N_d \exp\left(-\frac{\Phi_i}{kT}\right)$$

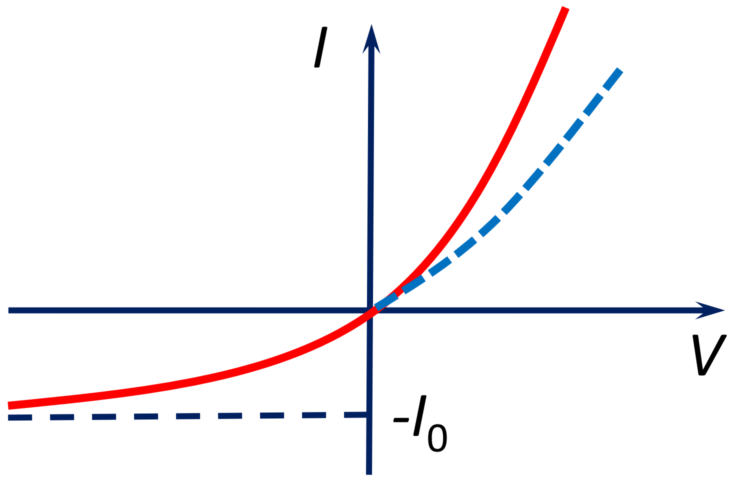
$$V \neq 0: \ |j_{MS}| = \frac{1}{4} q N_d \exp\left(-\frac{\Phi_i}{kT}\right) \langle V_T \rangle$$

$$|j_{SM}| = \frac{1}{4} q N_d \exp\left(-\frac{\Phi_i - qV}{kT}\right) \langle V_T \rangle$$

$$|j_\Sigma| = |j_{SM}| - |j_{MS}| = \underbrace{\frac{1}{4} q N_d \langle V_T \rangle \exp\left(-\frac{\Phi_i}{kT}\right)}_{j_0} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$

$$j = j_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$

Диод Шоттки



$$I = I_0\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$

$$I_0 = \text{Area}\cdot\frac{1}{4}qN_{\text{d}}\langle V_T\rangle\exp\left(-\frac{\Phi_{\text{i}}}{kT}\right)$$

Ток насыщения

$$I_0 = \frac{\text{Area}}{4}qN_{\text{d}}\sqrt{\frac{8kT}{\pi m^*}}\exp\left(-\frac{\Phi_{\text{i}}}{kT}\right)$$

$$I_0 \sim \sqrt{T}\exp\left(-\frac{\Phi_{\text{i}}}{kT}\right)$$

С учётом сопротивления п/п

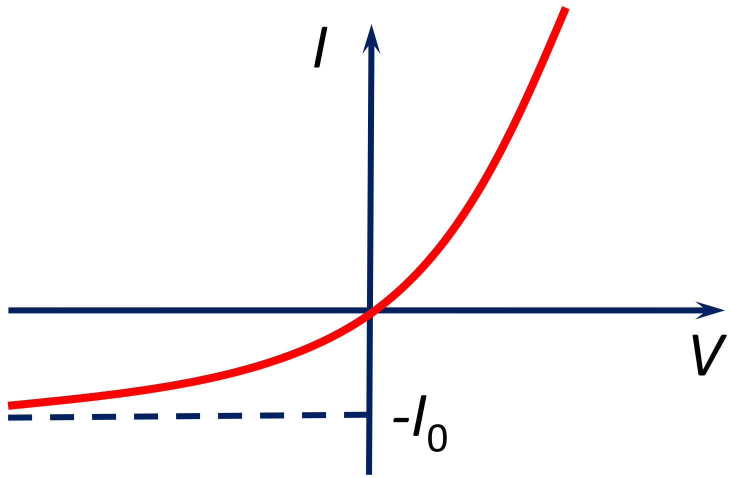
$$I = I_0\left(\exp\left(\frac{q(V - IR_{\text{s}})}{kT}\right) - 1\right)$$

При x_{d} сравнимой с L_{n}, L_{p}

$$I = I_0\left(\exp\left(\frac{q(V - IR_{\text{s}})}{\alpha kT}\right) - 1\right)$$

$$1 \leq \alpha \leq 2$$

Диод Шоттки



$$I = I_0\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$

$$I_0 = \text{Area}\cdot\frac{1}{4}qN_d\langle V_T\rangle\exp\left(-\frac{\Phi_i}{kT}\right)$$

Ток насыщения

$$I_0 = \frac{\text{Area}}{4}qN_d\sqrt{\frac{8kT}{\pi m^*}}\exp\left(-\frac{\Phi_i}{kT}\right)$$

$$I_0 \sim \sqrt{T}\exp\left(-\frac{\Phi_i}{kT}\right)$$

$$I = I_0\left(\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{\alpha kT}\right) - 1\right)$$

Au/Si, N_d=10^{16} см$^{-3}$

$\Phi_i = 0{,}846$ эВ $\quad \langle V_T\rangle = 2{,}1\times 10^7$ см/с $\quad j_0 = 3{,}9\times 10^{-11}$ А/см^2

$\text{Area} = (100\ \text{мкм})^2 = 10^{-4}\text{см}^2$

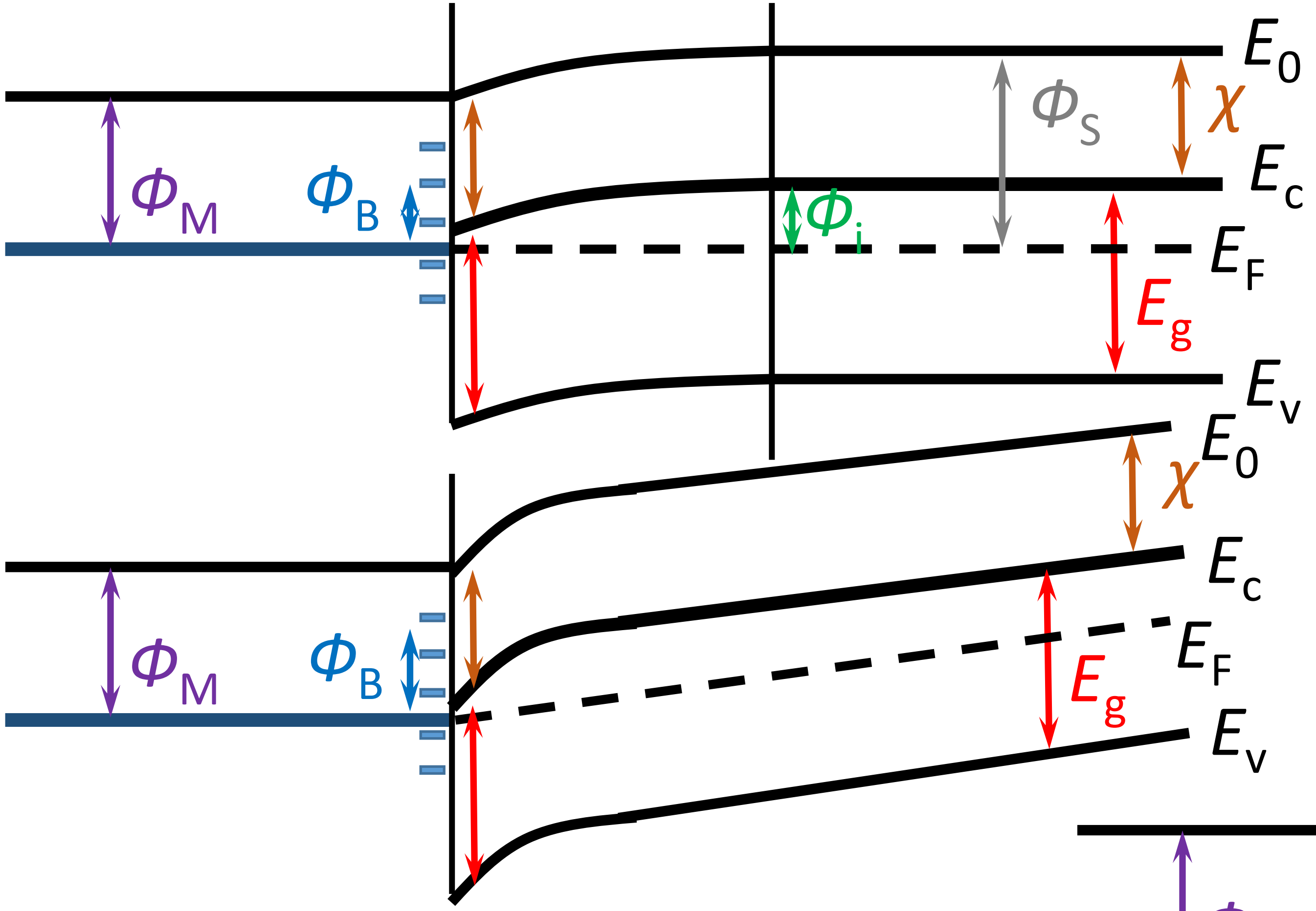
$I_0 = 4\times 10^{-15}$ A

$\text{Area} = (1\ \text{мм})^2 = 10^{-2}\text{см}^2$

$I_0 = 4\times 10^{-13}$ A

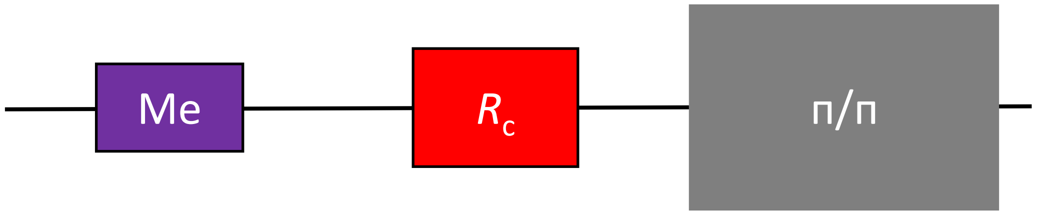
Контакт металл-полупроводник: $\Phi_M < \Phi_S$

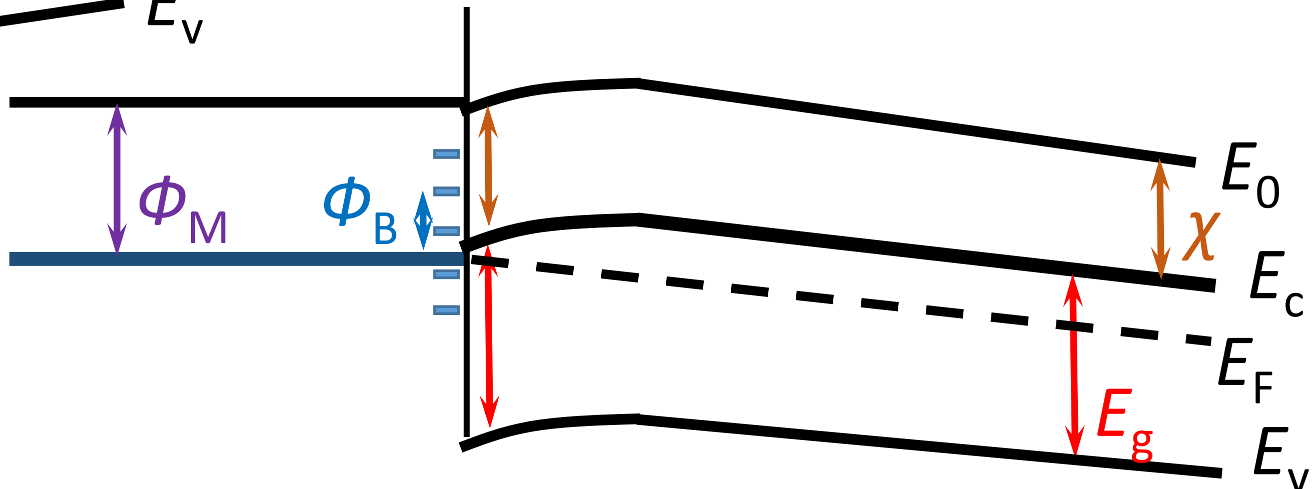
Обогащение



$$n_s = N_c \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right) = \underbrace{N_c \exp\left(-\frac{\xi}{kT}\right)}_{N_d} \exp\left(+\frac{\Phi_i}{kT}\right)$$

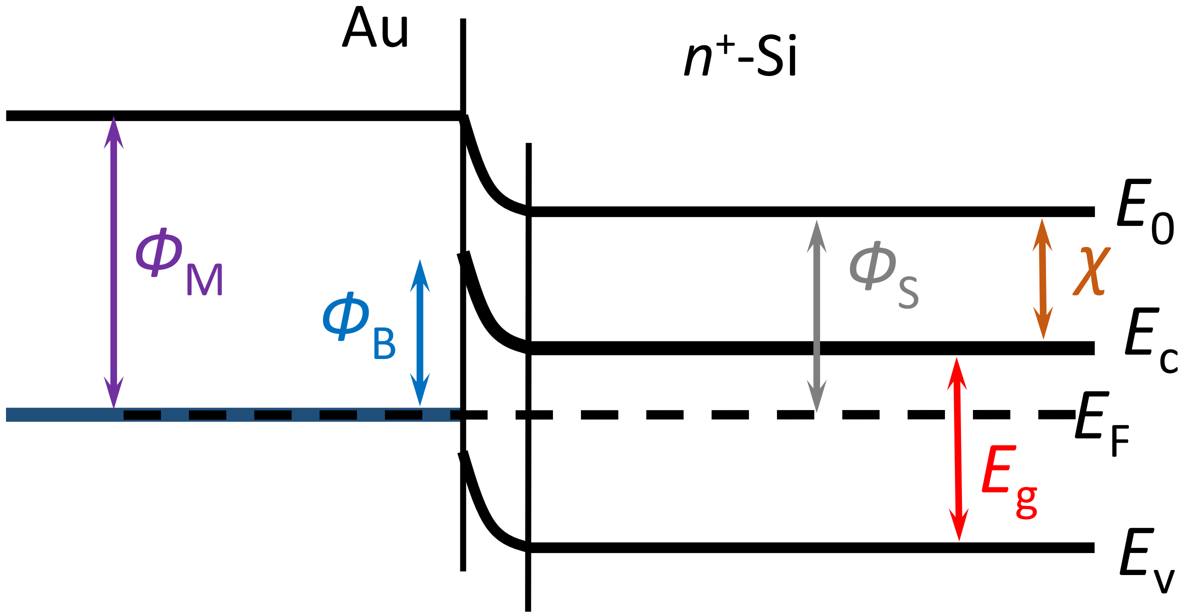
$$n_s = N_d \exp\left(\frac{\Phi_i}{kT}\right)$$





Омический контакт

Контакт металл-полупроводник Me/n^+-Si



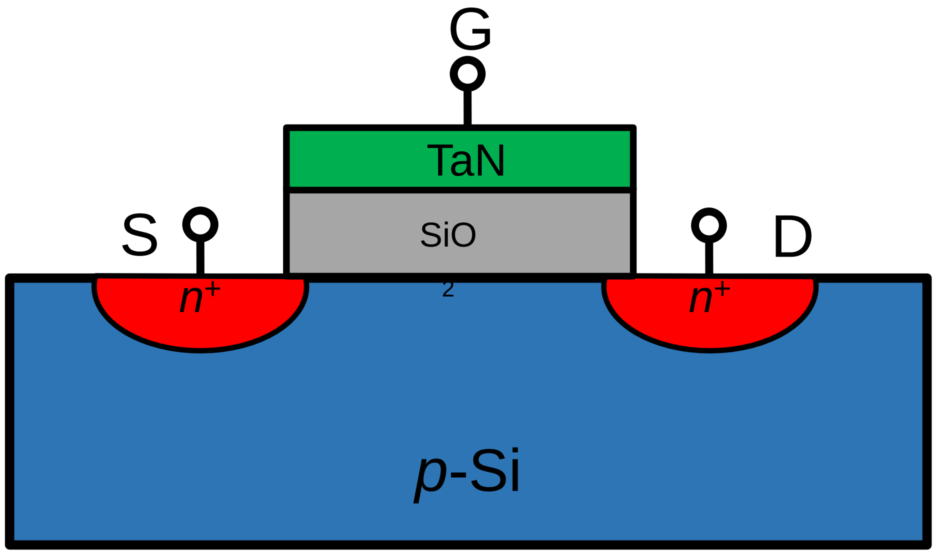
$x_d \sim 1 \div 10$ нм

$$x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\Phi_i}{q^2 N_d}}$$

$$N_d = 10^{19}\ \text{см}^{-3} \Rightarrow x_d = 10\ \text{нм}$$

$$N_d = 10^{20}\ \text{см}^{-3} \Rightarrow x_d = 3\ \text{нм}$$

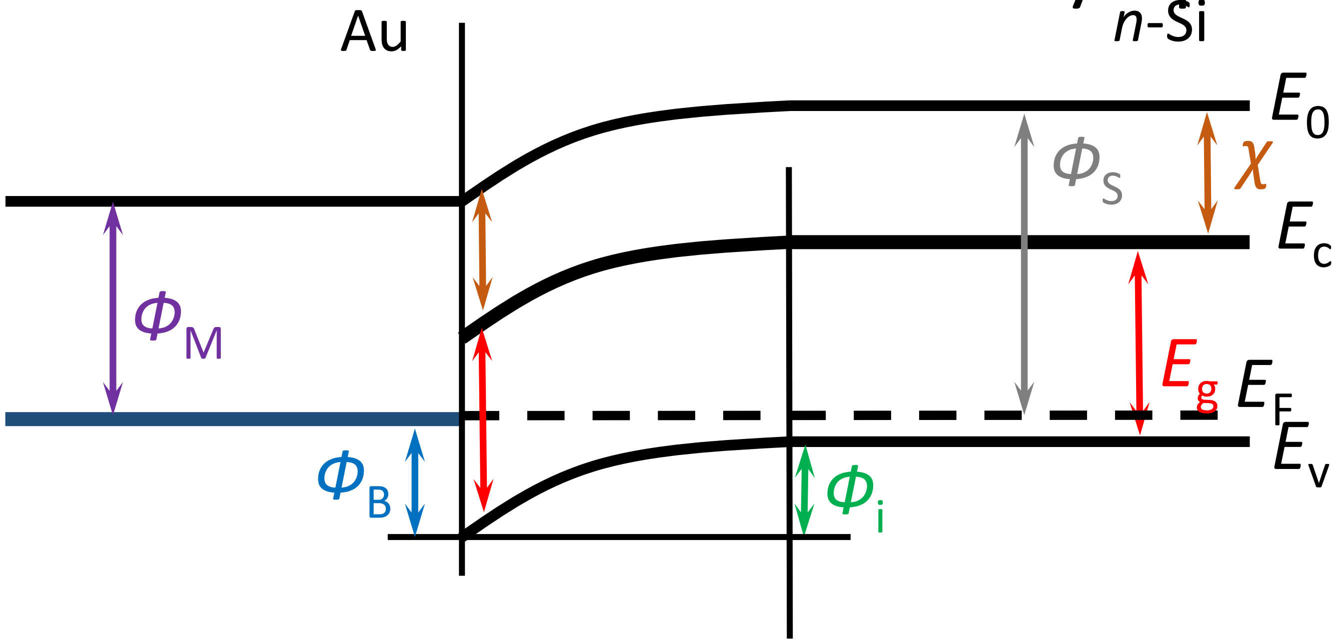
$$N_d = 10^{21}\ \text{см}^{-3} \Rightarrow x_d = 1\ \text{нм}$$



Туннельные контакты тоже **омические**

n^+-Si, n^{++}-Si, p^+-si, p^{++}-Si

Контакт металл-полупроводник Me/*p*-Si, $\Phi_M < \Phi_S$

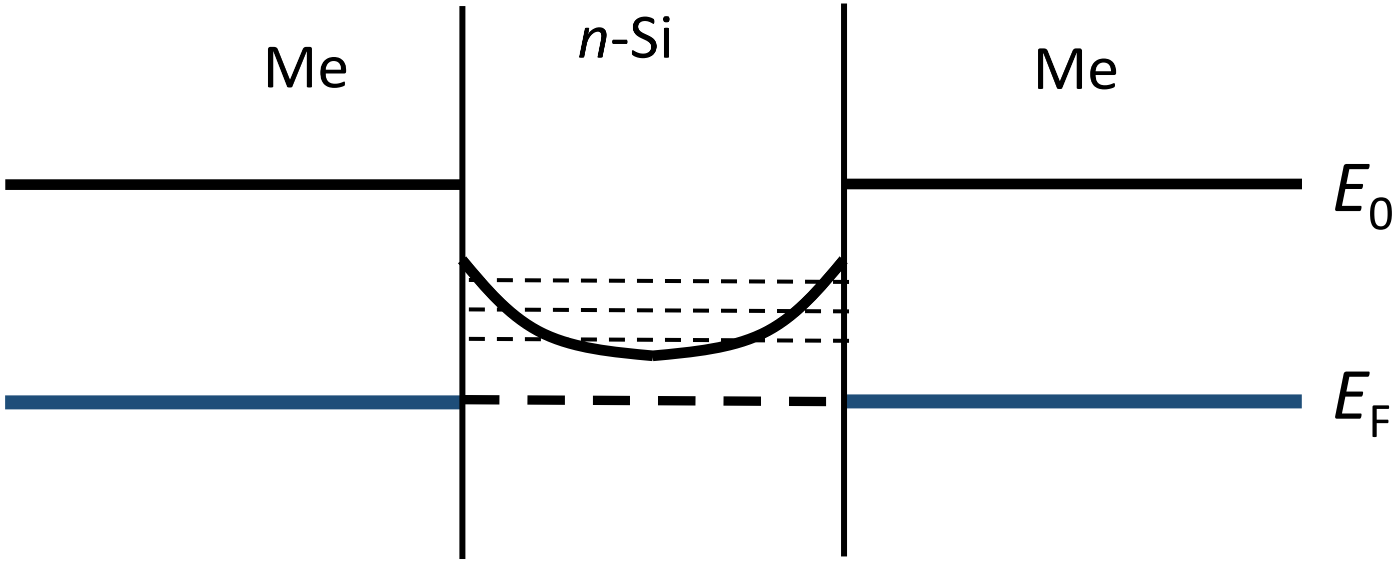


Барьер Шоттки для дырок

$$p = N_v \exp\left(\frac{\eta}{kT}\right)$$

$$x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\Phi_i - qV)}{q^2 N_a}}$$

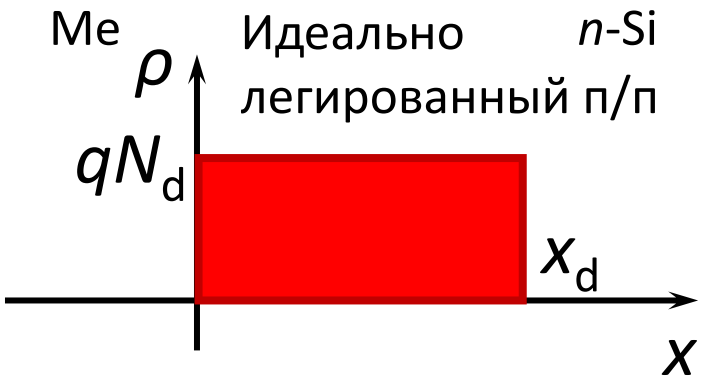
Тонкий полупроводниковый слой в МПМ

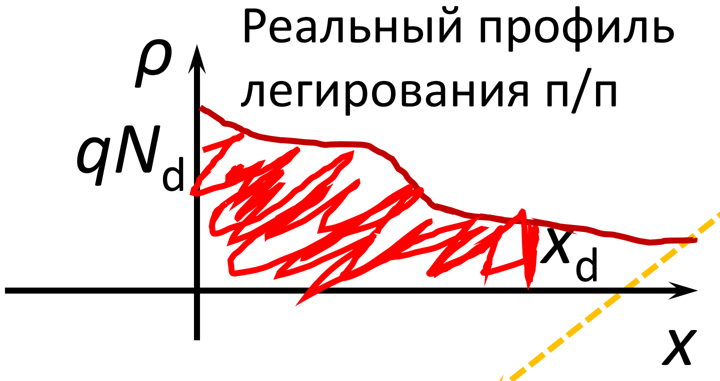


$L < 2x_d$

Квантовая яма параболического типа

CV методы определения профиля легирования





$$C_S = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{x_d} \Rightarrow \frac{dx}{dC} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{C^2}$$

$$V_\Sigma = V_0 + \delta V\cos(\omega t)$$

измерение $f(V)$ измерение $f'(V)$

$$Q_S = q\int_0^{x_d} N_d(x)dx$$

$$dQ = qN_d(x)dx = -CdV$$

$$N_d(x) = -\frac{C}{q}\frac{dV}{dx} = -\frac{C}{q}\frac{1}{dx/dV}$$

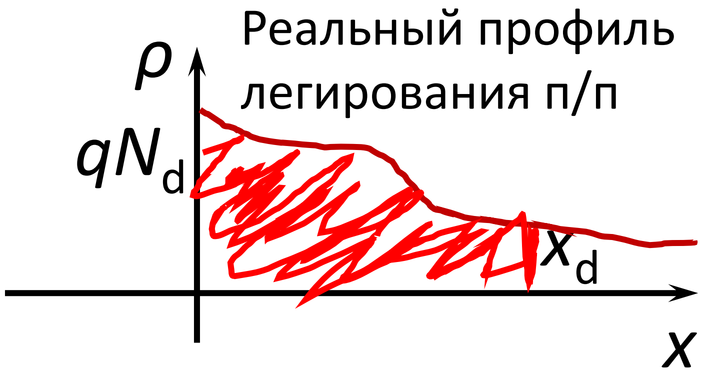
$$\frac{dx}{dV} = \frac{dx}{dC}\frac{dC}{dV} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{C^2}\frac{dC}{dV}$$

$$\boxed{N_d(x) = \frac{1}{q\varepsilon\varepsilon_0}\frac{C^3}{\frac{dC}{dV}} = \frac{-2}{q\varepsilon\varepsilon_0\left(\frac{d(1/C^2)}{dV}\right)}}$$

$$\frac{d(1/C^2)}{dC} = -\frac{2}{C^3}$$

$$\frac{d(1/C^2)}{dV} = \frac{d(1/C^2)}{dC}\frac{dC}{dV} = -\frac{2}{C^3}\frac{dC}{dV}$$

CV методы определения профиля легирования



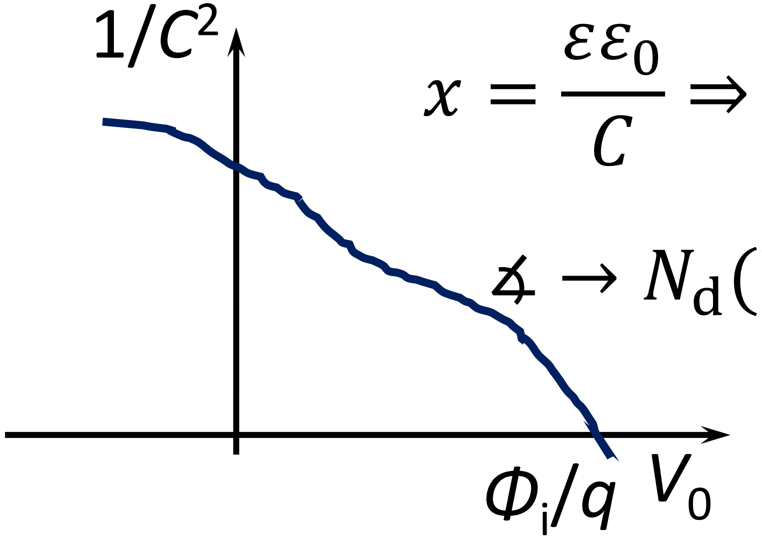
$$x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\Phi_i - qV)}{q^2 N_d}}$$

$$V_\Sigma = V_0 + \delta V \cos(\omega t)$$

измерение $f(V)$ измерение $f'(V)$

$$C_S = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{x_d} = \sqrt{\frac{q^2\varepsilon\varepsilon_0 N_d}{2(\Phi_i - qV)}} \Rightarrow \boxed{\Phi_i - qV = \frac{q^2\varepsilon\varepsilon_0 N_d}{2C^2}}$$

$$\boxed{N_d(V) = \frac{-2}{q\varepsilon\varepsilon_0\left(\frac{d(1/C^2)}{dV}\right)}}$$



$$x = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{C} \Rightarrow \frac{1}{C^2} = \frac{x^2}{(\varepsilon\varepsilon_0)^2}, \frac{1}{C^2} = f(V_0), \frac{d(1/C^2)}{dV} = \frac{\delta f(V)}{\delta V} = g(V_0)$$

$$\cancel{x} \rightarrow N_d(V_0)$$

$$\boxed{\begin{cases} N_d(V_0) = \dfrac{-2}{q\varepsilon\varepsilon_0 g(V_0)} \\ x(V_0) = \varepsilon\varepsilon_0\sqrt{f(V_0)} \end{cases}}$$