Твердотельная электроника

Презентации к лекционному курсу

Основные понятия твердотельной электроники

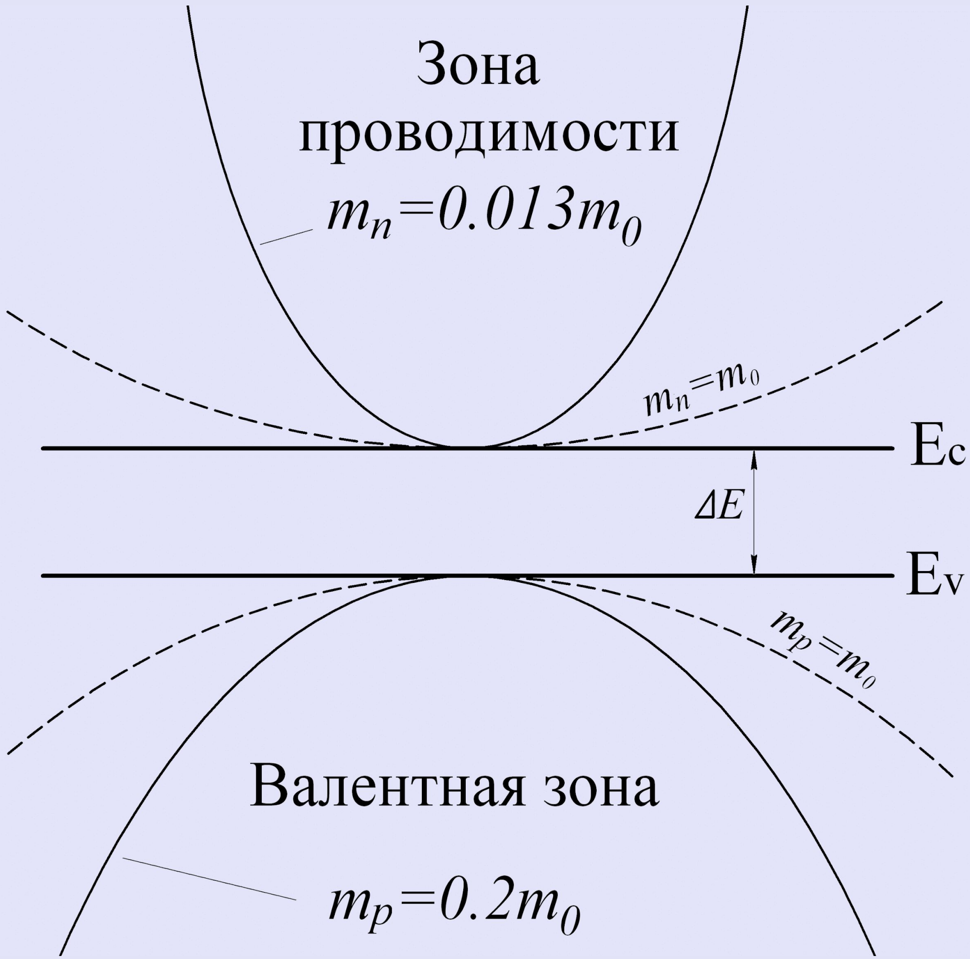
МОСКВА 2012 НИУ «МЭИ»

1 Основные понятия твердотельной электроники

$$E = \frac{\overline{p}^{2}}{2m_n *} = \frac{\hbar^2 \overline{k}^{2}}{2m_n *} = \frac{h^2 \overline{k}^{2}}{8\pi^2 m_n *}$$

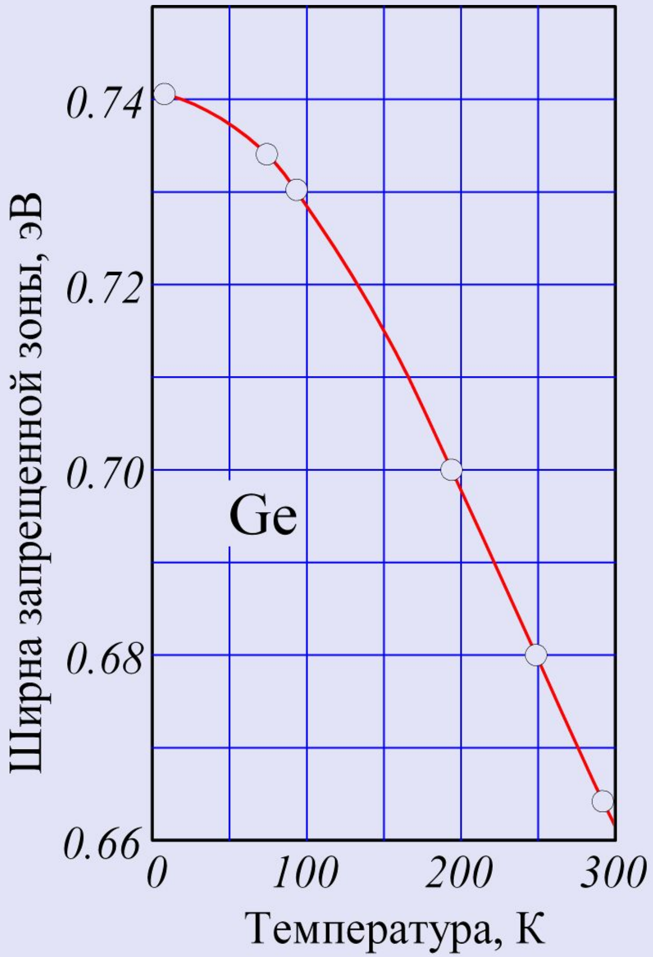
$$m_n^* = \left(\frac{\partial^2 E}{\partial p^2} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right)^{-1}$$

Зависимость энергии от квазиимпульса в InSb

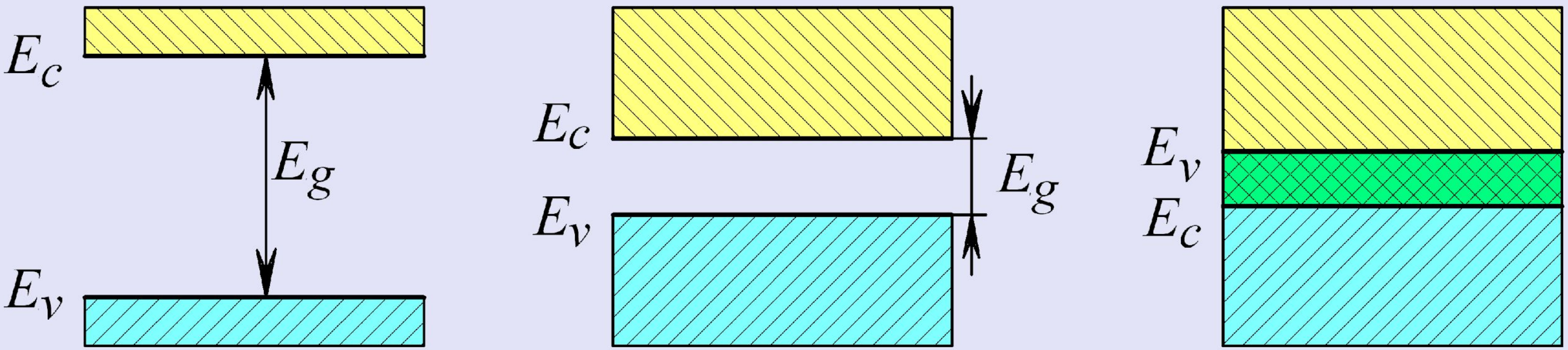


Температурная зависимость Eg для германия

$$E_g = E_{g0} + \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \approx E_{g0} + \alpha T$$



Упрощенная энергетическая диаграмма



Диэлектрик

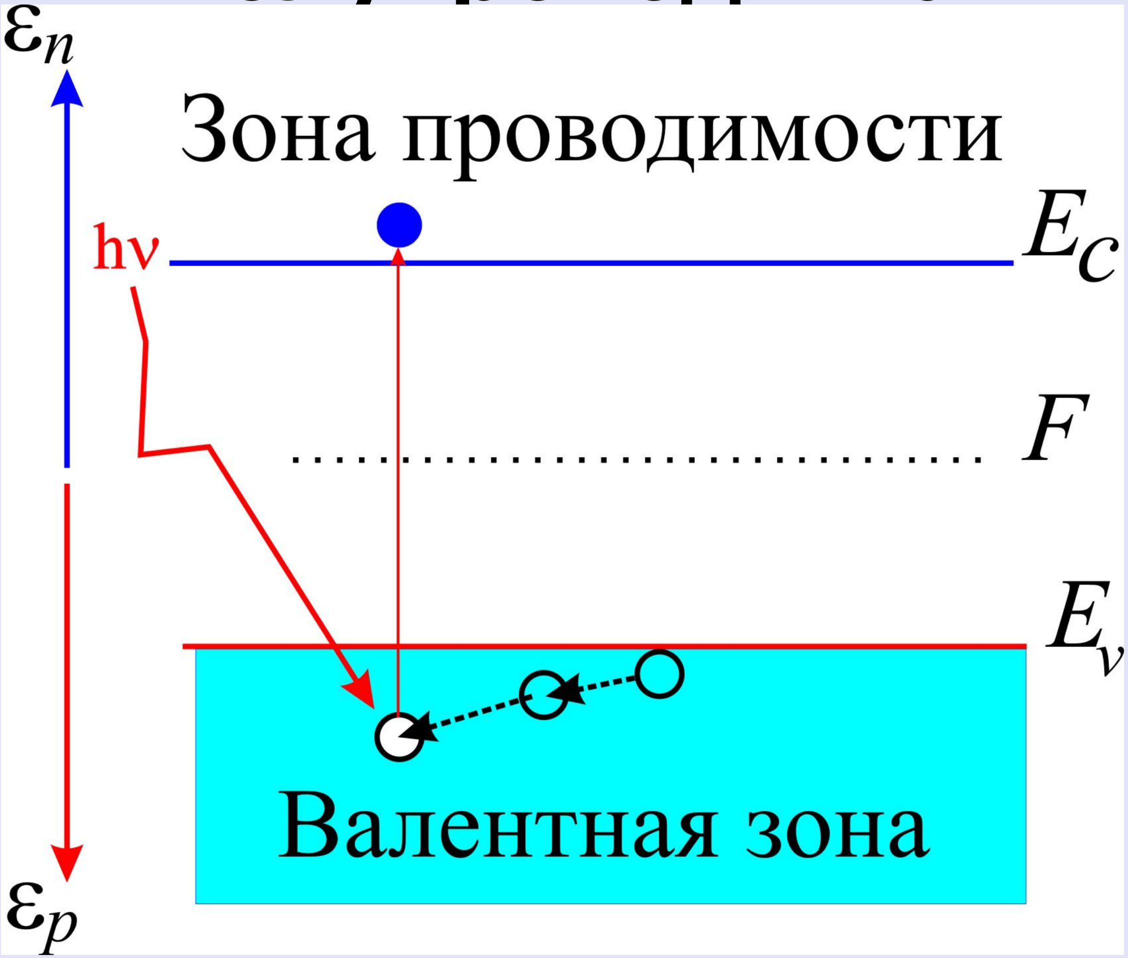
$E_g > 4$ эВ

Полупроводник

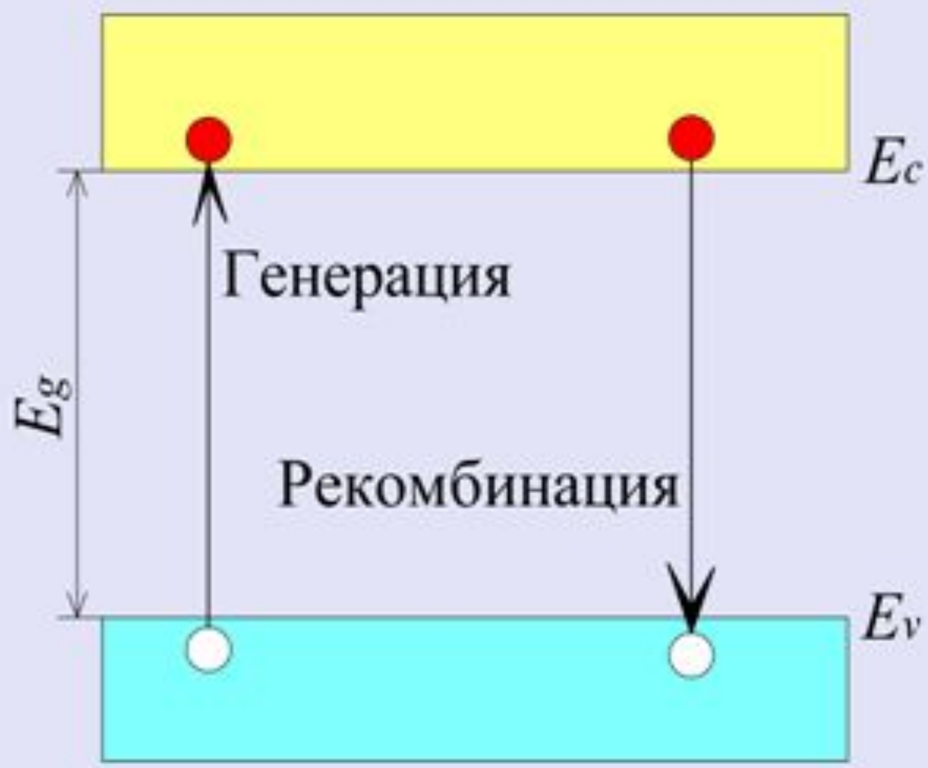
Проводник

$E_g = 0$

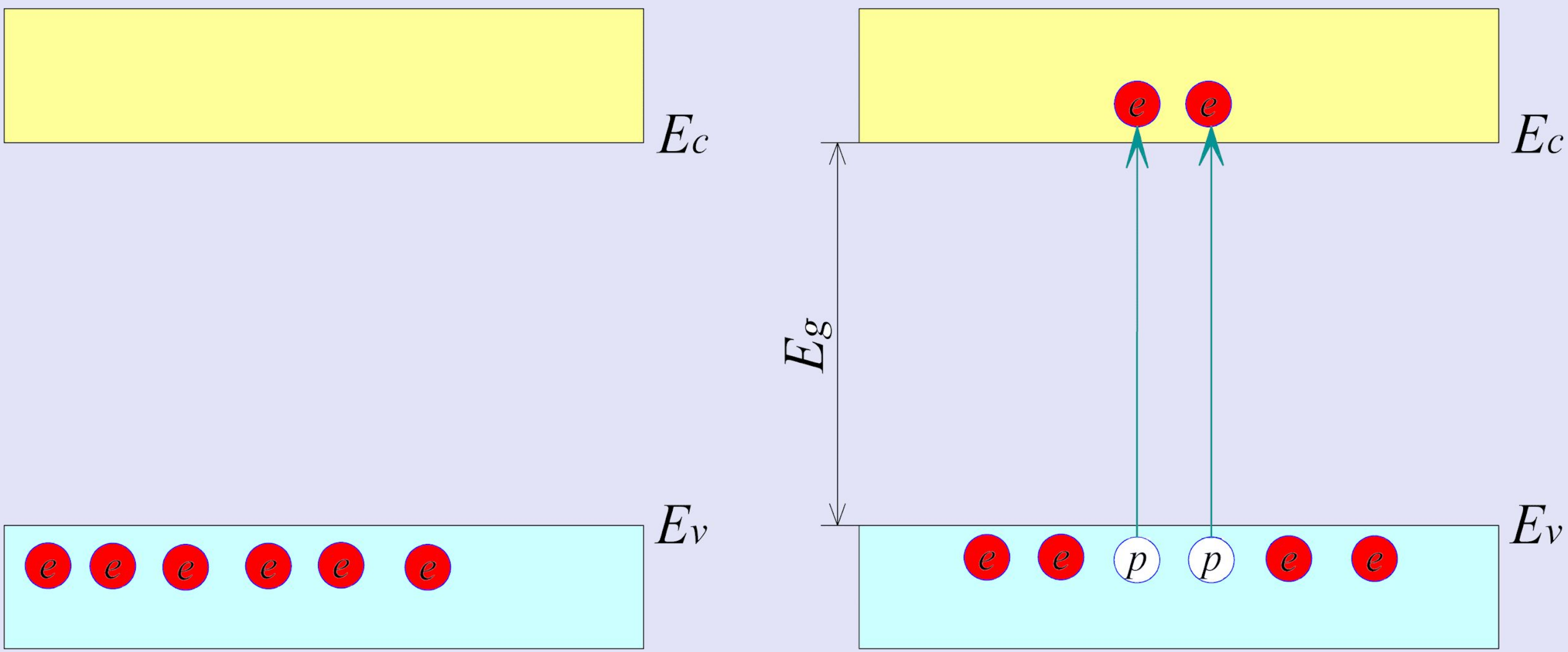
Упрощенная энергетическая диаграмма собственного полупроводника



Процессы генерации и рекомбинации



Заполнение зон при *T*=0 К и *T*>0 К



Статистика электронов и дырок в полупроводниках

Функция распределения Ферми-Дирака

$$f_n(E) = \frac{1}{\exp\left(\dfrac{E-F}{kT}\right)+1}$$

$$f_p(E) = \frac{1}{\exp\left(\dfrac{F-E}{kT}\right)+1}$$

$$n_0(E)=\int_{E_c} N(E)\cdot f_n(E)dE=\int_{E_c}\frac{N(E)}{\exp\left(\frac{E-F}{kT}\right)+1}dE$$

$$N(E)=4\pi\cdot\left(\frac{2m^*_n}{h^2}\right)^{3/2}\cdot(E-E_c)^{1/2}$$

$$p_0(E)=\int_{E_v} N(E)\cdot f_p(E)dE=\int_{E_c}\frac{N(E)}{\exp\left(\frac{E-F}{kT}\right)+1}dE$$

Статистика Максвелла-Больцмана

$$f_n(E) = \exp\left(-\frac{E-F}{kT}\right)$$

$$n_0 = \int\limits_{E_c}^{\infty} N(E)\cdot f_n(E)dE = \int\limits_{E_c}^{\infty} N(E)\cdot \exp\left(\frac{E_c-F}{kT}\right)dE = N_c\cdot\exp\left(-\frac{E_c-F}{kT}\right)$$

$$f_p(E) = \exp\left(-\frac{F-E}{kT}\right)$$

$$p = \int\limits_{-\infty}^{E_v} N(E)\cdot f_p(E)dE = \int\limits_{-\infty}^{E_v} N(E)\cdot \exp\left(-\frac{F-E_v}{kT}\right)dE = N_V\cdot\exp\left(-\frac{F-E_v}{kT}\right)$$

эффективная плотность состояний в зоне проводимости

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

$$N_c = 2{,}7 \cdot 10^{19}\left(m_n^* / m_0\right)^{3/2}(T/300)^{3/2}$$

Эффективная плотность состояний для валентной зоны

$$N_{\upsilon} = 2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot m_p^{*} \cdot kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$N_{\upsilon} = 1{,}05 \cdot 10^{19} \cdot \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2}$$

Уравнение электронейтральности

$$(-q)\cdot n+(+q)\cdot p=0 \qquad n=p$$

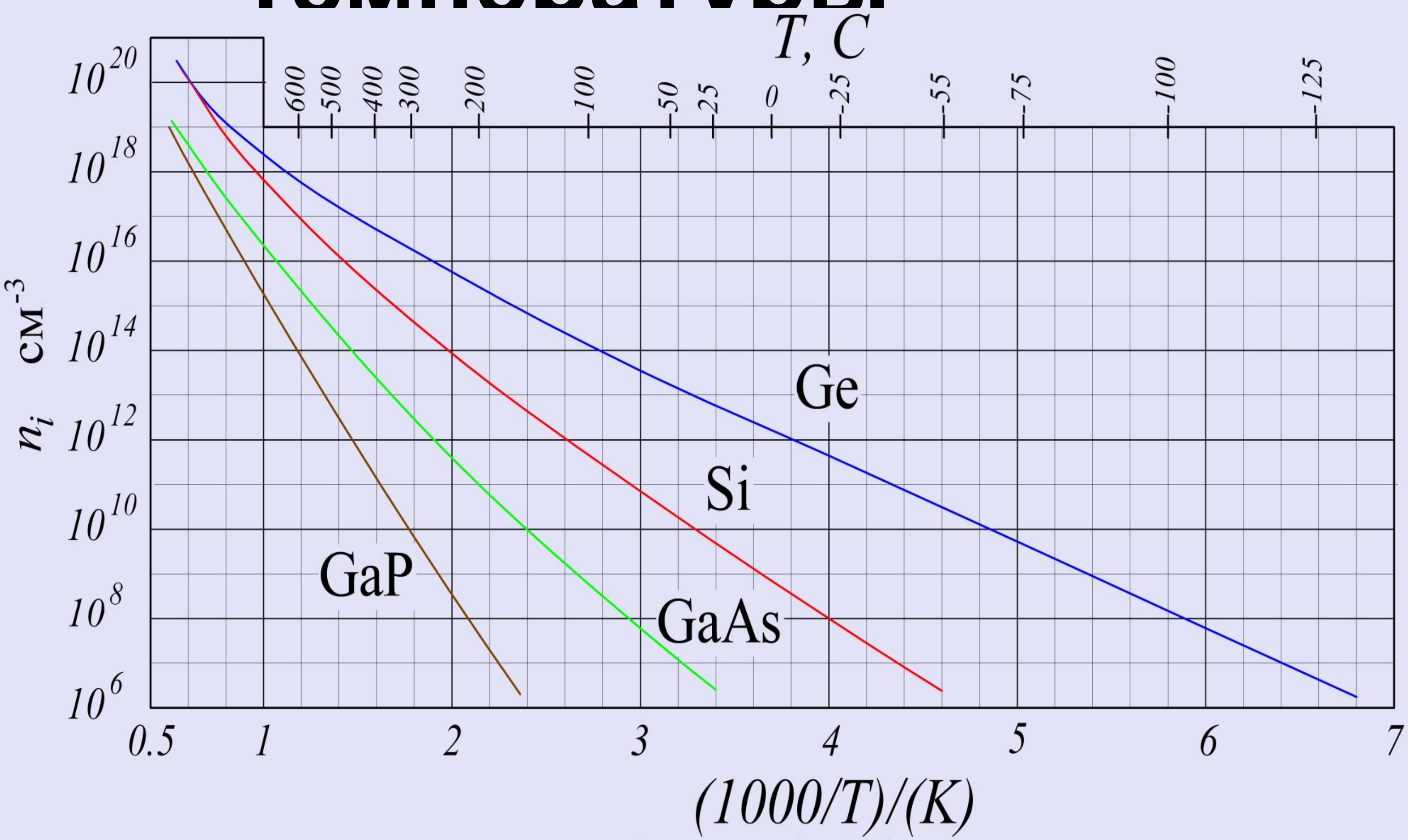
$$(-q)\cdot n+(-q)\cdot N_a^- +(+q)\cdot p+(+q)\cdot N_d^+ =0$$

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

собственная концентрация

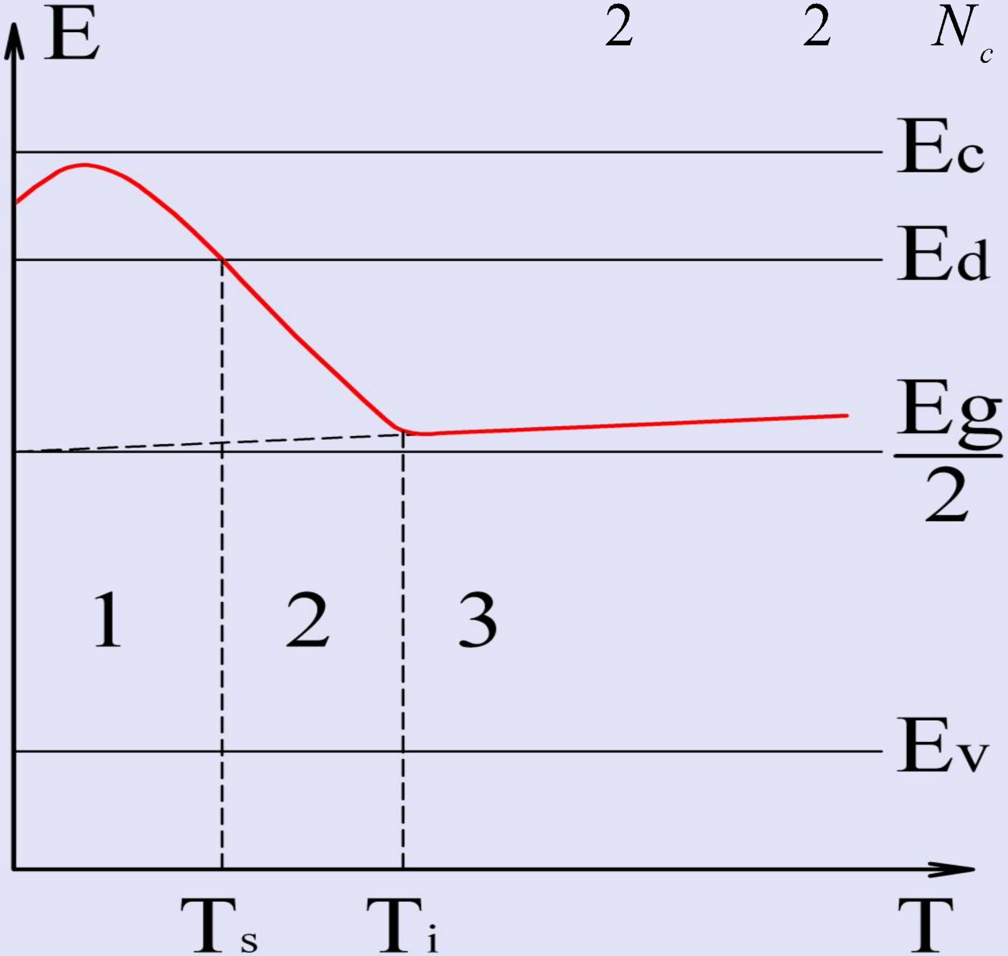
$$n_i = \sqrt{N_c(T) \cdot N_\upsilon(T)} \cdot \exp\left(- \frac{- E_g(T)}{2kT} \right)$$

Зависимость собственной концентрации от обратной температуры



Донорный полупроводник

$$F = \frac{E_c + E_\upsilon}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_\upsilon}{N_c} = E_i + \frac{3}{4} kT \cdot \ln \frac{m_p^*}{m_n^*}$$



$$tg\alpha_i = E_g / 2kT$$

$$tg\alpha_{np} = E_a / kT$$

$$T_i = \frac{E_g}{k\ln\left(N_c \cdot N_\upsilon / N_d^2\right)}$$

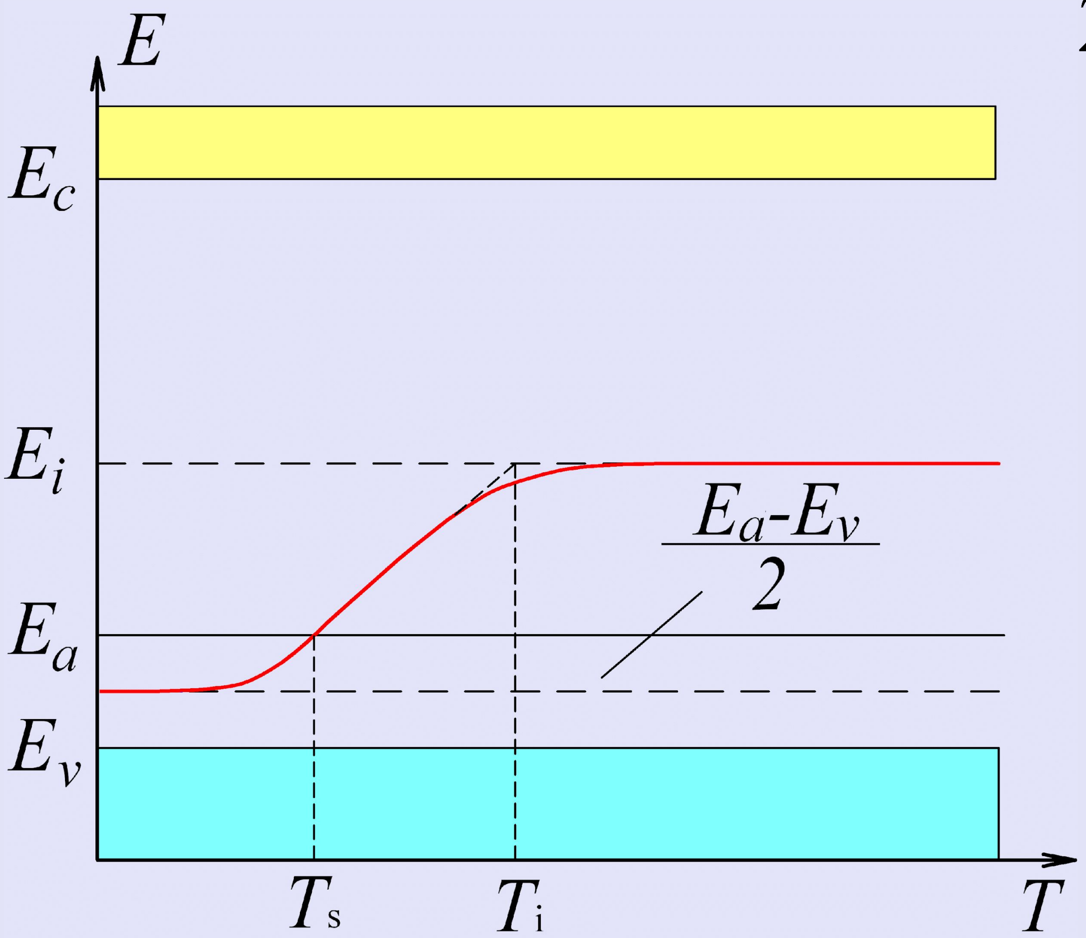
$$T_s = \frac{E_c - E_d}{k\ln\left(N_c / N_d\right)}$$

$$n_i^2 = n_0 \cdot p_0$$

$$p_n = n_i^2 / n_n, \; n_n \approx N_d, \; p_n \approx n_i^2 / N_d$$

Акцепторный полупроводник

$$F = \frac{E_c + E_a}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{gN_\upsilon}{N_a}$$

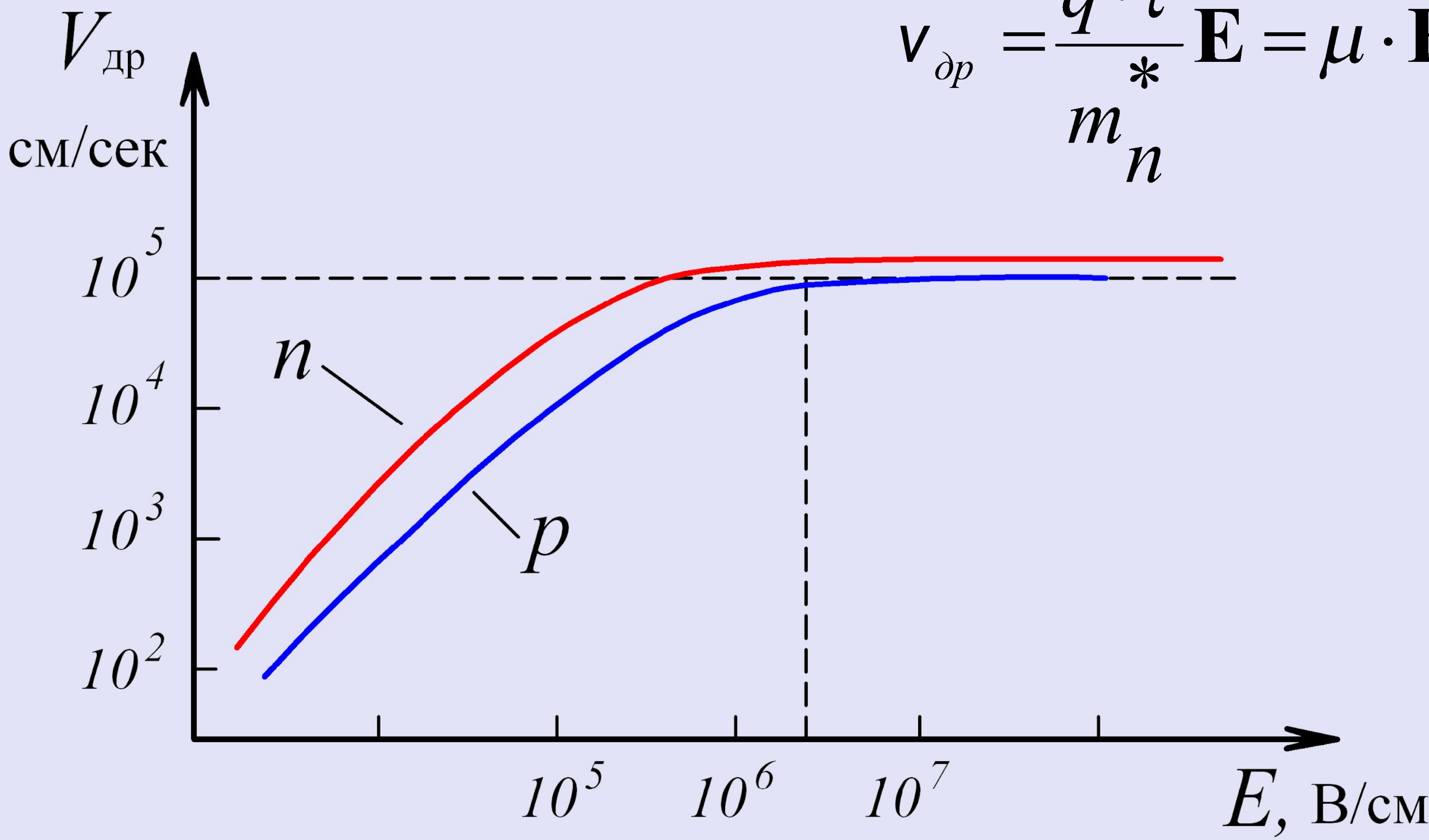


$$p = N_a^-$$

$$n_p = n_i^2 / N_a$$

Насыщение дрейфовой скорости в сильных электрических полях

$$\overline{v_{др}} = \frac{q \cdot \tau}{m_n^*} \mathbf{E} = \mu \cdot \mathbf{E}$$



Коэффициент пропорциональности между дрейфовой скоростью и напряженностью электрического поля называют ***подвижностью*** носителей заряда и обозначают μ [см2/(В·с)].

$$\mu_n = \overline{v_{др}} / \overline{E} = q \cdot \tau / m_n^*$$

$$\mu_p = \overline{v_{др}} / \overline{\mathrm{E}} = q \cdot \tau / m_p^*$$

Влияние электрического поля

$$j = n \cdot q \cdot \mathrm{V}_{др},$$

$$I = U/R = \overline{J} \cdot S,$$

$$U = \overline{E} \cdot l,$$

$$R = \rho \cdot l/S,$$

$$\rho = 1/\sigma$$

Закон Ома в дифференциальной форме:

$$j_n = \sigma_n \cdot \mathrm{E} \qquad j_p = \sigma_p \cdot \mathrm{E}.$$

$$\sigma_n = q \cdot \mu_n \cdot n$$

$$\sigma_p = q \cdot \mu_p \cdot p$$

Рассеяние – мгновенные события, внезапно меняющие скорость электронов. Экспериментальные исследования температурной зависимости подвижности показывают, что ***при низких температурах*** преобладает ***рассеяние на ионах примеси***, а при более ***высоких*** – ***рассеяние на тепловых колебаниях решетки***

Рассеяние на решетке

$$\mu_{nr}(T) = \mu_{nr}(T_0) \cdot (T/T_0)^{-3/2}$$

Рассеяние на заряженной примеси

$$\mu_{ni}\left(T\right)=\mu_{ni}\left(T_0\right)\cdot\left(T/T_0\right)^{3/2}$$

Электропроводность материала

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p =$$

$$= q \cdot \mu_n \cdot n + q \cdot \mu_p \cdot p =$$

$$= q \cdot \left(\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p \right)$$

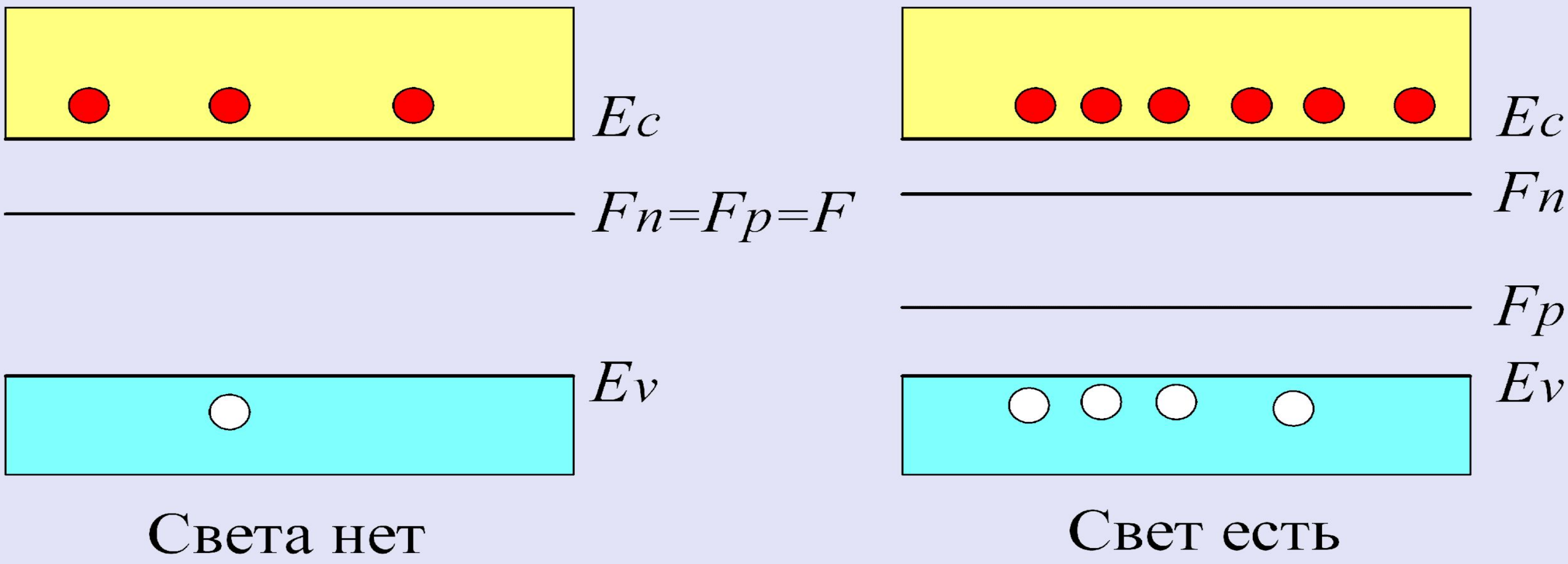
$$\sigma_n(T) = q \cdot \mu_n(T) \cdot n(T)$$

Неравновесное состояние полупроводника

$$n = n_0 + \Delta n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - F_n}{kT}\right),$$

$$p = p_0 + \Delta p = N_v \exp\left(-\frac{F_p - E_v}{kT}\right)$$

Квазиуровень Ферми



- В ***равновесном состоянии*** *скорость генерации (число электронов, генерируемых в единице объема в единицу времени) равна скорости рекомбинации (число электронов, рекомбинирующих в единице объема в единицу времени)*:

$$G_0 = R_0 = \gamma \cdot n_0 \cdot p_0$$

- Концентрация неравновесных носителей может быть меньше концентрации равновесных носителей ($\Delta n \ll n_0$, $\Delta p \ll p_0$), в этом случае говорят о ***низком уровне возбуждения*** или ***низком уровне инжекции***. При ***высоком уровне возбуждения*** или ***высоком уровне инжекции*** концентрация неравновесных носителей сравнима или превышает равновесную концентрацию

Влияние внешних условий на свойства полупроводников

$$\sigma = q \cdot (\mu_n \cdot n_0 + \mu_p \cdot p_0 + \mu_n \cdot \Delta n + \mu_p \cdot \Delta p)$$

$$\Delta\sigma = q \cdot (\mu_n \cdot \Delta n + \mu_p \cdot \Delta p)$$

- *Скорость, с которой протекает рекомбинация, определяется временем жизни неравновесных носителей заряда*

$$\tau_n = \tau_p = \tau$$

Уравнение непрерывности

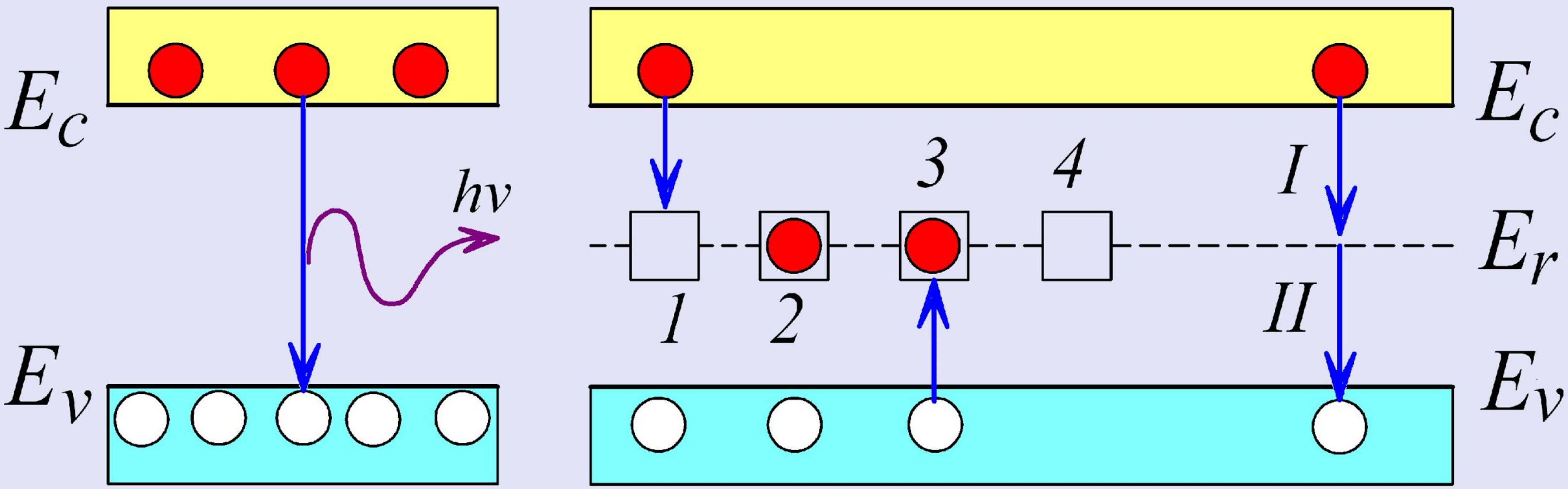
$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = G - R = 0$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_0}{\tau} = -\frac{\Delta n}{\tau}$$

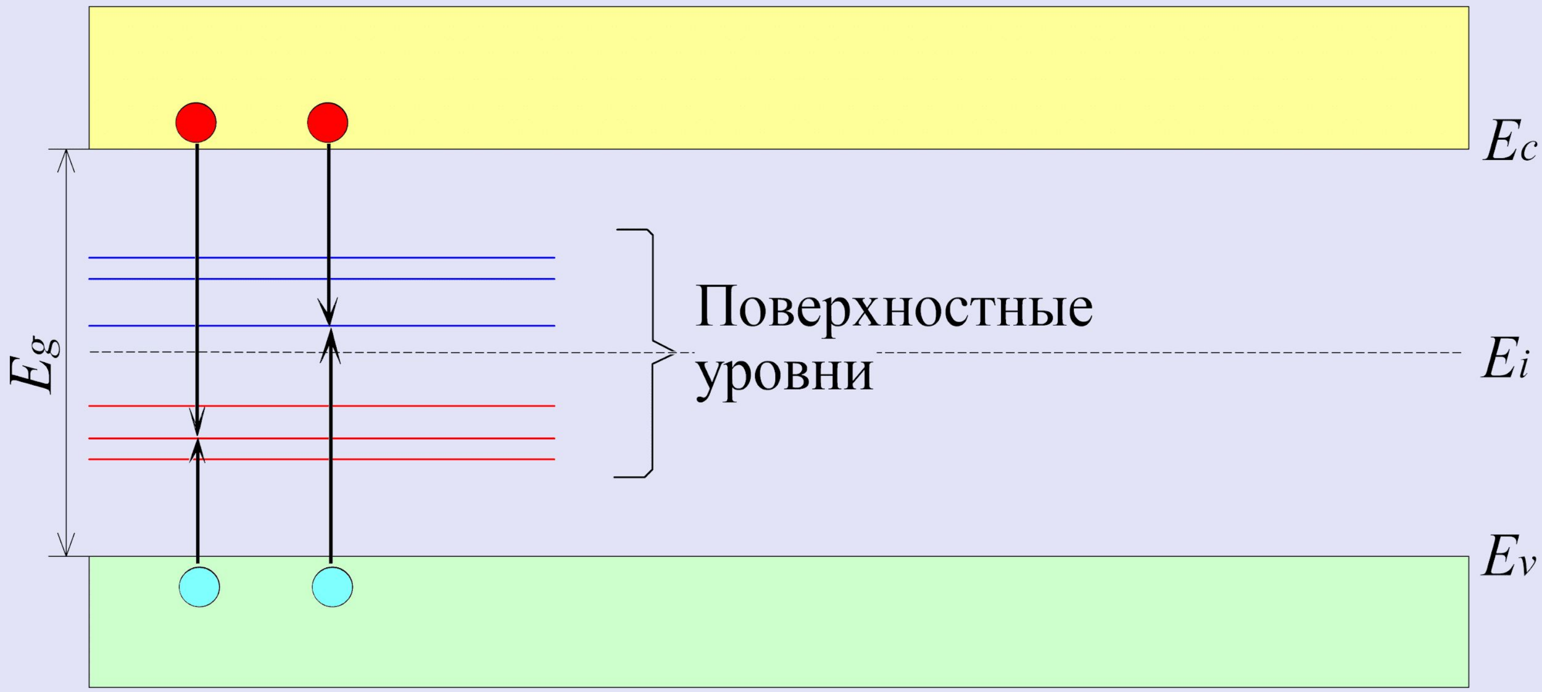
Уменьшение концентрации носителей, определяемое процессом *линейной рекомбинации* имеет вид:

$$\Delta n = \Delta n(0) \cdot \exp\left(-t/\tau\right)$$

Механизмы рекомбинации



Энергетические диаграммы дырочного полупроводника с учетом поверхностных состояний



$$j_n / q = s_n \cdot \Delta n \qquad j_p / q = s_p \cdot \Delta p$$

Диффузионные и дрейфовые токи

$$j_{n\text{диф}} = q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}, \quad j_{p\text{диф}} = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

$$D_n = \frac{kT}{q} \cdot \mu_n = \phi_T \cdot \mu_n, \qquad D_p = \frac{kT}{q} \cdot \mu_p = \phi_T \cdot \mu_p$$

$$j = j_{\text{др}} + j_{\text{диф}},$$

$$j_{\text{др}} = j_{n\text{др}} + j_{p\text{др}} = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot \mathrm{E} + q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \mathrm{E},$$

$$j_{\text{диф}} = j_{n\text{диф}} + j_{p\text{диф}} = q \cdot D_n \cdot \nabla n - q \cdot D_p \cdot \nabla p$$

$$j_n = j_{n\,\partial p} + j_{n\,\partial u\phi} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \mathrm{E} + q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$$

$$j_p = j_{p\,\partial p} + j_{p\,\partial u\phi} = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \mathrm{E} - q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

Для одномерного случая полный ток равен:

$$J = J_{\text{дрейф}} + J_{\text{диф}} =$$

$$= q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \mathbf{E} + q \cdot \mu_n \cdot n \cdot \mathbf{E} - q \cdot D_p \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + q \cdot D_n \cdot \frac{\partial n}{\partial x}$$

Уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} = -\frac{\partial \mathbf{E}(x)}{\partial x} = -\frac{\boldsymbol{\rho}(x)}{\varepsilon_s \varepsilon_0}$$

Уравнение непрерывности тока

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{q}\nabla \overline{j}_n$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - \frac{1}{q}\nabla \overline{j_p},$$

Уравнение непрерывности:

$$-\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} = 0$$

Граничные условия

$$p_n(x=0)=p_n(0)$$

$$p_n(x\to\infty)=p_{n0}$$

$$p_n(x)=p_{n0}+\left[p_n(0)-p_{n0}\right]\cdot\exp\left(-x/L_p\right)$$

$$L_p=\sqrt{D_p\cdot\tau_p},\ \ L_n=\sqrt{D_n\cdot\tau_n}$$

Граничные условия

$$x = W \qquad p_n\left(x = W\right) = p_{n0}$$

$$p_n\left(x\right) = p_{n0} + \left[p_n\left(0\right) - p_{n0}\right] \cdot \frac{sh\dfrac{W - x}{L_p}}{sh\dfrac{W}{L_p}}$$

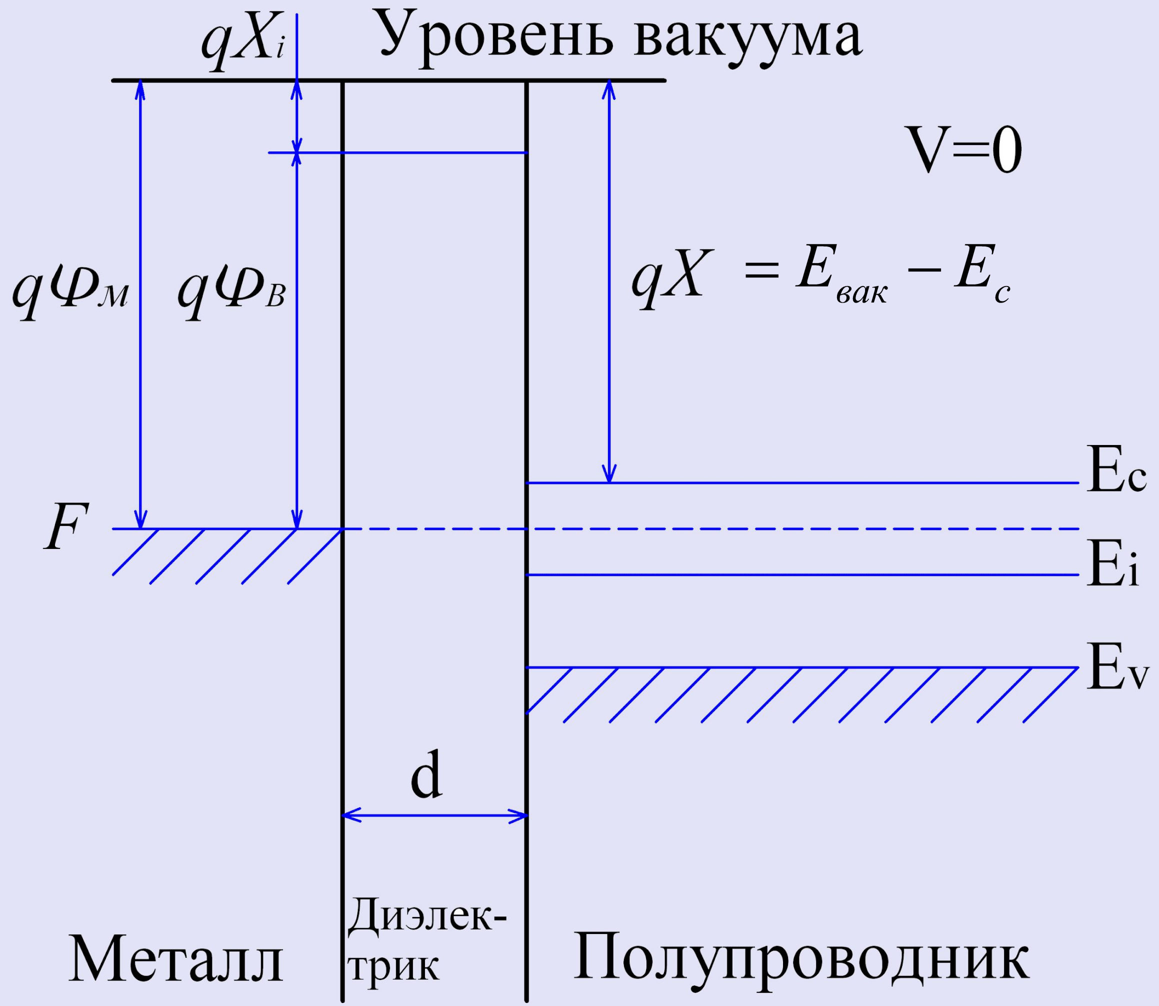
Плотность дырочного тока при :

$$x = W$$

$$j_p = -qD_p \frac{\partial p}{\partial x}\Big|_{x=W} = q\left(p_n(0) - p_{n0}\right)\frac{D_p}{L_p}\cdot\frac{1}{sh\dfrac{W}{L_p}}$$

Контактные явления

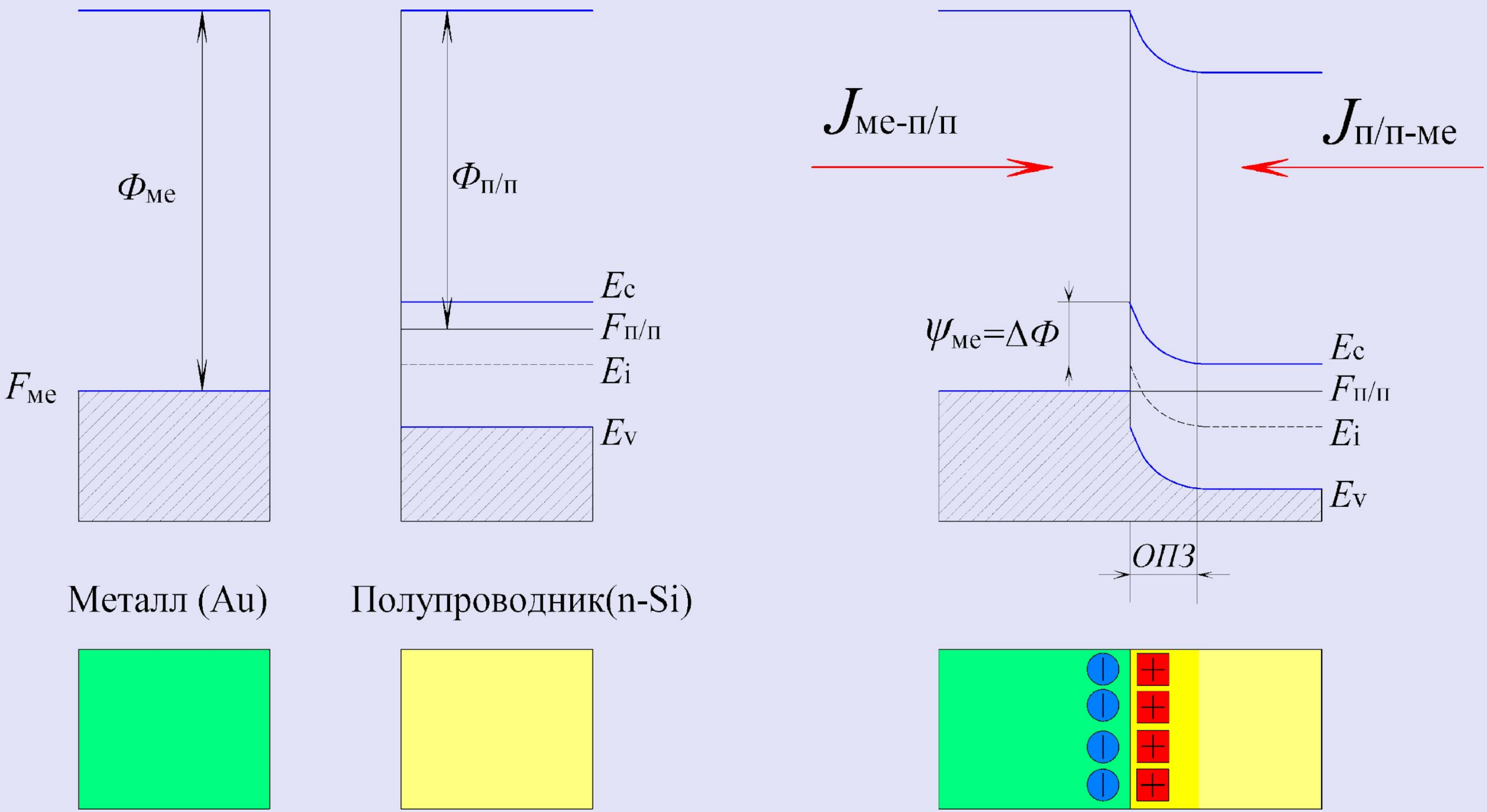
$$\Phi = E_{вак} - F$$



qX_i
Уровень вакуума
V=0
$q\varphi_M$
$q\varphi_B$
$qX = E_{вак} - E_c$
Ec
F
Ei
Ev
d
Металл
Диэлек-
трик
Полупроводник

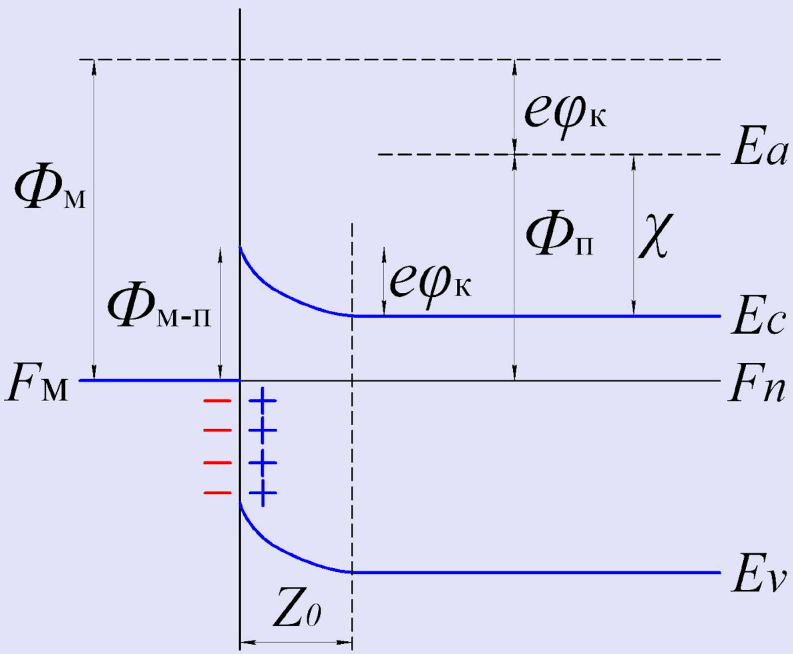
Барьер на границе металла с полупроводником (барьер Шоттки)

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \phi_k}{q \cdot N_d}}$$

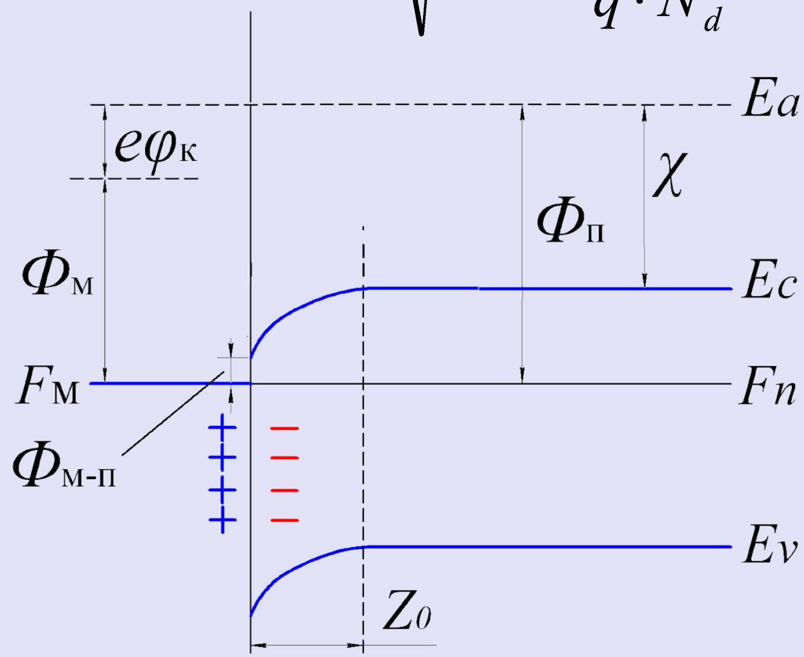


Контакт металл-электронный полупроводник

$$W=\sqrt{\frac{2\cdot\varepsilon\cdot\varepsilon_0\cdot\left(\phi_k\pm V_{см}\right)}{q\cdot N_d}}$$

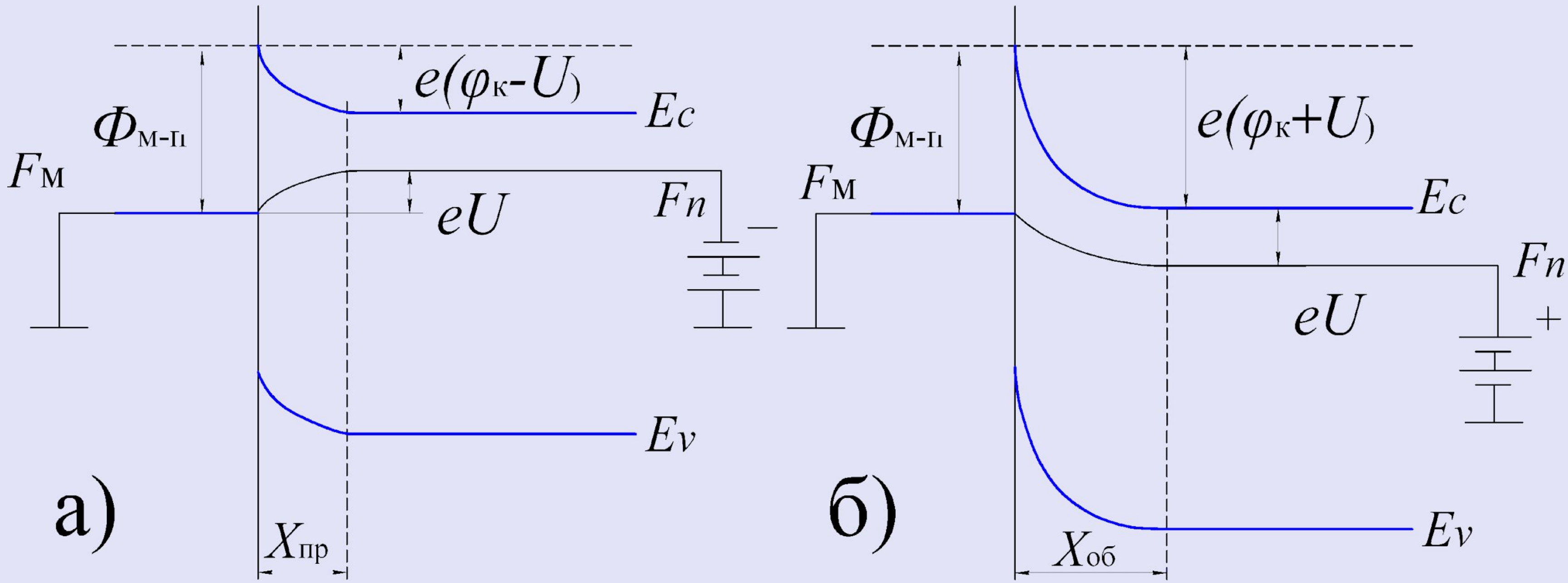


а) Фм>Фп

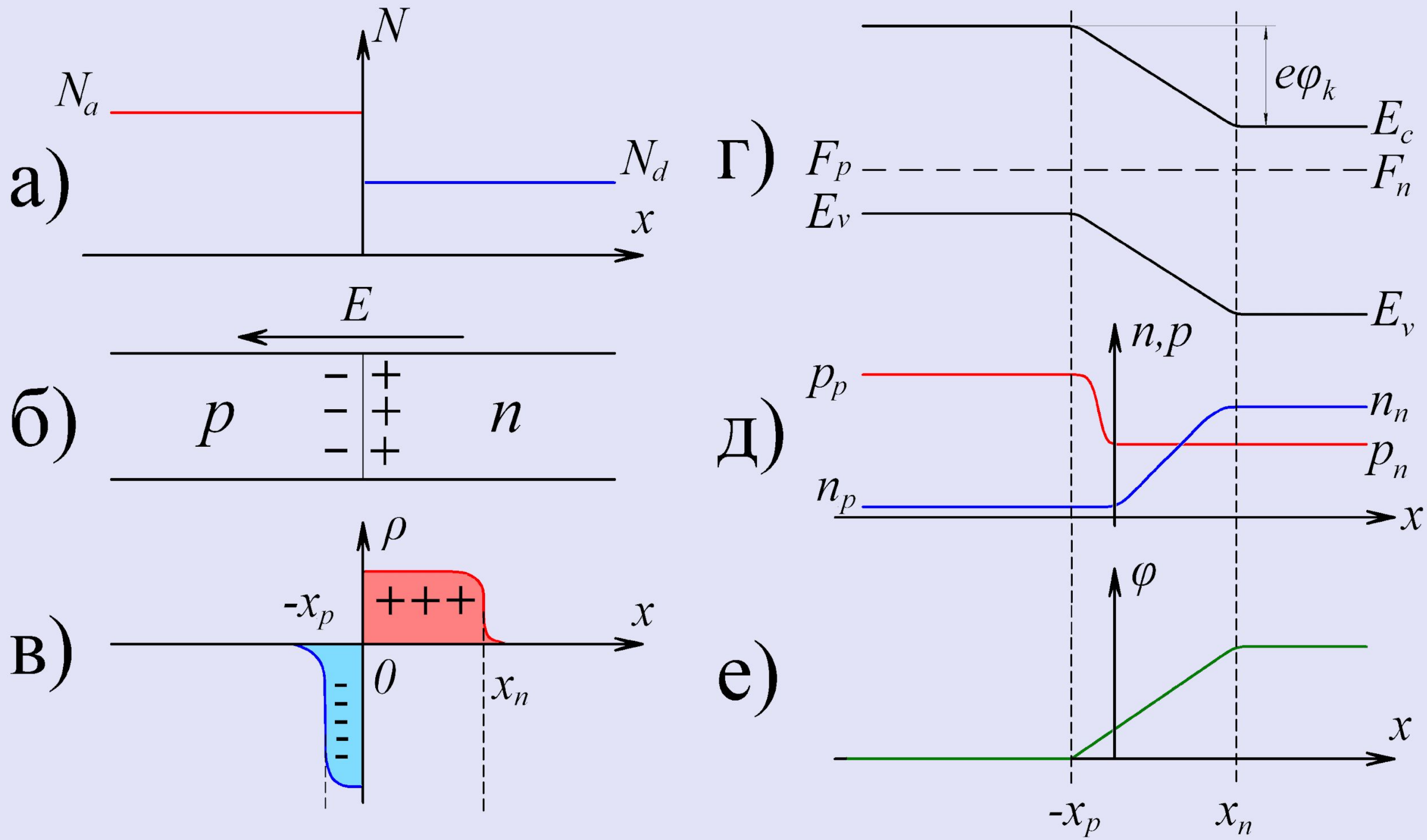


б) Фм<Фп

Выпрямление тока на контакте металла с полупроводником



Контакт электронного и дырочного полупроводников


а)
N
N_a
N_d
x
б)
E
p
n
в)
ρ
$-x_p$
0
x_n
x
г)
$e\varphi_k$
E_c
F_p
F_n
E_v
E_v
д)
n,p
p_p
n_n
p_n
n_p
x
е)
φ
x
$-x_p$
x_n

$$\phi_{\kappa} = \frac{F_n - F_p}{q}$$

$$q \cdot \phi_k = E_g - kT \cdot \ln \frac{N_{\upsilon}}{N_a} - kT \cdot \ln \frac{N_c}{N_d}$$

$$q\phi_k = kT \ln \frac{n_n \cdot p_p}{n_i^2} = kT \ln \frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2}$$

$$\phi_k = \phi_T \ln \frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2} = \phi_T \ln \frac{n_n}{n_p} = \phi_T \ln \frac{p_p}{p_n}$$

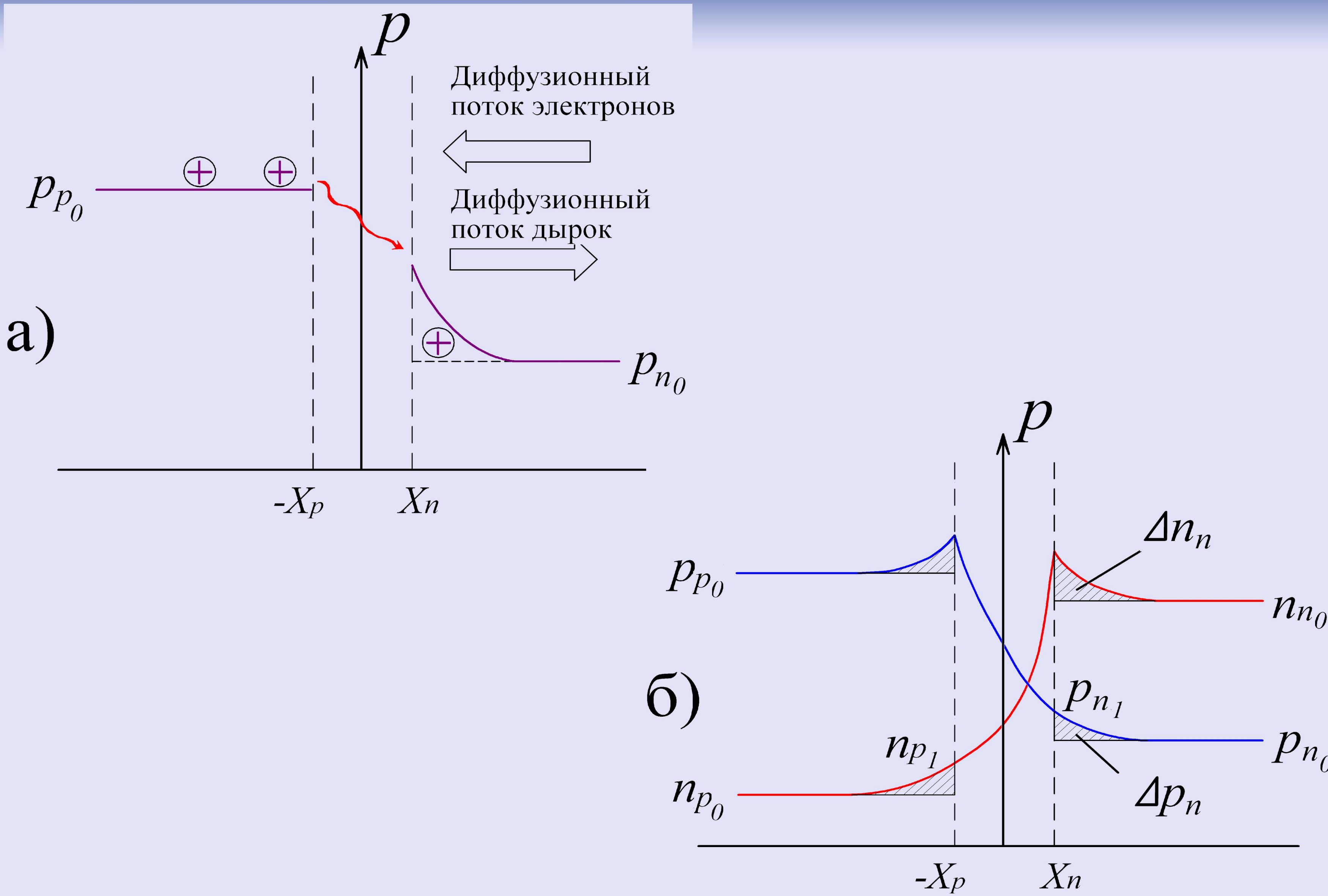
Соотношения между основными и неосновными носителями:

$$p_n = p_p \cdot \exp\left(-\frac{q\phi_k}{kT}\right) = p_p \cdot \exp\left(-\frac{\phi_k}{\phi_T}\right)$$

$$n_p = n_n \cdot \exp\left(-\frac{q\phi_k}{kT}\right) = n_n \cdot \exp\left(-\frac{\phi_k}{\phi_T}\right)$$

$$\frac{W_n}{W_0} = \frac{N_a}{N_d + N_a}; \frac{W_p}{W_0} = \frac{N_d}{N_d + N_a}$$

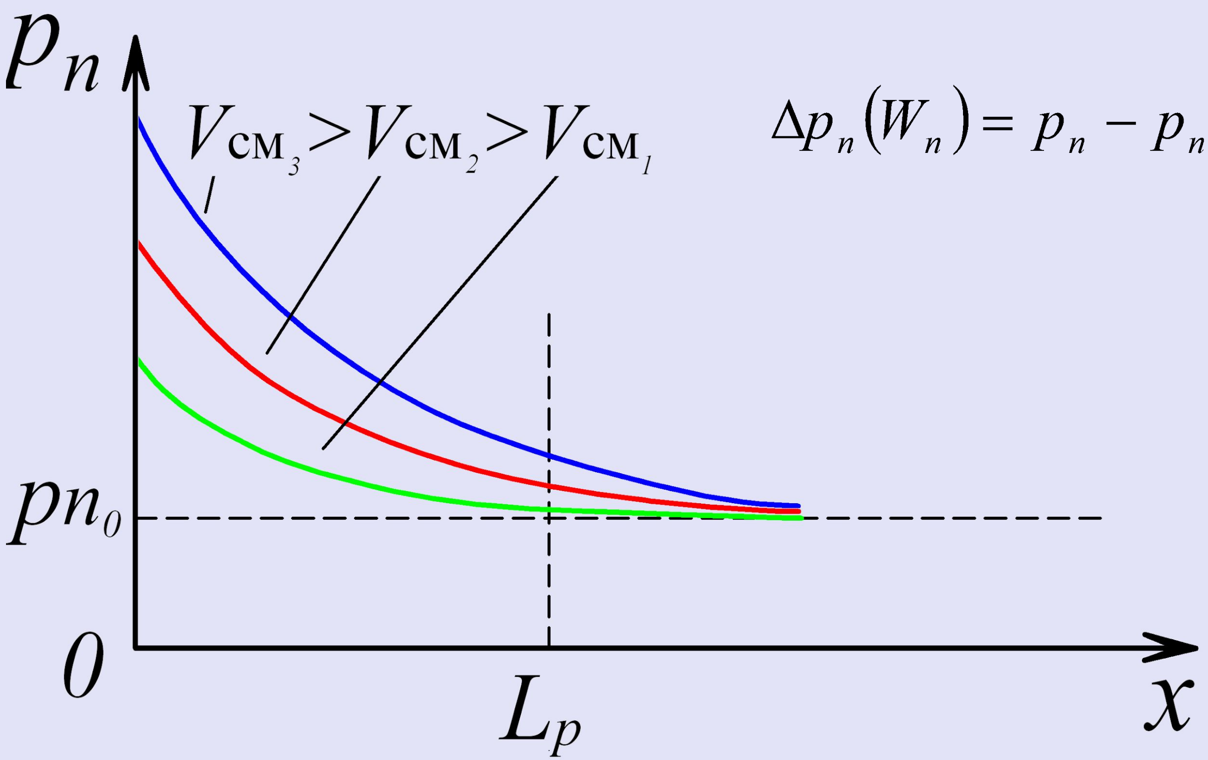
$$W_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_s}{q} \phi_k \frac{N_d + N_a}{N_d N_a}}$$



p
Диффузионный
поток электронов
Диффузионный
поток дырок
p_{p_0}
а)
p_{n_0}
$-X_p$
X_n
p
p_{p_0}
Δn_n
n_{n_0}
б)
p_{n_1}
n_{p_1}
p_{n_0}
n_{p_0}
Δp_n
$-X_p$
X_n

$$p_n(W_n) = p_p \cdot \exp\left(-\frac{(\phi_k - V_{см})}{\phi_T}\right) = p_{no} \cdot \exp\left(\frac{V_{см}}{\phi_T}\right)$$

$$\Delta p_n(W_n) = p_n - p_{n0} = p_{no} \cdot \exp\left(\frac{V_{см}}{\phi_T} - 1\right)$$



Прямое смещение p-n-перехода

$$W_{np} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s}{q} \cdot (\phi_k - V_{cм}) \cdot \frac{N_d + N_a}{N_d \cdot N_a}}$$

$$p_n = p_{n0} + \Delta p$$

$$p_n(W_n) = p_p \cdot \exp\left(-\frac{(\phi_k - V_{cм})}{\phi_T} \right) = p_{no} \cdot \exp\left(\frac{V_{cм}}{\phi_T} \right)$$

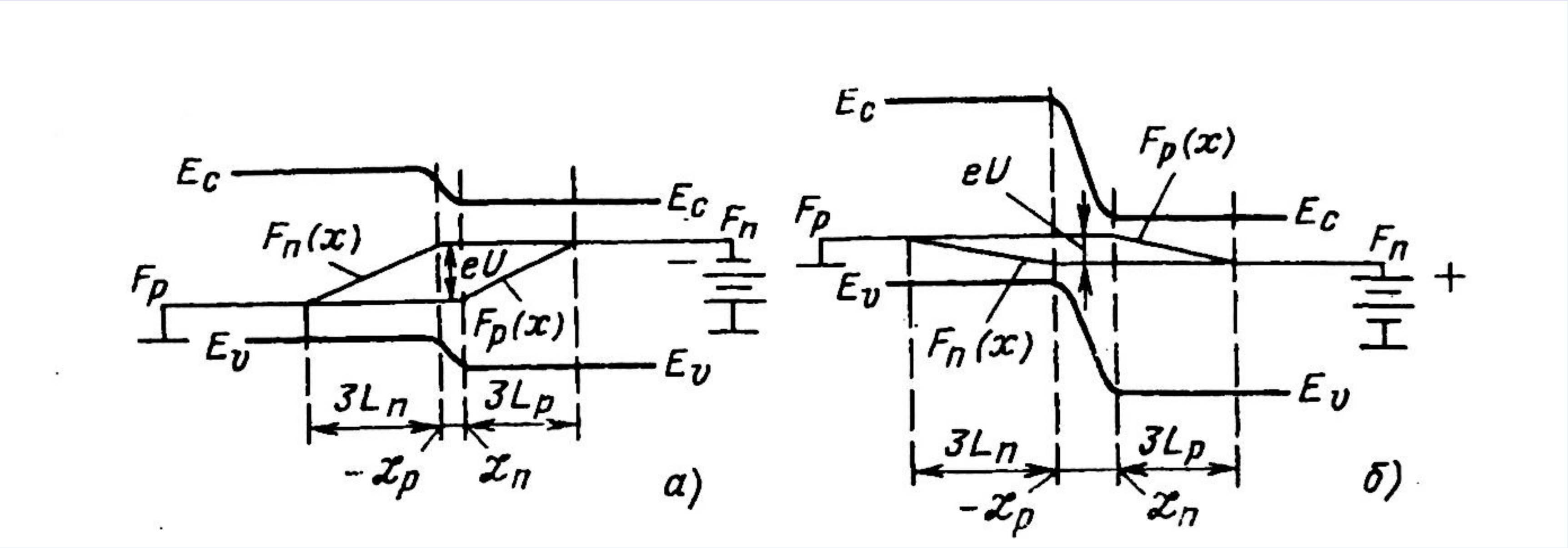
При $x = W_n$ $$\Delta p_n(W_n) = p_n - p_{n0} = p_{no} \cdot \exp\left(\frac{V_{cм}}{\phi_T} - 1 \right)$$

При $x = -W_p$ $$\Delta n_p(-W_p) = n_{po} \cdot \exp\left(\frac{V_{cм}}{\phi_T} - 1 \right) \quad (7.14)$$

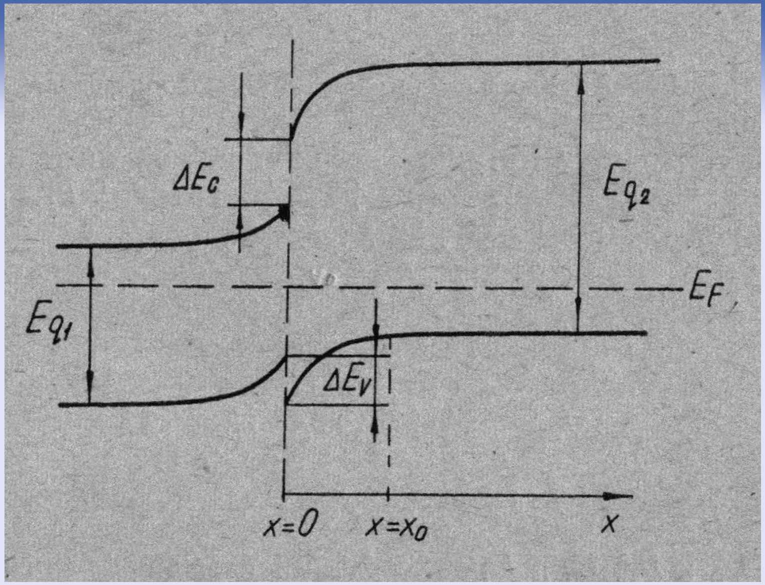
Обратное смещение

$$W_{обр} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s}{q} \cdot \left(\phi_k + V_{см}\right) \cdot \frac{N_d + N_a}{N_d \cdot N_a}}$$

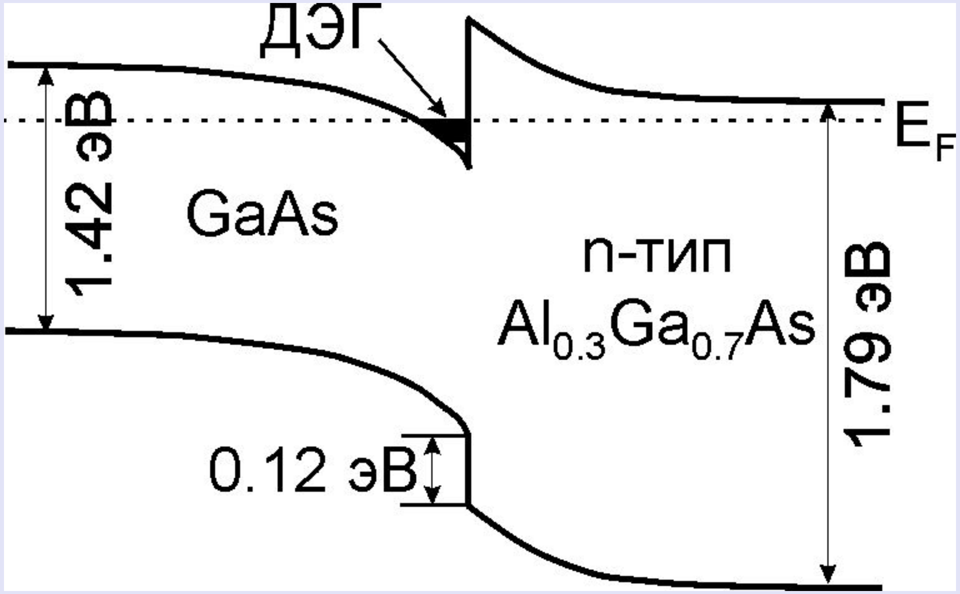
Энергетические диаграммы при прямом и обратном смещении



Изотипные и анизотипные гетеропереходы

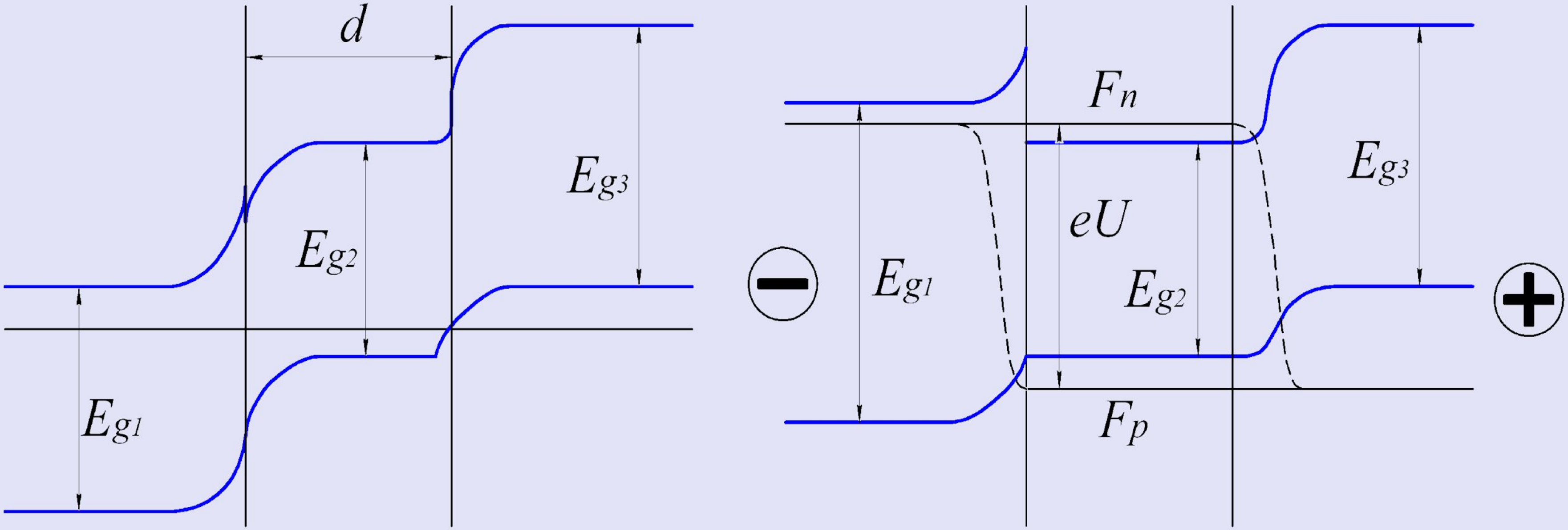


ΔEc
Eq2
EF
Eq1
ΔEv
x=0
x=x0
x



ДЭГ
EF
1.42 эВ
GaAs
n-тип
Al0.3Ga0.7As
1.79 эВ
0.12 эВ

Схема двойного гетероперехода

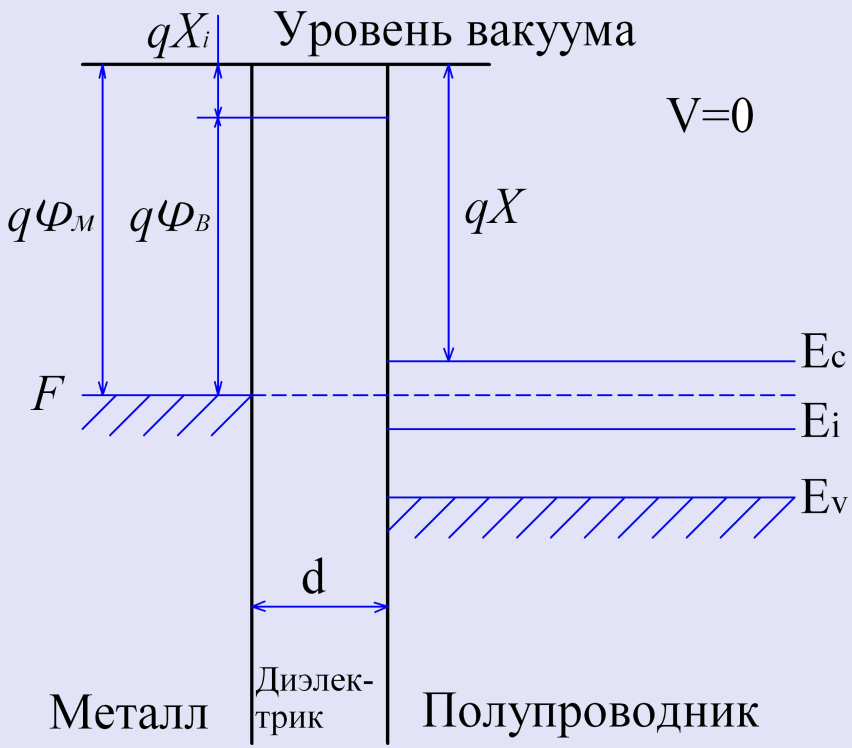


U=0
ток не течет через переход

U>0
ток течет через переход

МДП–структура

МДП-структура

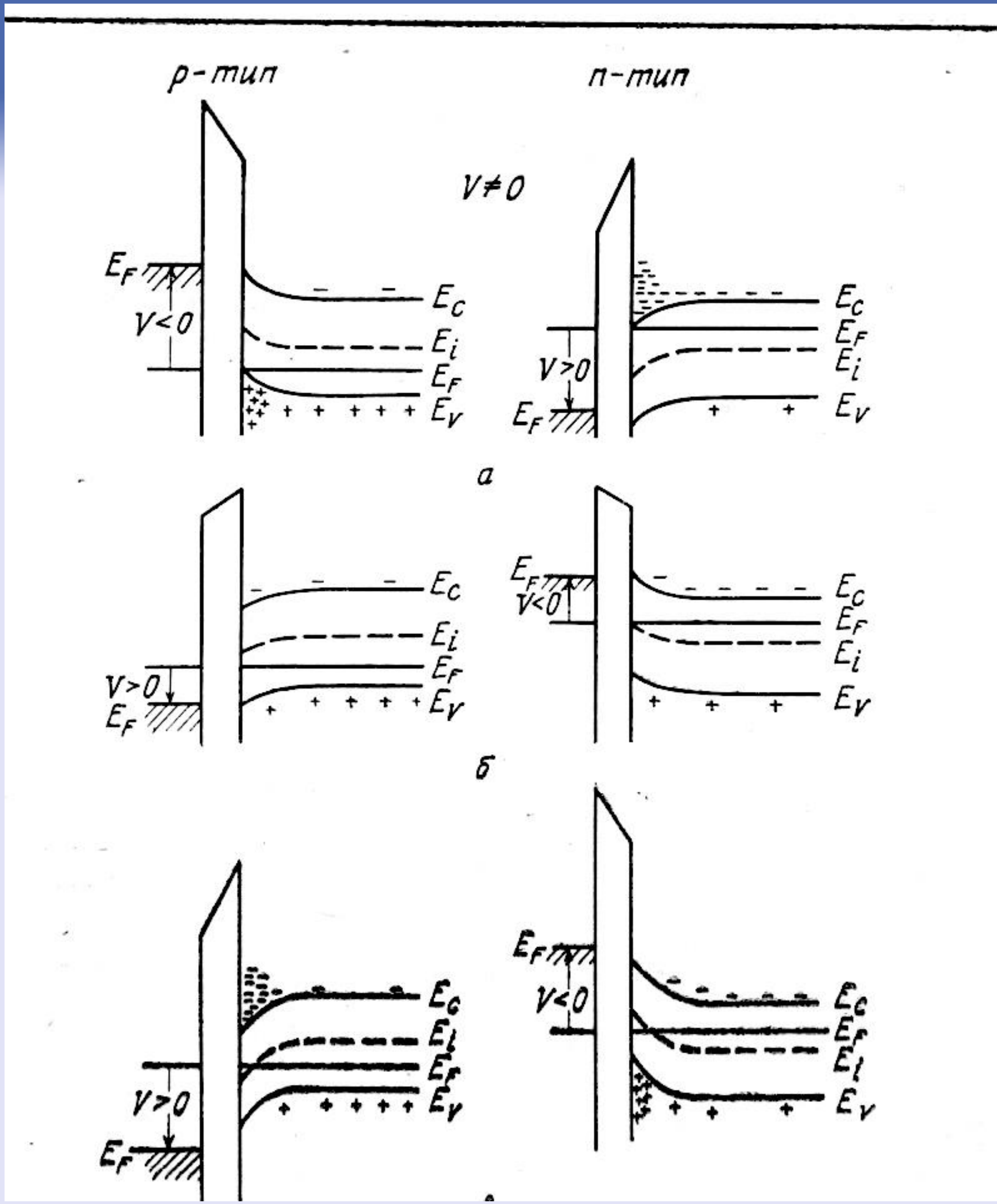


энергия электронного сродства

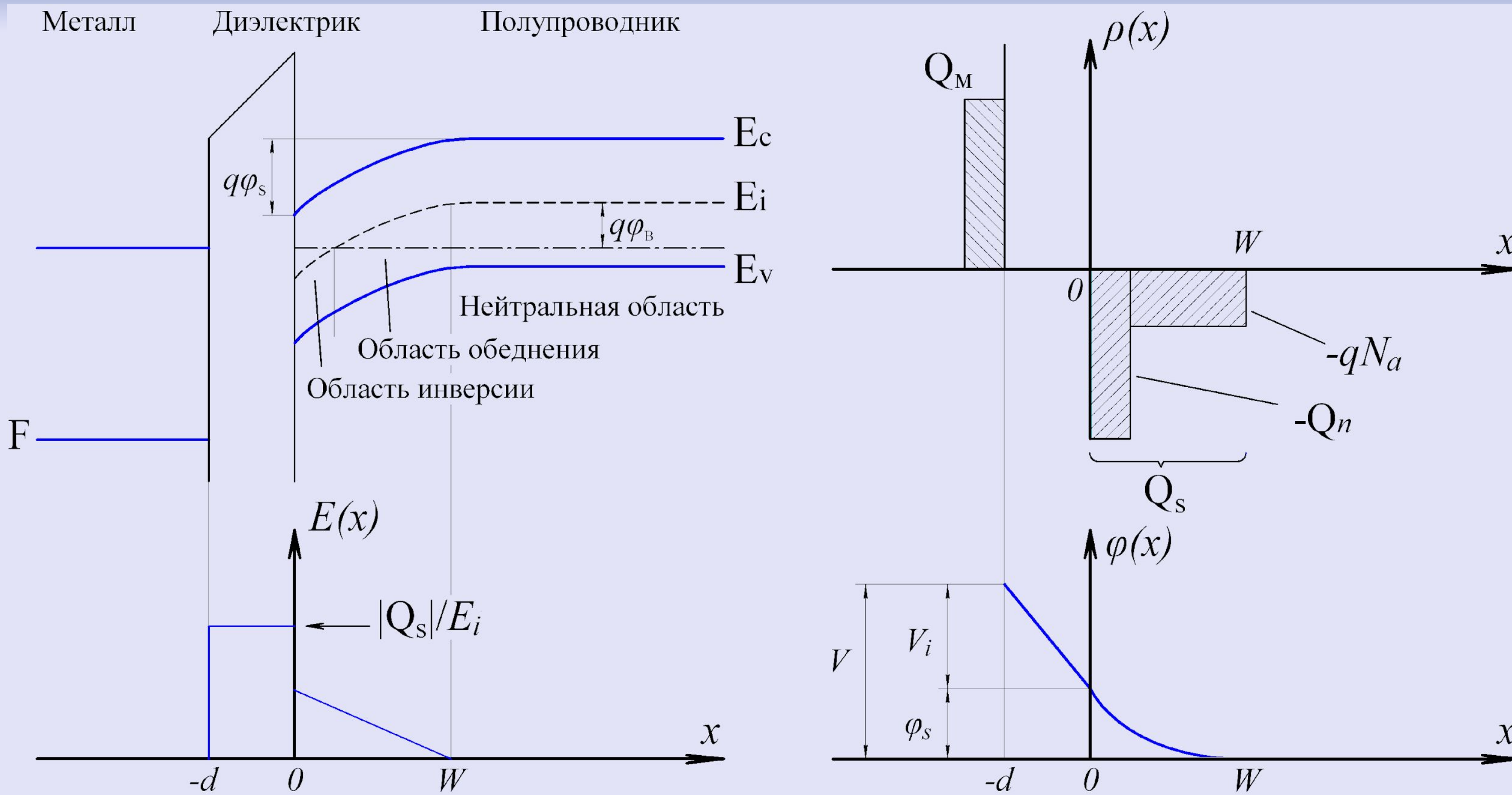
$$q \cdot \chi = E_{вак} - E_c$$

Если энергию электрона отсчитывать от энергии Ферми, а не от E_c, используют понятие *термоэлектронной работы выхода* или просто *работы выхода Ф*:

$$\Phi = E_{вак} - F = q \cdot \chi + E_c - F$$



Энергетические диаграммы при различных смещениях


Металл
Диэлектрик
Полупроводник
Ec
Ei
Ev
F
qφs
qφB
Нейтральная область
Область обеднения
Область инверсии
E(x)
|Qs|/Ei
x
-d
0
W
ρ(x)
QM
W
x
0
-qNa
-Qn
Qs
φ(x)
V
Vi
φs
x
-d
0
W

$$n(x) = n_i \cdot \exp\left(\frac{F - E_i}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (\phi_F - \phi_i)}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{\phi_B}{\phi_T}\right);$$

$$p(x) = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_i - F}{kT}\right) = n_i \cdot \left(\frac{q \cdot (\phi_i - \phi_F)}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(-\frac{\phi_B}{\phi_T}\right);$$

$$\varphi_B = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right)$$

$$\varphi_B = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right)$$

$$\frac{\partial^2 \phi(x)}{\partial x^2} = -\frac{\partial \mathbf{E}(x)}{\partial x} = -\frac{\boldsymbol{\rho}(x)}{\varepsilon_s \varepsilon_0} = \frac{q \cdot N_a^-}{\varepsilon_0 \varepsilon_s}$$

$$\phi = 0 \qquad \frac{d\phi}{dx} = 0$$

при *x*=*w*

$$\phi = \frac{q \cdot N_a^-}{2\varepsilon_s \cdot \varepsilon_0}(x - w)^2 \qquad \phi_s = \frac{q \cdot N_a^- \cdot w^2}{2\varepsilon_s \cdot \varepsilon_0}$$

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s \cdot \phi_s}{q \cdot N_a^-}}$$