

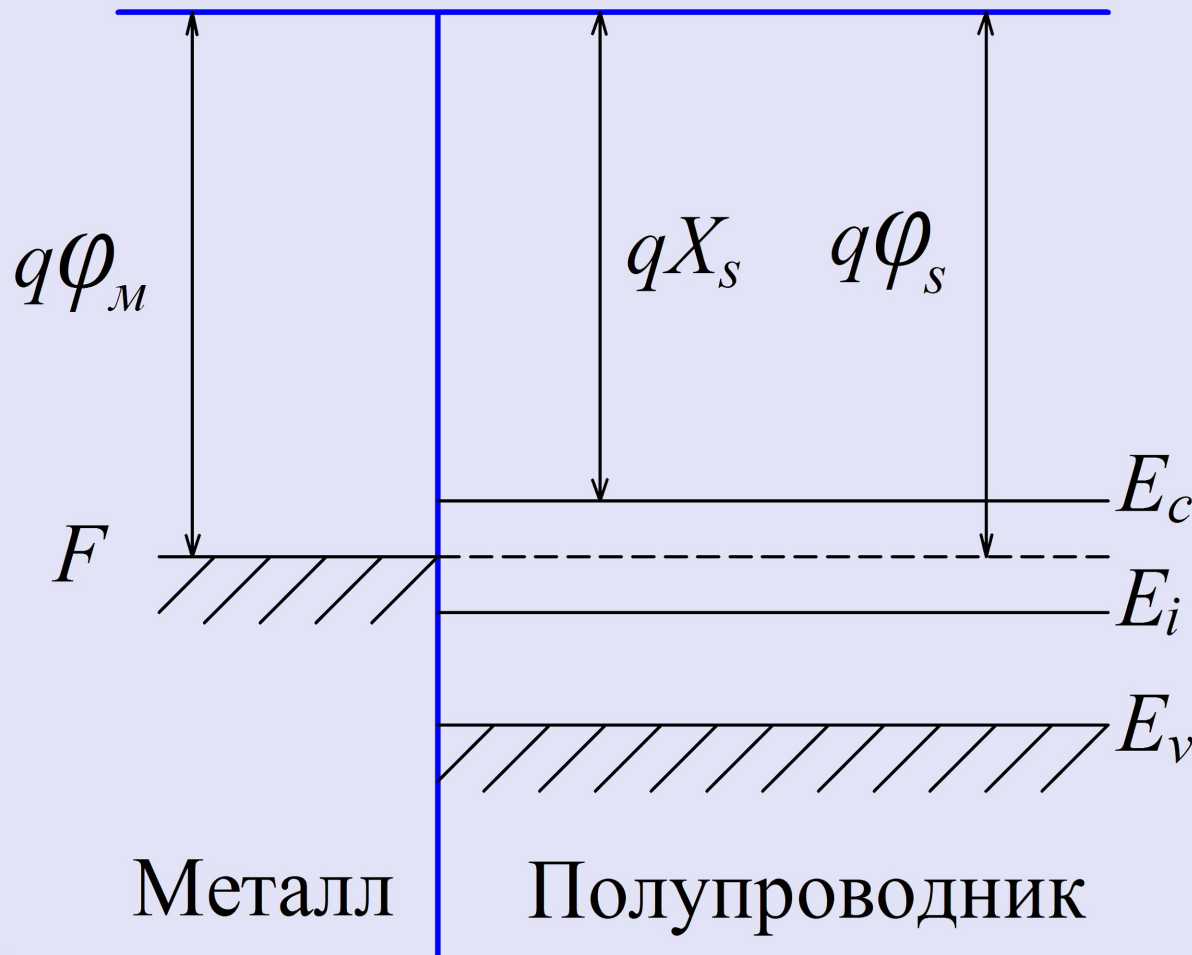
# Твердотельная электроника

Презентации к лекционному курсу

Контактные явления

# Барьер на границе металла с полупроводником (барьер Шоттки)

Уровень вакуума



$$qX_s = E_{\text{вак}} - E_c$$

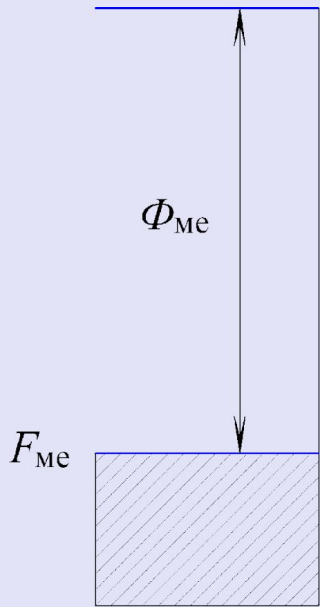
$$\Phi = E_{\text{вак}} - F$$

*Работа выхода равна разности между энергией покоящегося электрона в вакууме у поверхности образца полупроводника и уровнем Ферми в данном полупроводнике.*

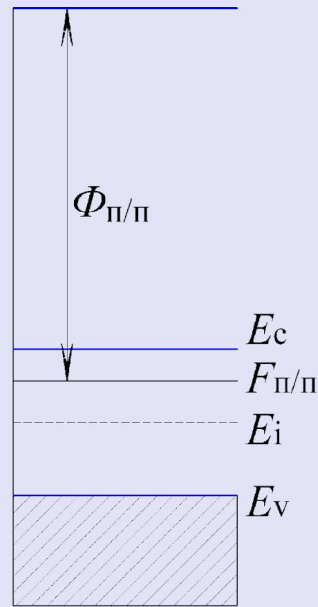
# Контакт металл-

# полупроводник

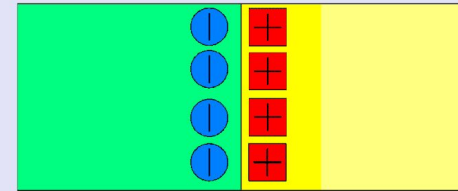
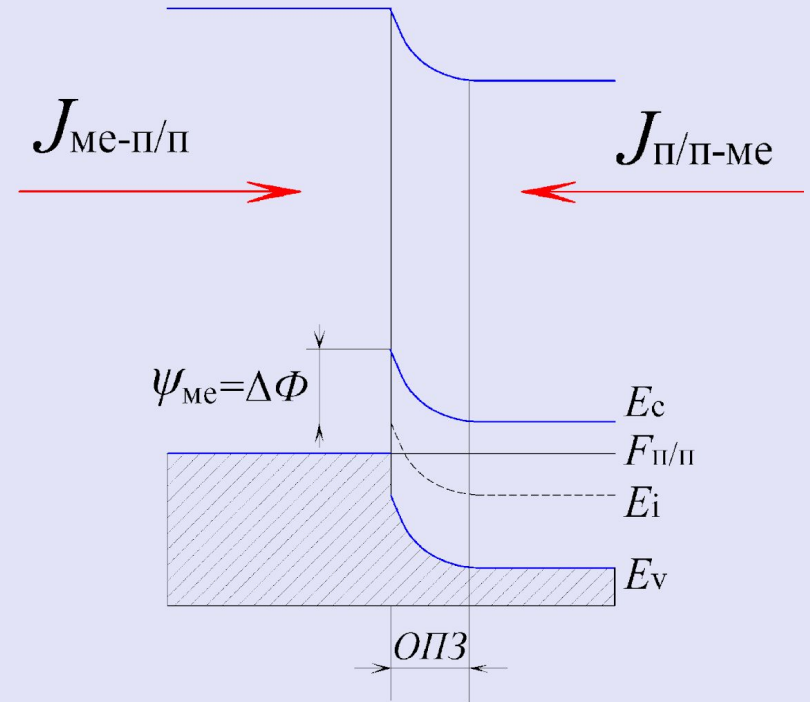
$$q\phi_k = \Phi_M - \Phi_{II}$$



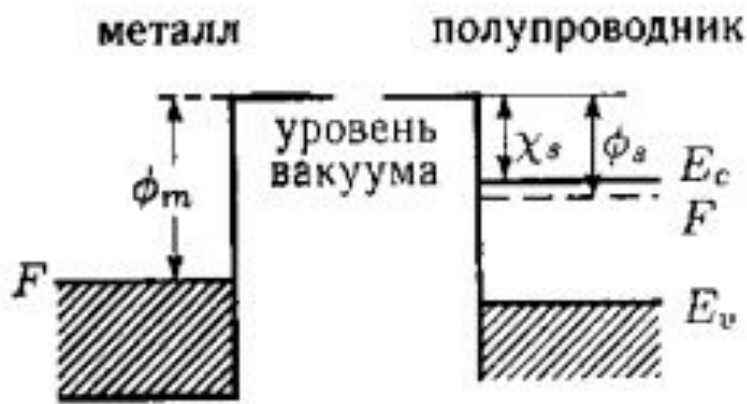
Металл (Au)



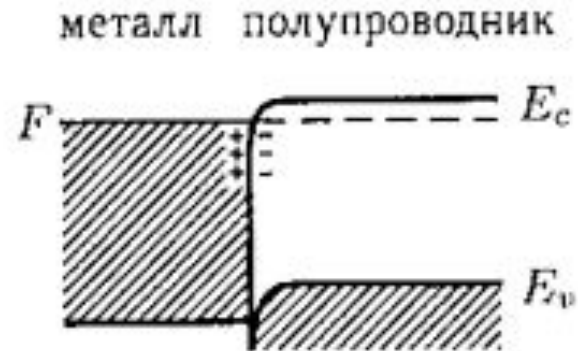
Полупроводник(n-Si)



# Контакт металл-полупроводник

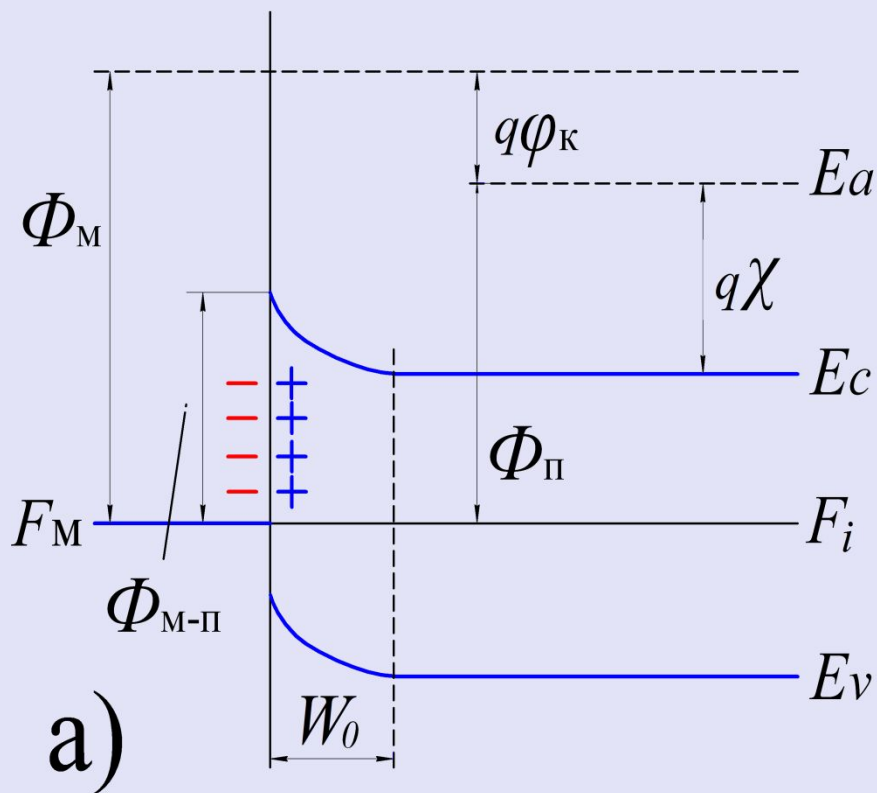


а

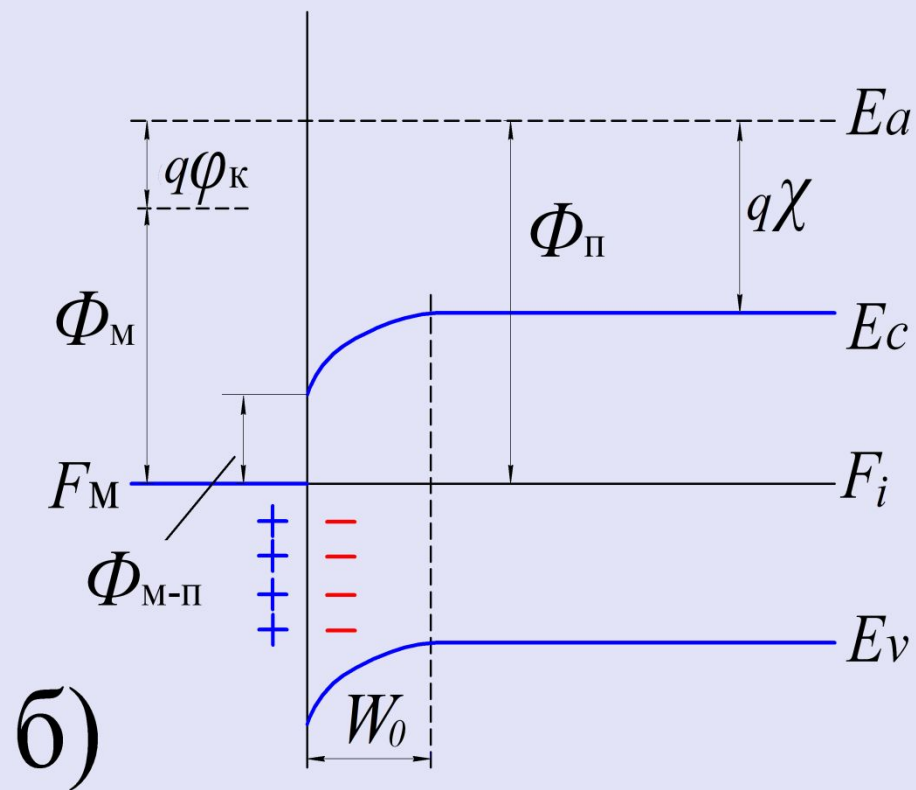


б

# Контакт металл-собственный полупроводник

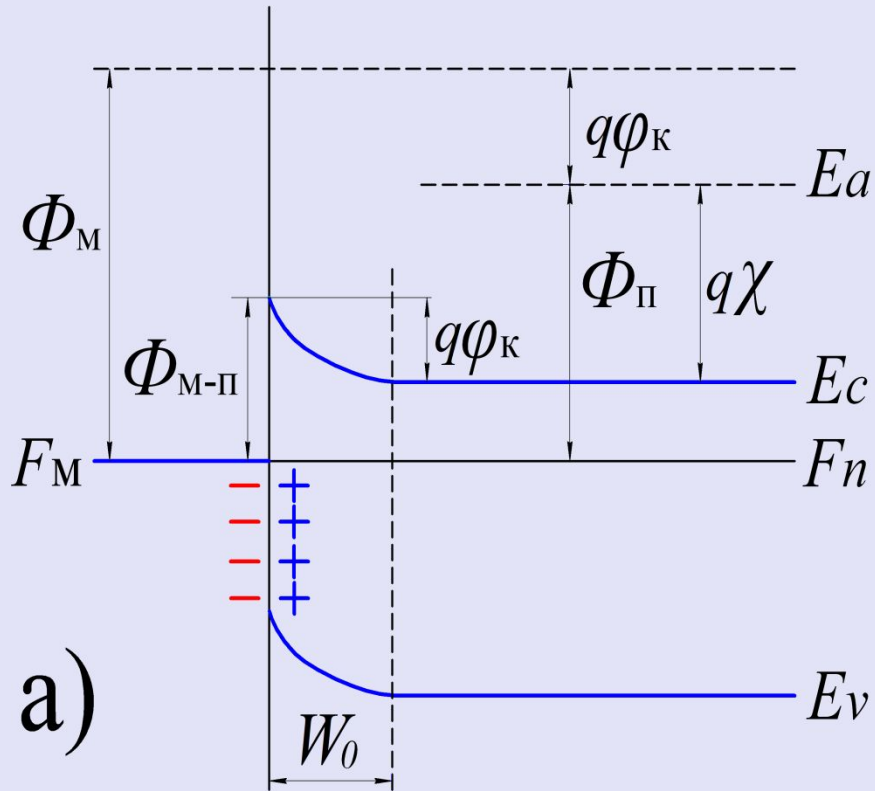


$$\Phi_{\Pi} > \Phi_M$$

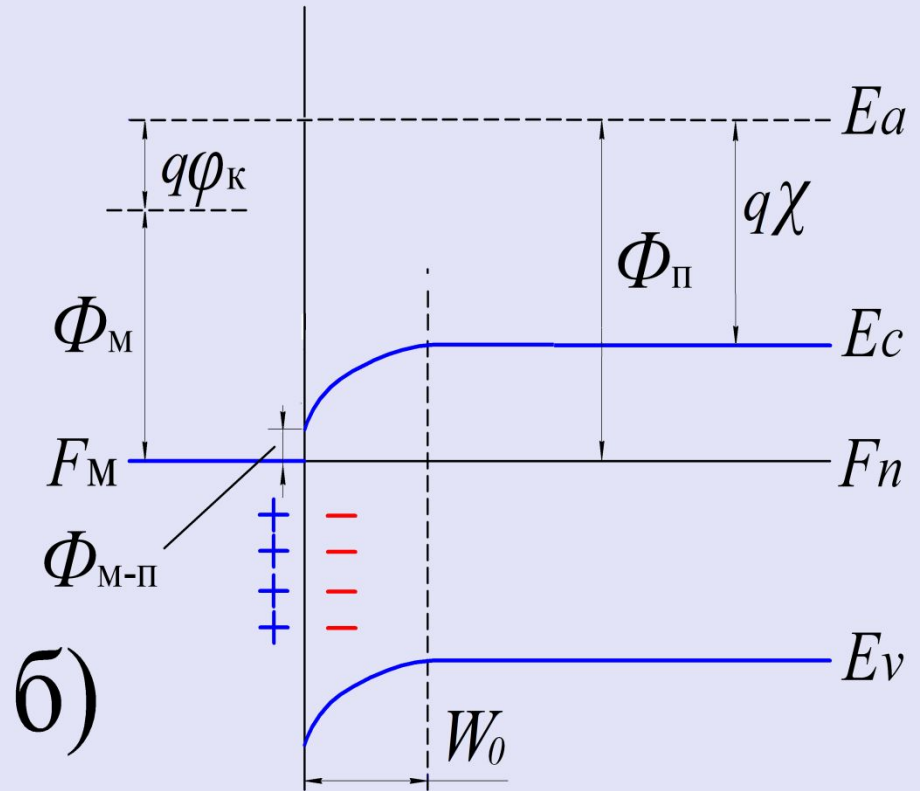


$$\Phi_{\Pi} < \Phi_M$$

# Контакт металл-электронный полупроводник

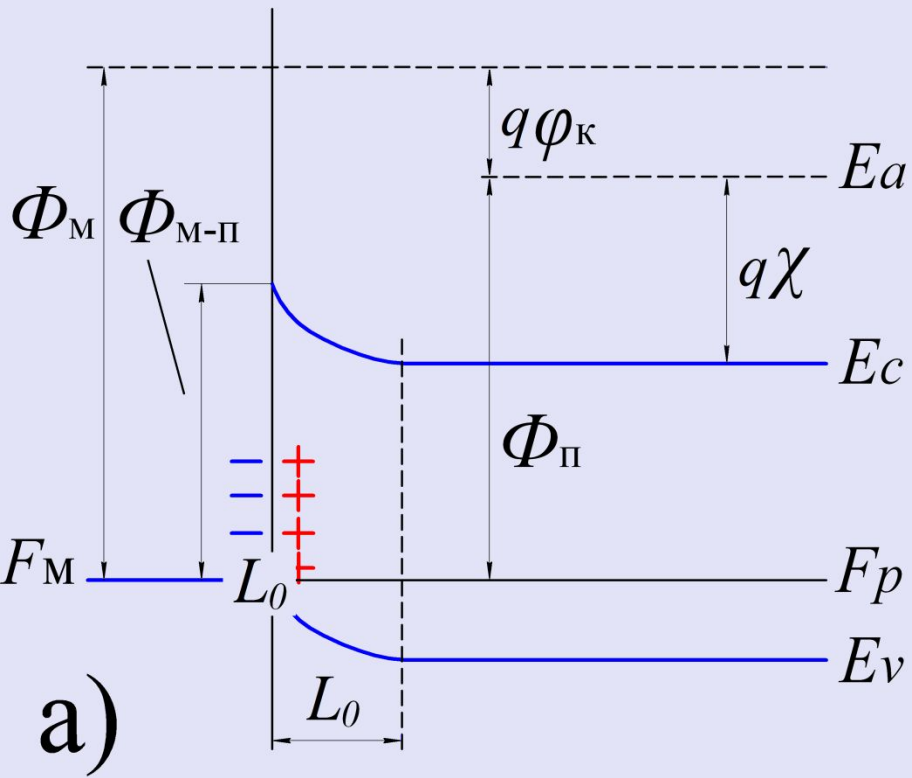


$$\Phi_{\text{II}} < \Phi_{\text{M}}$$

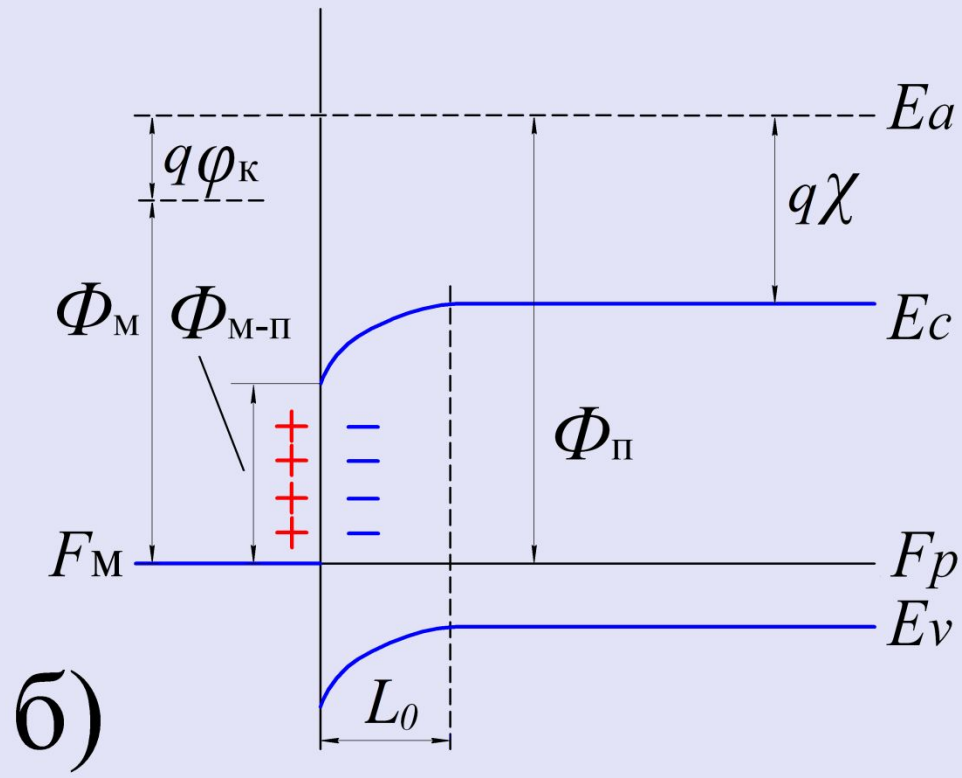


$$\Phi_{\text{II}} > \Phi_{\text{M}}$$

# Контакт металл-дырочный полупроводник



$$\Phi_{\Pi} < \Phi_M$$



$$\Phi_{\Pi} > \Phi_M$$



Без смещения:

$$W_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \phi_k}{q \cdot N_d}}$$

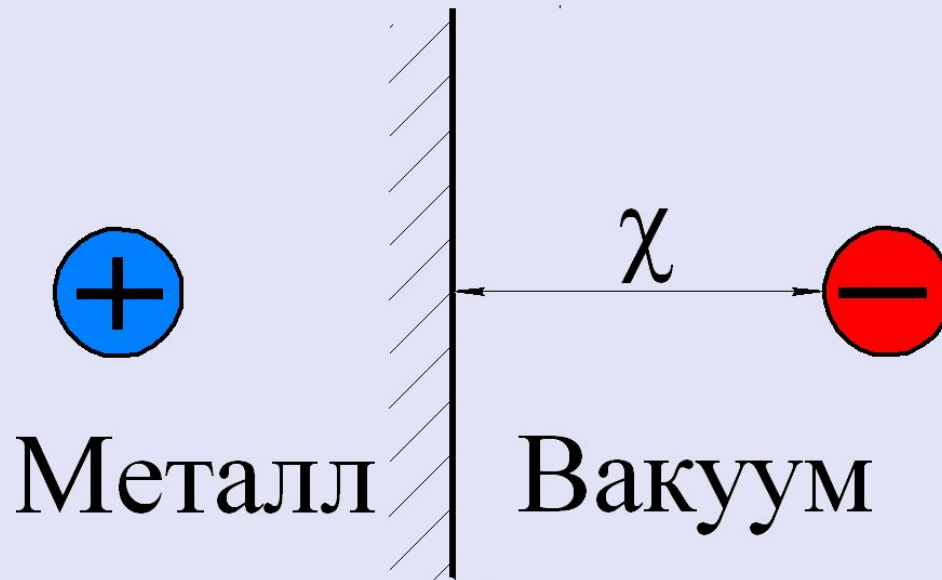
$$\bar{E}_m = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot N_d \cdot \phi_k}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}}$$

Со смещением:

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

$$\bar{E}_m = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot N_d \cdot (\phi_k - V)}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}}$$

# Сила изображения



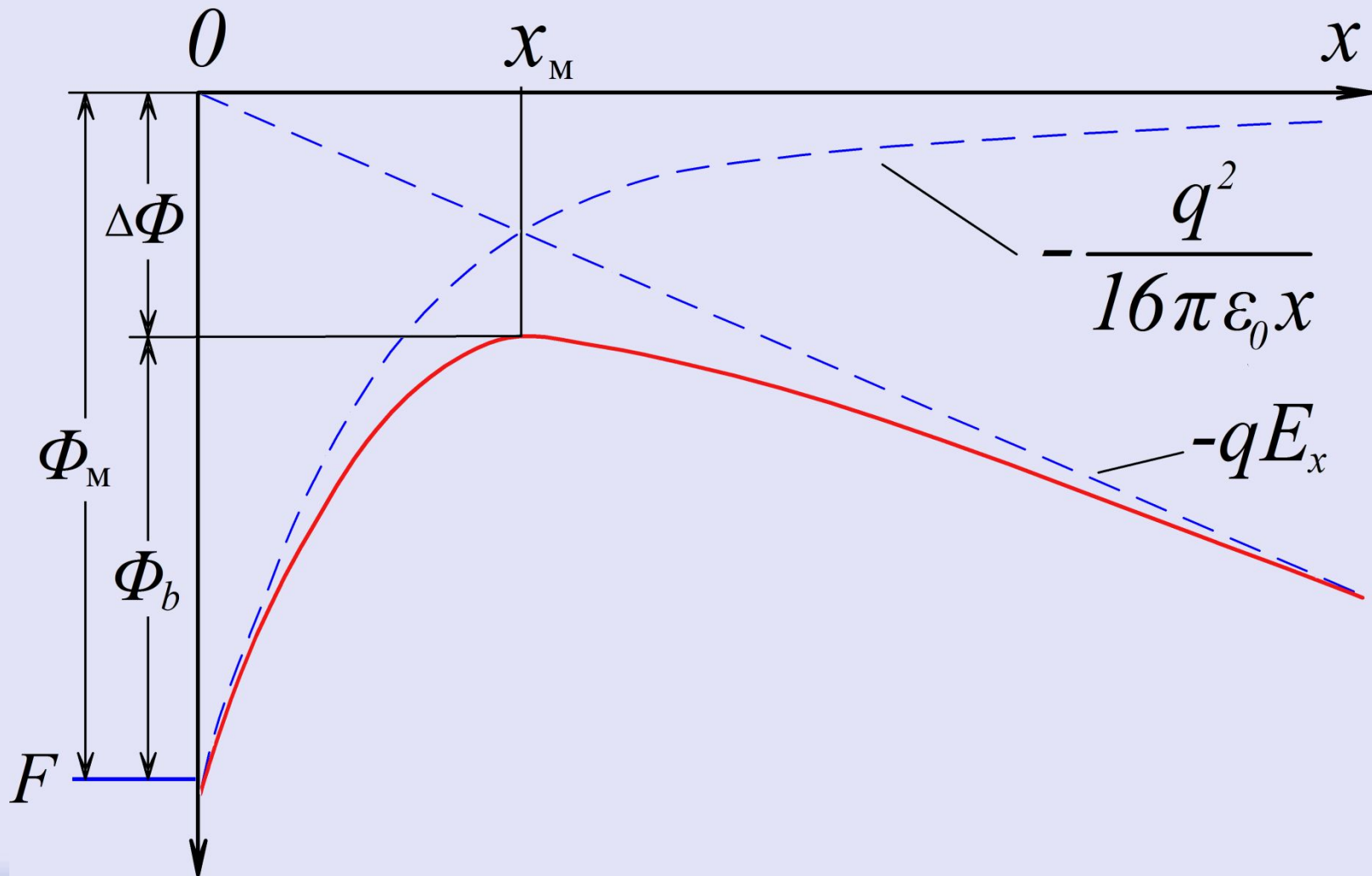
$$E_{\text{ном}}(x) = -\frac{q^2}{16\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot x}$$

# Сила изображения

- Если теперь вблизи границы раздела металл – вакуум имеется электрическое поле , то выражение для энергии электрона на расстоянии  $x$  приобретает вид:

$$E_{\text{пот}}(x) = -\frac{q^2}{16\pi \cdot \varepsilon_0 x} - q \cdot \bar{E}(x) \cdot x$$

# Граница металл-полупроводник при приложении электрического поля (барьер для электрона)



Граница металл-полупроводник при  
приложении электрического поля  
(барьер для электрона)

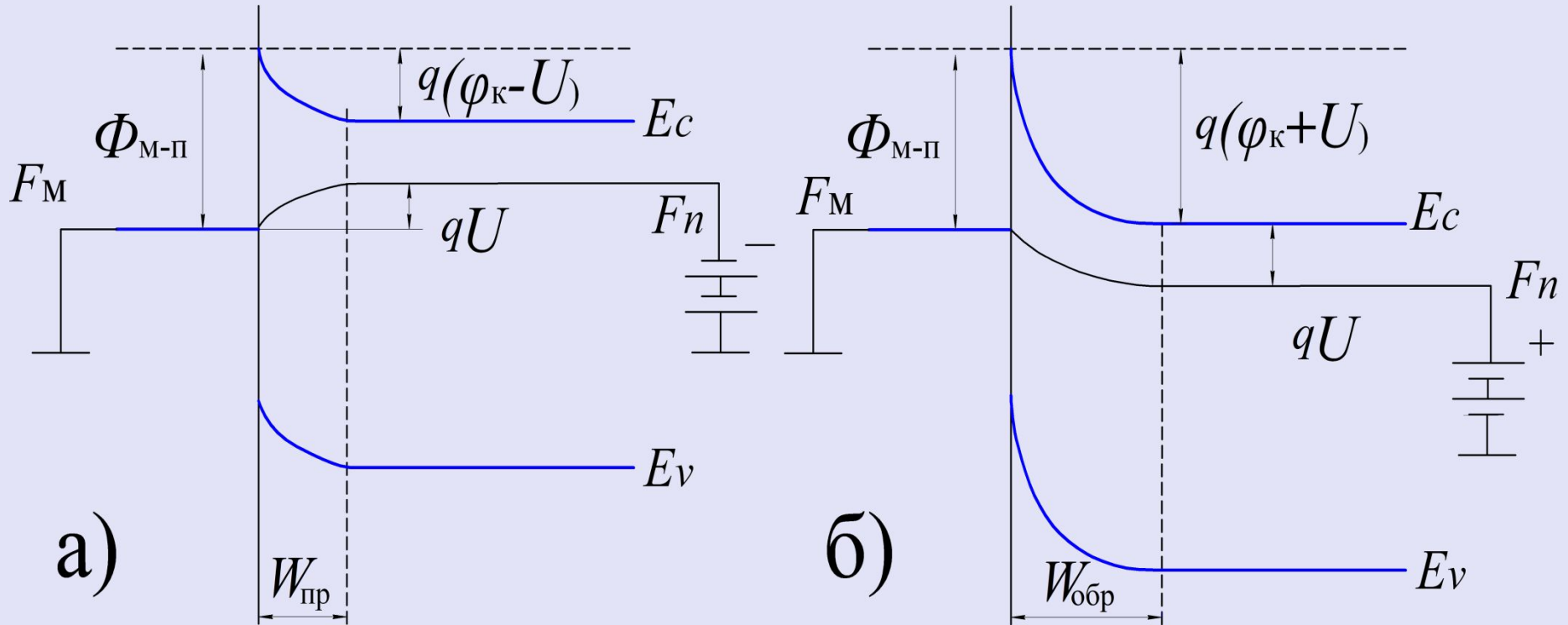
- Эта функция имеет максимум в точке  $x_m$ . Его положение можно определить из условия

$$\frac{d[E(x)]}{dx} = 0$$

$$x_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E}} = 0$$

- где в качестве  $E$  обычно принимается максимальное электрическое поле в обедненной области. Контактное электрическое поле понижает высоту барьера на величину 0,01-0,04 эВ.

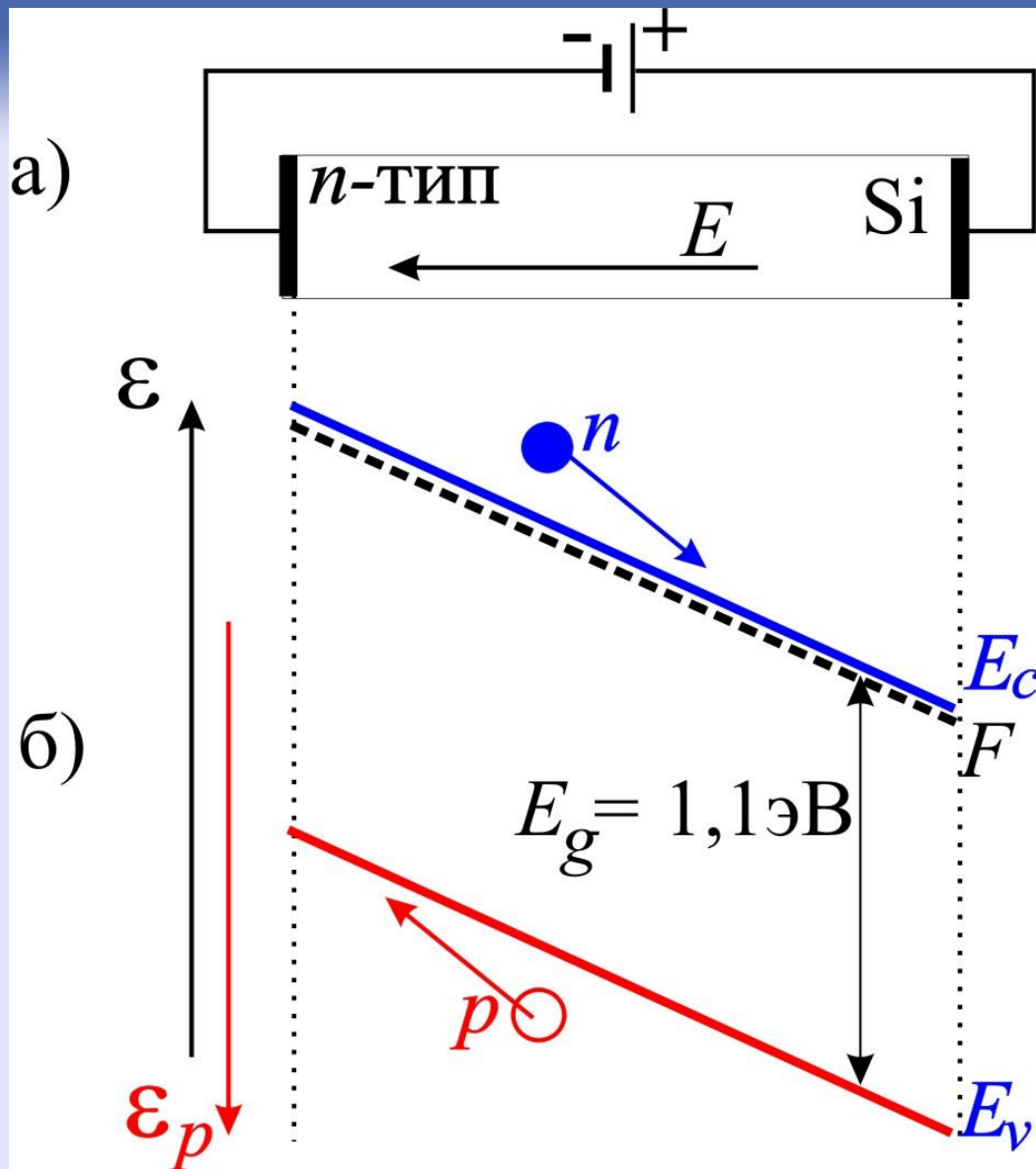
# Прямое и обратное смещение перехода металл-полупроводник



Важно подчеркнуть, что внешнее напряжение может *только выпрямить границы разрешенных зон* .

Другими словами, при приложении больших прямых смещений электроны начнут «убегать» от батареи смещения и все зоны будут наклоняться.





# Расчет ВАХ барьера Шоттки

При приложении напряжения:

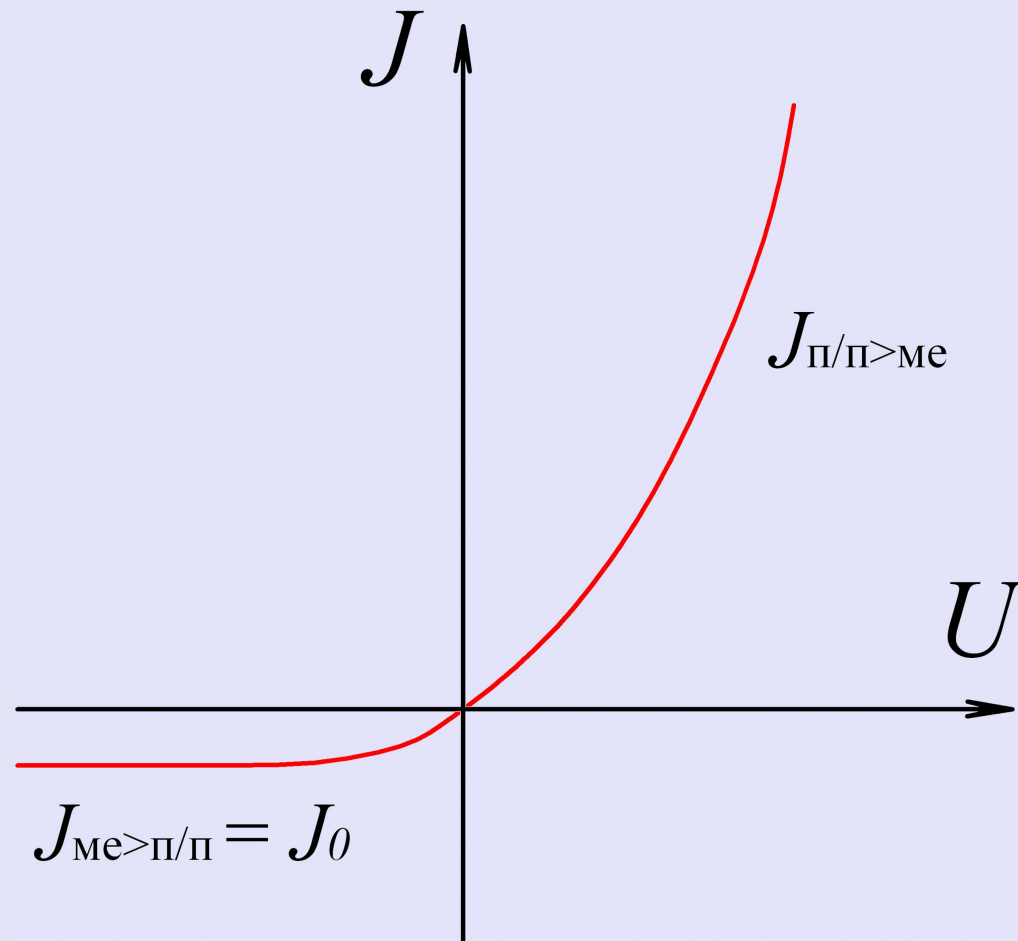
$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (\phi_k \pm V_{\text{см}})}{q \cdot N_d}} \quad J = J_{\text{п.п}} - J_{\text{м}} = J_{\text{с}} \cdot \left( e^{-\frac{V}{\phi_T}} - 1 \right)$$

где

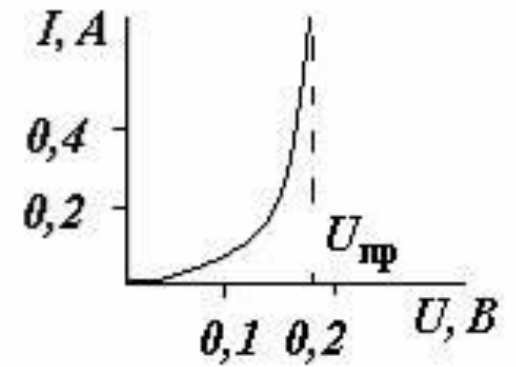
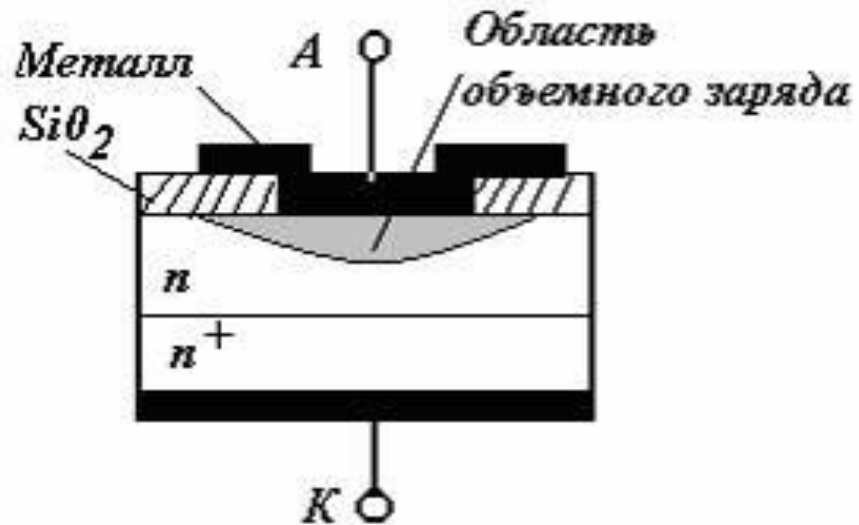
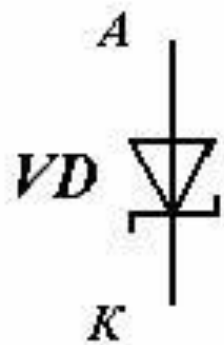
$$J_{\text{с}} = A \cdot T^2 \cdot e^{\frac{U_b}{\phi_T}}$$

$$A = \frac{4\pi \cdot m_n^* \cdot q \cdot k^2}{h^3} = 120 \cdot \frac{m_n^*}{m_0} \left[ \frac{\text{А}}{\text{см}^2 \text{К}^2} \right] - \text{Постоянная Ричардсона}$$

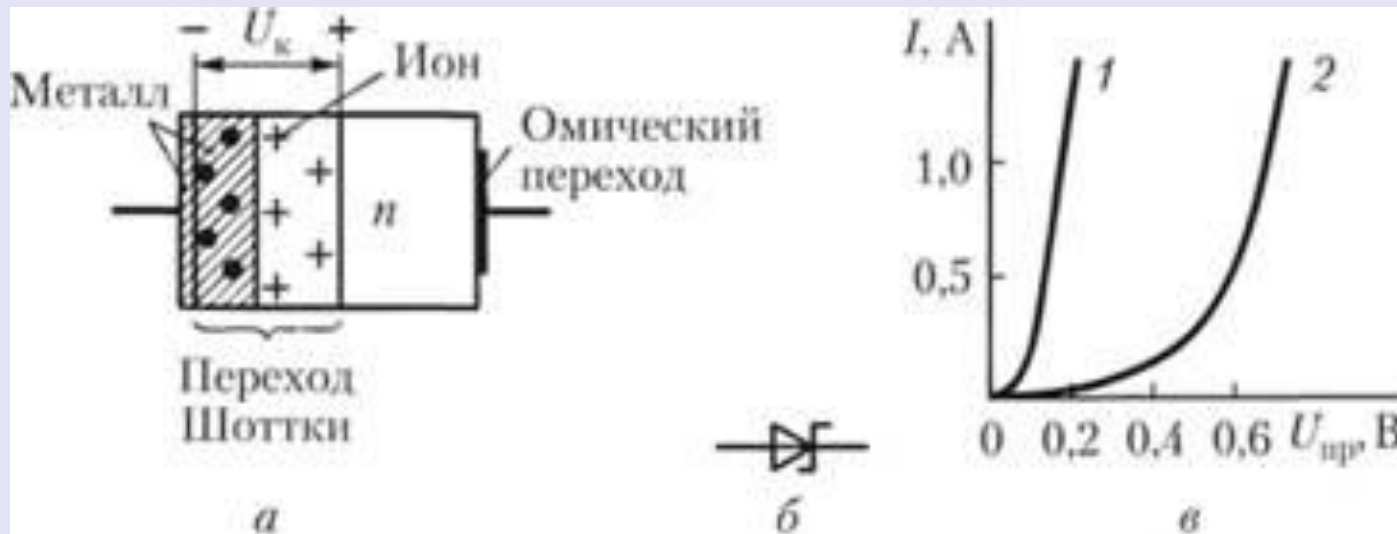
# ВАХ диода Шоттки



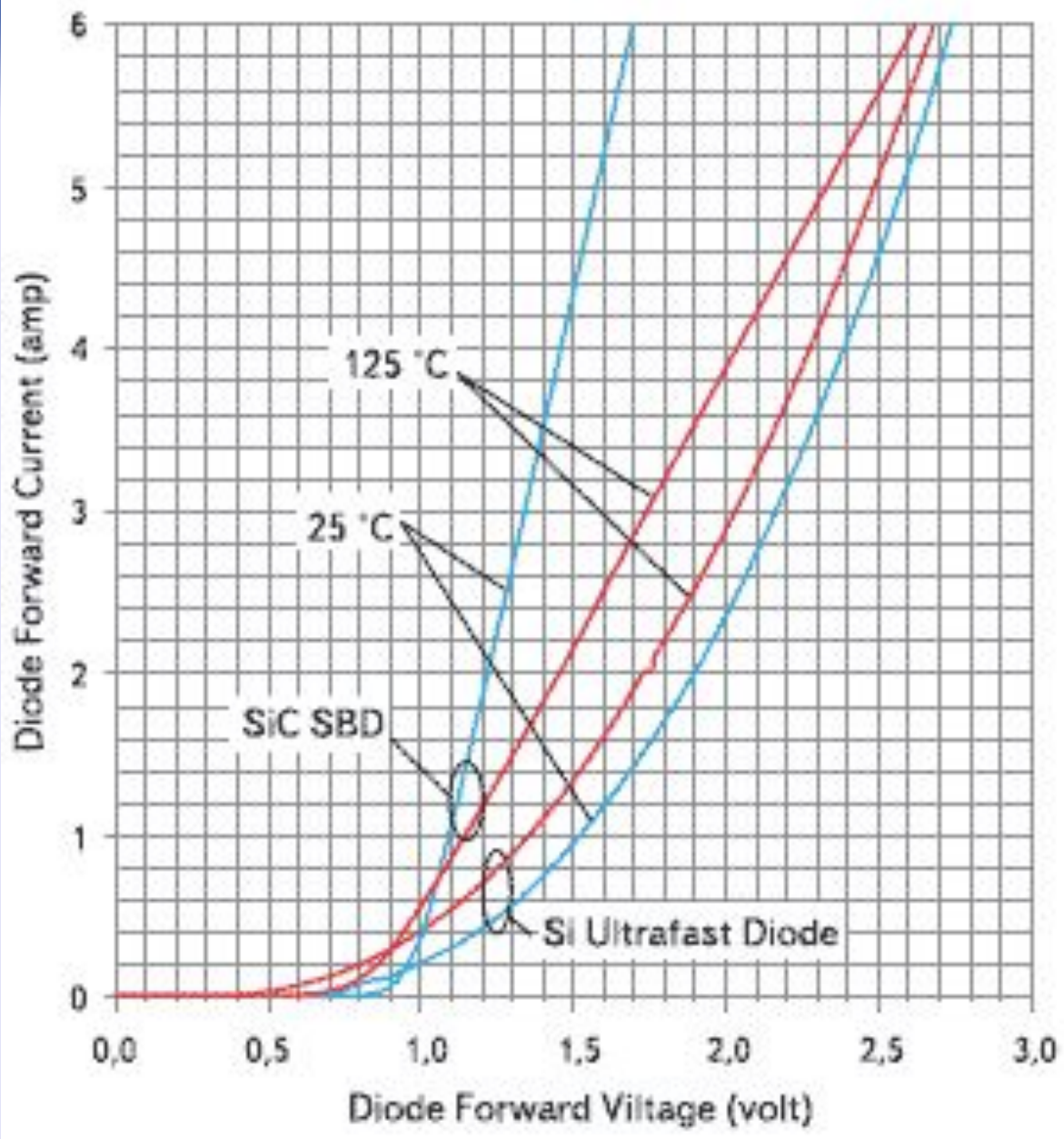
# Диод Шоттки

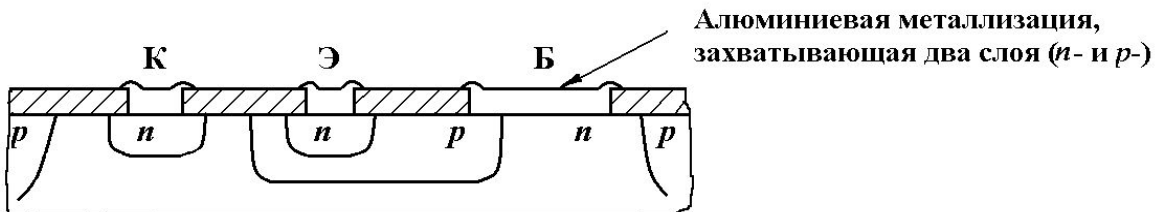
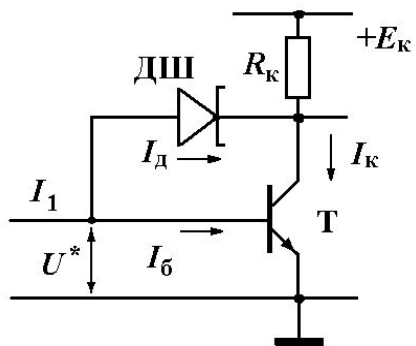
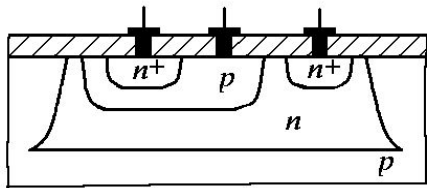


# Диод Шоттки



- ДШ характеризуются быстрой рекомбинацией инжектированных носителей (время жизни носителей крайне мало), а значит и высоким быстродействием. Благодаря минимальному сопротивлению базы и отсутствию процессов накопления и рассасывания избыточных зарядов, быстродействие получается достаточно высоким: граничная частота  $f_{гр} = 10^{10}$  Гц.





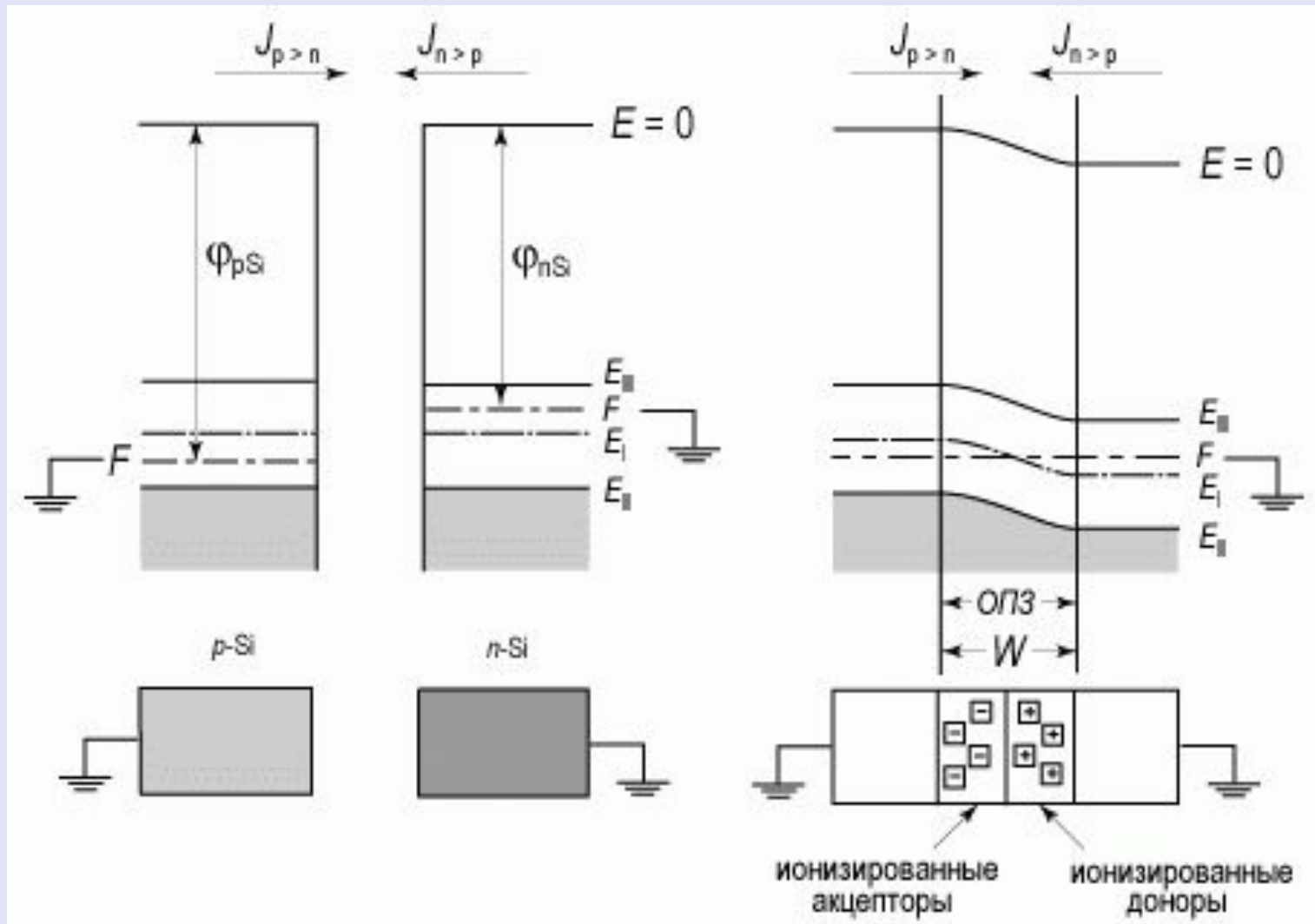
**Конструкция биролярного транзистора с барьером Шоттки**



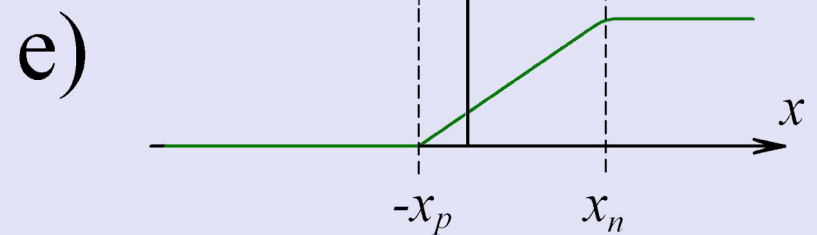
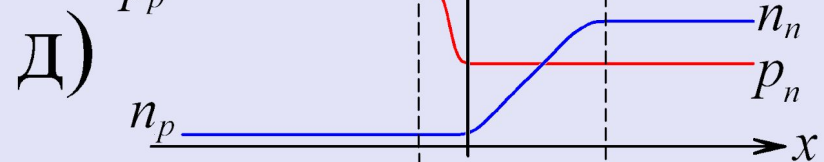
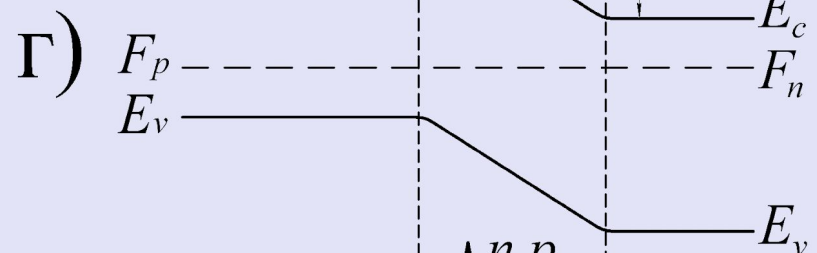
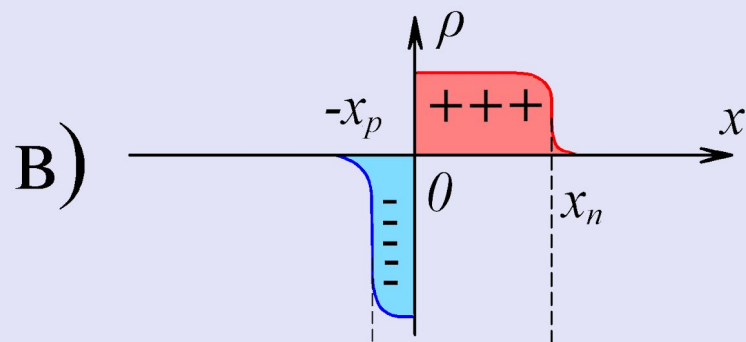
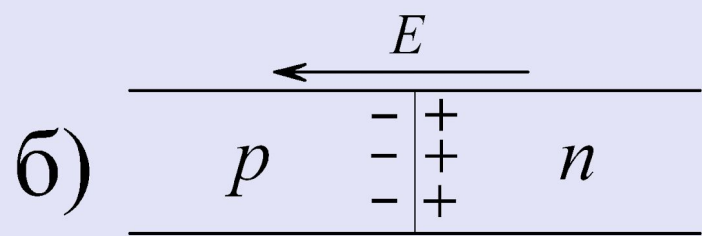
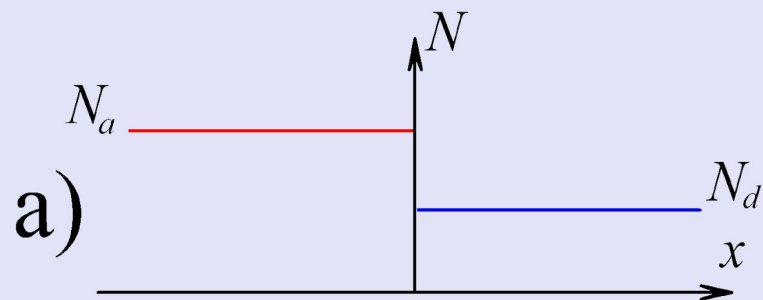
# **Контакт электронного и дырочного полупроводников**

# Возникновение потенциального барьера.

## Контактная разность потенциалов



# Контакт электронного и дырочного полупроводников



Для n-типа: 
$$\varphi_{ms} = \varphi_m - \varphi_s = \varphi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{2q} - \varphi_B \right) = 0 \quad (10.8)$$

Для p-типа: 
$$\varphi_{ms} = \varphi_m - \varphi_s = \varphi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{2q} + \varphi_B \right) = 0, \quad (10.9)$$

где  $q \cdot \phi_B = (F - E_i)$

$$n(x) = n_i \cdot \exp\left(\frac{F - E_i}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (\phi_F - \phi_i)}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{\phi_B}{\phi_T}\right) \quad (10.10)$$

$$p(x) = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_i - F}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (\phi_i - \phi_F)}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(-\frac{\phi_B}{\phi_T}\right) \quad (10.11)$$

Для n-типа: 
$$\varphi_B = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (10.12)$$

Для p-типа: 
$$\varphi_B = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (10.13)$$

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

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

где  $\phi_F = F/q$  – потенциал уровня Ферми,  $\phi_i = E_i/q$  – потенциал собственного полупроводника

Для р-типа:

Для n-типа:

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

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

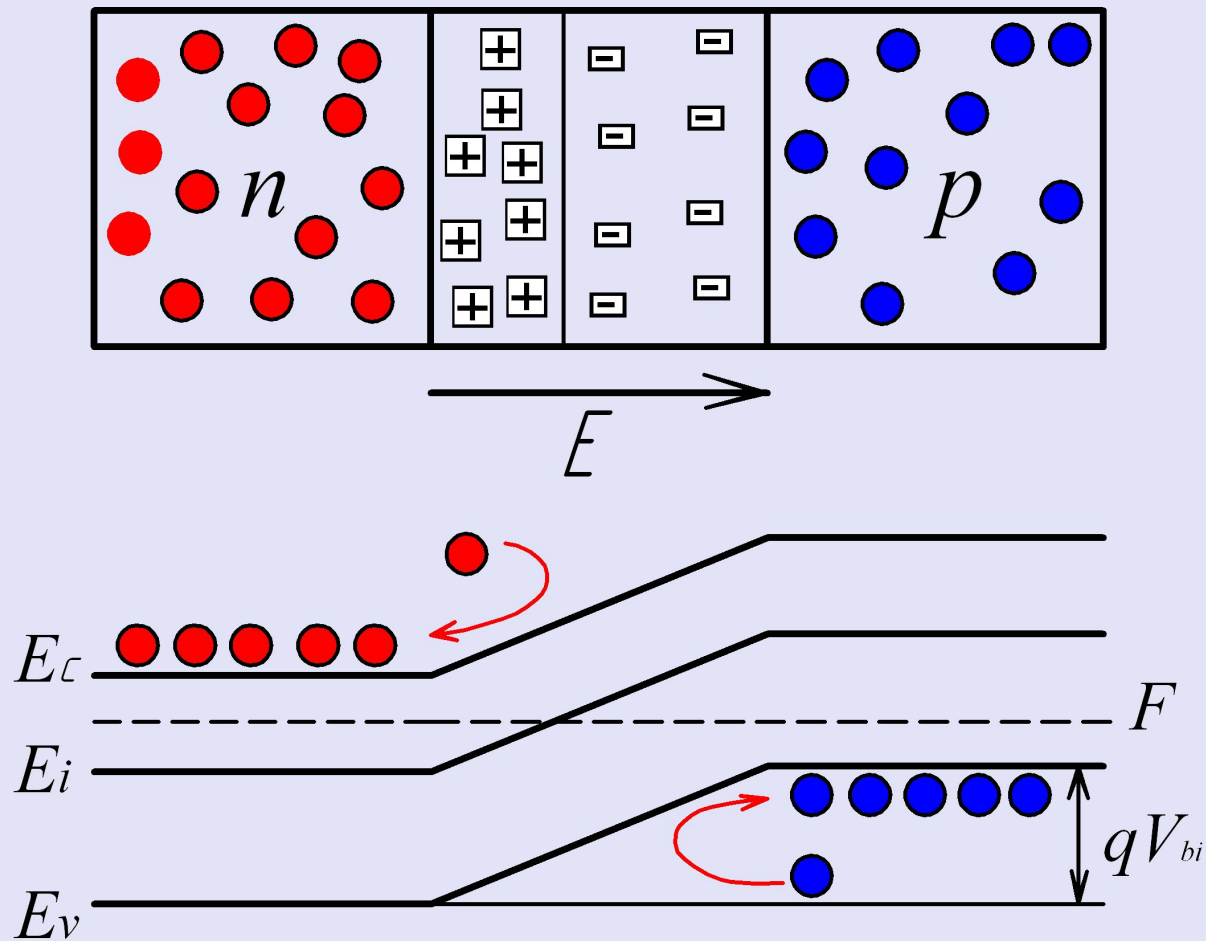
В приповерхностной области:

$$p_p(x) = p_{p0} \cdot \exp\left(-\frac{\phi(x)}{\phi_T}\right)$$

$$n_p(x) = n_{p0} \cdot \exp\left(\frac{\phi(x)}{\phi_T}\right)$$

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

# Образование р-n-перехода



Перераспределение носителей, образовавшееся при контакте, и формирование потенциального барьера высотой  $q\phi_k$  приводит к тому, что диффузионный поток основных носителей ( $n_n$  и  $p_p$ ) прекращается. *Энергетический барьер существует именно для основных носителей, потенциального барьера для неосновных носителей ( $p_n$  и  $n_p$ ) нет*

Для того чтобы рассчитать распределения концентраций свободных носителей в приповерхностной области необходимо решить уравнение Пуассона, устанавливающее связь между распределением потенциала и пространственного заряда  $\rho(x)$ :



# Решение уравнения Пуассона

$$\frac{\partial^2 \phi(x)}{\partial x^2} = -\frac{\partial E(x)}{\partial x} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_s \varepsilon_0} = -\frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon_s} [p(x) - n(x) + N_d^+ - N_a^-] \quad (4.1)$$

При  $-W_p \leq x < 0$  заряд  $\rho = -qN_a^-$

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = \frac{qN_a}{\varepsilon_0 \varepsilon_s} \quad (4.2)$$

$$\phi(-W_p) = 0; \quad \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x=-W_p} = 0$$

При  $0 < x \leq W_n$  заряд  $\rho = qN_d^+$

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = -\frac{q \cdot N_d}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s} \quad (4.3)$$

$$\phi(W_n) = \phi_k; \quad \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x=W_n} = 0$$

*РЕШЕНИЕ*

$$\phi_p = \frac{q \cdot N_a}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s} \cdot (W_p + x)^2 \quad \text{для области } -W_p \leq x < 0 \quad (4.5)$$

$$\phi_n = \phi_k - \frac{q \cdot N_d}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s} \cdot (W_n - x)^2 \quad \text{для области } 0 < x \leq W_n \quad (4.6)$$

## Толщина ОПЗ

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

$$\phi_k = \frac{q}{2\varepsilon_0\varepsilon_s} (N_d W_n^2 + N_a W_p^2) = \frac{q}{2\varepsilon_0\varepsilon_s} W_0^2 \frac{N_d N_a}{N_d + N_a}$$

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

Чем выше степень легирования *n*- и *p*-областей полупроводника, тем меньше толщина ОПЗ. Если одна из областей легирована значительно сильнее другой, то большая часть падения потенциала приходится на высокоомную область

# Определение контактной разности потенциалов

$$\text{При } -W_p \leq x < 0 \quad \phi_p = \frac{q \cdot N_a}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s} \cdot (W_p + x)^2$$

$$\text{При } 0 < x \leq W_n \quad \phi_n = \phi_k - \frac{q \cdot N_d}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s} \cdot (W_n - x)^2$$

$$q \cdot \phi_k = \Phi_p - \Phi_n = F_p - F_n$$

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

Учитывая, что

$$n_i^2 = p_p \cdot n_p = n_n \cdot p_n = N_c \cdot N_v \exp(-E_g/kT)$$

Получим:

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

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

Потенциальный барьер в  $pn$ -переходе тем выше, чем сильнее легированы  $p$ - и  $n$ -области. По мере роста температуры величина  $n^2$  возрастает. Выражение под знаком логарифма  $i$  стремится к нулю, т.е. *контактная разность потенциалов с ростом температуры уменьшается.*

При высоких температурах начинает доминировать собственная проводимость как в  $p$ -, так и в  $n$ -области, при этом в каждой из областей уровень Ферми стремится к середине запрещенной зоны и  $q\phi_k$  стремится к нулю.

Связь концентрации носителей с  $\phi_k$

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

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

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

Рассмотрим теперь *pn*-переход, к которому приложено **прямое смещение**  $V_{см}$  (минус батареи к *n*-типу, плюс – к *p*-типу).

Допустим, что все приложенное внешнее напряжение падает на *pn*-переходе.

При прямом смещении высота потенциального барьера понижается на  $qV_{см}$  по сравнению с равновесным состоянием, соответственно изменяется и толщина ОПЗ:

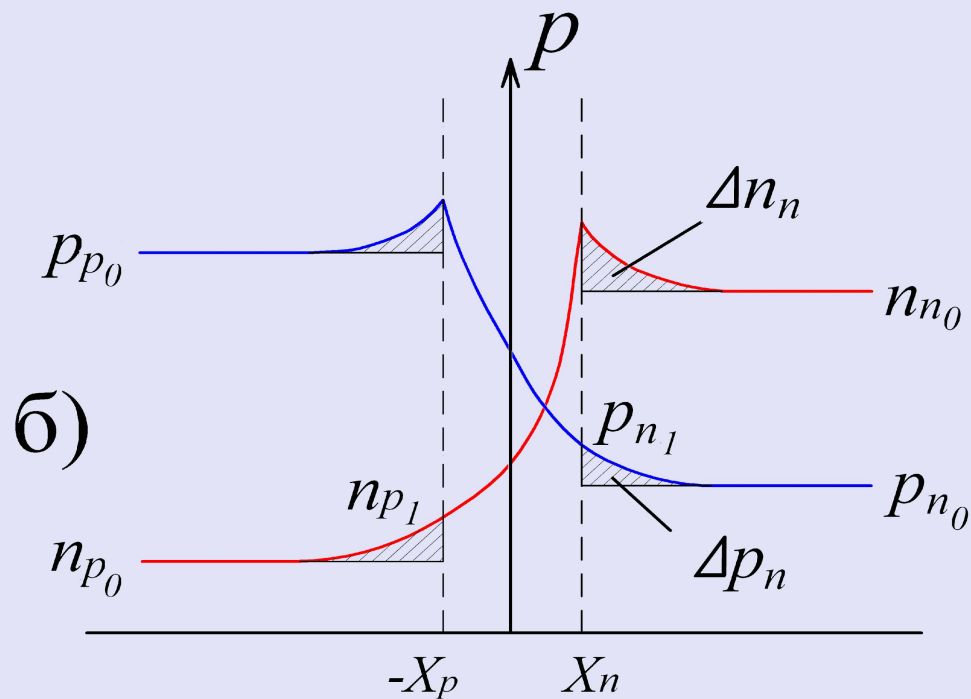
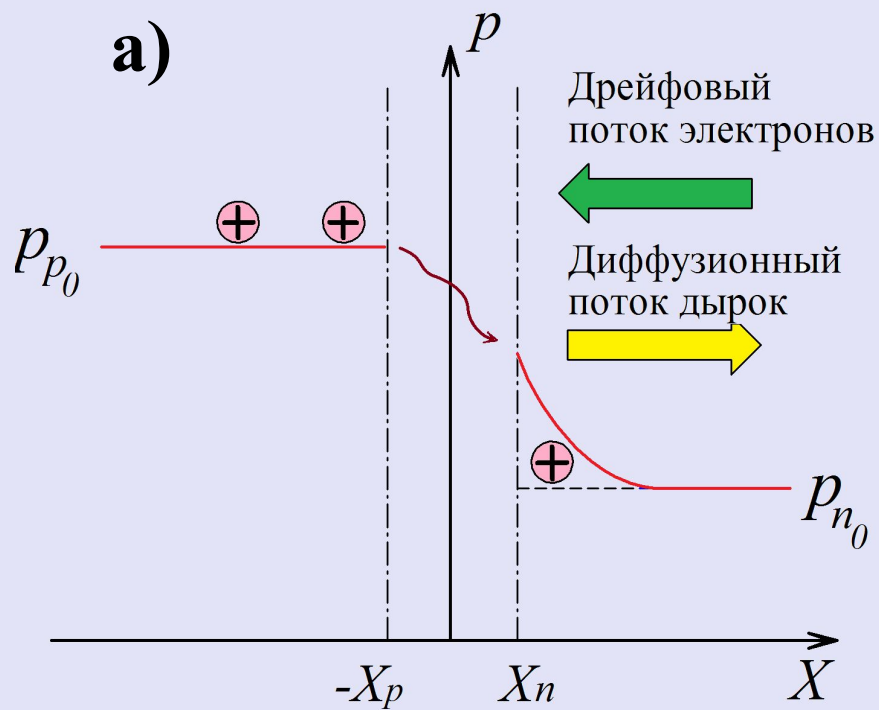
$$W_{np} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s}{q} \cdot (\phi_k - |V_{см}|) \cdot \frac{N_d + N_a}{N_d \cdot N_a}}$$

Понижение потенциального барьера приводит к увеличению потока основных носителей заряда по сравнению с равновесным состоянием. Под действием диффузионных процессов основные носители ( $n_n$  и  $p_p$ ) перемещаются в соседнюю область, становясь неосновными носителями ( $p_n$  и  $n_p$ ).

Образовавшийся градиент концентрации неосновных носителей приводит к появлению диффузионных токов неосновных носителей заряда, он направлен от ОПЗ вглубь полупроводника. При этом направления диффузионных токов, создаваемых  $p_n$  и  $n_p$  совпадают, в то время как их потоки направлены в разные стороны.



# Распределение носителей заряда вблизи перехода



Введение в полупроводник носителей заряда с помощью  $pn$ -перехода при подаче на него прямого смещения в область, где эти носители заряда являются неосновными, называют ***инжекцией***.

Концентрация дырок в  $n$ -области вблизи контакта будет равна:

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

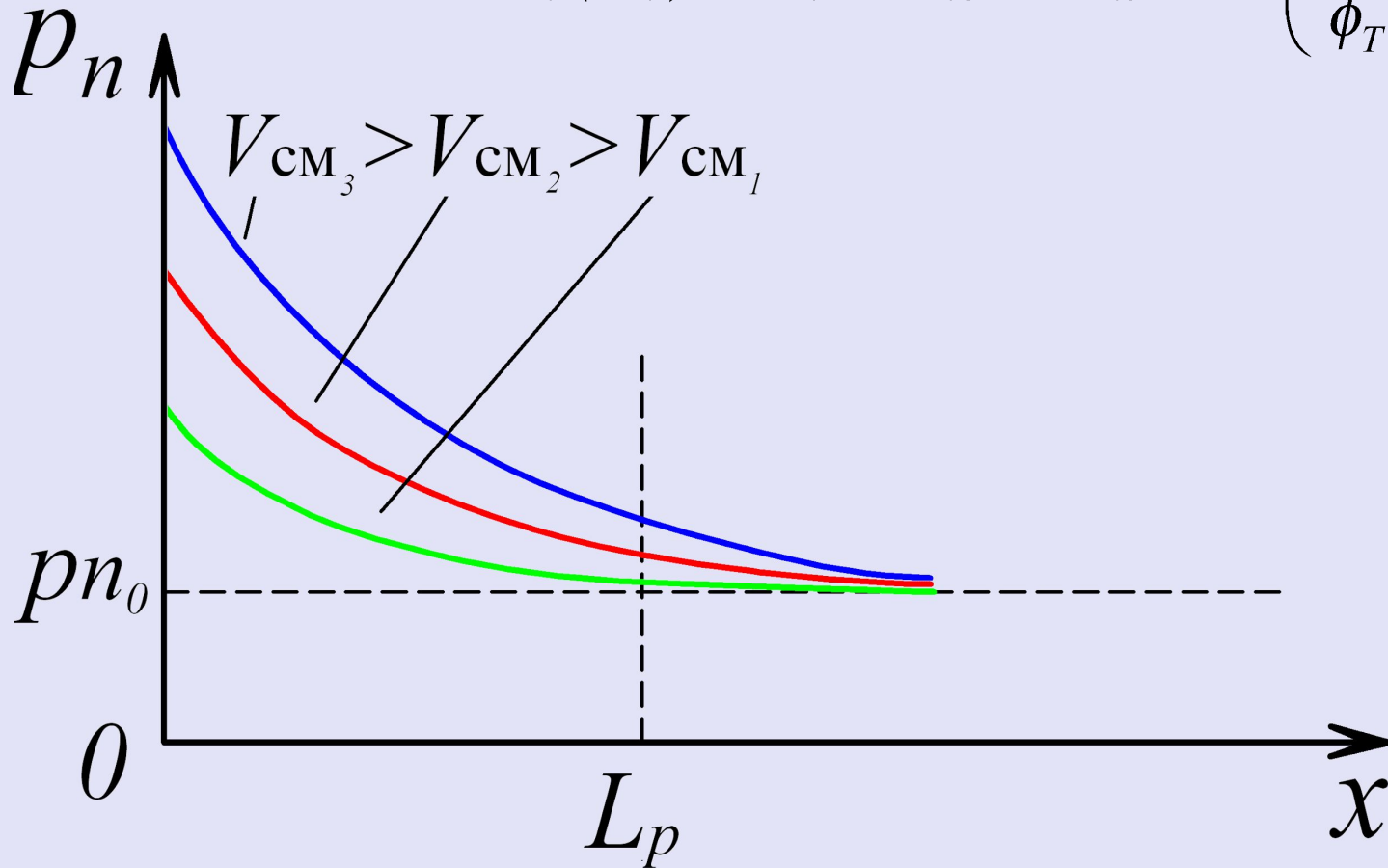
Для ее нахождения в стационарном случае на границе с ОПЗ (при  $x = W_n$ ) нужно вместо  $q\phi_k$  использовать значение  $q(\phi_k - V_{см})$

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

*Концентрация неосновных носителей в низколегированной области (базе) зависит от концентрации носителей в высоколегированной области (эмиттере) и от напряжения смещения, приложенного к рп-переходу*

# Распределение неосновных носителей в базе

$$\Delta p_n(W_n) = p_n - p_{n0} = p_{n0} \cdot \exp\left(\frac{V_{см}}{\phi_T} - 1\right)$$



Аналогичные явления происходят в  $p$ -области: сюда из  $n$ -области инжектируются электроны и концентрация избыточных электронов при  $x=-W_p$  составит:

$$\Delta n_p(-W_p) = n_{po} \cdot \exp\left(\frac{V_{см}}{\phi_T} - 1\right)$$

Если к  $pn$ -переходу приложено **обратное смещение** (минус батареи к  $p$ -типу, плюс – к  $n$ -типу), потенциальный барьер повышается на  $q\phi_k$ . Толщина слоя ОПЗ увеличивается:

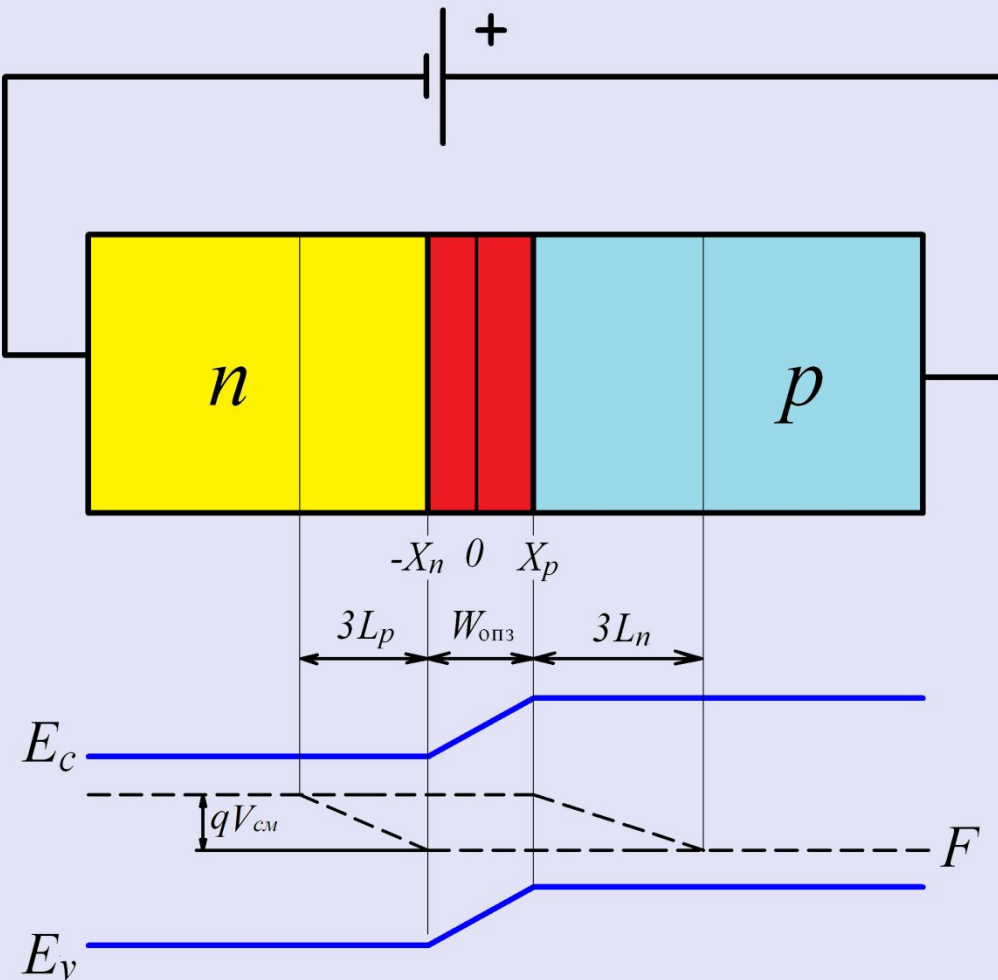
$$W_{обр} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s}{q} \cdot (\phi_k + |V_{см}|) \cdot \frac{N_d + N_a}{N_d \cdot N_a}}$$

Чем сильнее переход смещен в обратном направлении, тем выше потенциальный барьер, и тем меньшее количество основных носителей заряда способно преодолеть возросший потенциальный барьер. В соответствии с этим *количество неосновных носителей заряда в приконтактной области уменьшается по сравнению с равновесным состоянием, следовательно, уменьшается и количество основных носителей заряда вследствие соблюдения электронейтральности. Это явление носит название **экстракции** носителей заряда*

Таким образом, при обратном смещении *pn*-перехода ток основных носителей заряда будет меньше, чем при равновесном состоянии, а ток неосновных носителей заряда практически не изменится. Поэтому суммарный ток через *pn*-переход будет направлен от *n*-области к *p*-области и с увеличением обратного напряжения вначале будет незначительно расти, а затем стремиться к некоторой величине, называемой током насыщения  $J_s$ .



# Прямое смещение р-п-перехода



Ширина ОПЗ:

$$W_{np} = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_s}{q} \cdot (\phi_k - V_{см}) \cdot \frac{N_d + N_a}{N_d \cdot N_a}}$$

Концентрация дырок:

$$p_n(X_n) = p_p \cdot \exp\left(-\frac{(\phi_k - V_{см})}{\phi_T}\right) =$$

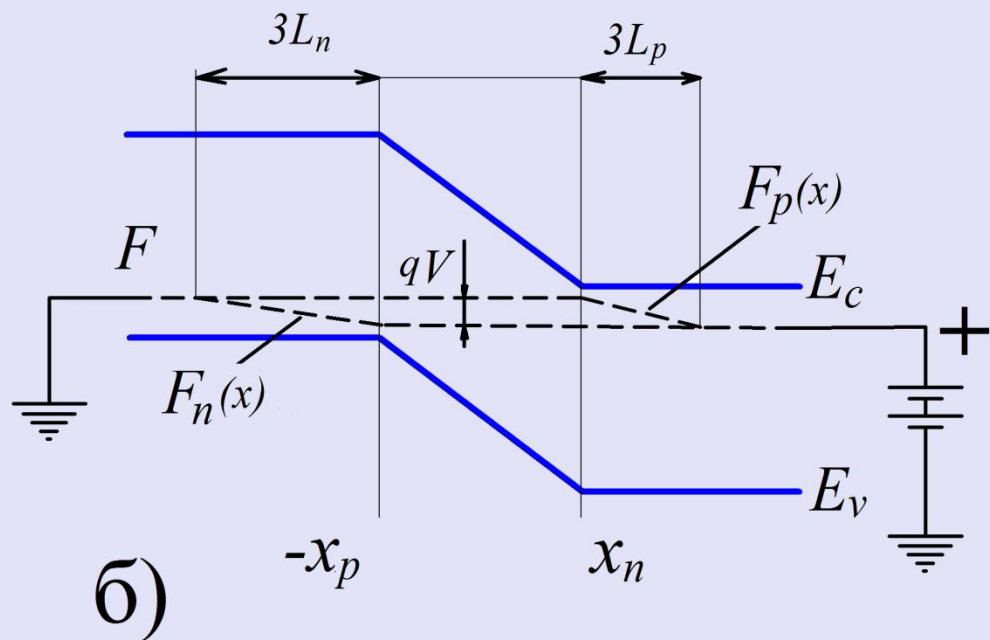
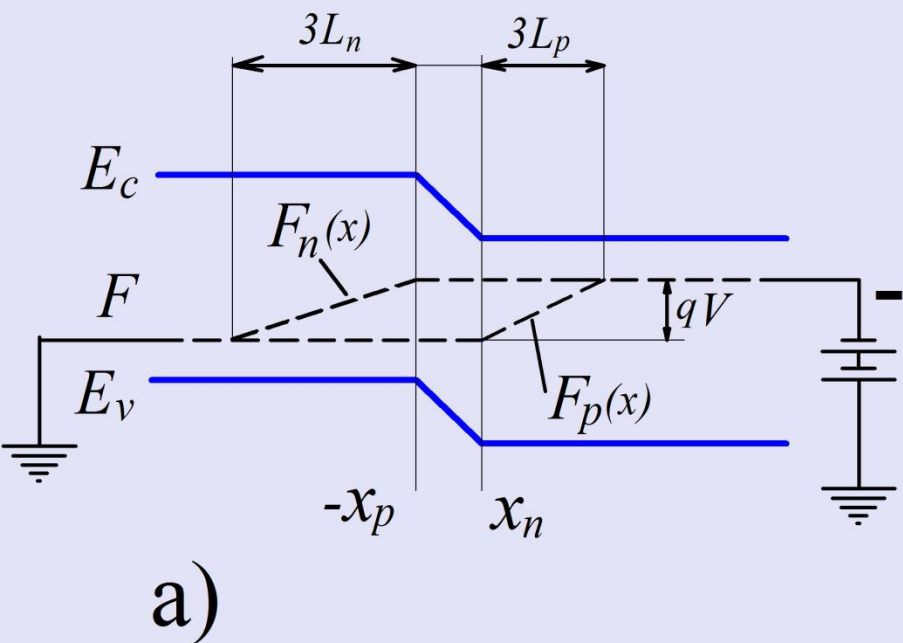
$$= p_{no} \cdot \exp\left(\frac{V_{см}}{\phi_T}\right)$$

Избыточные концентрации:

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

$$\Delta n_p(-X_p) = n_{po} \cdot \exp\left(\frac{V_{см}}{\phi_T} - 1\right)$$

# Энергетические диаграммы при прямом и обратном смещении $p$ - $n$ -перехода

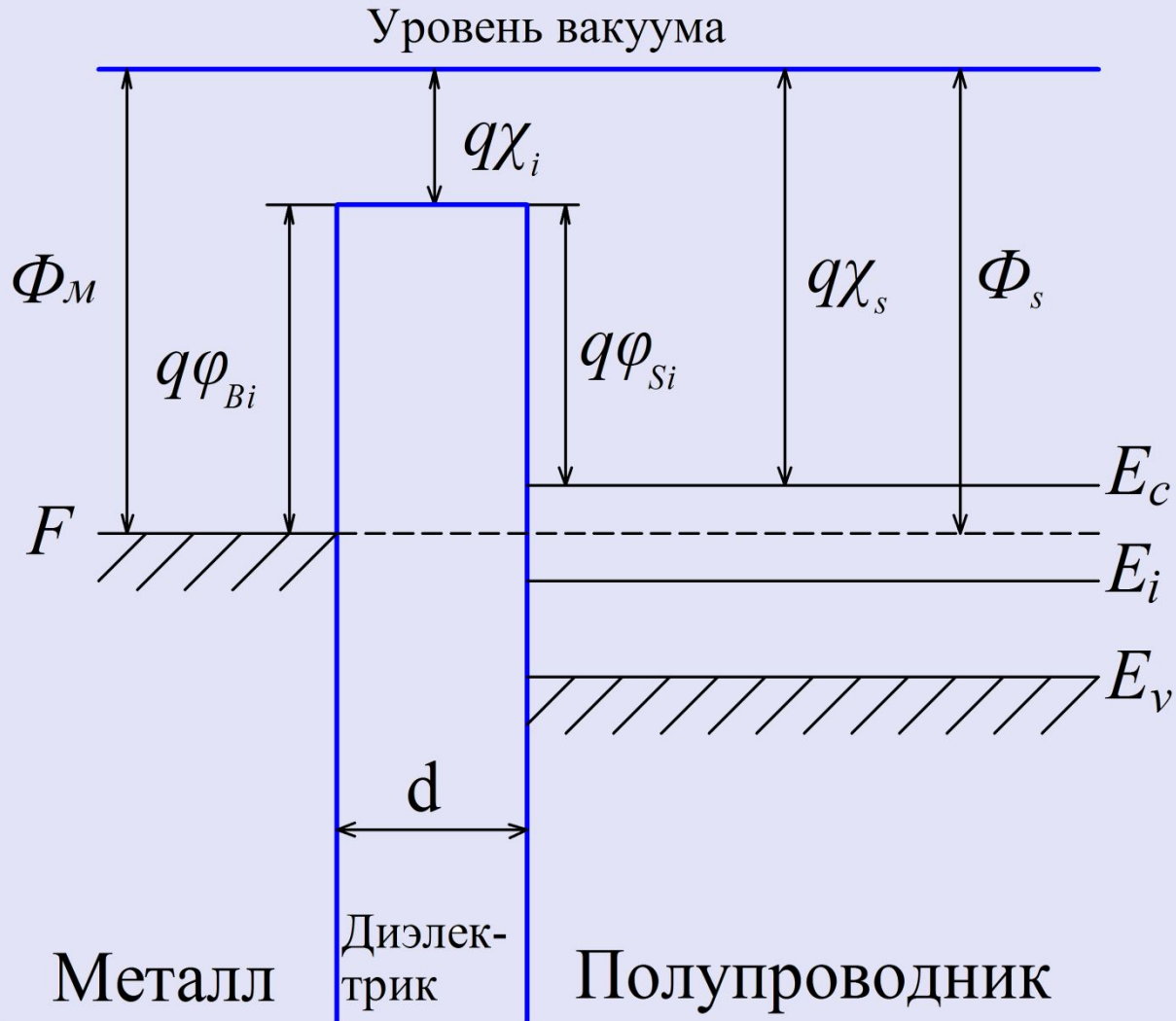


# Идеальная МДП–структура

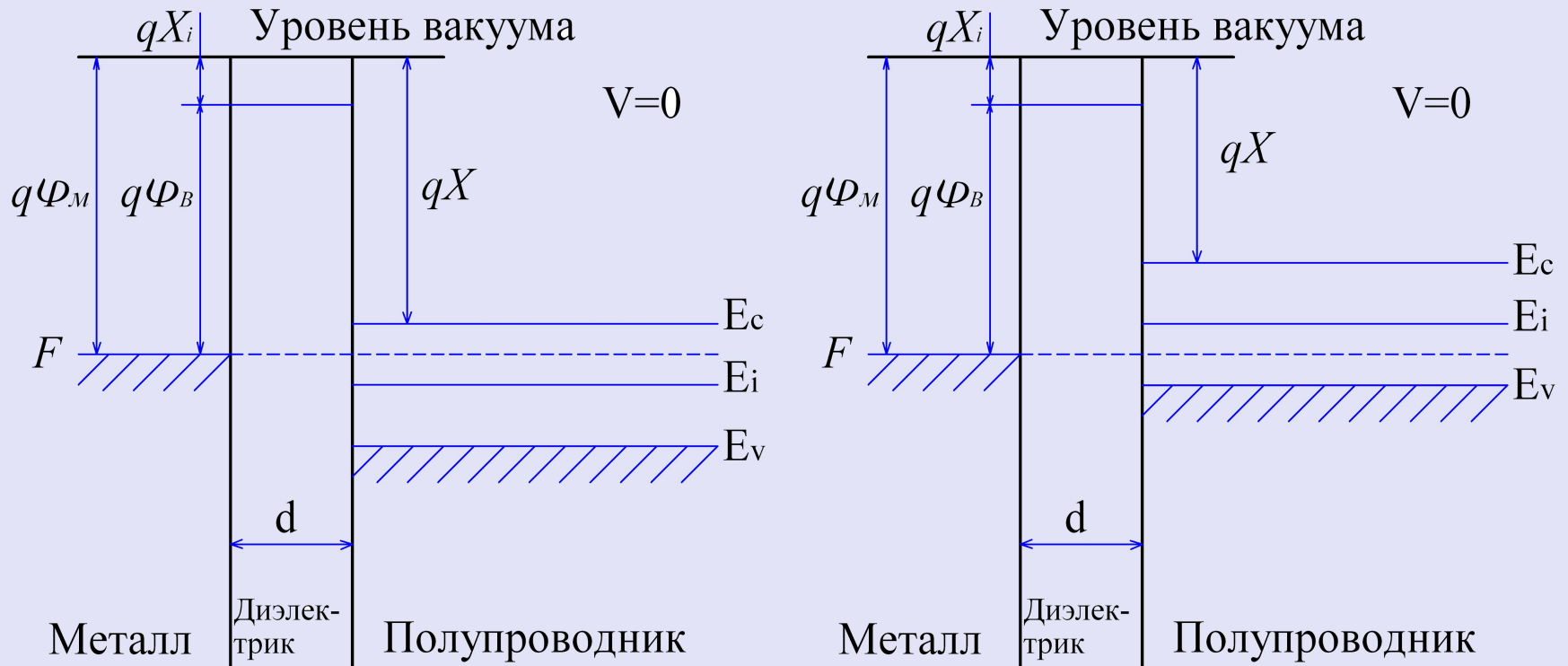
Если на окисел, покрывающий поверхность кристалла, нанести металлический электрод (затвор), то, изменяя его потенциал относительно объема кристалла, возможно изменять величину заряда в приповерхностной области полупроводника и, соответственно, её проводимость.

Этот эффект положен в основу целого ряда полупроводниковых устройств, среди которых самое известное – МДП-транзистор.

# МДП-структура



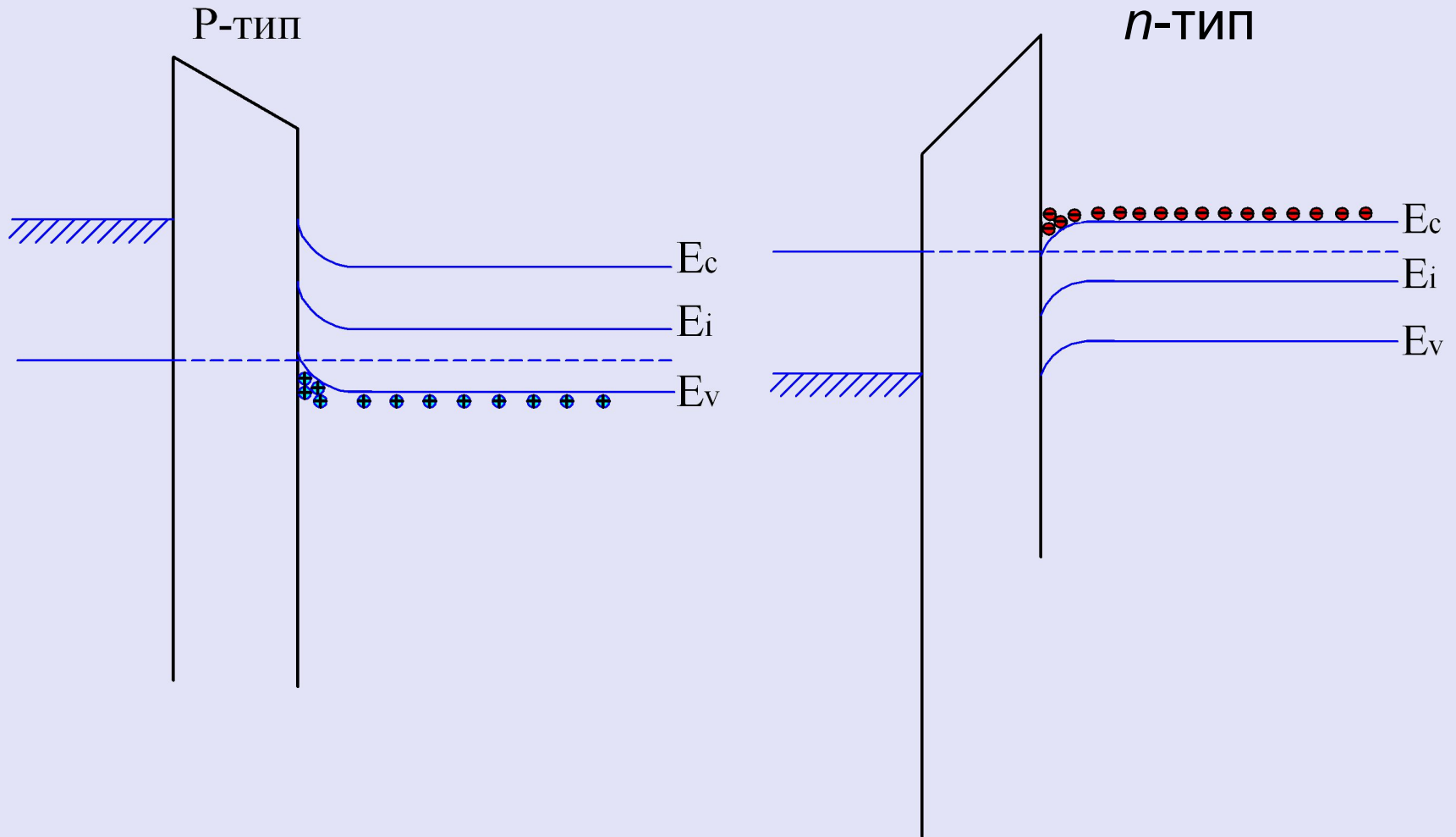
# МДП-структура



- На границе металл-диэлектрик, диэлектрик-полупроводник, а в отсутствии диэлектрика на границе металл-полупроводник возникает *контактная разность потенциалов*:

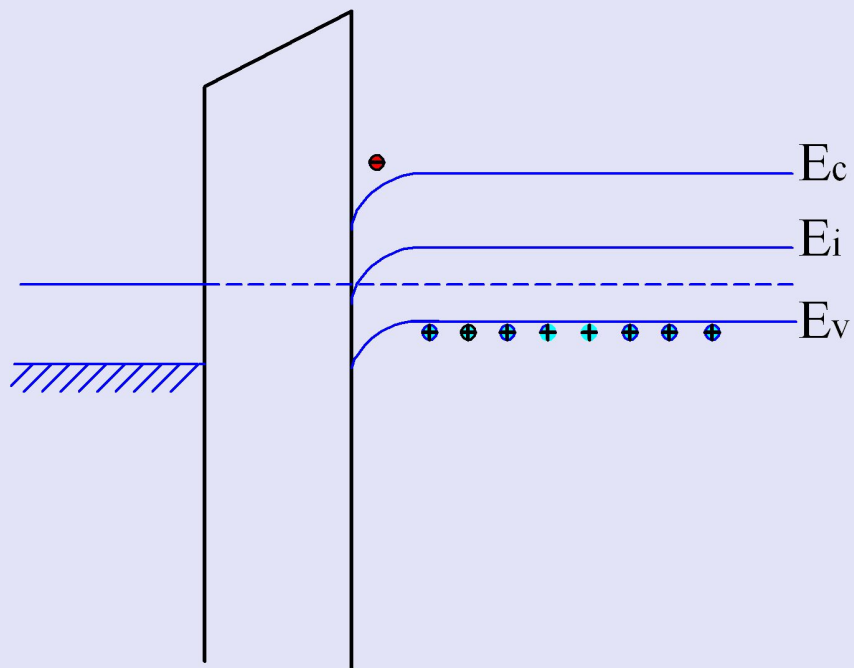
$$q\varphi_k = \Phi_1 - \Phi_2$$

# Обогащение

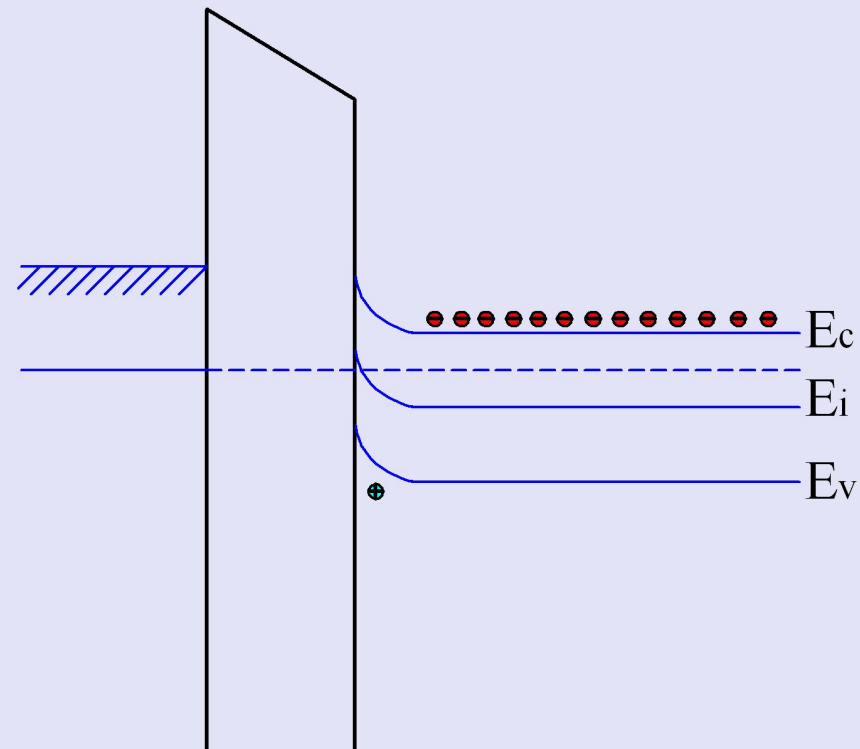


# Обеднение

*p*-ТИП



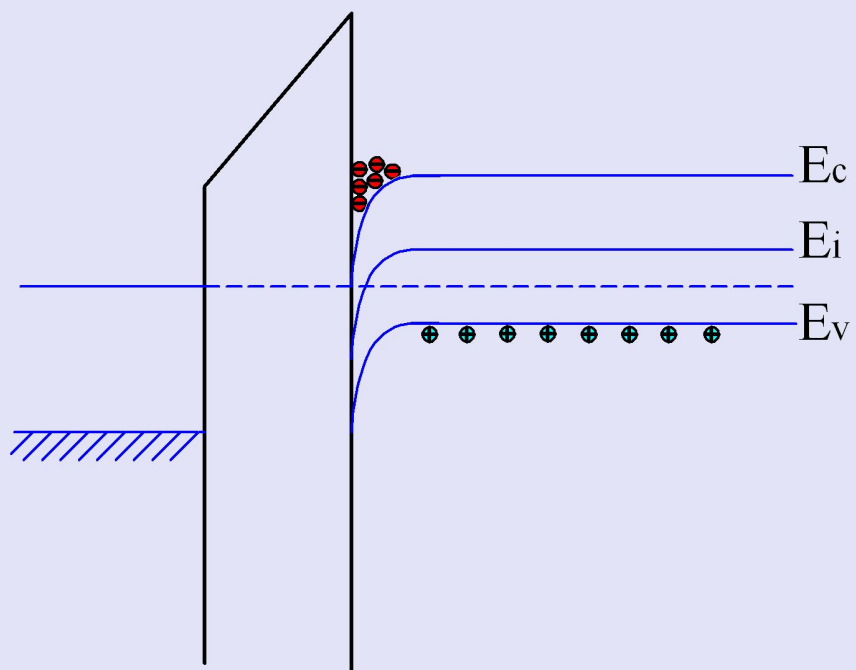
*n*-ТИП



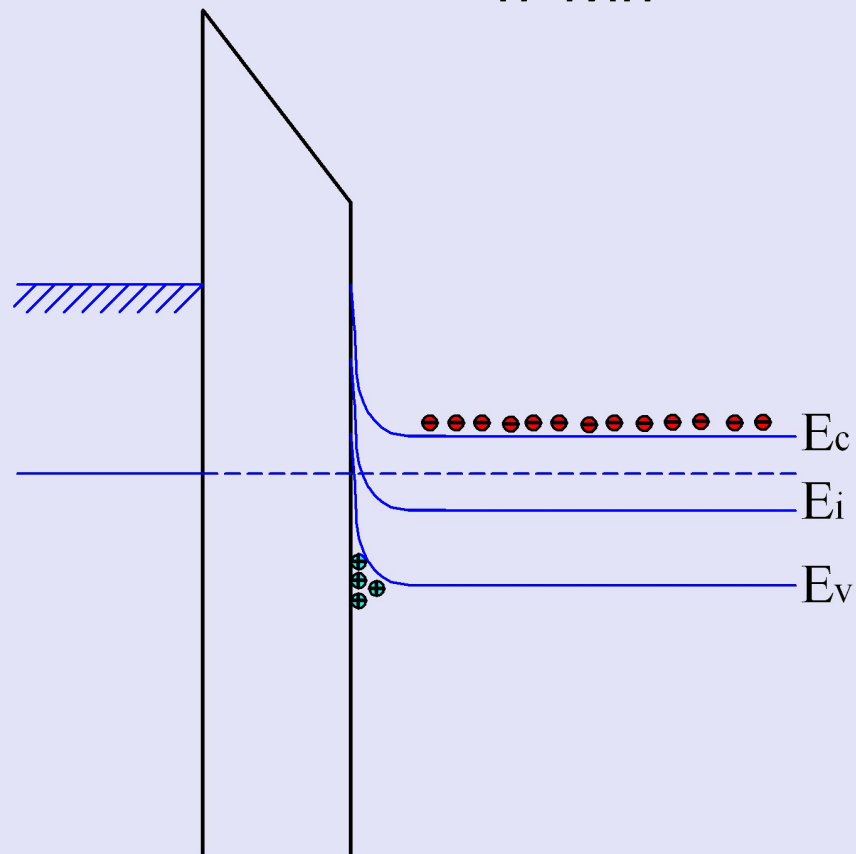


# Инверсия

*p*-тип



*n*-тип

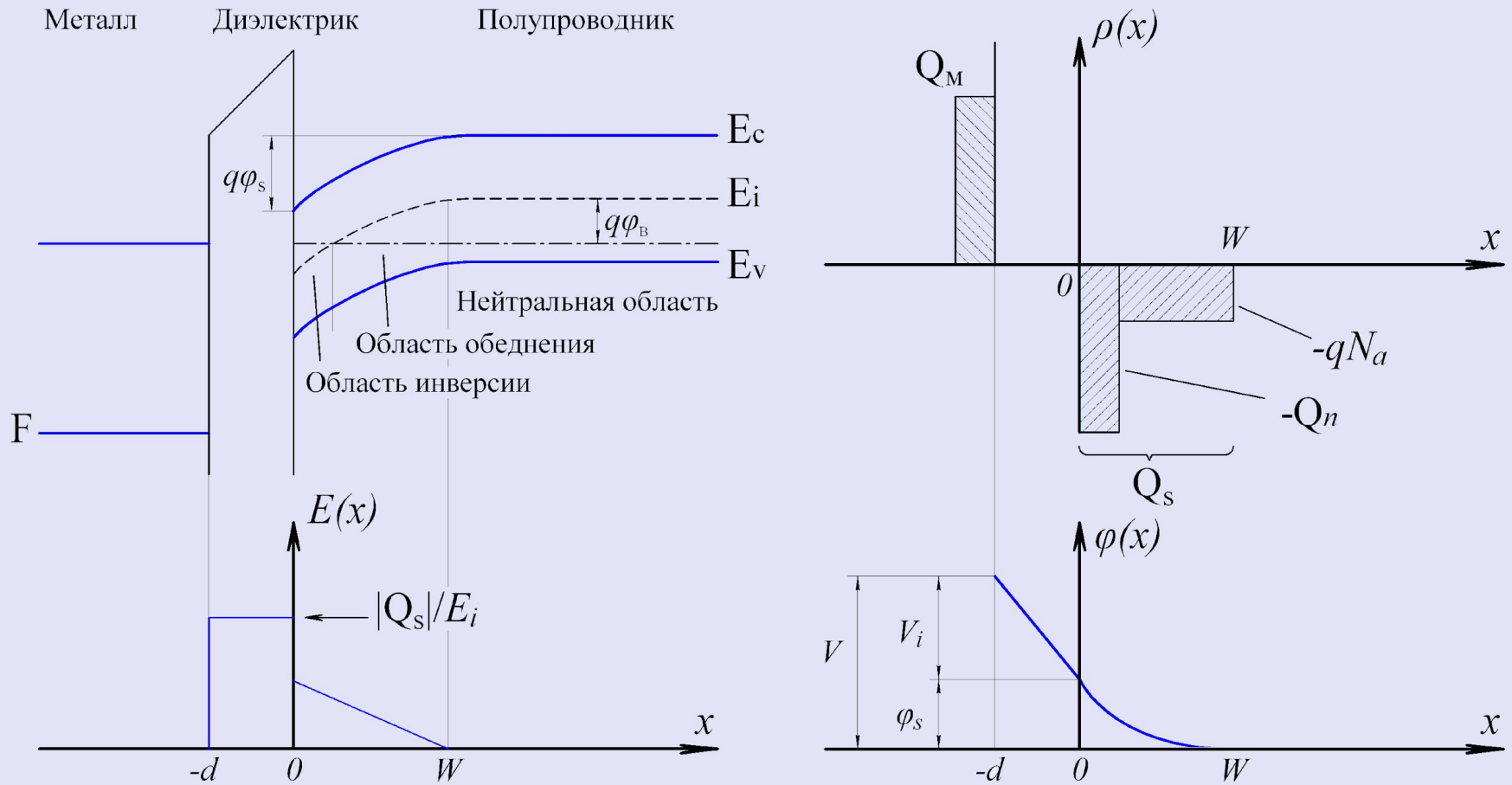


# Допущения для «идеальной» МДП-структуры

- Разность работ выхода между металлом затвора и диэлектриком, диэлектриком и полупроводником, равна нулю.
- Диэлектрик является идеальным изолятором.
- В диэлектрике и на границах раздела металл-диэлектрик и полупроводник-диэлектрик нет никаких зарядов, т.е. диэлектрик не имеет дефектов.

При любых смещениях в структуре могут существовать только заряд в ее полупроводниковой части и равный ему заряд противоположного знака на металлическом электроде, отделенном от полупроводника слоем диэлектрика.

# МДП-структура



Для характеристики изгиба будем использовать понятие *поверхностного потенциала*  $\phi_s$

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

$$\phi = 0 \quad \frac{d\phi}{dx} = 0 \quad \text{при } x = w$$

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

# Расчет параметров

Для n-типа: 
$$\varphi_{ms} = \varphi_m - \varphi_s = \varphi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \varphi_B\right) = 0 \quad (10.8)$$

Для p-типа: 
$$\varphi_{ms} = \varphi_m - \varphi_s = \varphi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \varphi_B\right) = 0, \quad (10.9)$$

где  $q \cdot \phi_B = (F - E_i)$

$$n(x) = n_i \cdot \exp\left(\frac{F - E_i}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (\phi_F - \phi_i)}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{\phi_B}{\phi_T}\right) \quad (10.10)$$

$$p(x) = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_i - F}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (\phi_i - \phi_F)}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(-\frac{\phi_B}{\phi_T}\right) \quad (10.11)$$

Для n-типа: 
$$\varphi_B = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (10.12)$$

Для p-типа: 
$$\varphi_B = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (10.13)$$

# К расчету МДП-структуры

$$n(x) = n_i \cdot \exp\left(\frac{F - E_i}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (\phi_F - \phi_i)}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{\phi_B}{\phi_T}\right) \quad (4.6)$$

$$p(x) = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_i - F}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{q \cdot (\phi_i - \phi_F)}{kT}\right) = n_i \cdot \exp\left(-\frac{\phi_B}{\phi_T}\right) \quad (4.7)$$

где  $\phi_F = F/q$  – потенциал уровня Ферми,  $\phi_i = E_i/q$  – потенциал собственного полупроводника

Для p-типа:

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (4.8)$$

Для n-типа:

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (4.9)$$

В приповерхностной области:

$$p_p(x) = p_{p0} \cdot \exp\left(-\frac{\phi(x)}{\phi_T}\right) \quad (4.10)$$

$$n_p(x) = n_{p0} \cdot \exp\left(\frac{\phi(x)}{\phi_T}\right) \quad (4.11)$$

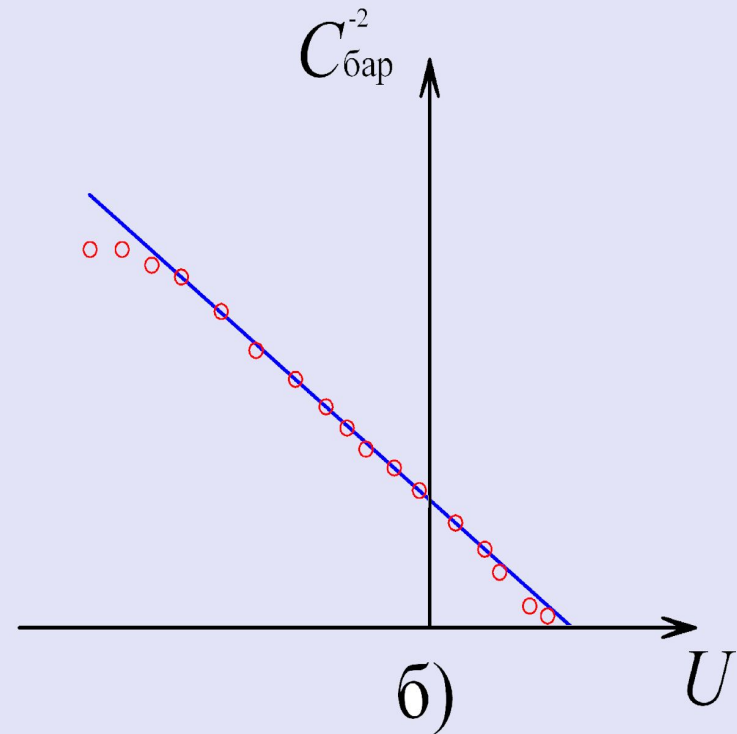
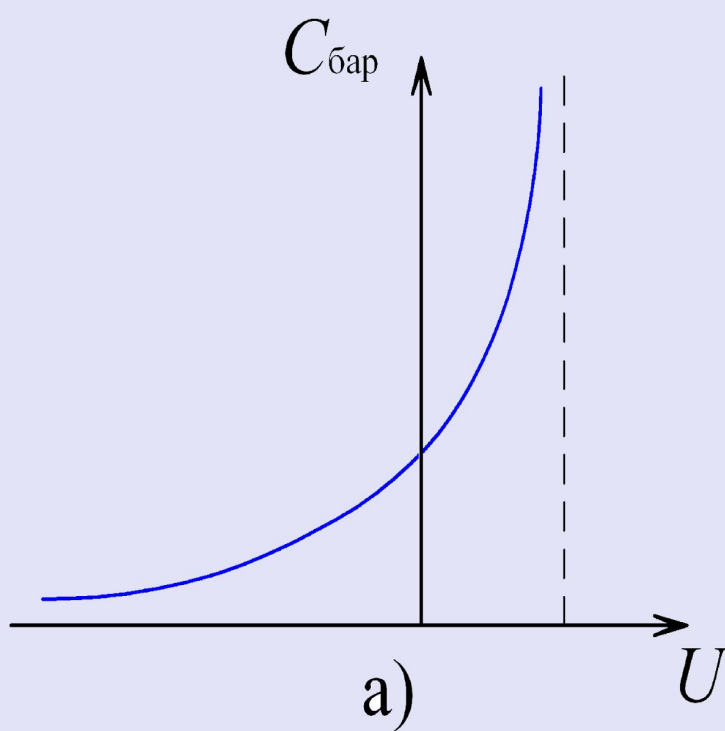
$$\text{Ширина ОПЗ} - w = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s \cdot \phi_s}{q \cdot N_a^-}} \quad (4.12)$$

# Емкость барьера Шоттки

$$C = S \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot q \cdot N_d}{2(\varphi_k - V_{\text{см}})}} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{L}$$

$$\varphi_k - V_{\text{см}} = \frac{q \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_d \cdot S^2}{2C^2}$$

# Емкость $p$ - $n$ -перехода



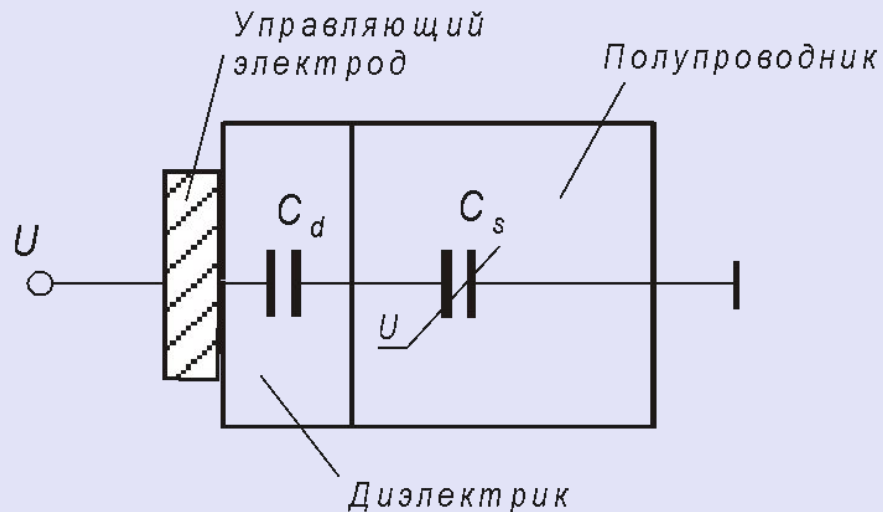
$$C_{\text{бар}} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s \cdot S}{W(V_{\text{см}})} = S \cdot \sqrt{\frac{q \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s}{2 \cdot (\phi_k - V_{\text{см}})} \cdot \frac{N_d \cdot N_a}{N_d + N_a}}$$



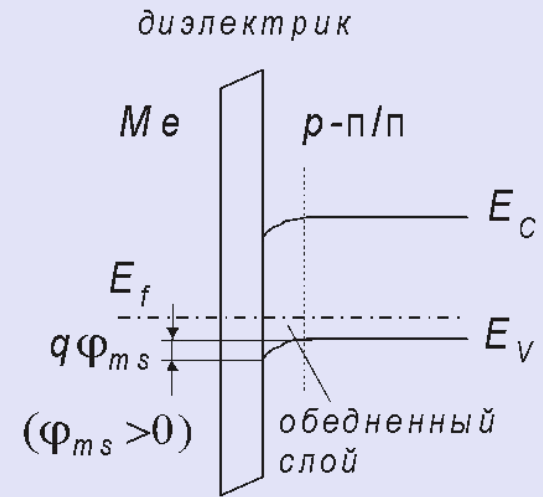
# Диффузионная емкость $pn$ - перехода

$$C_{\text{диф}} = \frac{(I_p \tau_p + I_n \tau_n)}{\phi_T} = S \frac{j_p \tau_p + j_n \tau_n}{\phi_T}$$

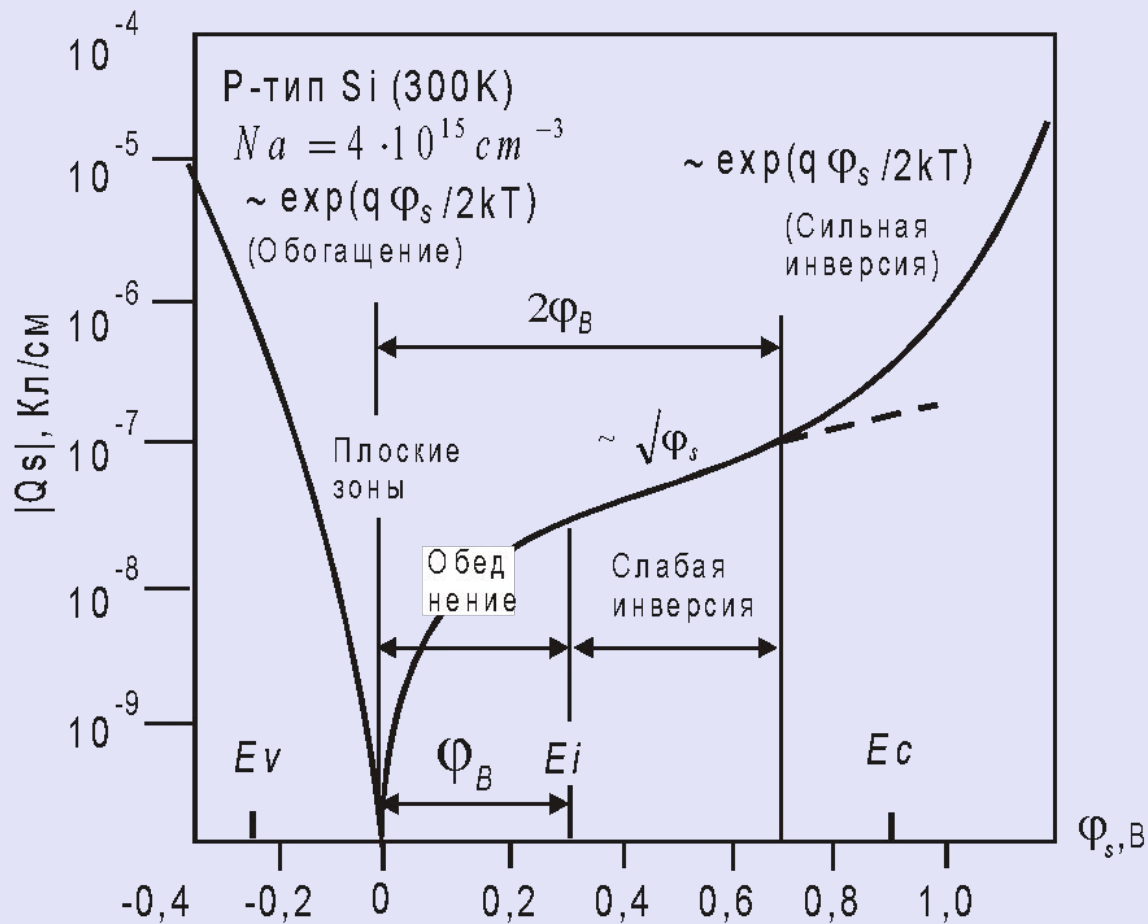
# Емкость МДП-структуры



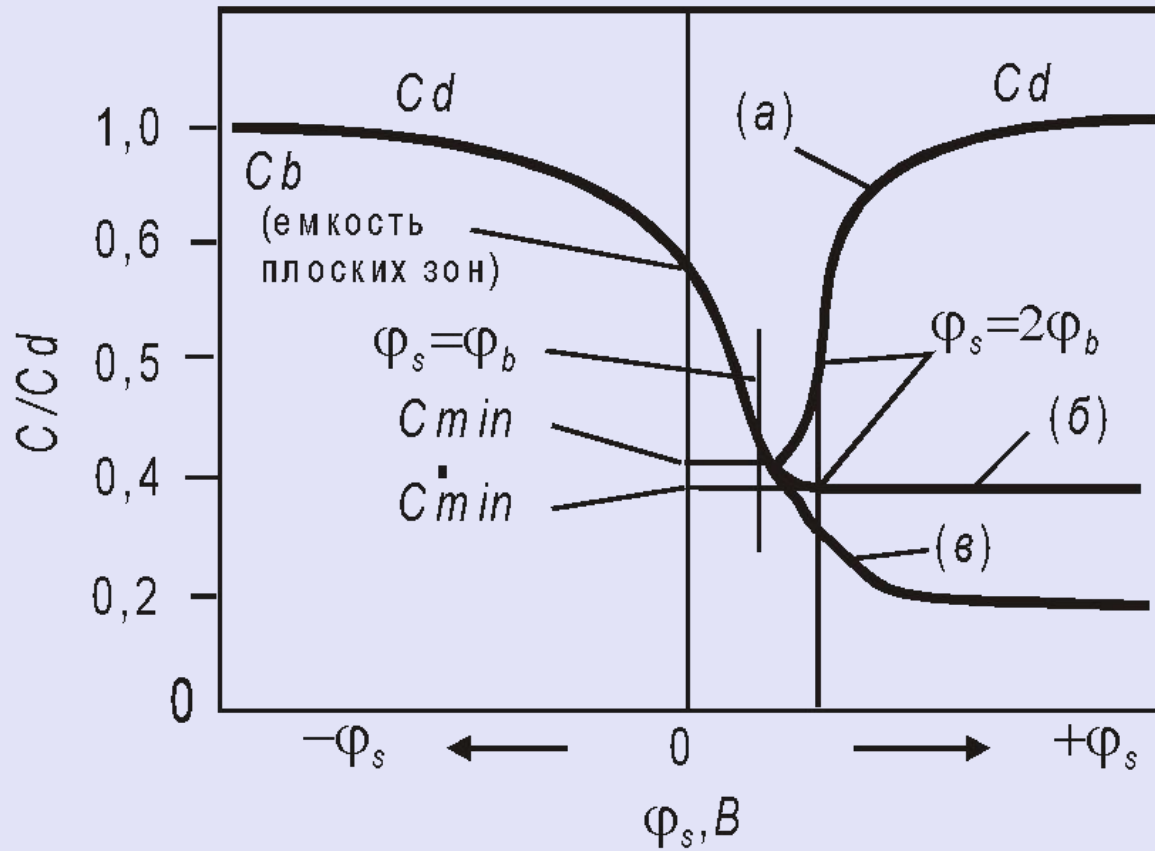
а)



б)



# C-V-характеристики идеальной МДП-структуры



# Заряды в окисле

