

# Лекция 6

## Основы микроэлектроники

Контактная разность потенциалов, Термоэлектронная эмиссия,  
Диод Шотки, Электронно-дырочный переход,  
Биполярные и полевые транзисторы

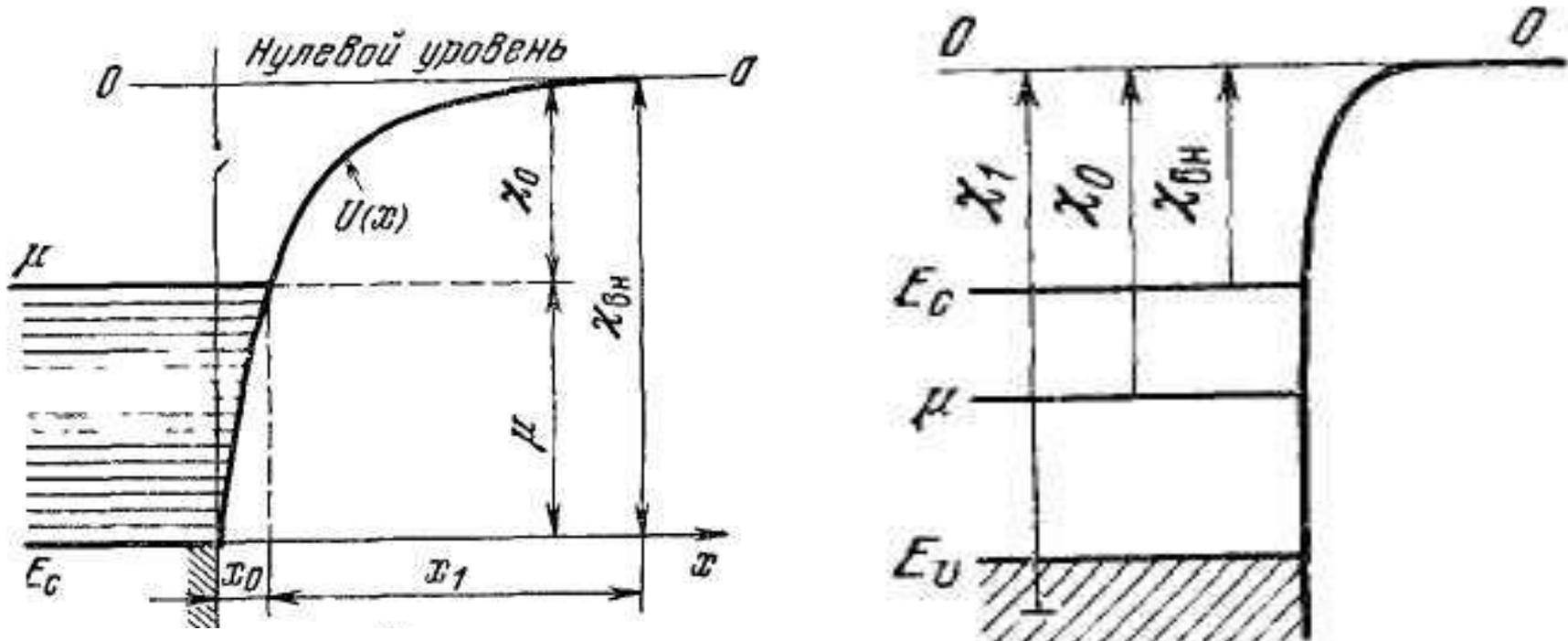
лектор:  
Колосько Анатолий Григорьевич  
( [agkolosko@mail.ru](mailto:agkolosko@mail.ru) )

# Контактная разность потенциалов

Изменение потенциальной энергии электрона  $U(x)$  с удалением его от поверхности

металла ( $E_F$  выше  $E_c$ ):

полупроводника ( $E_F$  ниже  $E_c$ ):



Работы выхода электронов из вещества:

$\chi_0$  — термодинамическая работа выхода (с уровня Ферми)

$\chi_{вн}$  — внешняя работа выхода (со дна зоны проводимости)

$\chi_1$  — работа выхода из глубины валентной зоны

# Термоэлектронная эмиссия

При повышении температуры  $T$  появляются электроны, обладающие кинетической энергией, превышающей высоту потенциального барьера выхода электрона ( $\chi_0$ ).

Такие электроны способны выходить из вещества («испаряться»).

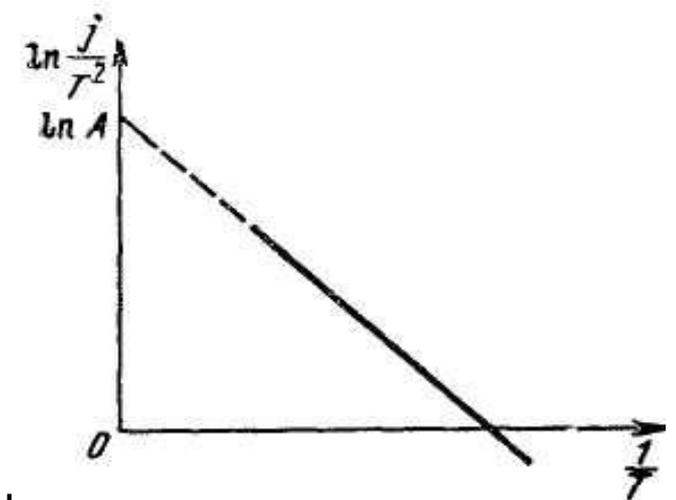
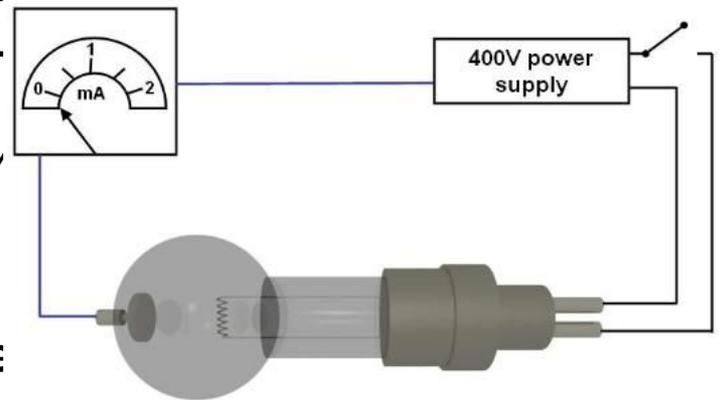
Это явление получило название **термоэлектронной эмиссии**.

Поместив вблизи нагретого металла проводник и создав между ними электрическое поле, можно получить термоэлектронный ток с плотностью  $j$ , которая согласно формуле Ричардсона-Дешмэ

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{\chi_0}{kT}\right)$$

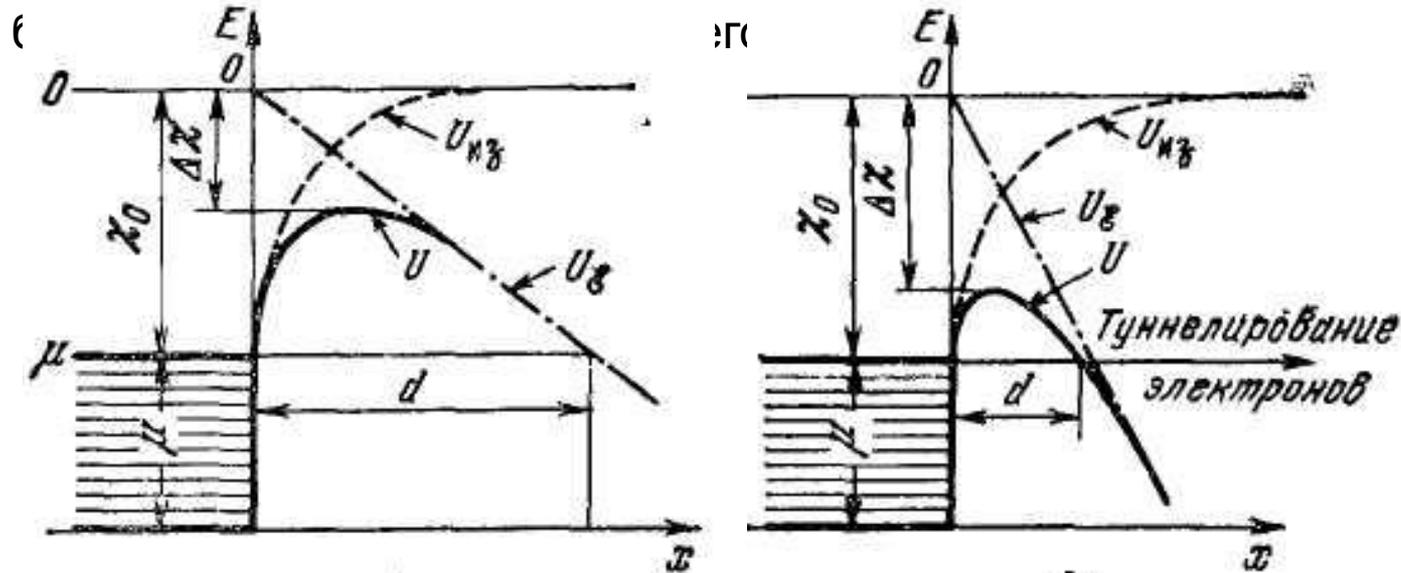
зависит от температуры  $T$  по закону Ричардсона.

Из экспериментальной прямой  $\ln(j/T^2)(1/T)$  можно найти термодинамическую работу выхода  $\chi_0$  и коэф.  $A$ .



# Эффект Шоттки

Электрическое поле  $E$  ускоряет электроны у поверхности вещества, уменьшая ЭТИМ потенциальную энергию выхода  $\chi_0$  на величину  $\Delta\chi$ . Это понижение потенциального



Шоттки.

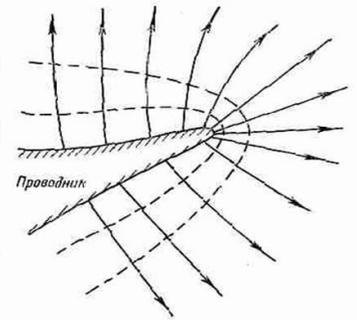
Ускоряющее электроны поле  $E$  вызывает не только понижение потенциального барьера, но и уменьшение его толщины  $d$ .

Поэтому в сильных электрических полях электроны получают шанс туннелировать

под барьером, и возникает туннельный эмиссионный ток т.н. автоэмиссия

# Автоэлектронная эмиссия

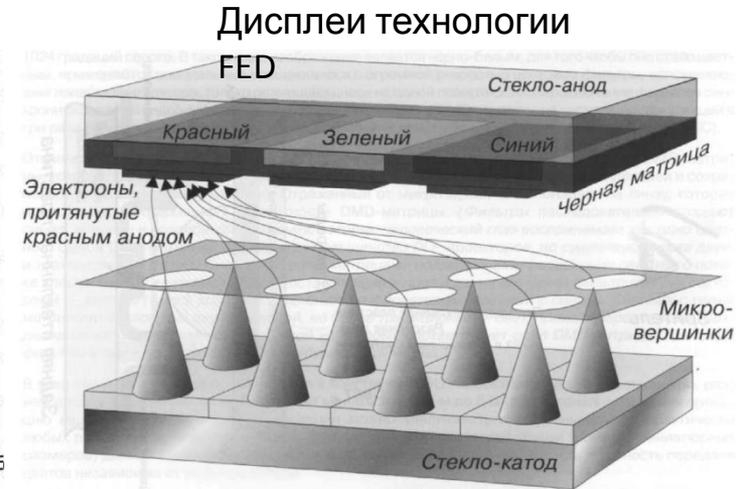
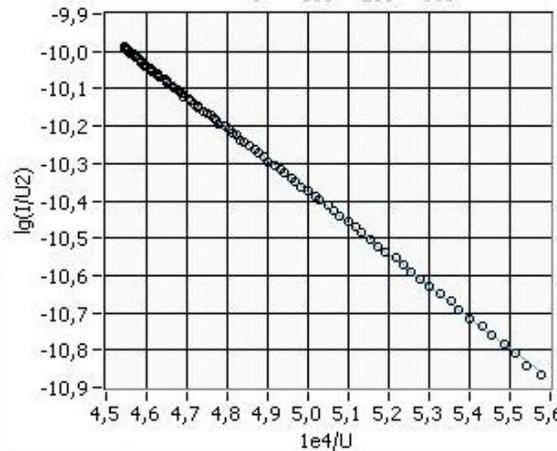
Усиление эл. поля на остриях вызывает понижение потенциальн  
барьера и создаёт туннельный ток по закону Фаулера-Нордгей



$$i = A \cdot E^2 \cdot \exp \frac{-B \cdot \varphi^{3/2}}{E}$$

$i$  — плотность тока эмиссии,  
 $E$  — поле на острие,

уменьшение работы выхода



Для массива эмиттеров ВАХ можно построить в координатах Фаулера-Нордгейма:

$$\lg \frac{I}{U^2} = (\lg S \cdot A \cdot \beta^2 / d^2) \cdot \frac{1}{U} \psi \left( \frac{B \cdot d}{\beta} \right)$$

$\beta$  - коэффициент усиления  
 $U$  - приложенное напряжение,  
 $I$  - общий ток,  
расстояние м/у анодом и катодом.

$$\beta = E_{\text{острия}} / E_{\text{уанода}}$$

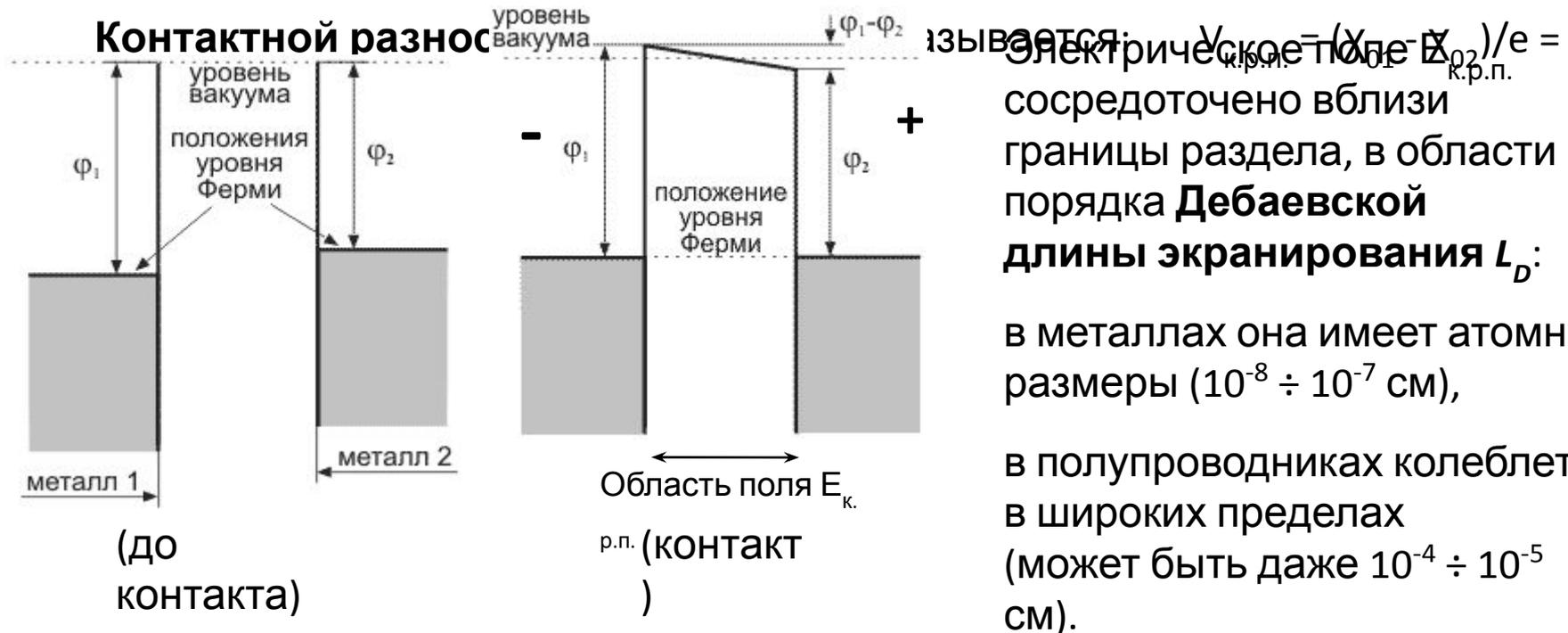
$$U = E_{\text{уанода}} \cdot d$$

$$I = i \cdot S_{\text{эмиссии}}$$

# Контактная разность потенциалов

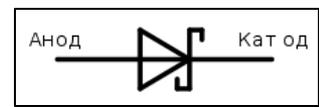
При соприкосновении проводников между ними происходит обмен электронами:

и переходят из проводника с меньшей работой выхода  $\chi_0$  в проводник с большей.



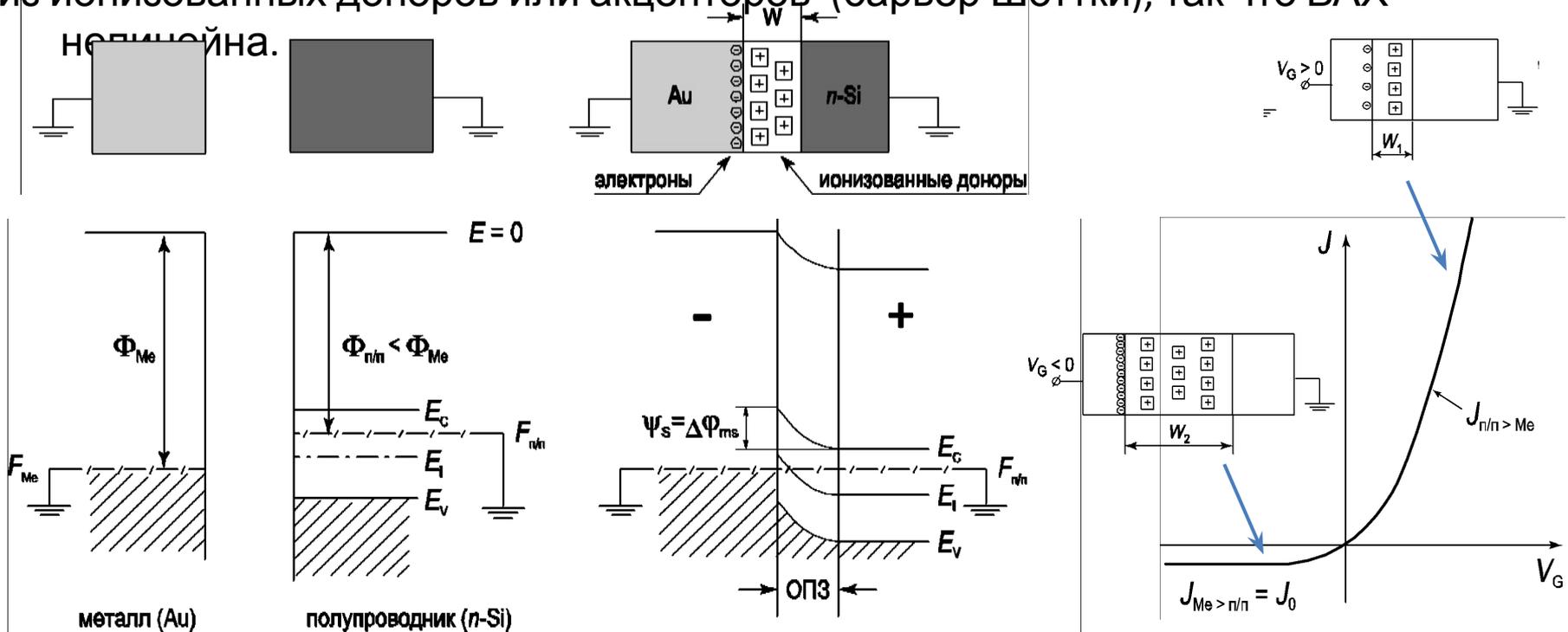
**Длина экранирования** обратно пропорциональна концентрации электронов  $n$ , поэтому из двух тел  $V_{к.р.п.}$  приходится на проводник с бо́льшим сопротивлением  $\rho$ .

# диод Шоттки (Вальтер Шоттки, 1939 г.)



Диод состоит из контакта металл-полупроводник n или p типа. В результате перетекания электронов в п/п формируется область пространственного заряда (ОПЗ)

из ионизованных доноров или акцепторов (барьер Шоттки), так что ВАХ



$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 (\Delta\phi_{ms} - V_G)}{qN_D}} \Rightarrow J = J_{n/n \rightarrow M} - J_{M \rightarrow n/n} = \frac{1}{4} qn_s v_0 (e^{\beta V_G} - 1)$$

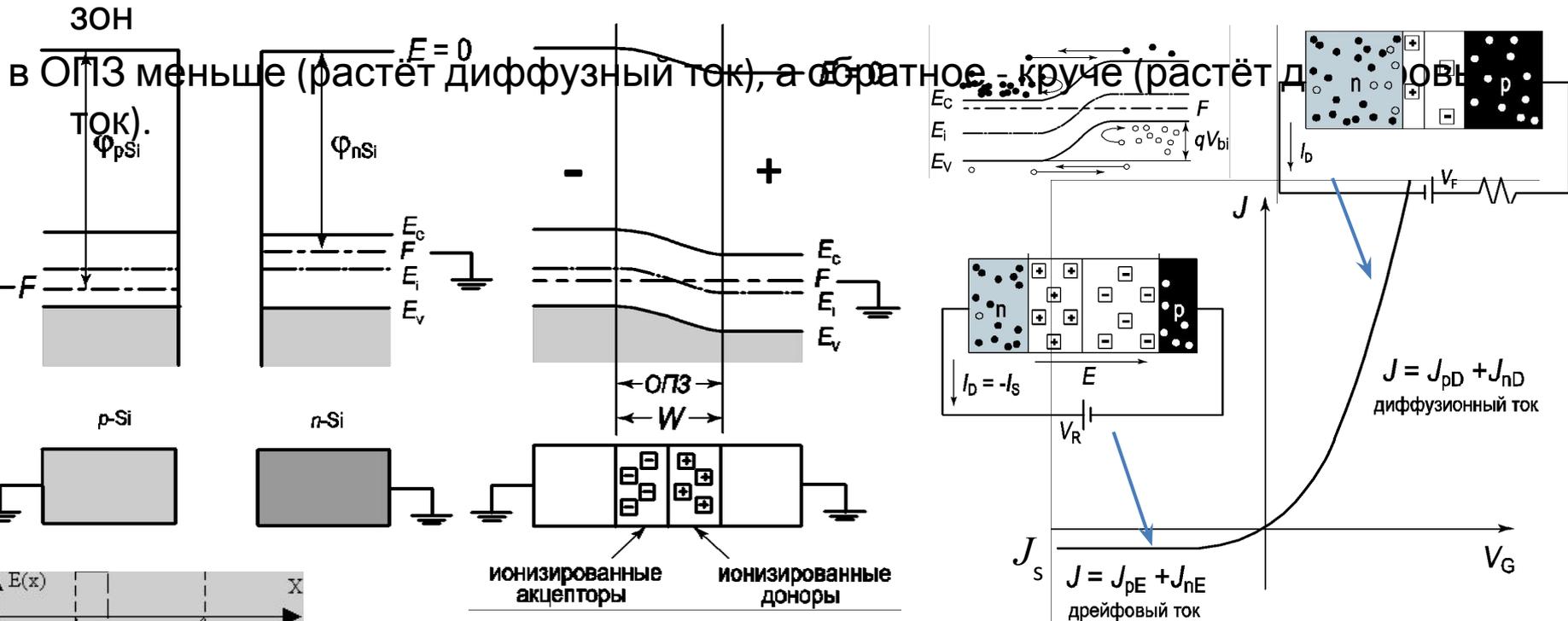
W зависит от

напряжения  $V_G$ :

( $\epsilon_s$  - диэлектрическая проницаемость п/п,  $q$  - заряд электрона,  $N_D$  - концентрация доноров,  $v_0$  - тепловая скорость,  $n_s$  - концентрация электронов в p-область)

# Электронно-дырочный переход (p-n переход)

Образуется контактом двух п/п - n и p типа. Дрейфовый ток, вызванный внутренним эл. полем между + и - примесями, конкурирует с диффузным током (падение электронов в зонной диаграмме). Напряжение прямого смещения делает изгиб



$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 \Delta\phi_0}{e} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \quad J = \left( \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \right) (e^{BU} - 1) = J_s (e^{BU} - 1)$$

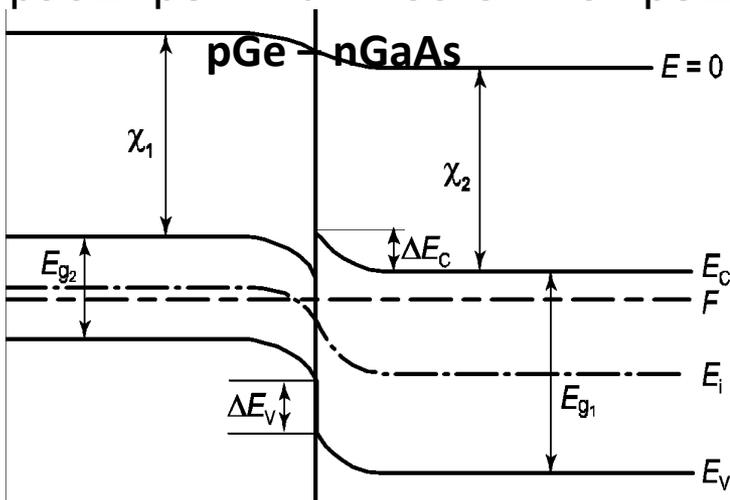
( $\epsilon_s$  - диэлектрическая проницаемость п/п,  $\Delta\phi$  - высота потенциального барьера,  $D_n$  - дебаевская длина экранирования,  $D$  - коэффициент диффузии носителей заряда)

# Гетеропереходы

**Гетеропереход** – контакт двух п/п различного вида и разного типа проводимости.

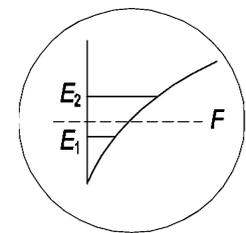
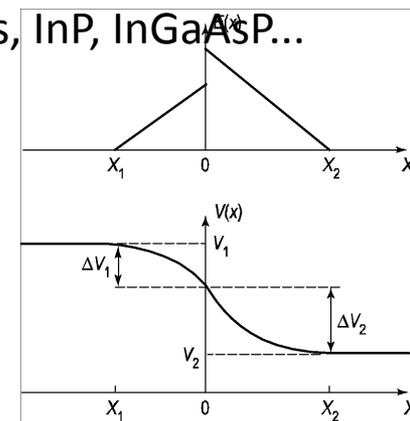
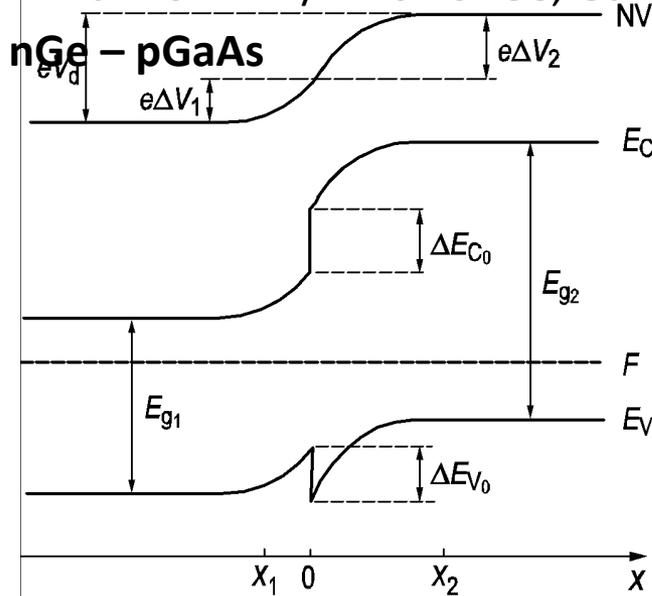
Необходимо, чтобы у них с высокой точностью совпадали температурный коэффициент

расширения  $\alpha$  и постоянная решётки  $a$ . Таких п/п мало: Ge, GaAs, InP, InGaAsP...



$$\alpha_{pGe} = 5,654 \text{ A}, \alpha_{nGaAs} = 5,658 \text{ A}$$

$$\alpha_{pGe} = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \alpha_{nGaAs} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$



$$J = J_s (e^{BV} - 1)$$

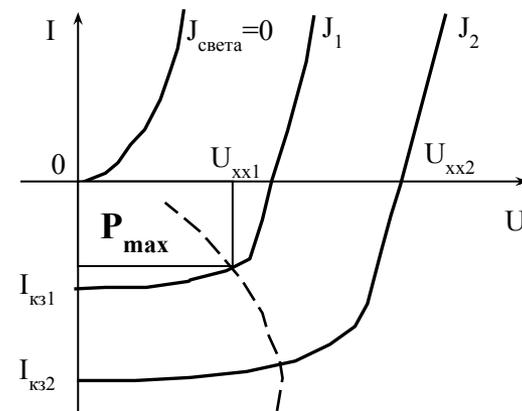
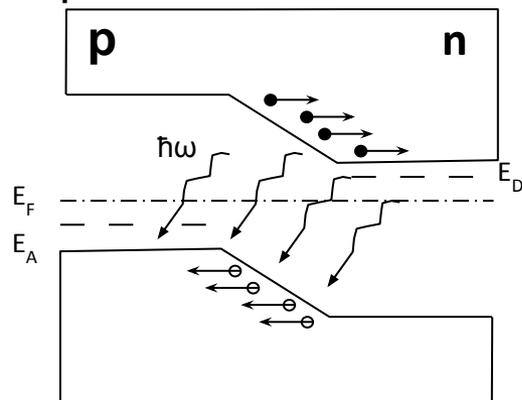
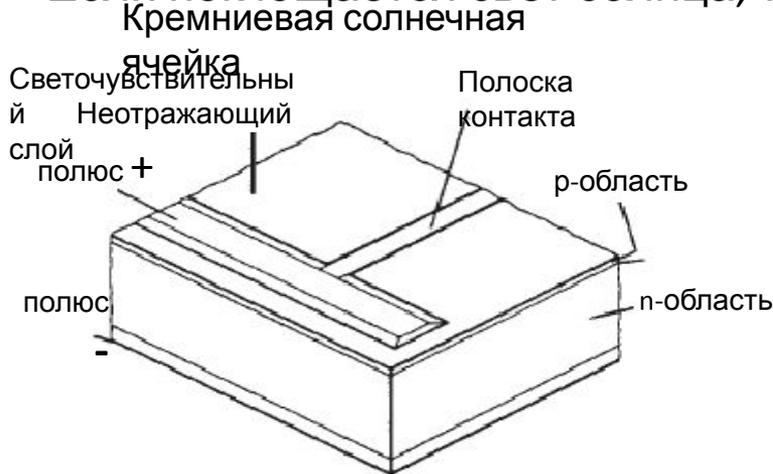
**Требования к построению зонной диаграммы:**

1. Уровень вакуума  $E = 0$  непрерывен.
2. Электронное сродство в пределах одного сорта п/п  $\chi_{Ge}$  и  $\chi_{GaAs}$  постоянно.

# Фотоэлемент

Фотоэлемент - источник электропитания, поглощающий свет внешних источников.

Если поглощается свет солнца, то фотоэлемент называется солнечной



$$j = j_n + j_p - eg \quad I_{кз} \sim g = \eta \cdot \alpha \cdot J \quad \eta = P_{max} / P$$

$g$  - число  $e^-h^+$ , родившихся на  $1\text{cm}^2$  p-n перехода за 1с,  $\alpha$  – показатель поглощения,

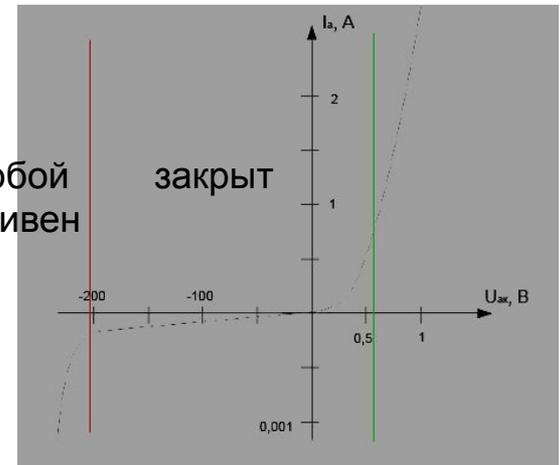
$J$  – интенсивность света,  $\eta$  – внутренний квантовый выход ( $\eta_{\text{кремниевых фотодиодов}} \sim 100\%$ ).

Кванты света генерируют  $e^-h^+$  пары - неравновесные носители заряда, а диффузия и

# Типы диодов



пробой активен



## Стабисторы

Используют участок ВАХ, соответствующий «прямому напряжению» на диоде.

## Стабилитроны (диод Зенера)

Используют обратную ветвь ВАХ диода с **обратимым пробоем** для стабилизации  $U$ .

## Туннельные диоды (диоды Лео Эсаки)

Используют квантовые эффекты: область «отрицательного сопротивления» на ВАХ.

## Варикапы (диоды Джона Джеумма)

Запертый p-n переход обладает большой ёмкостью, которая зависит от обратного  $U$ .

Применяются в качестве конденсаторов переменной ёмкости.

## Светодиоды (диоды Генри Раунда)

При рекомбинации электронов и дырок в области p-n перехода излучают свет, существуют диоды, излучающие в видимом, ИК и даже УФ диапазоне волн.

# Типы диодов

## Фотодиоды

Запертый фотодиод, который открывается под действием света.

## Солнечный элемент

Падающий на p-n-переход свет вызывает движение электронов и генерацию тока.

## Диоды Ганна

Используются для генерации и преобразования колебаний  $U$  в СВЧ диапазоне.

## Диод Шоттки

Диод с малым падением напряжения при прямом включении  $< 0,4$  В (p-n диод  $> 0,6$  В)

## Лавинный диод

Основан на лавинном пробое обратного участка ВАХ: защита от перенапряжений.

## Лавинно-пролётный диод

Применяется для генерации колебаний в СВЧ-технике.

## Магнитодиод

ВАХ зависит от величины и ориентации магнитного поля относительно p-n перехода

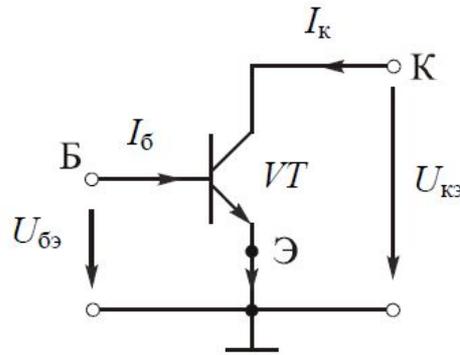
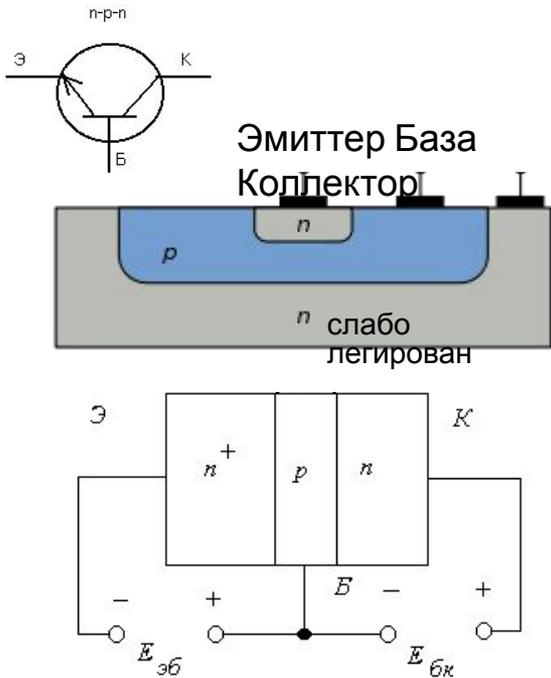


## Смесительный диод

Перемножает два высокочастотных сигнала.

## pin диод

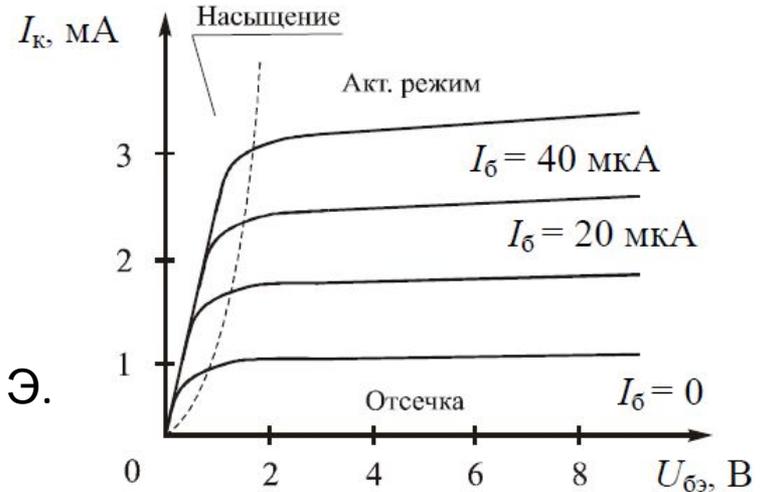
# Биполярный транзистор



Включение с общим Э.

$$I_{э} = I_{э0} e^{U_{бэ}/Vt}$$

( $I_{э0}$  - ток утечки при  $U_{бэ} = 0$ ,  $Vt = kT/q$  - "термическое напряжение")



В активном режиме эмиттерный p-n "смещён" в прямом направлении => через него

течёт большой ток. В базе электрического поля нет ( $U_{эб} < 1$  В, а  $d_{эб}$  большое), зато

толщина базы меньше диффузионной длины электронов ( $< 10$  мкм), поэтому электроны, попавшие в неё через эмиттерный p-n, диффундируют ко второму p-n ,

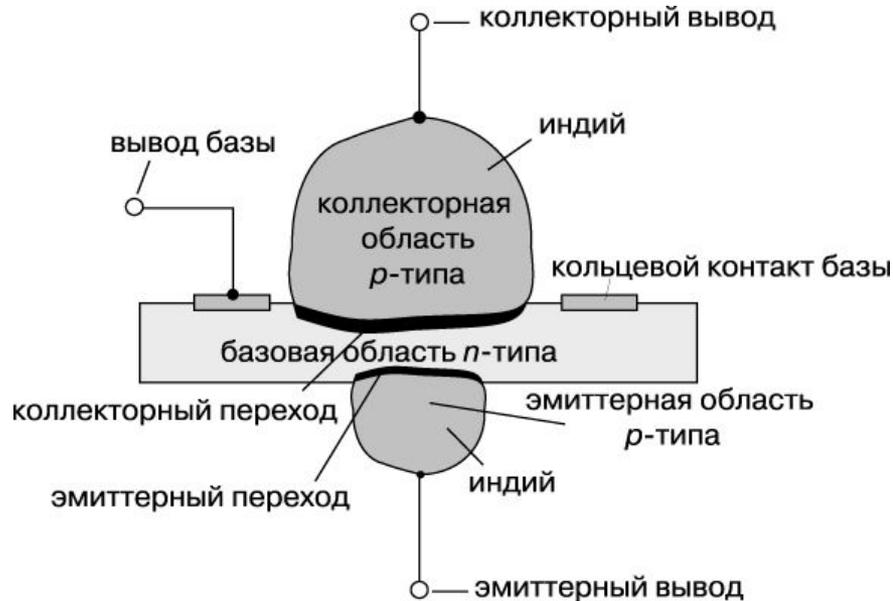
где сильное электрическое поле втягивает их в коллектор, так что через

коллекторный p-n, "смещённый" в обратном направлении!, тоже течёт ток:  $I_{э} \approx$

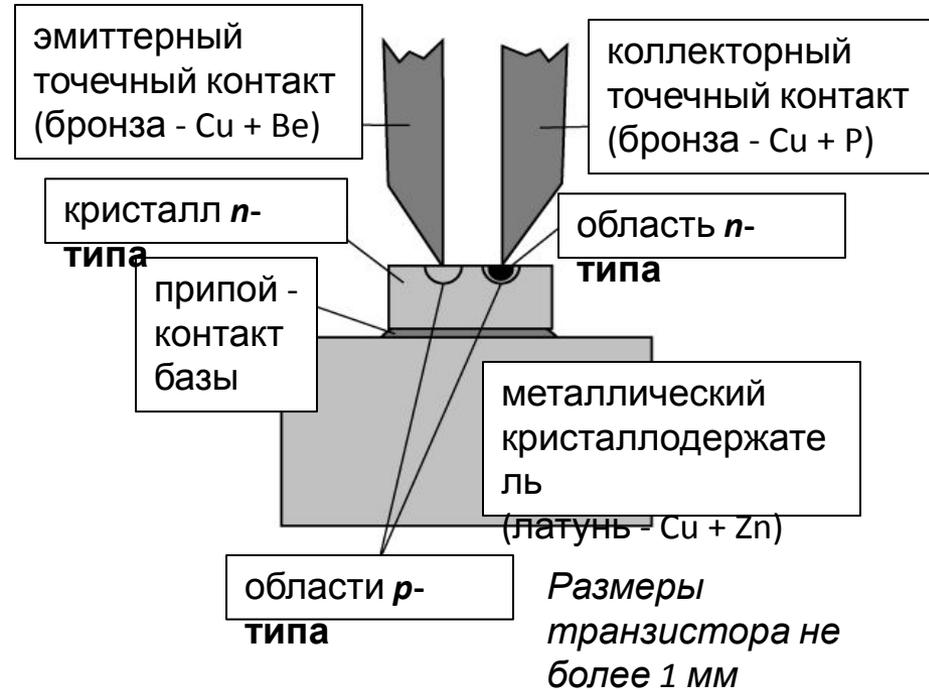
$I_{к}$ .

# Создание транзисторов

## Сплавной плоскостной транзистор



## Точечный транзистор

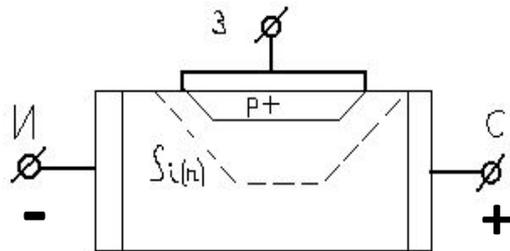


## Методы получения p-n переходов:

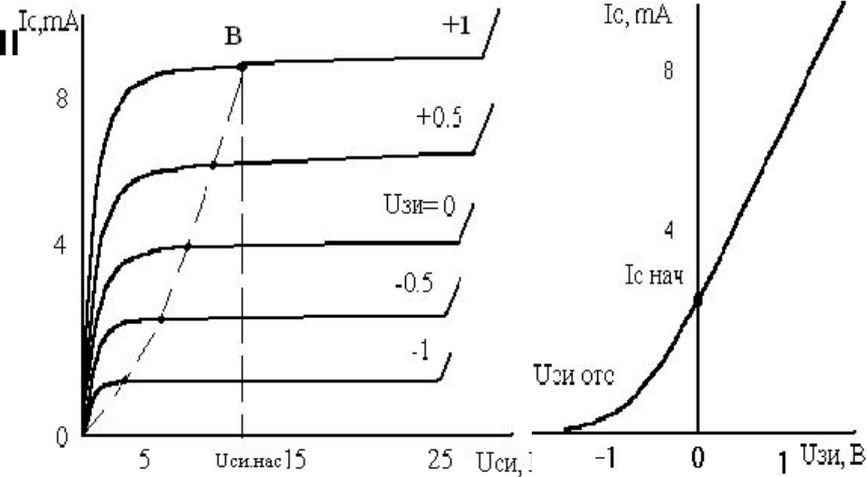
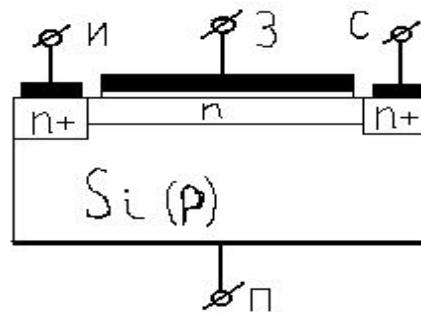
1. Метод вытягивания: в процессе вытягивания п/п монокристалла из расплава В него вводят сначала примесь n-типа, а затем p-типа.
2. Диффузионный метод: диффузия акцепторной примеси в донорный п/п.
3. Эпитаксиальный метод: осаждение на n-Si монокристаллической плёнки p-Si.
4. Метод ионного легирования: поверхностный слой полупроводника n-типа легируется ионным пучком примесью p-типа.

# Полевой транзистор

С управляющим р-п переходом



С изолированным затвором



При подключении к истоку (И) отрицательного  $\phi^-$ , а к стоку (С) – положительного  $\phi^+$

в канале возникает электрический ток. При этом затвор (З) электрически отделен от канала либо "обратно смещённым" (запертым) р-п переходом, либо тонким слоем

диэлектрика (структура МДП - металл диэл. полупроводник), обычно это  $\text{SiO}_2$  (МОП).

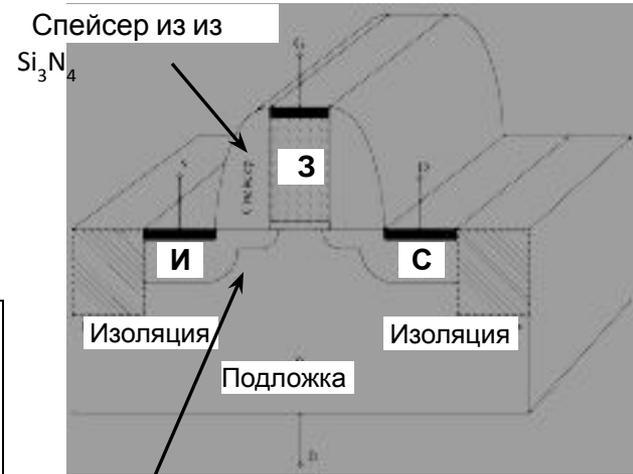
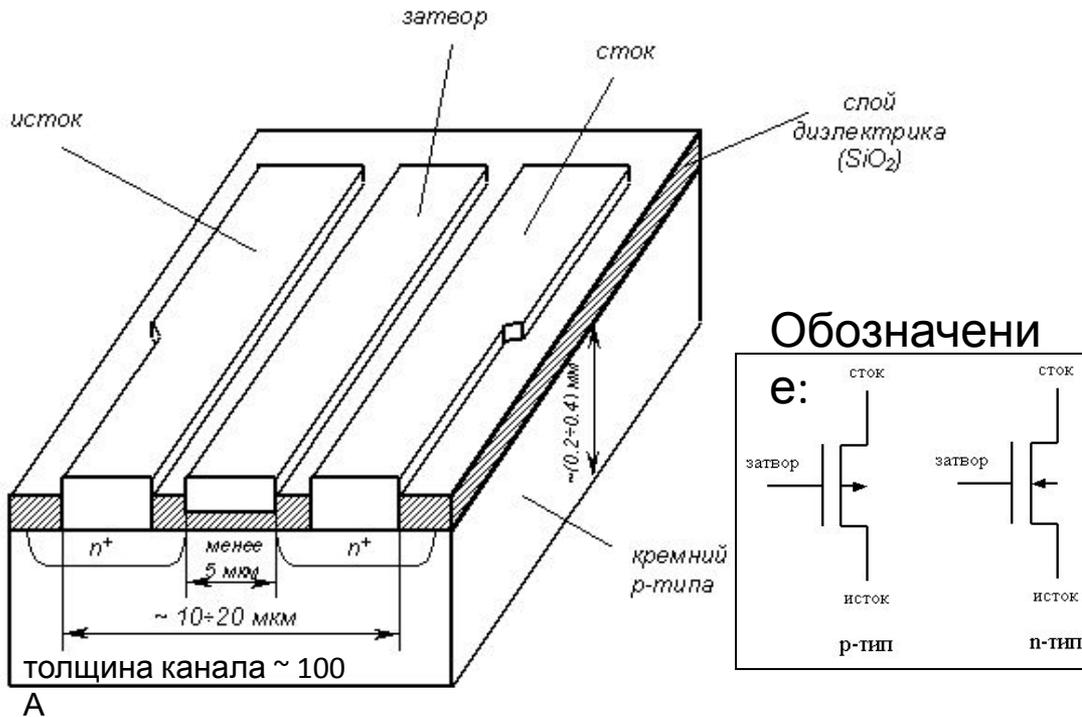
Электрическое поле между затвором и каналом меняет плотность  $e$  в канале, т. е.  $I_{C-И}$ .

**Индукцированный канал МДП:** проводящий канал И-С появляется при  $U_{З-И} > U_{\text{пороговое}}$

# Технология МОП транзисторов

Подвижности  $\mu_n/\mu_p \approx 2,5$ , поэтому n-транзисторы лучше р-транзисторов.

Структура n-канального МОП транзистора: **LDD структура (Lightly Doped)**



Слабелегированные области с плавным р-п переходом удлиняют И и С в сторону канала, повышая  $U_{\text{пробоя}}$ .

Изготовление МОП много проще биполярных, к тому же МОП могут использоваться

как резисторы и конденсаторы, т.е. на них можно реализовать все схемные функции.

МОП:  $I_{\text{д}} = 5 \text{ мкА}$ ,  $R_{\text{д}} = 106 \text{ Ом}$ ,  $R_{\text{з}} = 1012 \text{ Ом}$ ,  $R_{\text{г}} \sim 100 \text{ Ом}$ ,  $C_{\text{г}} = 10 \text{ пФ}$ .

**Последний слайд**

**До**

**свидания!**