

Лекция 6

Основы микроэлектроники

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

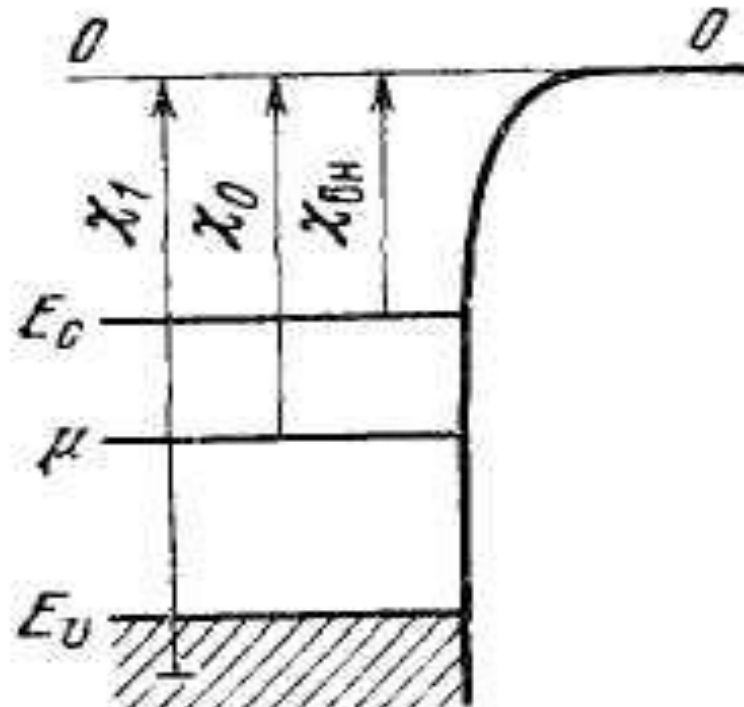
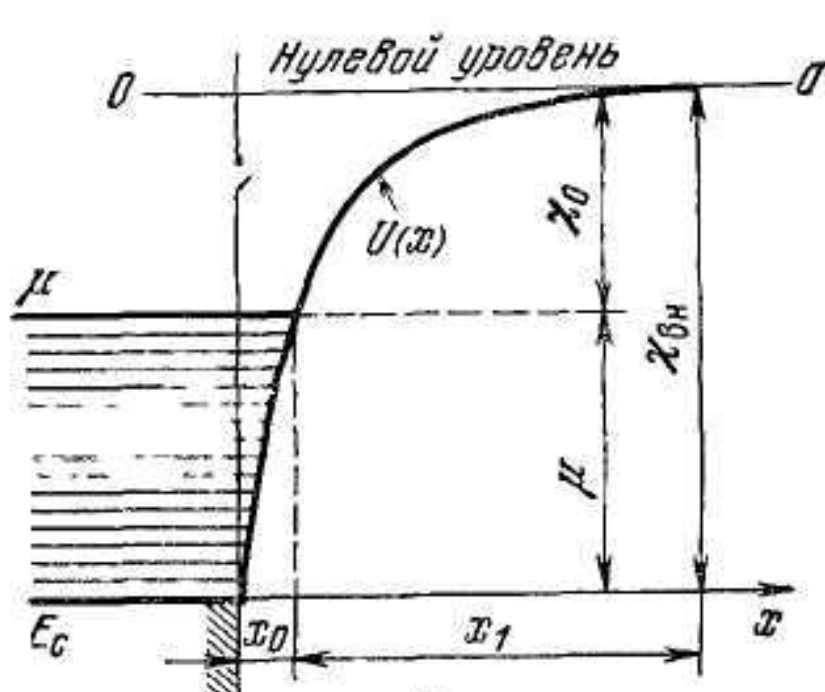
лектор:
Колосько Анатолий Григорьевич
(agkolosko@mail.ru)

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:

χ_0 — термодинамическая работа выхода (с уровня Ферми)

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

χ_1 — работа выхода из глубины валентной зоны

Термоэлектронная эмиссия

При повышении температуры T появляются электроны, обладающие кинетической энергией, превышающей высоту потенциального барьера выхода электрона (χ_0).

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

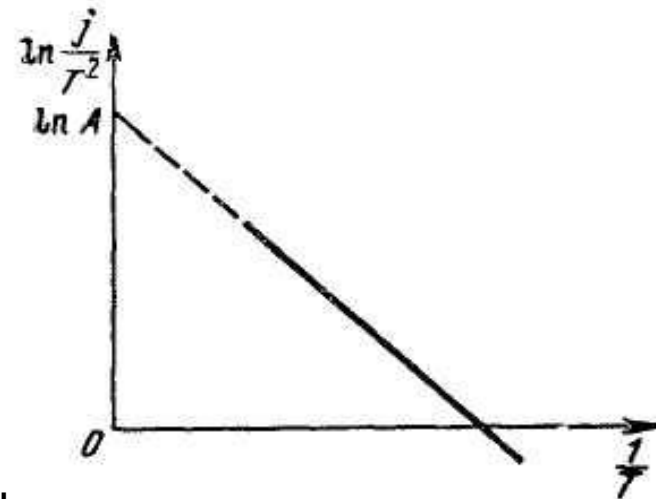
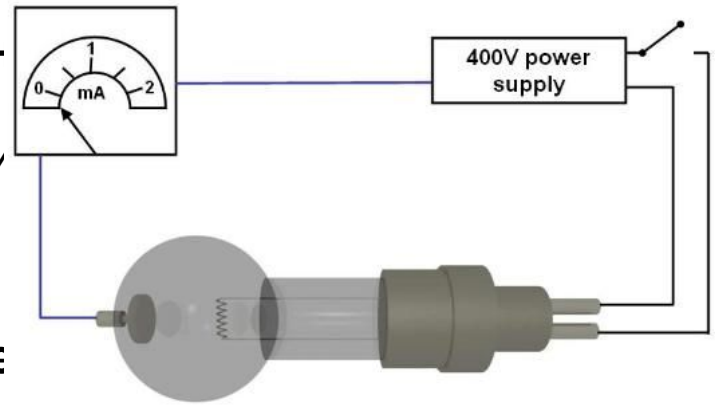
Это явление получило название **термоэлектронной эмиссии**.

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

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

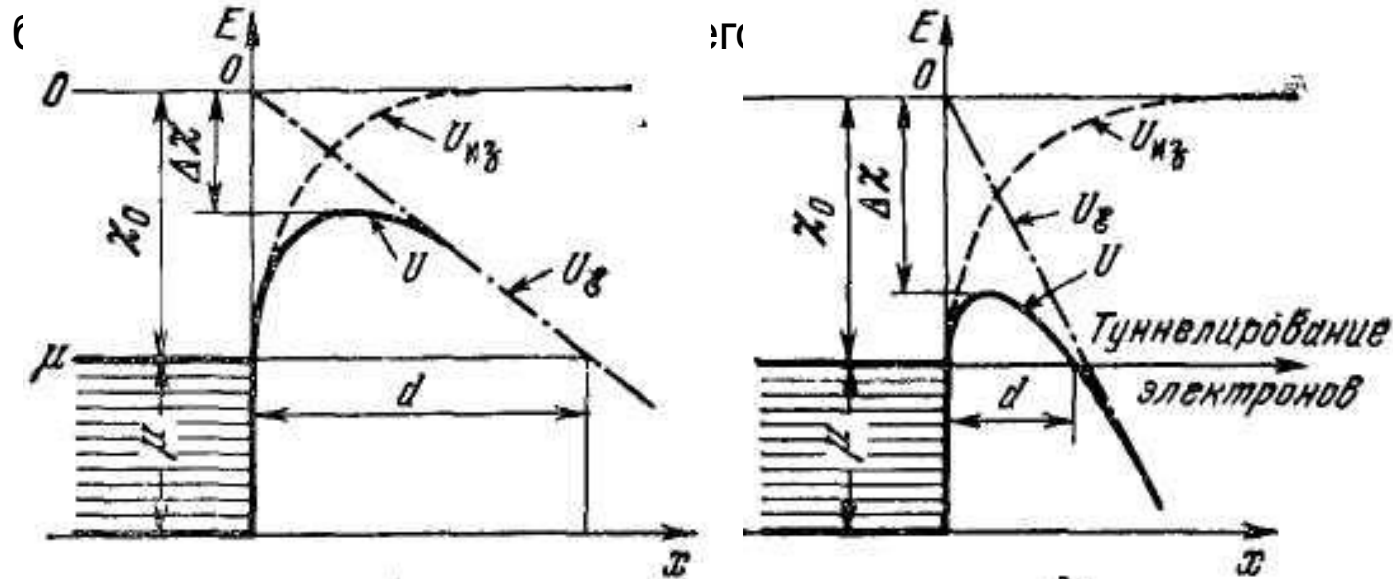
зависит от температуры T по закону Ричардсона.

Из экспериментальной прямой $\ln(j/T^2)(1/T)$ можно найти термодинамическую работу выхода χ_0 и коэф. A .



Эффект Шоттки

Электрическое поле E ускоряет электроны у поверхности вещества, уменьшая ЭТИМ потенциальную энергию выхода χ_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

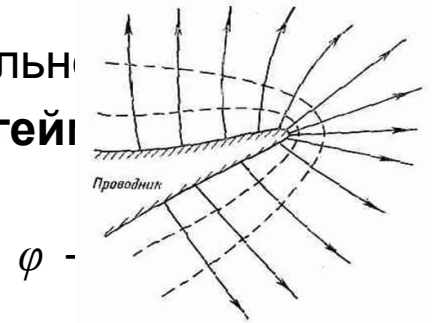
под барьером, и возникает туннельный эмиссионный ток т.н. автоэмиссия

Автоэлектронная эмиссия

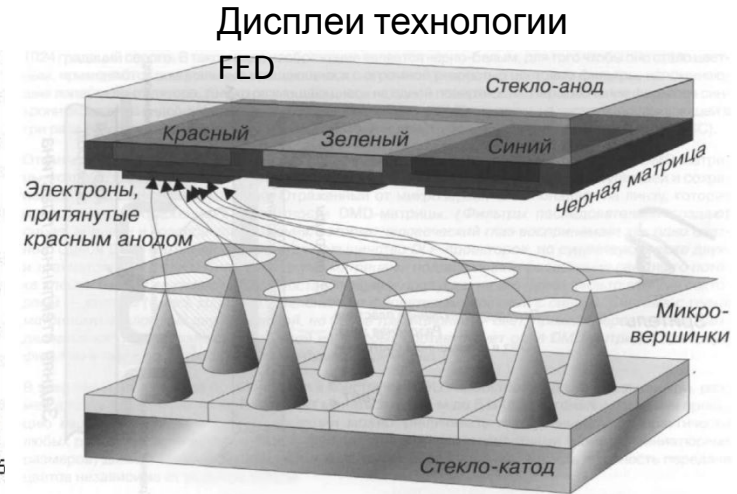
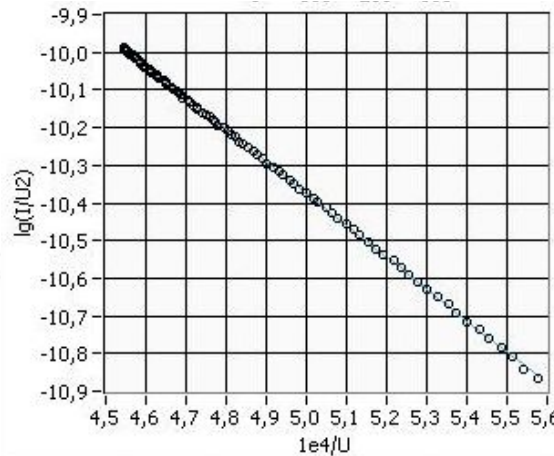
Усиление эл. поля на остриях вызывает понижение потенциальн
барьера и создаёт туннельный ток по **закону Фаулера-Нордгей**

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

i – плотность тока эмиссии,
 E – поле на острие,



уменьшение работы выхода



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

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

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

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

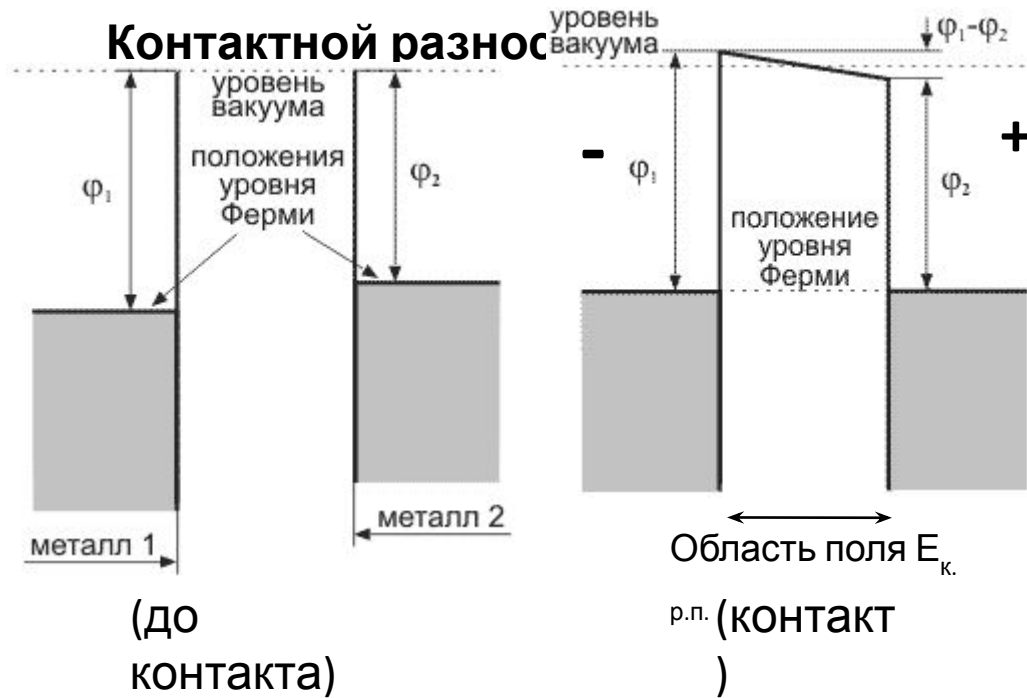
$$U = E_{\text{уанода}} \cdot d$$

$$I = i \cdot S_{\text{эмиссии}}$$

Контактная разность потенциалов

При соприкосновении проводников между ними происходит обмен электронами:

и переходят из проводника с меньшей работой выхода χ_0 в проводник с большей.



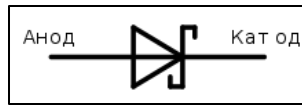
Электрическое поле $V_{к.р.п.} = (\chi_0^2 - \chi_0^1)/e = \chi_0^2 - \chi_0^1$ сосредоточено вблизи границы раздела, в области порядка Дебаевской длины экранирования L_D :

в металлах она имеет атомные размеры ($10^{-8} \div 10^{-7}$ см),

в полупроводниках колеблется в широких пределах (может быть даже $10^{-4} \div 10^{-5}$ см).

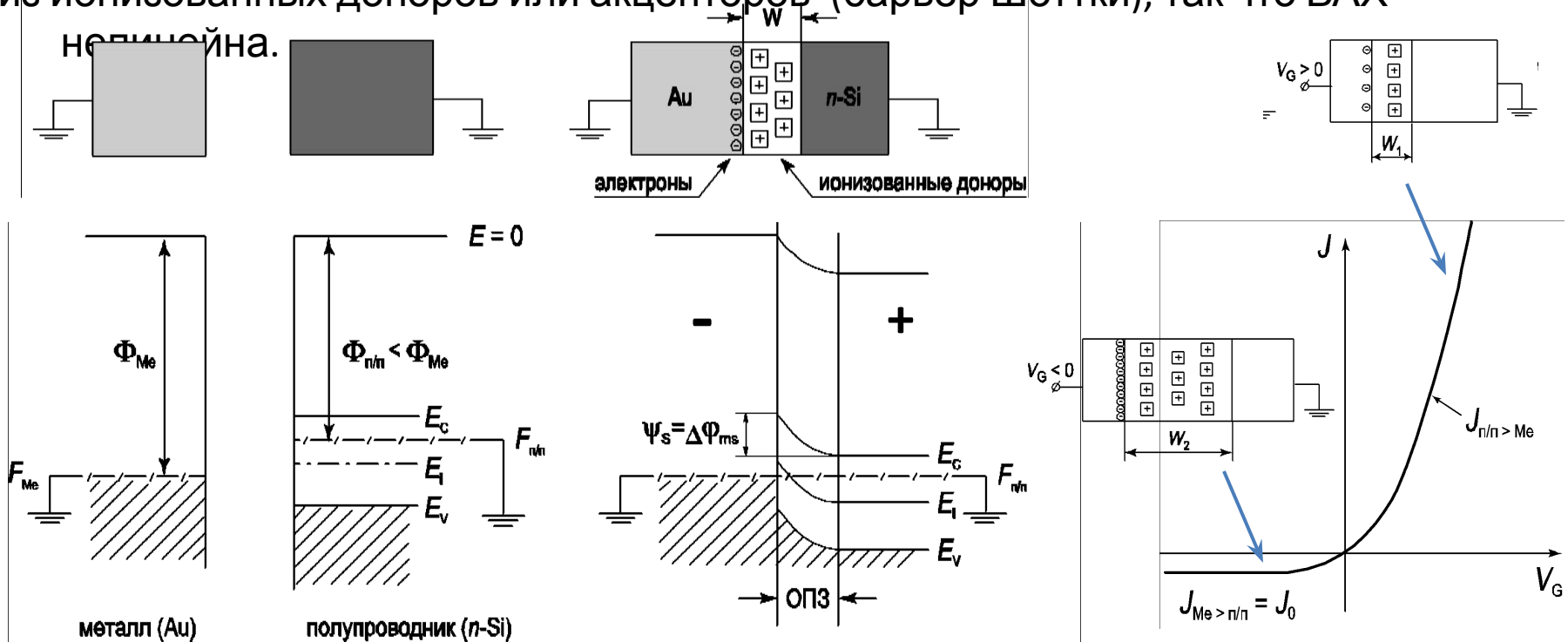
Длина экранирования обратно пропорциональна концентрации электронов n , поэтому из двух тел $V_{к.р.п.}$ приходится на проводник с бо́льшим сопротивлением ρ .

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



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

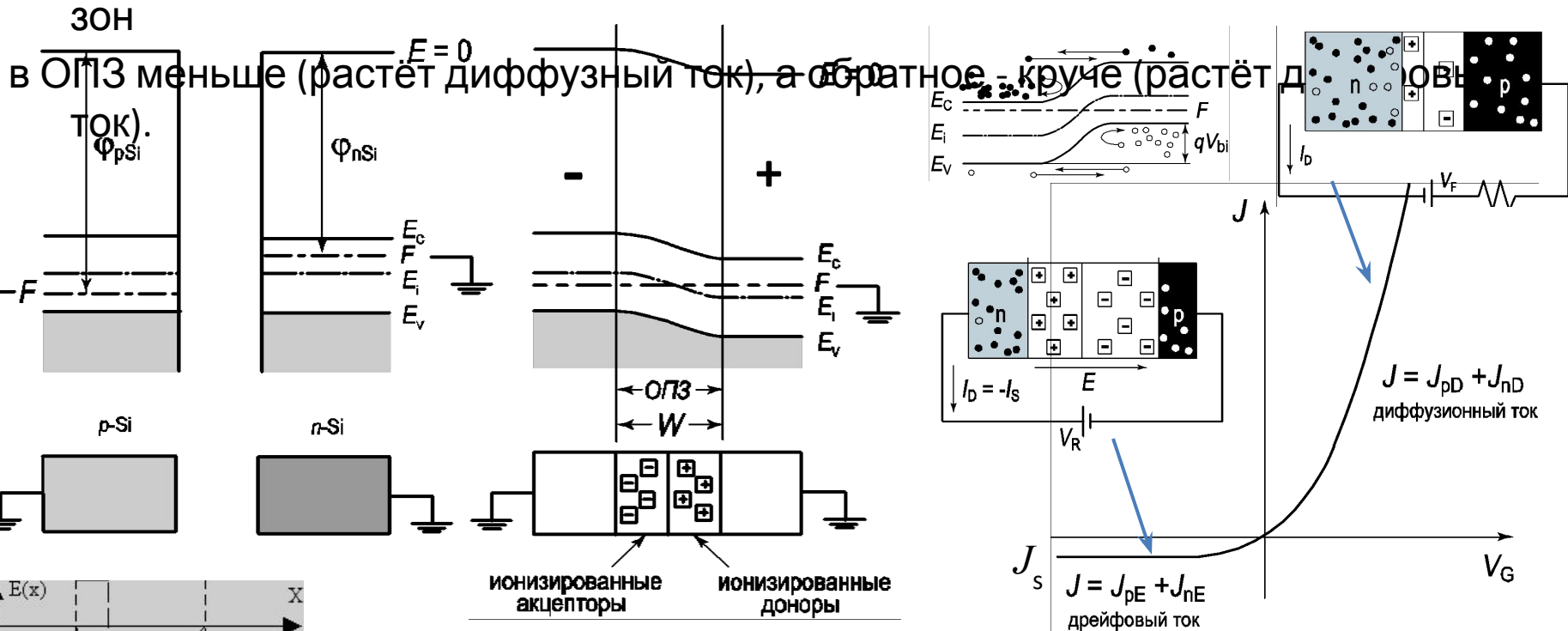
W зависит от

напряжения V_G :

(ϵ_s - диэл. п/п, q - заряд e , N_D - конц. доноров, v_0 - тепловая скорость, n_s - поверх. концентрация, $\beta = \frac{q}{kT}$)

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



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

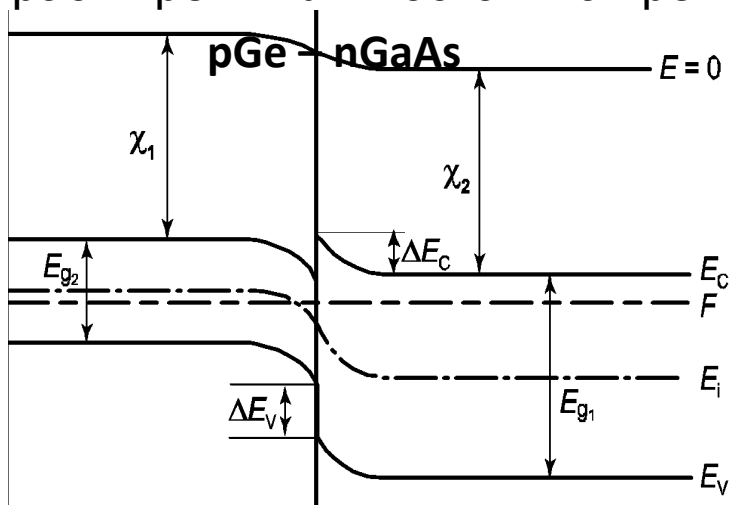
(ϵ_s - диэлектрическая проницаемость п/п, $\Delta\phi$ - высота потенциального барьера, D_n - дебаевская длина экранирования, D - коэффициент диффузии носителей заряда)

Гетеропереходы

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

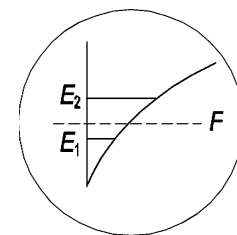
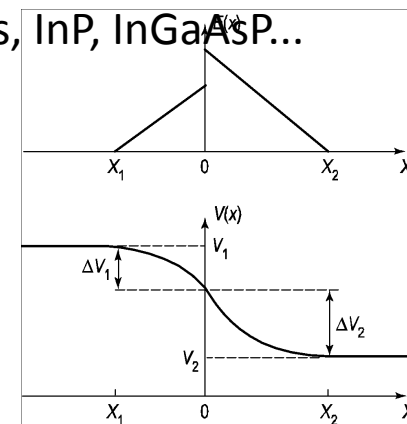
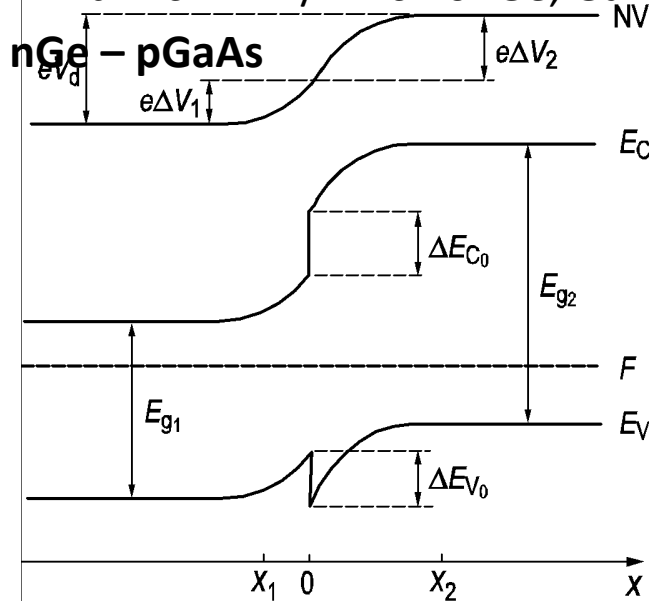
Необходимо, чтобы у них с высокой точностью совпадали температурный коэффициент

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



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

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



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

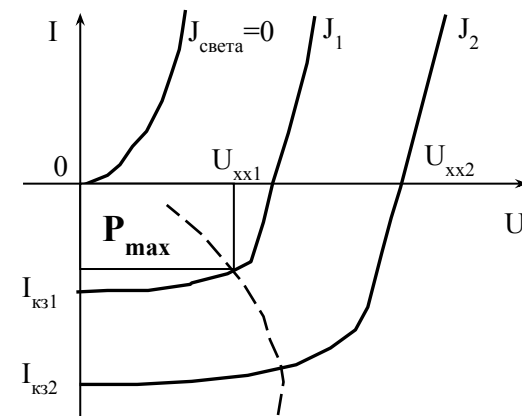
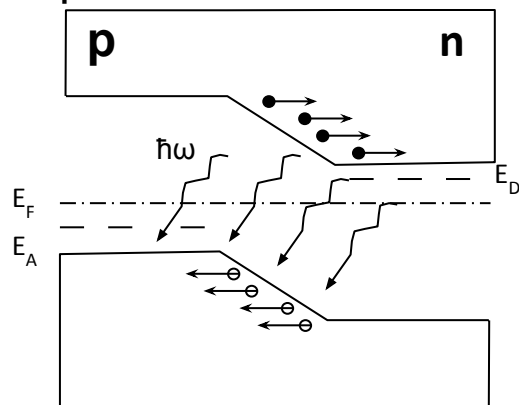
Требования к построению зонной диаграммы:

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

Фотоэлемент

Фотоэлемент - источник электропитания, поглощающий свет внешних источников.

Если поглощается свет солнца, то фотоэлемент называется солнечной



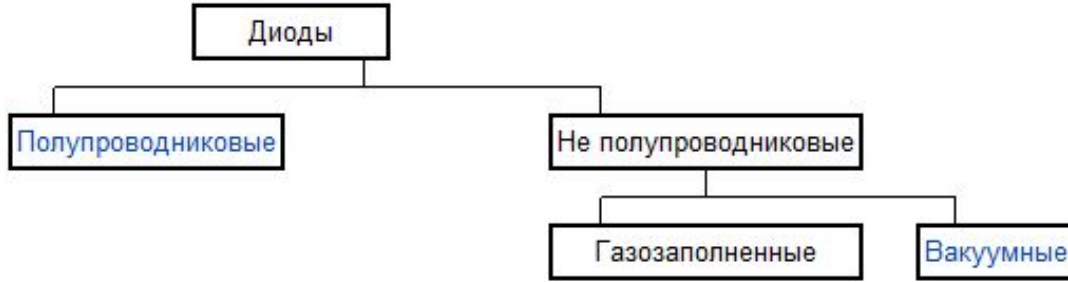
$$j = j_n + j_p - eg \quad I_{кз} \sim g = \eta \cdot \alpha \cdot J \quad \eta = P_{\max} / P$$

g - число e^-h^+ , родившихся на 1см^2 p-n перехода за 1с, α - показатель поглощения,

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

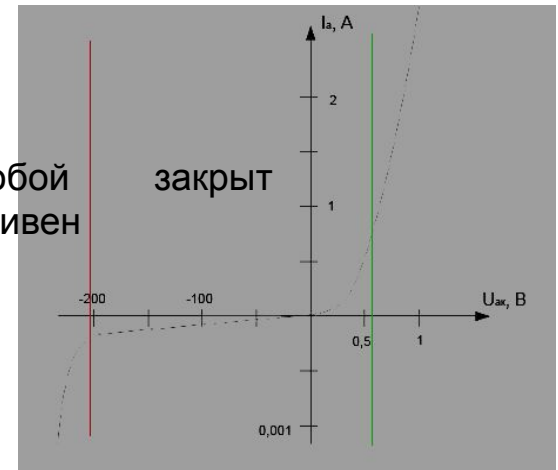
Кванты света генерируют e^-h^+ пары - неравновесные носители заряда, а диффузия и

Типы диодов



пробой активен

закрыт



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

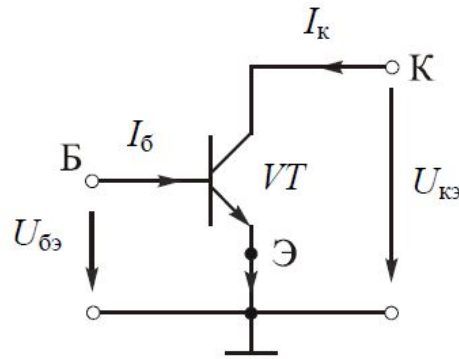
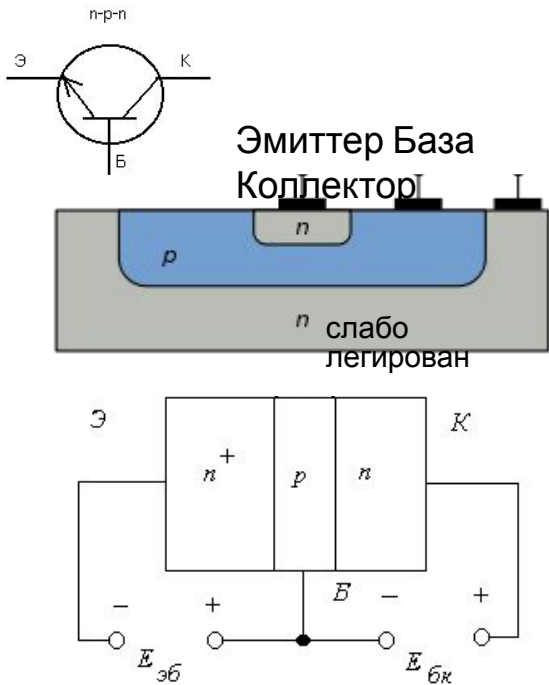


Смесительный диод

Перемножает два высокочастотных сигнала.

p-i-n диод

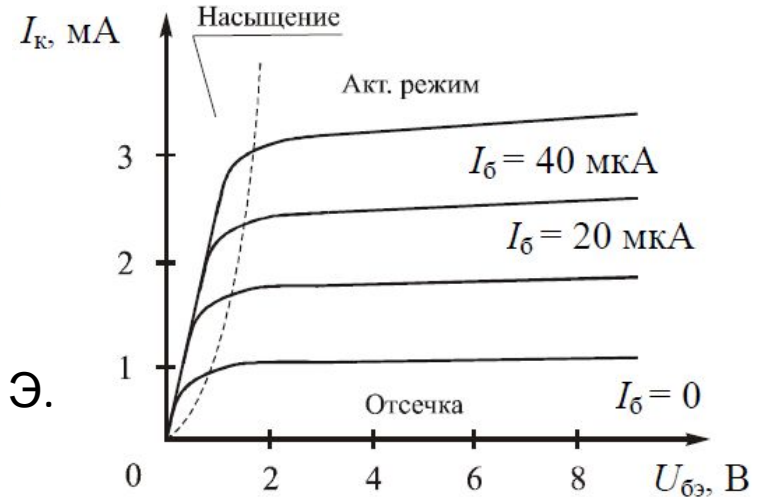
Биполярный транзистор



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 ,

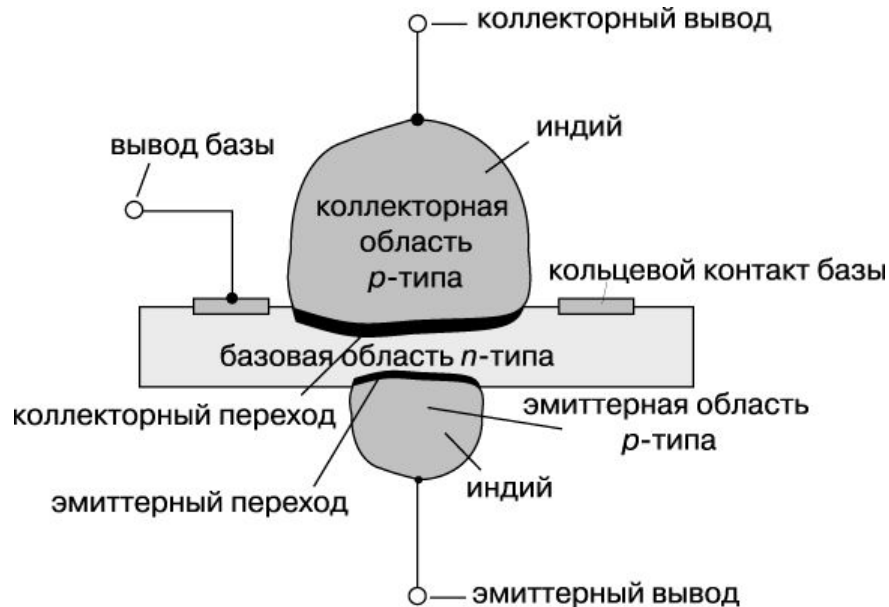
где сильное электрическое поле втягивает их в коллектор, так что через

коллекторный p-n, "смещённый" в обратном направлении!, тоже течёт ток: $I_э \approx$

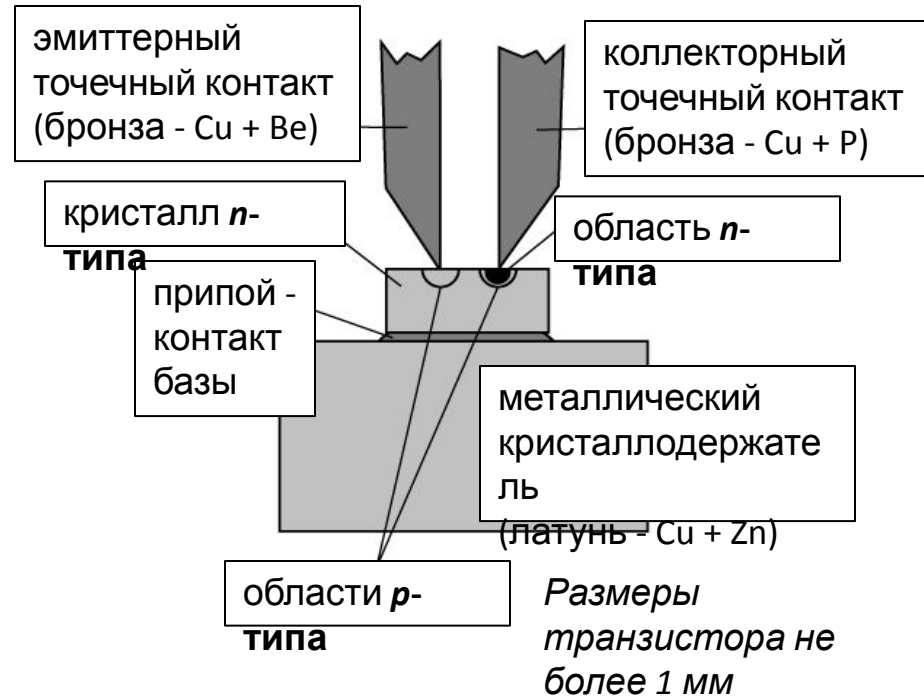
I_K .

Создание транзисторов

Сплавной плоскостной транзистор



Точечный транзистор

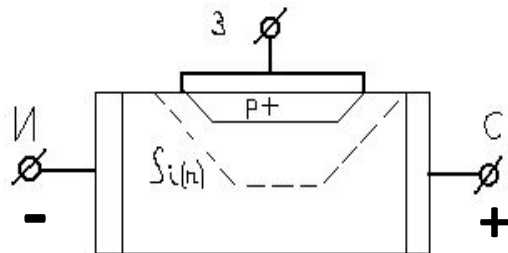


Методы получения p-n переходов:

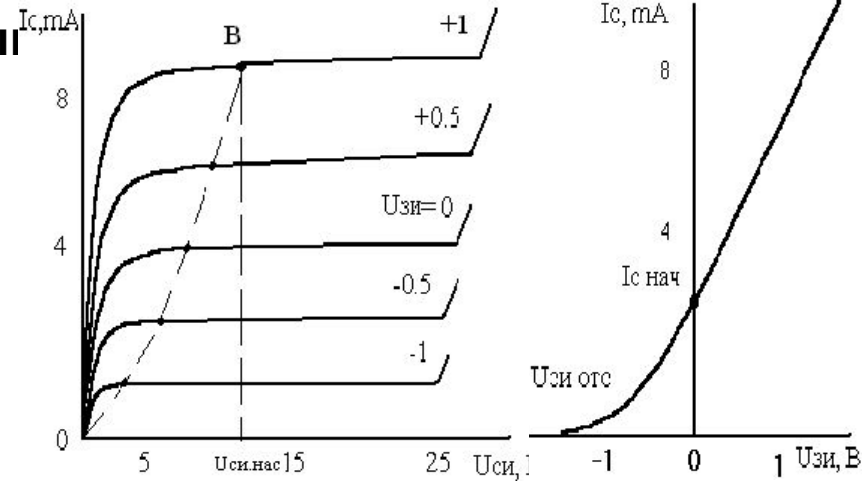
1. Метод вытягивания: в процессе вытягивания п/п монокристалла из расплава В него вводят сначала примесь n-типа, а затем p-типа.
2. Диффузионный метод: диффузия акцепторной примеси в донорный п/п.
3. Эпитаксиальный метод: осаждение на n-Si монокристаллической плёнки p-Si.
4. Метод ионного легирования: 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 ϕ^- , а к стоку (С) – положительного ϕ^+

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 SiO_2 (МОП).

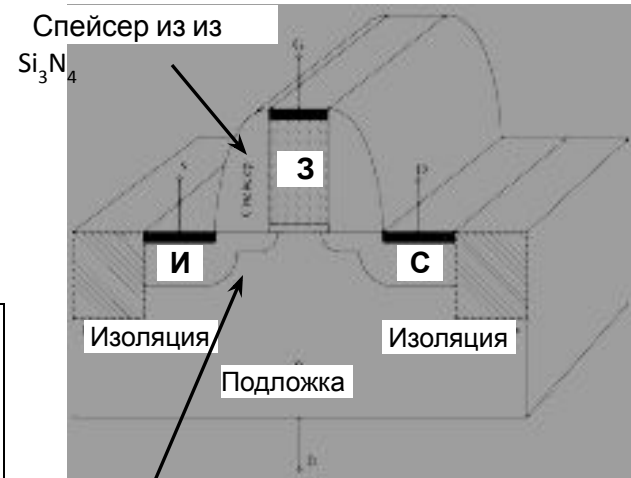
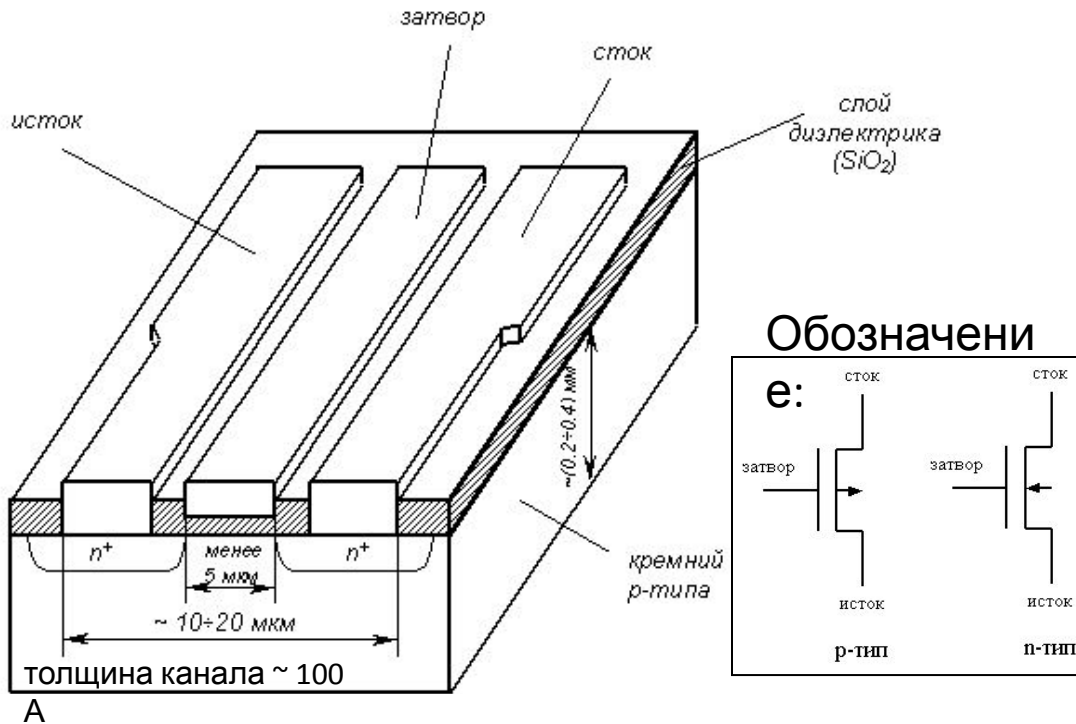
Электрическое поле между затвором и каналом меняет плотность e в канале, т. е. $I_{C-И}$.

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!