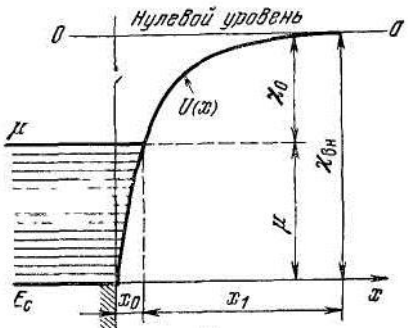
Тема 8. Основы микроэлектроники

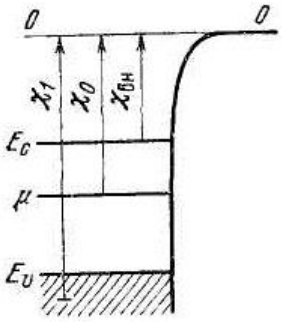
Содержание темы: Работа выхода; Термоэлектронная эмиссия; Автоэмиссия; Контактная разность потенциалов; Фотоэлемент; Электронно-дырочный переход; МОП; диод; биполярные и полевые транзисторы.

Работа выхода

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

металла (E_F выше E_c): или полупроводника (E_F ниже E_c):





Работы выхода электронов из вещества:

χ_0 — **термодинамическая работа выхода** (с уровня Ферми в вакуум)

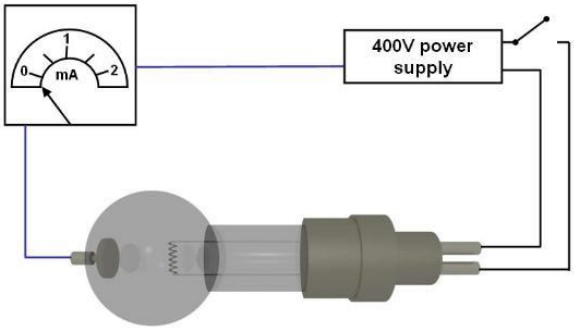
$\chi_{вн}$ — внешняя работа выхода (со дна зоны проводимости в вакуум)

χ_1 — работа выхода из глубины валентной зоны в вакуум

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**.

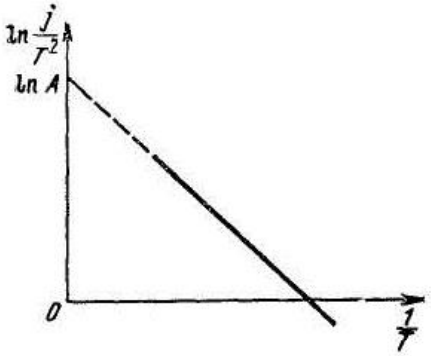
Поместив вблизи нагретого металла проводник и создав между ними электрическое поле, можно получить термоэлектронный ток.



Плотность этого тока j подчиняется **формуле Ричардсона-Дешмена**:

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{\chi_0}{kT}\right)$$ где коэффициент А – постоянная Ричардсона.

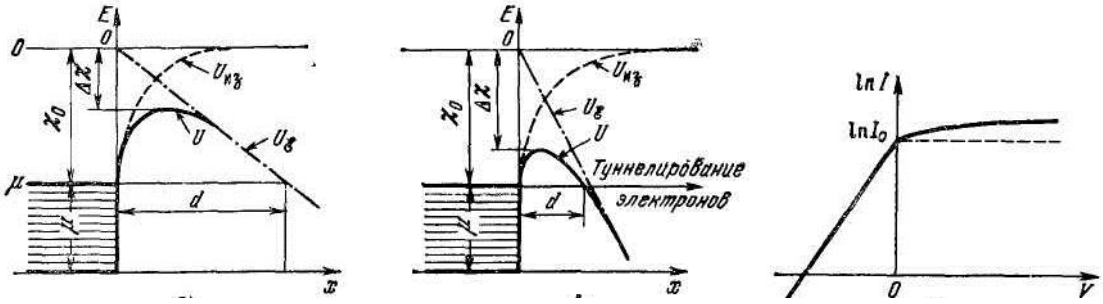
Из экспериментальной прямой в полулогарифмических координатах $\ln(j/T^2)(1/T)$ можно между прочим найти термодинамическую работу выхода χ_0 и коэф. A.



$$\ln \frac{j}{T^2} = \ln A - \frac{\chi_0}{k}\frac{1}{T}.$$

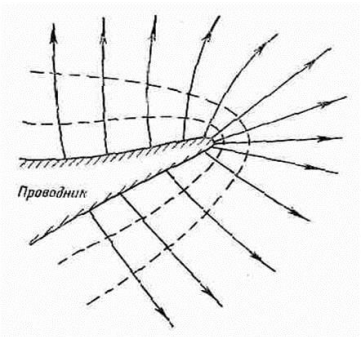
Автоэлектронная эмиссия

Электрическое поле E ускоряет электроны у поверхности вещества, уменьшая этим потенциальную энергию выхода χ_0 на величину $\Delta\chi$. Это понижение потенциального барьера под действием внешнего поля называется **эффектом 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. **автоэлектронная эмиссия**.

Выступающие проводящие поверхности фокусируют на себе электрическое поле, так что поле возле «острия» намного превышает (в 10000 раз!) поле на поверхности ровных проводников.

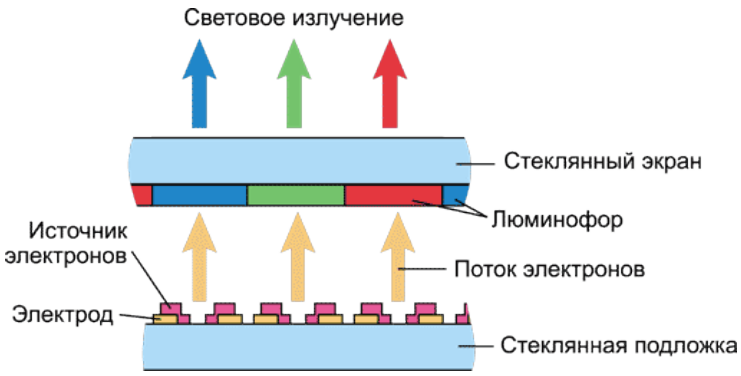


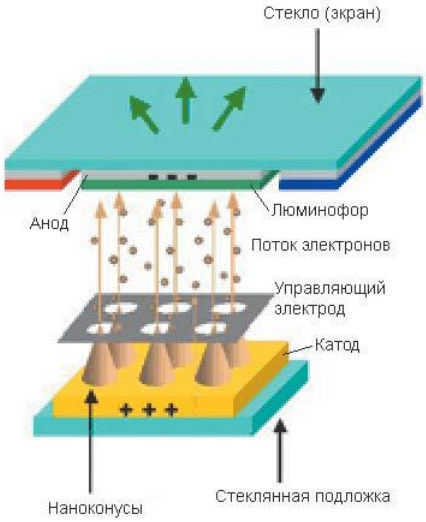
Такое усиление электрического поля вызывает описанное выше понижение потенциального барьера и создаёт туннельный ток по **закону Фаулера-Нордгейма**:

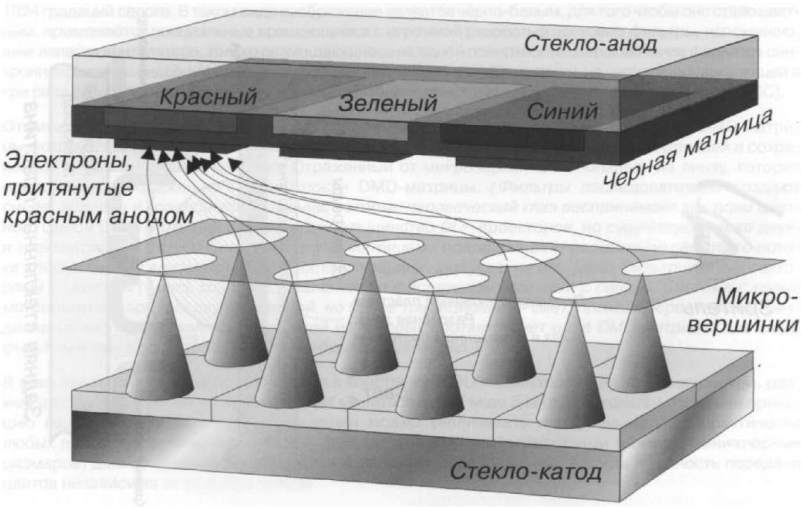
$$i = A \cdot E^2 \cdot exp\frac{-B \cdot \varphi^{3/2}}{E}$$

где i – плотность тока эмиссии, E – напряжённость эл. поля на острие, φ – работа выхода.

Дисплеи технологии FED (Field Emission Display), изготовленные из массива вытянутых микропроводников (Mo или Si проводящие микроострия):

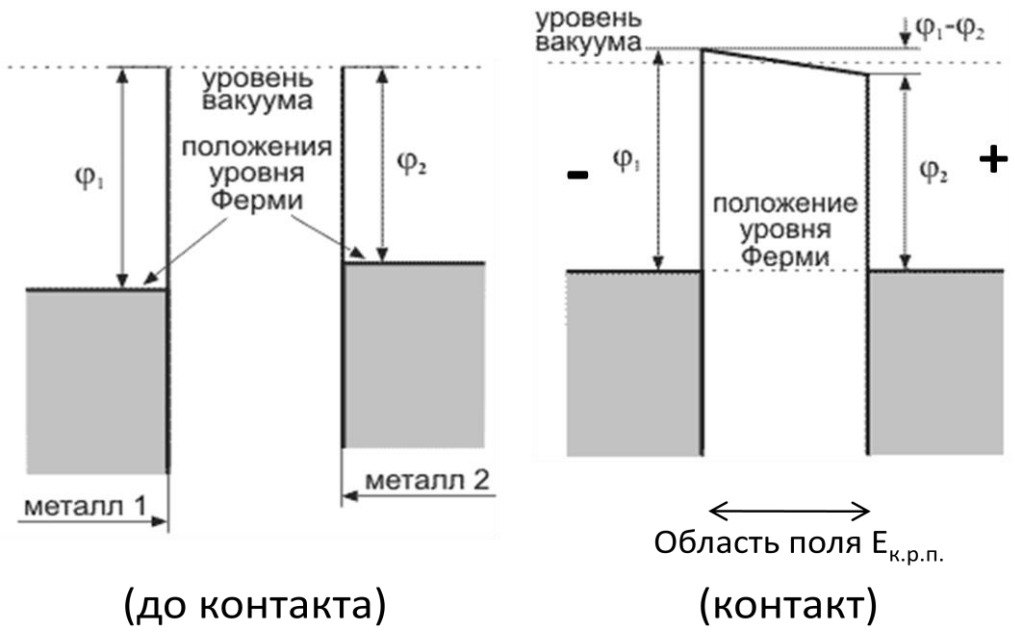






Контактная разность потенциалов

При соприкосновении проводников между ними происходит обмен электронами: электроны переходят из проводника с меньшей работой выхода χ_0 в проводник с большей.



Контактной разностью потенциалов (к.р.п.) называется разница работ выхода:

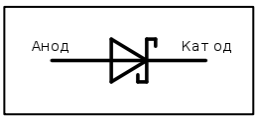
$$V_{к.р.п.} = (\chi_{01} - \chi_{02})/e = \phi_1 - \phi_2$$

Электрическое поле этой разницы потенциалов $E_{к.р.п.}$ сосредоточено вблизи границы раздела материалов, в области порядка **Дебаевской длины экранирования электронов L_D. В металлах L_D** имеет атомные размеры ($10^{-8} \div 10^{-7}$ см), потому что электроны там могут покидать свои атомы и «кучковаться» возле границы раздела. **В полупроводниках L_D** колеблется в широких пределах (может быть даже $10^{-4} \div 10^{-5}$ см), потому что «кучкование» электронов там слабое.

В целом же длина экранирования обратно пропорциональна концентрации электронов проводимости n, поэтому из двух тел $V_{к.р.п.}$ приходится на проводник с бо́льшим сопротивлением ρ (то есть с меньшей n).

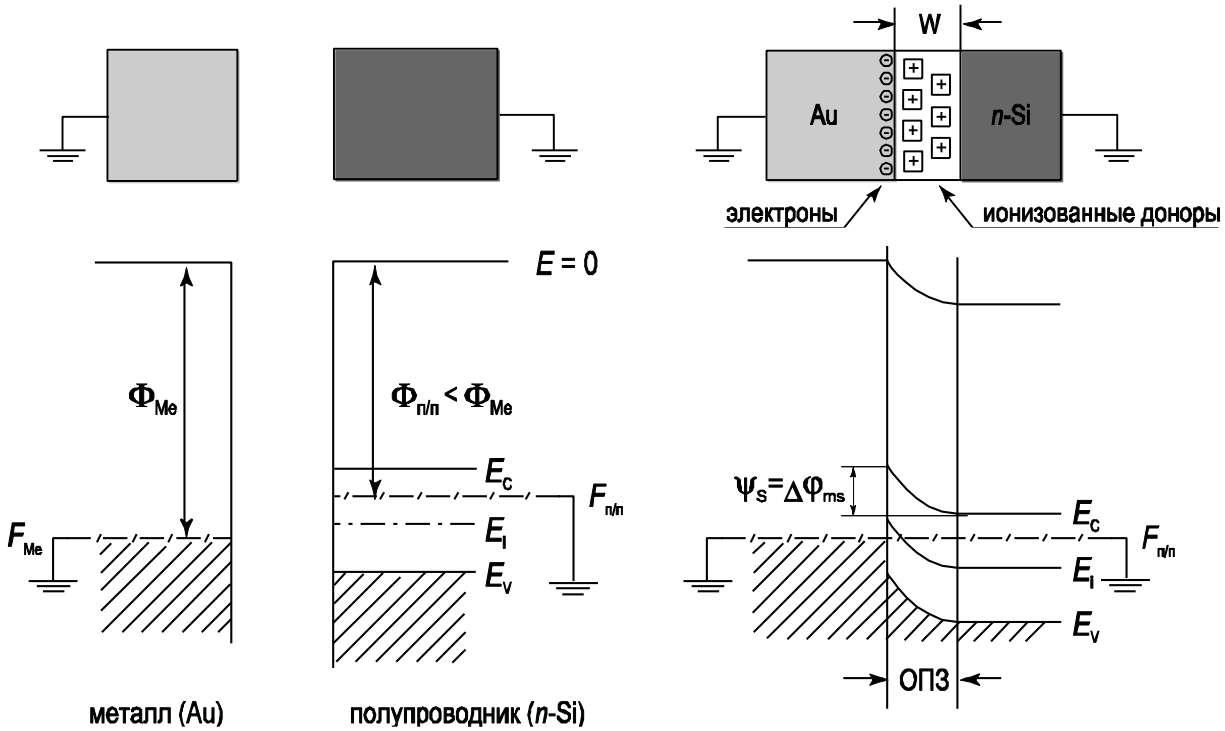
Термоэлектронный преобразователь энергии: электроны «испаряются» из горячего катода с ϕ_1 и «конденсируются» на аноде с ϕ_2, создавая электрическое напряжение между материалами, которое может послужить источником питания для внешней цепи.

Диод Шоттки



Изобретён Вальтером Шоттки в 1939 г.

Диод состоит из контакта **металл-полупроводник n или p типа**. Из-за вышеописанного перетекания электронов из полупроводника в металл, в полупроводнике формируется **область пространственного заряда** (ОПЗ), состоящая из ионизованных доноров или акцепторов. В этой области электроны отталкиваются от металла теми электронами, которые в него уже заползли (т.н. **барьер Шоттки**).

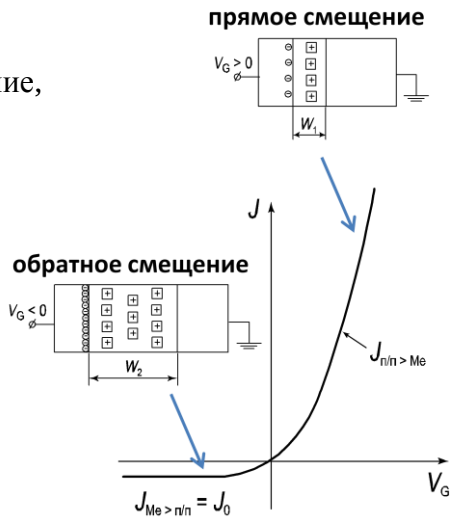


ОПЗ по-разному реагирует на прямое и обратное напряжение, так что ВАХ такого элемента оказывается нелинейной.

Ширина ОПЗ - W зависит от напряжения V_G:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0\left(\Delta\varphi_{ms} - V_G\right)}{qN_D}}$$

$$J = J_{n/n \to M} - J_{M \to n/n} = \frac{1}{4} q n_s \upsilon_0 (e^{\beta V_G} - 1)$$

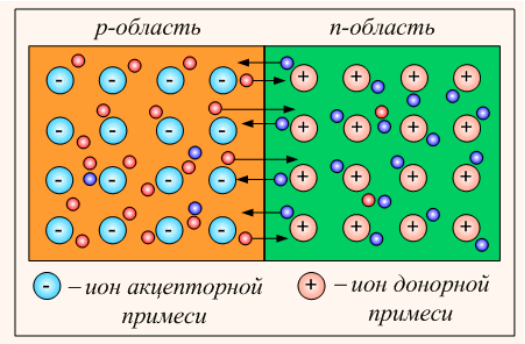


где ε_s - диэлектрическая проницаемость п/п, q - заряд электрона, N_D - концентрация доноров, v_0 - тепловая скорость электронов, n_s - их поверхностная концентрация, β - коэффициент стохастического подъёма электронов на потенциальный барьер против поля ОПЗ.

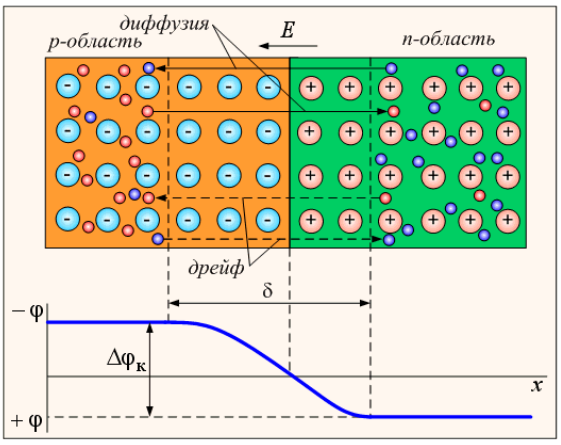
Электронно-дырочный переход (p-n диод)

При контакте двух п/п свободные носители зарядов из-за разности концентраций начинают перемещаться: дырки диффундируют из области *p* (основные носители заряда, которых там много) в область *n*, а электроны – наоборот, из области *n* (где они основные носители заряда и их там много) в область *p*. Причём двигаются они друг к другу навстречу на разных энергетических уровнях - одни в зоне проводимости, а другие в валентной зоне. Их «противовесы» - отпустившие их погулять атомы - не могут также хорошо диффундировать, потому что их держит кристаллическая решётка.

Это так называемый **диффузионный ток**, обеспеченный не электрическими силами!!!, а именно стохастическим движением ПОДВИЖНЫХ заряженных частиц из области, где их много, в область, где их мало.

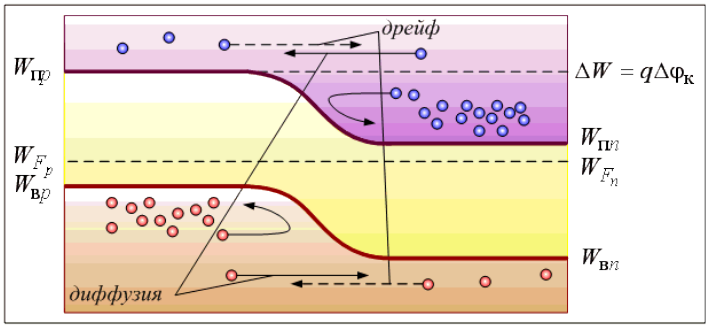


В результате диффузии электроны приходят в область, где много дырок (область *p*). Их взаимная рекомбинация приводит к тому, что на атомах акцепторной примеси накапливаются нескомпенсированные отрицательные заряды и возникает приграничная область с отрицательным зарядом. В области *n* происходит тоже самое только с донорами - на них образуется стабильный положительный заряд. Таким образом образуется 2 слоя пространственных зарядов, заключённых в узком промежутке δ (**область пространственного заряда** - ОПЗ).



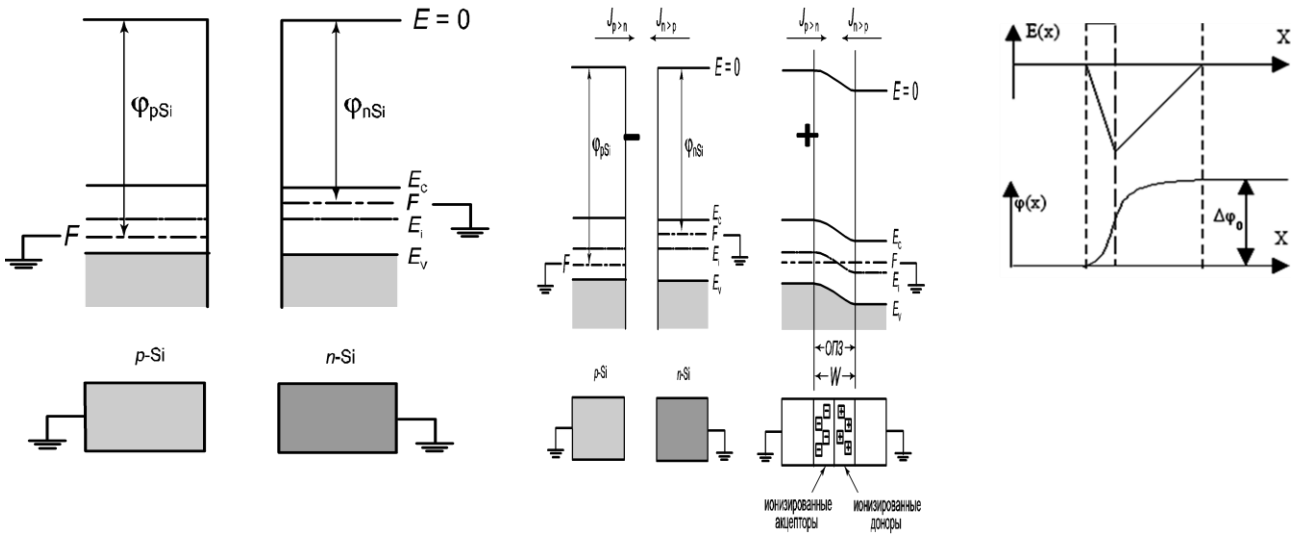
Между этими слоями возникает электрическое поле, которое называют **полем потенциального барьера**, а разность потенциалов на границе раздела двух зон, называют **контактной разностью потенциалов**.

Это внутреннее электрическое поле между слоями ОПЗ вызывает обратный диффузионному **дрейфовый ток** : электроны пытаются вернуться домой к своим плюсам, а дырки - к минусам. Именно он не позволяет ОПЗ распространиться на весь кристалл и конкурирует с **диффузным током**.



При отсутствии внешнего поля в p-n переходе между этими двумя токами устанавливается динамическое равновесие. А в зонной диаграмме наблюдается единый уровень Ферми (как уровень воды в сообщающихся сосудах).

Однако, поскольку в полупроводнике *p*-типа уровень Ферми смещён к потолку валентной зоны, а в полупроводнике *n*-типа – к дну зоны проводимости , то в области ОПЗ диаграмма энергетических зон серьёзно искривляется, образуя в зоне проводимости и валентной зоне тот самый потенциальный барьер.



$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0\Delta\varphi_0}{e}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)}$$

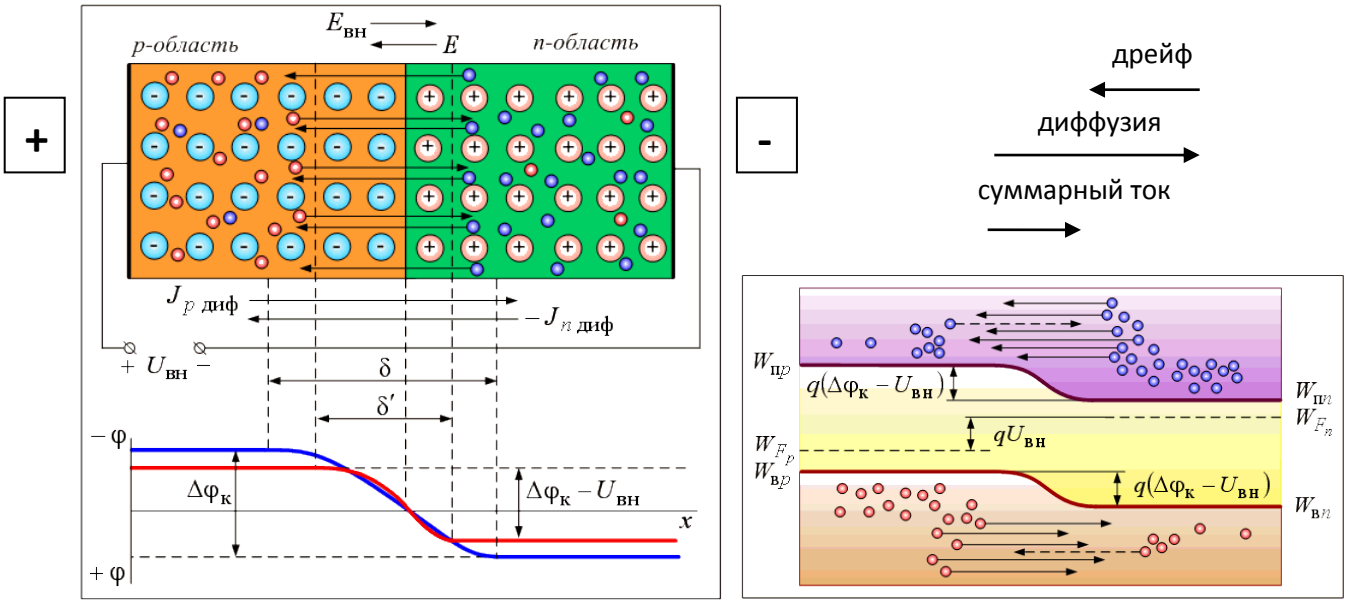
где ε_s - диэлектрическая проницаемость,

$\Delta\varphi$ - высота потенциального барьера

Прямое смещение p-n перехода

При приложении внешнего поля динамическое равновесие токов в pn-переходе смещается, меняя ширину ОПЗ, а вместе с ней и электрическую проводимость структуры.

Подключим внешний источник напряжения: «+» к *p* области, «–» к *n* области. В результате напряженность поля внешнего источника $E_{вне}$ окажется направлена навстречу напряженности поля потенциального барьера E. Это приводит к снижению общего барьерного поля внутри перехода $E_{рез} = E - E_{вне}$ (на графике снизу синяя линия меняется на красную, обладающую меньшим перепадом потенциала).



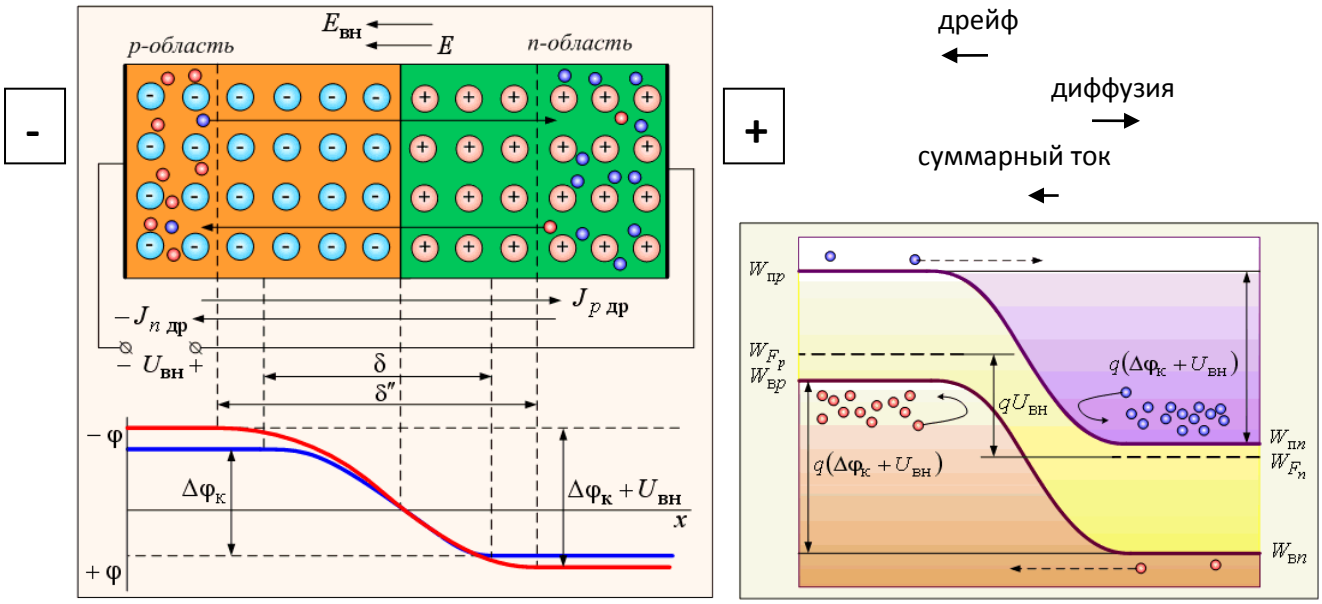
Дрейфовый ток с уменьшением барьера падает, а диффузный на его фоне растёт. Однако при подключении внешнего источника диффузный ток становится частично сквозным (сквозной ток равен разнице диффузного и дрейфового). Т.е. через *p-n*-переход непрерывно проходят носители заряда. При этом электроны входят в полупроводник со стороны n-области и **инжектируются** внешним полем в p область. Дырки же входят со стороны p-области и **инжектируются** внешним полем в n область. Введение носителей заряда через *p-n*-переход в область, где они являются неосновными, называют **инжекцией носителей заряда**. Инжектирующий слой называют **эмиттером**, а слой, в который происходит инжекция неосновных для него носителей заряда, – **базой**.

В результате добавления в систему этих встречных потоков частиц динамическое равновесие в ОПЗ меняется и ОПЗ становится более узкой (неким аналогом p-n перехода с прямым смещением и без смещения может послужить бегущий по лесу ручей и образованная плотиной заводь). В уровне Ферми при прямом смещении возникает плавный перепад, пропорциональный по величине внешнему напряжению.

Обратное смещение p-n перехода

Подключим к p-n переходу внешний источник с противоположной полярностью: «–» к *p* области , «+» к *n* области.

В результате напряженность поля внешнего источника $E_{вне}$ окажется направлена в ту же сторону, что и напряженность поля потенциального барьера E. Это приводит к увеличению общего барьерного поля внутри перехода $E_{рез} = E + E_{вне}$ (на графике снизу синяя линия меняется на красную, обладающую большим перепадом потенциала).

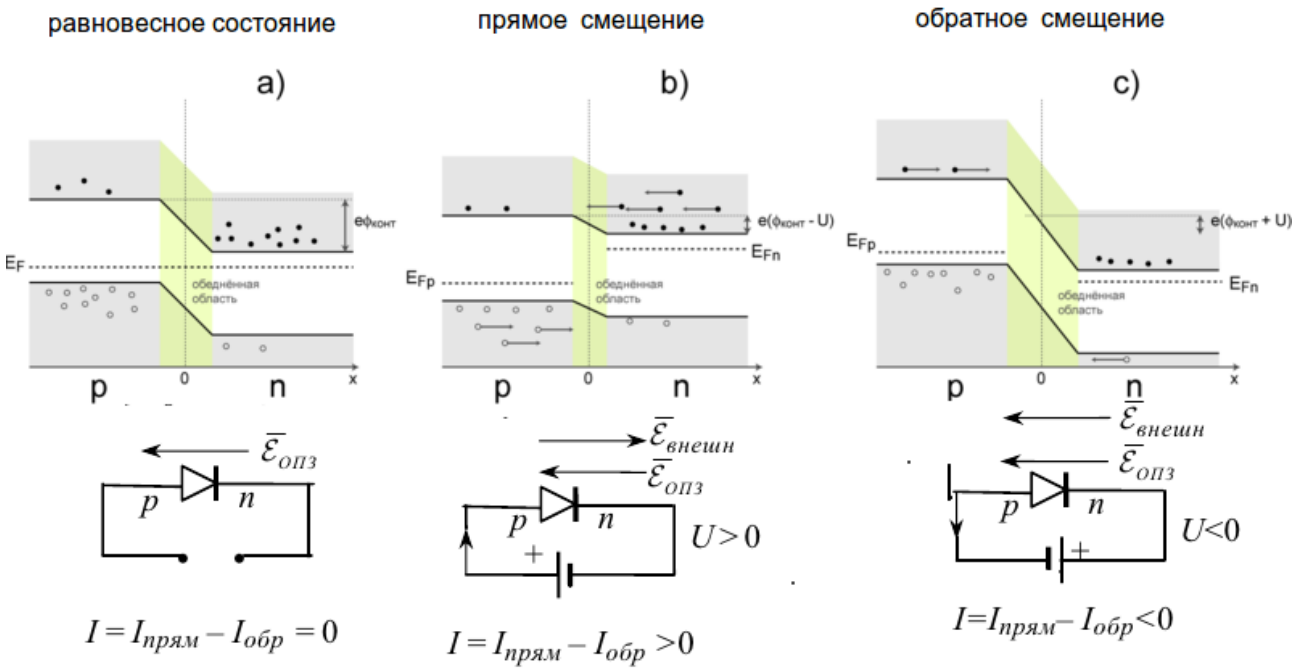


По идее дрейфовый ток должен вырасти пропорционально приложенному напряжению, но в результате добавления из внешнего источника неосновных носителей заряда в зоны и рекомбинации их там с основными носителями ширина ОПЗ становится очень большой (электроны увеличивают ОПЗ в *p*-области, а дырки увеличивают ОПЗ в *n*-области), так что вероятность пробежать через ОПЗ без рекомбинации у носителя заряда становится малой. Система начинает работать, как конденсатор, в котором часть вещества не позволяет зарядам пройти навстречу друг другу. Поэтому суммарный ток оказывается весьма невелик.

Введение неосновных носителей заряда в зоны *p-n*-перехода через контакт и рекомбинацию их там с основными (по сути получается выведение основных носителей заряда) называют **экстракцией носителей заряда**. В уровне Ферми при этом также возникает перепад, пропорциональный внешнему напряжению.

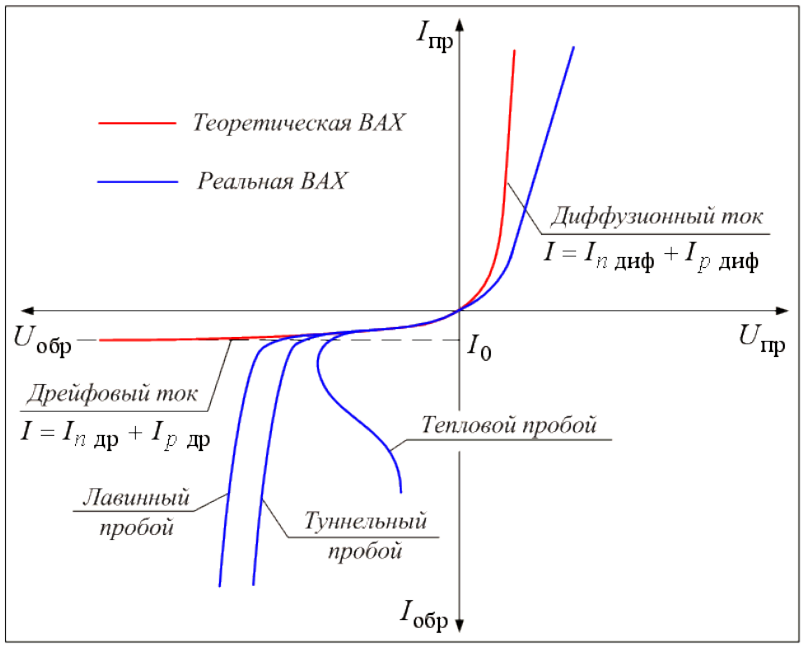
Суммарный ток имеет дрейфовую природу и называется **обратным током.** Носители заряда, обеспечивающие его наличие, возникают в ОПЗ под действием различных ионизирующих факторов, в основном теплового характера.

Все три типа смещения вместе:



ВАХ p-n перехода

Итак, напряжение прямого смещения V_F увеличивает диффузионный ток, уменьшая дрейфовый, а напряжение обратного смещение V_R уменьшает оба тока. Таким образом, p-n-переход, обладает свойством менять своё электрическое сопротивление в зависимости от направления протекающего через него тока. Это свойство называется **вентильным**, а прибор, обладающий таким свойством, называется **электрическим вентилем**.



Суммарный ток получается из сложения двух типов токов для двух типов носителей:

$$I_{p-n} = I_{n\ диф} + I_{p\ диф} - I_{n\ др} - I_{p\ др}$$

$$J = \left(\frac{eD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \right)(e^{\beta U} - 1) = J_s(e^{\beta U} - 1)$$

D_n - дебаевская длина экранирования

D - коэффициент диффузии носителей заряда

В реальности же к описанным выше процессам добавляются пробойные эффекты. Лавинный, туннельный и тепловой пробои искривляют ход обратной ветви ВАХ.

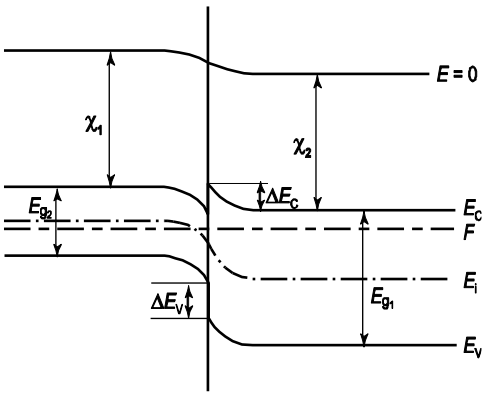
Гетеропереходы

Гетеропереход – контакт двух полупроводников различного вида и разного типа проводимости. Для создания прибора на таком переходе необходимо, чтобы у этих полупроводников с высокой точностью совпадали температурный коэффициент расширения α и постоянная решётки a. Таких материалов достаточно мало: Ge, GaAs, InP, InGaAsP...

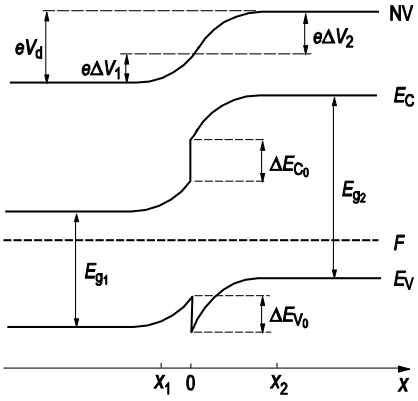
Коэффициент расширения: $\alpha_{pGe} = 5{,}9 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, $\alpha_{nGaAs} = 6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$

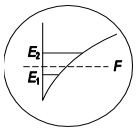
Постоянная решётки: $a_{pGe} = 5{,}654$ А, $a_{nGaAs} = 5{,}658$ А

pGe – nGaAs



nGe – pGaAs





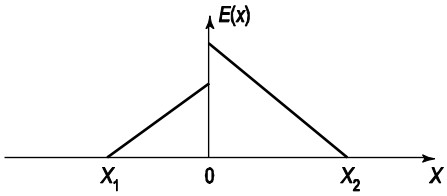
Требования к построению зонной диаграммы p-n переходов:

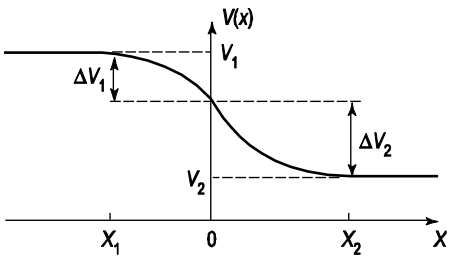
1. Уровень вакуума (E = 0) всегда непрерывен;

2. Электронное сродство в пределах одного сорта полупроводников, т.е. интервалы между уровнем вакуума и дном зоны проводимости (например, χ_{Ge} и χ_{GaAs}) должно быть постоянно;

3. Ширина запрещенной зоны E_g в пределах одного сорта полупроводника тоже должна быть постоянна.

Распределение электрического поля и перепад потенциалов в структуре nGe – pGaAs:





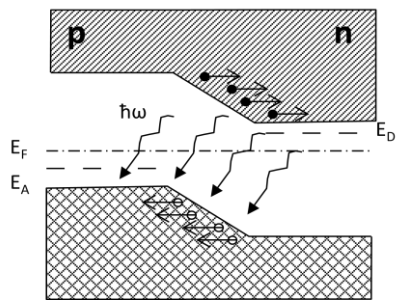
$$J = J_s\left(e^{\beta V} - 1\right)$$

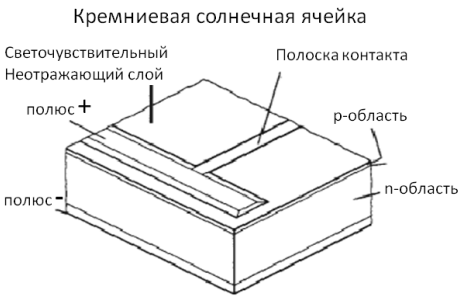
Фотоэлемент

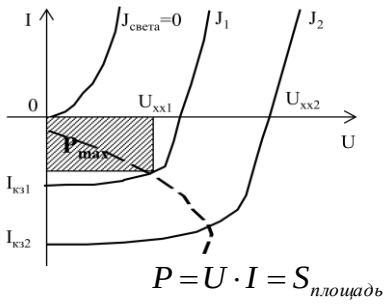
Фотоэлемент - источник электропитания, поглощающий свет внешних источников. Если поглощается свет солнца, то фотоэлемент называется солнечной ячейкой.

Принцип действия: кванты света генерируют в области перехода неравновесные носители заряда - электрон-дырочные пары e^--h^+ (возникают в тонкой p-области - см. рисунок снизу - и диффундируют до границы p-n перехода), а поле пространственного заряда там их разделяет, так что электроны двигаются в *n* область, а дырки - *p* область. ОПЗ при этом уменьшается и падает диффузионный ток, ответственный за прямую ветвь ВАХ (см. рисунок снизу).

В результате накопления этих неравновесных зарядов в области границы перехода n-p возникает дополнительное поле - **фото-ЭДС**.







Суммарный ток через структуру: $$j = j_n + j_p - eg$$

где g - число пар e^--h^+, родившихся на 1 см^2 p-n перехода за 1с.

При коротком замыкании полюсов солнечного элемента в нём возникает ток (обратный ток), выравнивающий потенциалы до исходного уровня.

Ток короткого замыкания: $$I_{кз} \sim g = \eta \cdot \alpha \cdot J$$

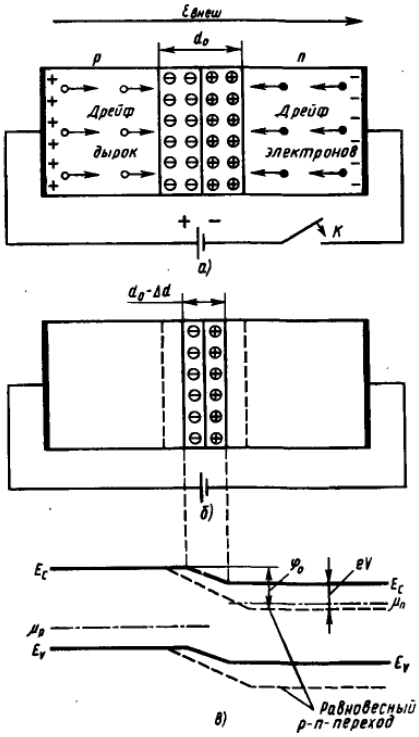
где α – показатель поглощения, *J* – интенсивность света, *η* – **внутренний квантовый выход.**

Внутренний квантовый выход оценивается по форме ВАХ (см. график сверху)

$$\eta = P_{\max} / P$$

У кремниевых фотоэлементов *η* ~ 100%.

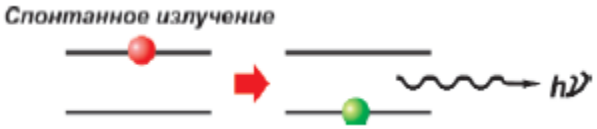
Лазер на p-n переходе



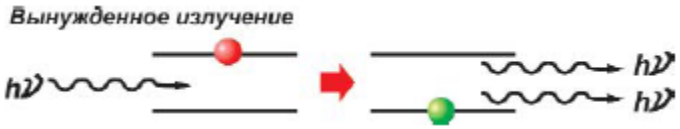
Когда на анод обычного диода подаётся положительный потенциал, то говорят, что диод смещён в прямом направлении. При этом дырки из p-области инжектируются в n-область p-n перехода, а электроны из n-области инжектируются в p-область полупроводника.

Если электрон и дырка оказываются «вблизи» друг друга (на расстоянии, когда возможно туннелирование), то они могут рекомбинировать с выделением энергии в виде фотона определённой длины волны (в силу сохранения энергии) и фонона (если переход непрямозонный, в силу закона сохранения импульса, потому что фотон уносит импульс).

Такой процесс называется **спонтанным излучением** и является основным источником излучения в **светодиодах**.



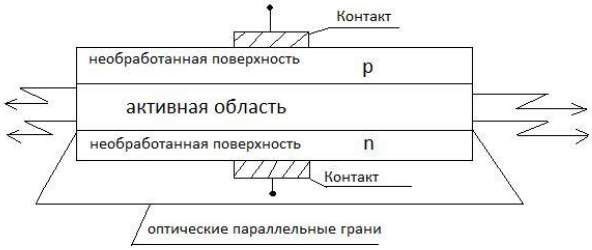
Однако, если при определённых условиях электрон и дырка будут находиться в одной области пространства достаточно долгое время (до микросекунд) не рекомбинируя, и в этот момент через эту область пространства пройдёт фотон нужной (резонансной) частоты, он может вызвать **вынужденную рекомбинацию** с выделением второго фотона, причём его направление, вектор поляризации и фаза будут в точности совпадать с теми же характеристиками первого фотона.



Одним из этих условий является **инверсная заселенность**, когда энергия оптического перехода меньше энергии переходов с поглощением, и вероятность первых переходов, соответственно, выше, чем вторых. Состояние вещества, в котором создана инверсная населенность энергетических уровней, называется активным или рабочим, а процесс создания инверсной населенности называется накачкой.

В лазерном диоде полупроводниковый кристалл изготавливают в виде очень тонкой прямоугольной пластинки. Такая пластинка по сути является оптическим волноводом, где излучение ограничено в относительно небольшом пространстве. Верхний слой кристалла легируется для создания n-области, а в нижнем слое создают p-область. В результате получается плоский p-n переход большой площади.

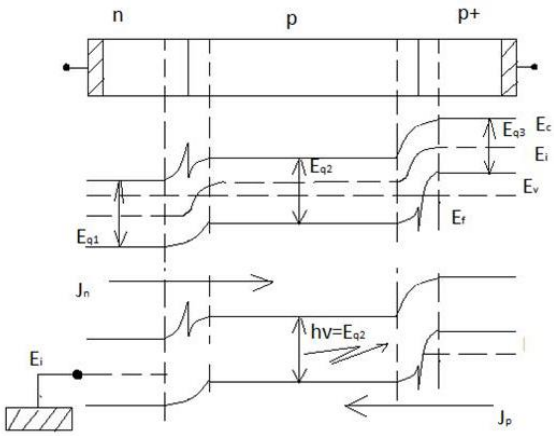
Две боковые стороны (торцы) кристалла полируются для образования гладких параллельных плоскостей, которые образуют оптический резонатор, называемый резонатором Фабри-Перо. Две другие грани делаются шероховатыми для исключения излучения в направлениях не совпадающих с главным.



Лазерные диоды могут быть с очень тонкими слоями (типичные размеры области генерации излучения не превышают 200-500 мкм), и такая структура может генерировать излучение только в направлении, параллельном этим слоям. С другой стороны, если волновод сделать достаточно широким по сравнению с длиной волны, он сможет работать уже в нескольких поперечных режимах, испуская свет под разными углами. Такой диод называется **многомодовым**

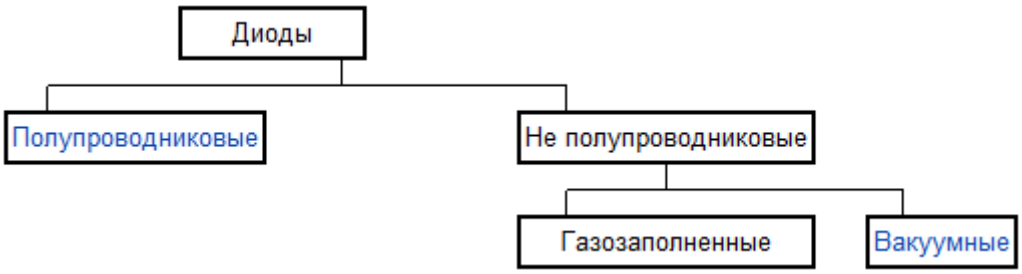
Однако в устройствах с несколькими продольными режимами и материалом, способным усиливать излучение в достаточно широком диапазоне частот, возможна работа на **нескольких длинах волн**.

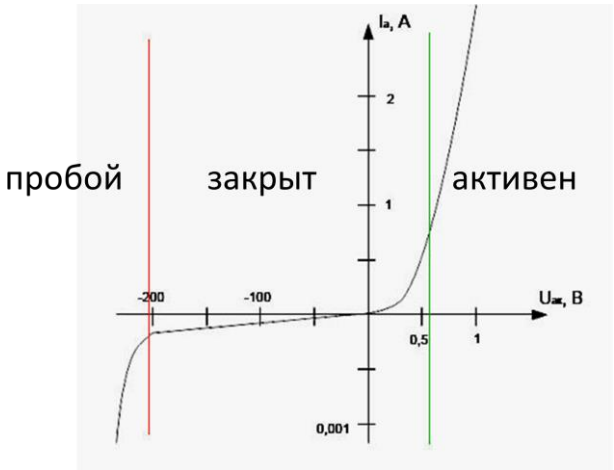
В **структуре с двумя гетеропереходами** носители сосредоточены внутри активной области, ограниченной с обеих сторон потенциальными барьерами. Излучение так же ограниченно этой областью, вследствие скачкообразного снижения показателей преломления за ее пределы. Эти ограничения способствуют усилению стимулированного излучения и соответственно снижают порог плотности тока.



Диоды

Диоды - те самые вентильные элементы, основанные, как правило, на p-n переходах (полупроводник vs полупроводник) или барьерах Шоттки (полупроводник vs металл).





Стабисторы (обычные диоды)

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.

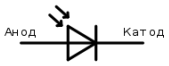
Светодиоды (диоды Генри Раунда)

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

Полупроводниковые лазеры

Светодиоды с оптическим резонатором, излучают когерентный свет.

Фотодиоды



Запертый фотодиод, который открывается только 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.

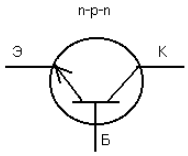
Смесительный диод

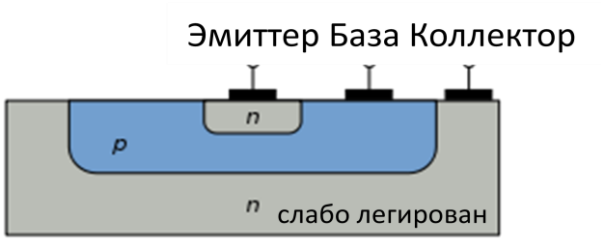
Перемножает два высокочастотных сигнала.

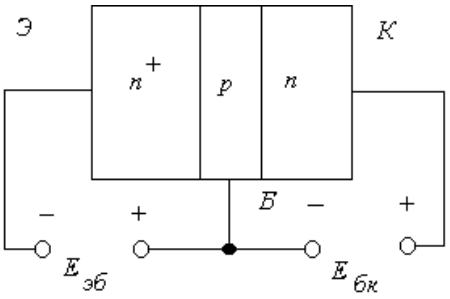
pin диод

Имеет область собственной проводимости между сильнолегированными областями, используется в СВЧ-технике и силовой электронике как фотодетектор, потому что нелегированная область i генерирует ровно столько носителей заряда, сколько фотонов на неё попало.

Биполярный транзистор







В **активном режиме** эмиттерный p-n переход "смещён" в прямом направлении => через него течёт большой ток.

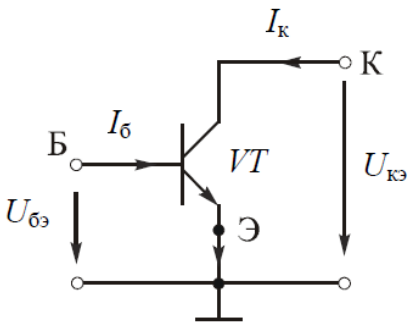
В базе электрического поля почти нет (напряжение эмиттер-база $U_{ЭБ} < 1$В, а расстояние между контактами $d_{Э\text{-}Б}$ большое, поэтому поле $E = U/d$ - маленькое).

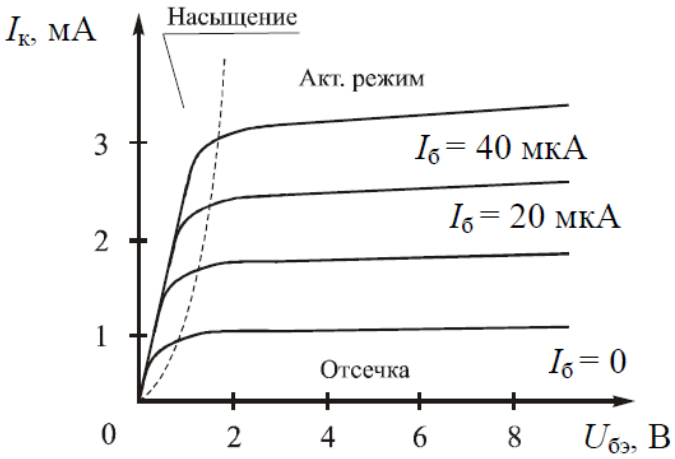
Зато толщина базы меньше диффузионной длины электронов (< 10 мкм), поэтому электроны, попавшие в неё через эмиттерный p-n переход, спокойно диффундируют ко второму p-n переходу, где сильное электрическое поле ($E_{БК}$) втягивает их в коллектор. Так что токи через контакт эмиттера и коллектора равны $I_Э \approx I_К$.

Увеличение напряжения $U_{бэ}$ приводит к резкому увеличению коллекторного тока: происходит инжекция носителей в p-n переходы из базы и увеличение их диффузионного тока (прямое смещение переходов).

Отношение $\beta = I_К / I_Б$ показывает усилительные возможности транзистора. Обычно $\beta = 10 \div 300$. У очень широкополосных транзисторов $\beta = 2 \div 5$. А у супербетатранзисторов $\beta = 5000 \div 10000$.

Включение с общим эмиттером:



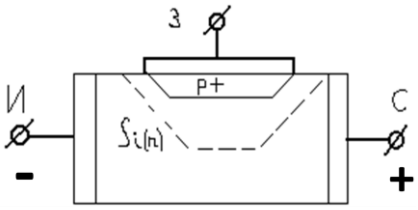


$$I_э = I_{э0} e^{U_{бэ}/Vt}$$

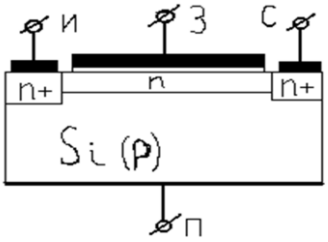
где $I_{э0}$ - ток утечки при $U_{бэ} = 0$, Vt = kT/q - "термическое напряжение".

Полевой транзистор

С управляющим p-n переходом



С изолированным затвором



При подключении к истоку (И) отрицательного потенциала, а к стоку (С) – положительного в канале «исток-сток» возникает электрический ток, величина которого управляется напряжением на электроде затвора (З).

Затвор электрически отделен от канала «исток-сток» либо "обратно смещённым" (запертым) p-n переходом, либо тонким слоем диэлектрика (это два разных вида транзисторов - см. на рисунке выше). Структуры с диэлектриком называются МДП (металл диэлектрик полупроводник). Обычно в качестве диэлектрика берут SiO_2 , тогда структура называется МОП (металл окисел полупроводник).

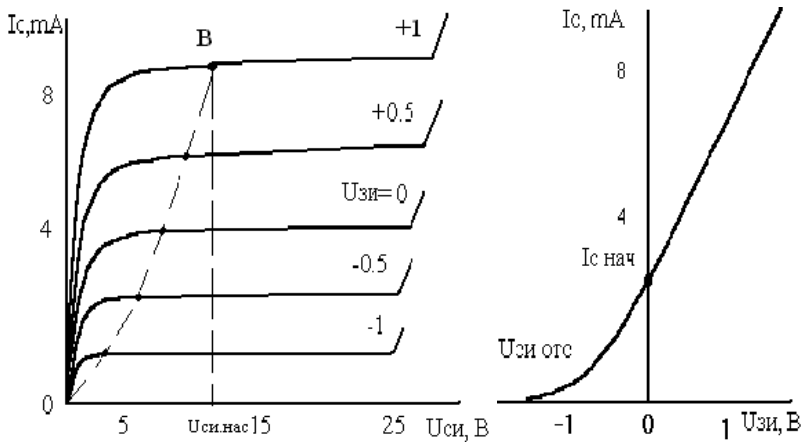
В схеме с **управляющим p-n переходом** затвор перекрывает канал «исток-сток» областью пространственного заряда, которую электронам проводимости приходится огибать, чтобы попасть в сток. В схеме с **изолированным затвором** поле затвора опять-таки создаёт на пути электронов область пространственного заряда.

Разновидности каналов:

Индуцированный канал МДП: проводящий канал «исток-сток» появляется только при напряжении между затвором и истоком $U_{З\text{-}И} > U_{пороговое}$.

Встроенный канал МДП изготавливается технологически и проводит ток при напряжении $U_{З\text{-}И} = 0$. И только при $U_{З\text{-}И} < U_{отсечки} < 0$ (для *n*-канала) ток в цепи «исток-сток» прекращается.

Подложка (П) тоже может быть затвором, если *p-n* переход И-П смещён обратно.



ВАХ полевого транзистора в целом похоже на ВАХ биполярного.

Однако 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: $I_{вх}$ = 5 мкА, $R_{вх}$ = 106 Ом, $R_{и\text{-}с\ закр.}$= 1012 Ом, $R_{и\text{-}с\ откр.}$~ 100 Ом, $C_{и\text{-}с}$ = 10 пФ.

Бип. : $I_{вх}$ = 1 мкА, $R_{вх}$ ~ 100 Ом, $R_{и\text{-}с\ закр.}$~ 100 Ом, $R_{и\text{-}с\ откр}$~ 10 Ом, $C_{и\text{-}с}$ = 10 пФ.

Подвижности электронов и дырок в полупроводниках обычно соотносятся: $\mu_n/\mu_p \approx 2{,}5$, поэтому n-транзисторы считаются лучше p-транзисторов.

Басня про Людей:

Профессор философии, стоя перед своей аудиторией, взял пятилитровую стеклянную банку и наполнил её камнями, каждый не менее трёх сантиметров в диаметре.

В конце спросил студентов, полна ли банка?

Ответили: да, полна.

Тогда он открыл банку горошка и высыпал её содержимое в большую банку, немного потряс её. Горошек занял свободное место между камнями. Ещё раз профессор спросил студентов, полна ли банка?

Ответили: да, полна.

Тогда он взял коробку, наполненную песком, и насыпал его в банку. Естественно, песок занял полностью существующее свободное место и всё закрыл.

Ещё раз профессор спросил студентов, полна ли банка? Ответили: да, и на этот раз однозначно, она полна.

Тогда из-под стола он достал кружку с водой и вылил её в банку до последней капли, размачивая песок.

Студенты смеялись.

— А сейчас я хочу, чтобы вы поняли, что банка — это ваша жизнь.

Камни — это важнейшие вещи вашей жизни: семья, здоровье, друзья, свои дети — всё то, что необходимо, чтобы ваша жизнь всё-таки оставалась полной даже в случае, если всё остальное потеряется. Горошек — это вещи, которые лично для вас стали важными: работа, дом, автомобиль. Песок — это всё остальное, мелочи.

Если сначала наполнить банку песком, не останется места, где могли бы разместиться горошек и камни.

И также в вашей жизни, если тратить всё время и всю энергию на мелочи, не остаётся места для важнейших вещей. Занимайтесь тем, что вам приносит счастье: играйте с вашими детьми, уделяйте время супругам, встречайтесь с друзьями. Всегда будет ещё время, чтобы поработать, заняться уборкой дома, починить и помыть автомобиль. Занимайтесь, прежде всего, камнями, то есть самыми важными вещами в жизни; определите ваши приоритеты: остальное — это только песок.

Тогда студентка подняла руку и спросила профессора, какое значение имеет вода?

Профессор улыбнулся.

— Я рад, что вы спросили меня об этом. Я это сделал просто, чтобы доказать вам, что, как бы ни была ваша жизнь занята, всегда есть немного места для праздного безделья.