

ЭЛЕКТРОНИКА

ЛЕКЦИЯ 1

ВВЕДЕНИЕ. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

(4 ЧАС)

(СВОЙСТВА P - N ПЕРЕХОДА; ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ; БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР (СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ И h -ПАРАМЕТРЫ); ТИПЫ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ; ТИРИСТОР; РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРА; ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Литература

1. **Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров** Аналоговая и цифровая электроника. - М.: Горячая линия - Телеком, 2000. - 768С.
2. **А.Л. Марченко Основы электроники / Учебное пособие для вузов.** - — М. : ДМК Пресс, 2008. — 296 С.
3. **В. А. Скаржепа, А. Н. Луценко Электроника и схемотехника Ч. 1. Электронные устройства информационной автоматики: Учебник/Под общ. ред. А. А. Краснопрошиной.**— К. : Выща шк. Головное изд-во, 1989. — 431 С.
4. **А.Л. Марченко, С.В. Освальд Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim.** - М.: ДМК Пресс, 2010. - 488 С.

Электрические сигналы в электронных устройствах

по своей физической сути ДЕЛЯТ на аналоговые и дискретные.

Аналоговые сигналы - непрерывные во времени функции напряжения или тока (постоянные и переменные).

Постоянные аналоговые сигналы - однополярные медленно изменяющиеся во времени напряжения или ток. Переменными аналоговыми сигналами наз. функции напряжения или тока, изменяющиеся во времени как по амплитуде, так и по знаку. Частным случаем переменного сигнала является гармонический или синусоидальный.

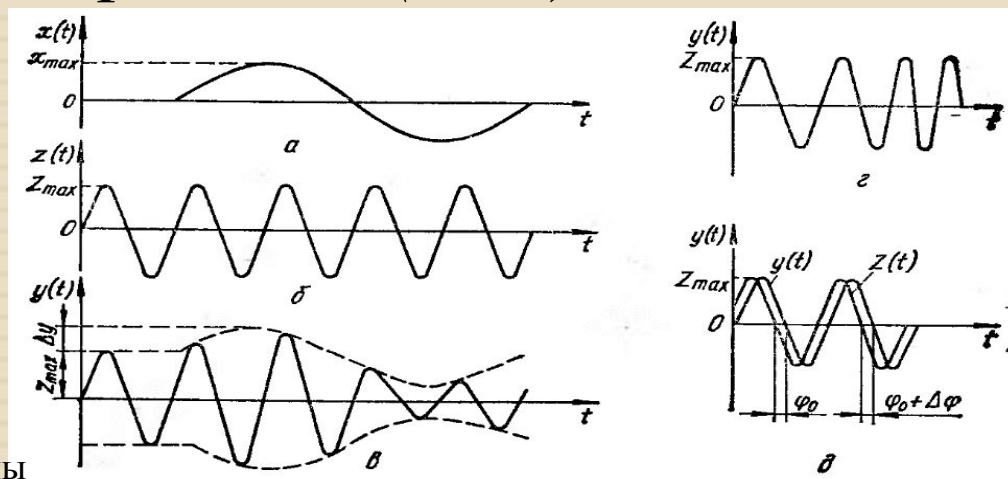
Электронные устройства, оперирующие с аналоговыми сигналами, как правило, работают в линейном режиме и составляют класс аналоговых устройств.

Электронные устройства (ЭУ) по способу формирования и передачи сигналов подразделяются на два класса: аналоговые (непрерывные) и дискретные (прерывистые).

Аналоговые электронные устройства (АЭУ) -

устройства приёма, преобразования и передачи электрического сигнала изменяющегося по закону непрерывной (аналоговой) функции.

В аналоговом электронном устройстве каждому конкретному значению реальной физической величины на входе датчика соответствует однозначное, вполне определённое значение выбранного параметра электрического постоянного или переменного тока (напряжение в узле или ток в ветви электрической цепи его частота, фаза и т. п.).



Дискретными наз. электрические сигналы, которые представляют собой разрывные во времени функции напряжения или тока и могут принимать ограниченное число уровней.

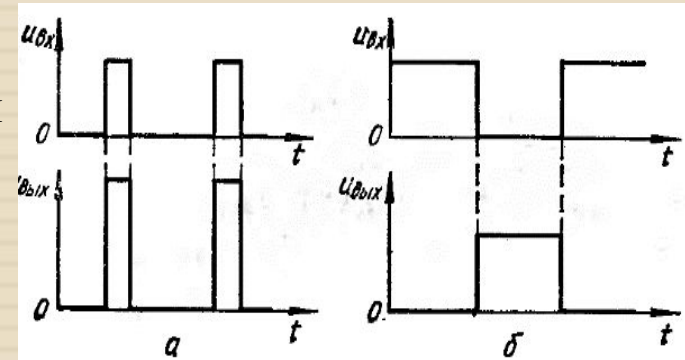
Наиболее часто дискретные сигналы, которые имеют только два уровня — высокого напряжения (тока) и низкого напряжения (тока). Такие сигналы наз. импульсными или двоичными.

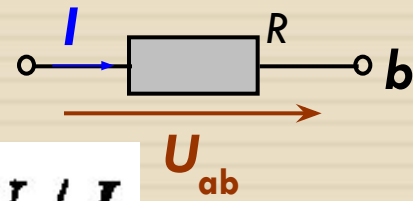
Электронные устройства, оперирующие с дискретными сигналами, работают в существенно нелинейном режиме. Основу их структуры составляют нелинейные (ключевые) элементы

Дискретные электронные устройства (ДЭУ) – устройства для приёма, преобразования и передачи электрических сигналов, полученных квантованием¹ по времени и/или уровню исходной аналоговой функции $x(t)$. Поэтому действующие в них сигналы пропорциональны конечному числу выбранных по определённому закону значений реальной

физической величины, численные величины которых представляются различными параметрами импульсов² или перепадов³ напряжения или тока.

¹*Квантование - процесс замены непрерывного сигнала его значениями в отдельных точках.*





Закон Ома: $U = IR$, $I = U / R$, $R = U / I$

Закон Джоуля – Ленца.

$$W = I^2 R t$$

$$I = \frac{\pm U_{ac} + \sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{k=1}^m R_k}$$

Мощность $P = I^2 R = UI = U^2 / R$

Первый закон Кирхгофа

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

Второй закон Кирхгофа

$$\sum_{i=1}^n U_k = \sum_{k=1}^m E_k$$

Сопротивление провода

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

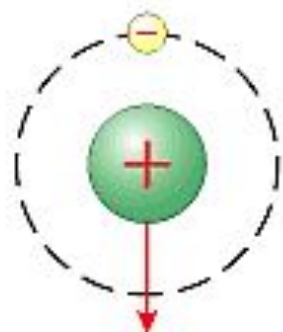
где ρ — *удельное сопротивление* вещества проводника, l — длина проводника, а S — площадь сечения.

4 агрегатных состояния вещества

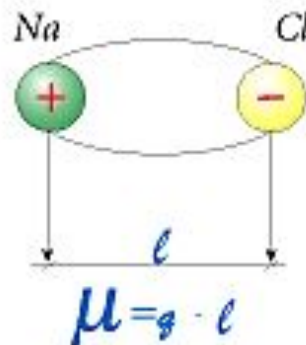
I Газы

Молекулы газа могут быть:

- 1) нейтральными 2) полярными или дипольными



O₂



II Жидкости



конденсатор
конденсаторные масла

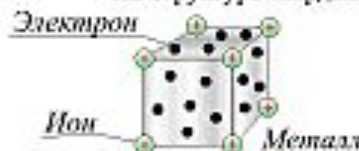
1. Диэлектрики состоят из нейтральных и слабополярных молекул.
2. Проводники состоят из растворов или расплавов ионных соединений.



4 агрегатных состояния вещества

III Твёрдое тело

По структуре твёрдые тела бывают:



1. Кристаллические
Большинство твёрдых тел имеют кристаллическую решётку.



стекло

2. Аморфные
Эти тела изотропны.



фарфор

3. Смешанные
Они имеют две фазы:
а) стекловидную и
б) кристаллическую.

Твёрдые вещества имеют две структуры



1. Монокристаллическую - единый целый кристалл (NaCl)



Микроструктура
электротехнических
алю сплавов

2. Поликристаллическую - плотные группы мелких беспорядочно сросшихся кристаллов (металлы их сплавы).



Электротехнические материалы — специальные материалы, обладающие свойствами, проявляющимися в электрическом и магнитном полях. Среди них выделяют три группы материалов, оцениваемых по важнейшему свойству — способности проводить электрический ток, которая зависит от удельной электрической проводимости материала (или от обратной ей характеристики — удельного электрического сопротивления).

Проводники обладают высокой удельной электрической проводимостью (малым удельным электрическим сопротивлением), т.е. хорошо проводят электрический ток (10^{-8} до 10^{-12} Ом*м):

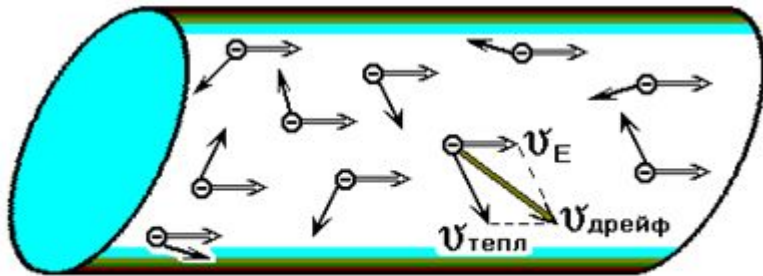
- Металлы — твёрдые (кроме ртути) проводники с электронной проводимостью.
- Электролиты — жидкие проводники с ионной проводимостью.
- Ионизированные газы — проводники со смешанной электронно-ионной проводимостью

Изоляторы (диэлектрики) имеют весьма низкую удельную электрическую проводимость (высокое удельное электрическое сопротивление) и потому плохо проводят электрический ток (изоляция токоведущих деталей, находящихся под разными электрическими потенциалами). В конденсаторах диэлектрики используют для создания электрической ёмкости. В группу изоляторов входят материалы сотен наименований, среди которых есть твёрдые, жидкие и газообразные, природные и синтетические материалы. $10^{12}/10^{14}$ Ом*м

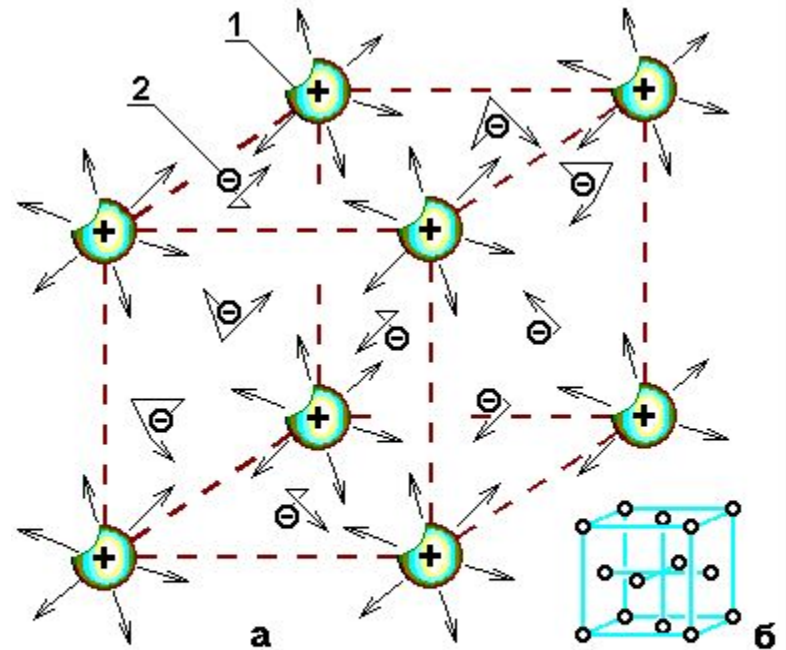
Полупроводники по способности проводить электрический ток занимают промежуточное положение между проводниками и изоляторами: их удельная электрическая проводимость мала для того, чтобы считать их проводниками, но слишком велика, чтобы использовать их как изоляторы. Под действием электрического поля, света, температуры, механических сил и др. Широко используются для изготовления диодов, транзисторов, фоторезисторов и фотоэлементов, терморезисторов и других полупроводниковых приборов, входящих в состав элементной базы современной вычислительной техники, электронной аппаратуры автоматического контроля и регулирования параметров и режимов технологических процессов. 10^{-5} до 10^{-6} Ом*м

Металлы в твердом состоянии имеют кристаллическую структуру. Частицы в кристаллах расположены в строго определённом порядке и образуют пространственную кристаллическую решётку (рис.). В узлах кристаллической решётки расположены положительно заряженные ионы, которые колеблются относительно узлов.

В пространстве между ионами беспорядочно движутся отрицательно заряженные свободные электроны. В 1 мм^3 металла содержится около 10^{20} электронов. Средняя скорость их хаотического движения даже при комнатной температуре весьма



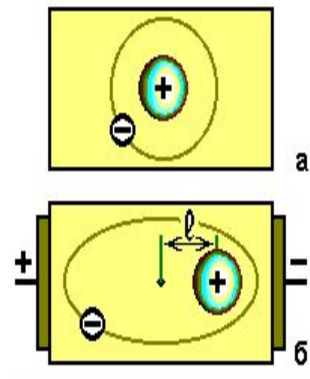
Дрейф электронов металла под действием сил электрического поля



Электролиты — растворы кислот, солей, щелочей, оксидов, содержащие положительно и отрицательно заряженные ионы. Вне электрического поля они движутся хаотично, а под действием сил электрического поля начинают перемещаться ещё и направленно, образуя ток в электролите. Положительные и отрицательные ионы перемещаются встречно, устремляясь соответственно к отрицательному (катоде) и положительному (аноду) электродам, помещённым в раствор.

Газы вне электрического поля содержат весьма малое количество заряженных частиц. Под энергетическим воздействием космического излучения, ультрафиолетового излучения Солнца, радиоактивного фона земной коры электроны возбуждаются и отрываются от нейтральных молекул газа, в результате чего в нём возникает естественная ионизация — в газе образуются свободные электроны и положительные ионы. При хаотическом перемещении электроны с

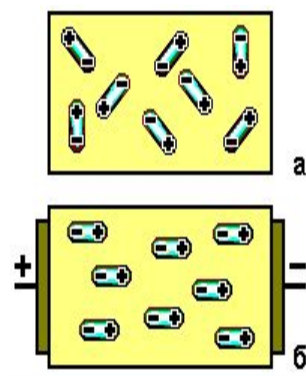
Электронная поляризация — упругое смещение электронных оболочек относительно ядра атомов диэлектрика под действием внешнего электрического поля



. Электронная поляризация диэлектрика. Диэлектрик вне электрического поля (а) и в электрическом поле (б)

Дипольная поляризация — ориентация диполей диэлектрика по внешнему электрическому полю

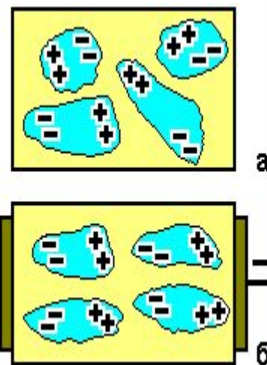
Полярные молекулы — устойчивые диполи, существующие и вне электрического поля, но относительно друг друга они размещены хаотично, сумма их дипольных моментов равна нулю. В электрическом поле диполи диэлектрика поворачиваются, ориентируясь по нему, и растягиваются полем, что увеличивает их дипольные моменты. Суммарный дипольный момент упорядоченно ориентированных удлинённых диполей в 4...7 раз превосходит аналогичный показатель вакуума. Энергия, затраченная на ориентацию диполей, — диэлектрические потери, необратимо преобразующиеся в тепло.



. Дипольная поляризация диэлектрика. Диэлектрик вне электрического поля (а) и в электрическом поле (б)

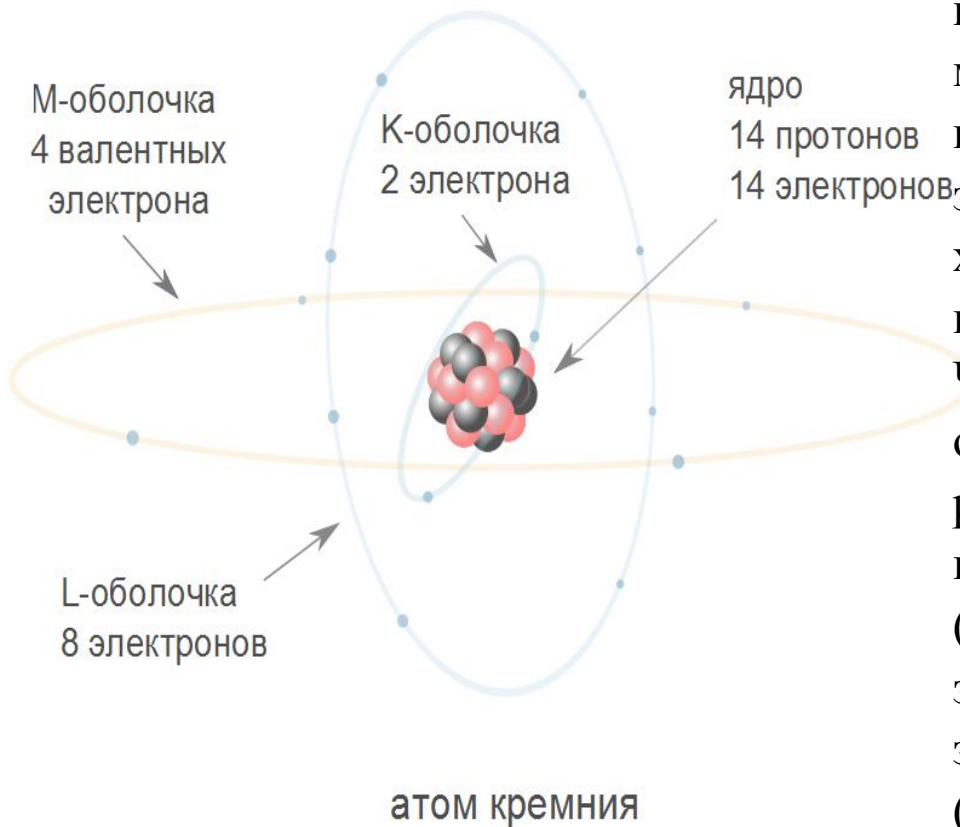
Спонтанная поляризация связана с наличием в диэлектрике областей — доменов областей — доменов, в пределах которых диполи имеют одинаковую ориентацию, но слабо связаны друг с другом.

Ориентация диполей соседних доменов различна и при отсутствии внешнего электрического поля их суммарный дипольный момент равен нулю. Направление приложенного поля совпадает с ориентацией диполей какого-либо домена, который начинает подчинять своей ориентации диполи соседних областей и расти за их счёт. Процесс завершается одинаковой ориентацией всех диполей диэлектрика. Диэлектрики, в которых процесс спонтанной поляризации



Спонтанная (доменная) поляризация диэлектрика. Диэлектрик вне электрического поля (а) и в электрическом поле (б)

СВОЙСТВА P-П ПЕРЕХОДА



Электрические свойства материала зависят от количества валентных электронов у их атомов. Чем их меньше, тем слабее связь каждого валентного электрона с ядром атома (такой материал лучше проводит электрический ток, т.е. его атомы "охотнее" расстаются со своими электронами). Лучшие проводники - химические элементы с одним электроном на внешней оболочке.: золото (Au) или медь (Cu). Чем больше заполнена внешняя электронная оболочка, тем больше энергии требуется на разрыв связей между ядром атома и валентными электронами. Лучшие диэлектрики (материалы, практически не проводящие электричество) - химические элементы с завершённой валентной оболочкой (благородные газы. неон (Ne) или аргон (Ar)). У полупроводников внешняя электронная оболочка заполнена наполовину. Эти материалы не могут быть хорошими проводниками, как и диэлектриками. 8, 18, 32, 50

К полупроводникам относят многие химические элементы (кремний, германий, индий, бор, галлий и др.), большинство окислов и сульфидов (закись меди, окись цинка, сульфид галлия и др.), интерметаллические соединения (арсенид галлия, карбид кремния и др.)

Удельное электрическое сопротивление полупроводников лежит в широких пределах от 10^{-5} до 10^{-6} Ом*м. Для сравнения, например металлы при комнатной температуре имеют удельное сопротивление 10^{-7} Ом*м, а диэлектрики $10^{12}/10^{14}$ Ом*м. Основная особенность полупроводников – возрастание удельной электрической проводимости при увеличении температуры.

Свойства полупроводников хорошо объясняются с помощью **зонной теории твердого тела**. Согласно квантовой механике энергия электрона дискретна (прерывиста) или квантована. Вследствие этого электрон может двигаться только по своей орбите.

С точки зрения зонной теории твердого тела деление твердых тел на металлы, полупроводники и диэлектрики производят, исходя из ширины запрещенной зоны и степени заполнения разрешенных энергетических зон.

Ширина запрещённой зоны ΔW наз. энергией активизации собственной проводимости. При $\Delta W \leq 2\text{эВ}$ (электрон–вольт) кристалл является полупроводником, при $\Delta W > 2\text{эВ}$ – диэлектриком.

Классификация веществ по электрическим свойствам

Зонная теория твёрдых тел

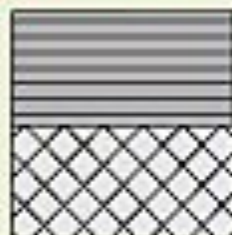
Энергетическая диаграмма атома



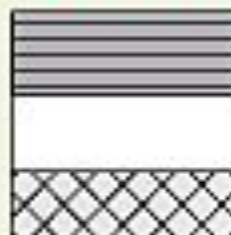
Различие между телами показывается с помощью Энергетических диаграмм зонной теории твёрдых тел.

1. заполненная электронами зона.
2. запрещённая зона.
3. свободная зона.

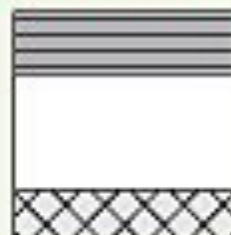
Различие в энергетических диаграммах проводников, полупроводников и диэлектриков



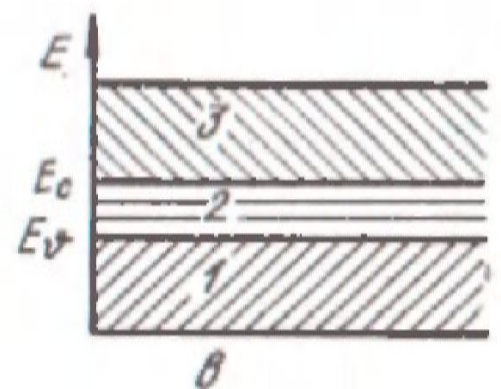
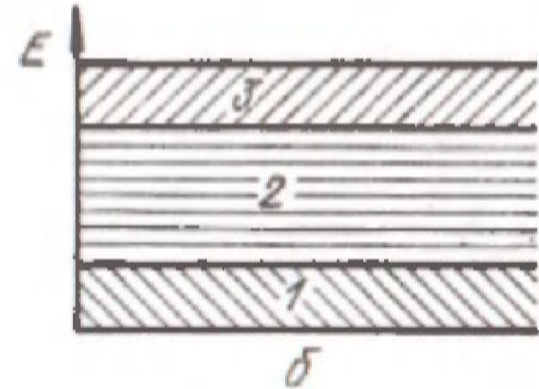
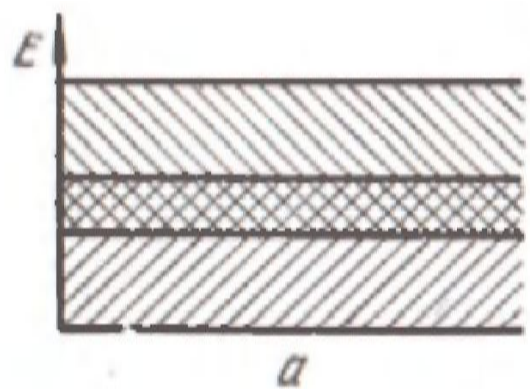
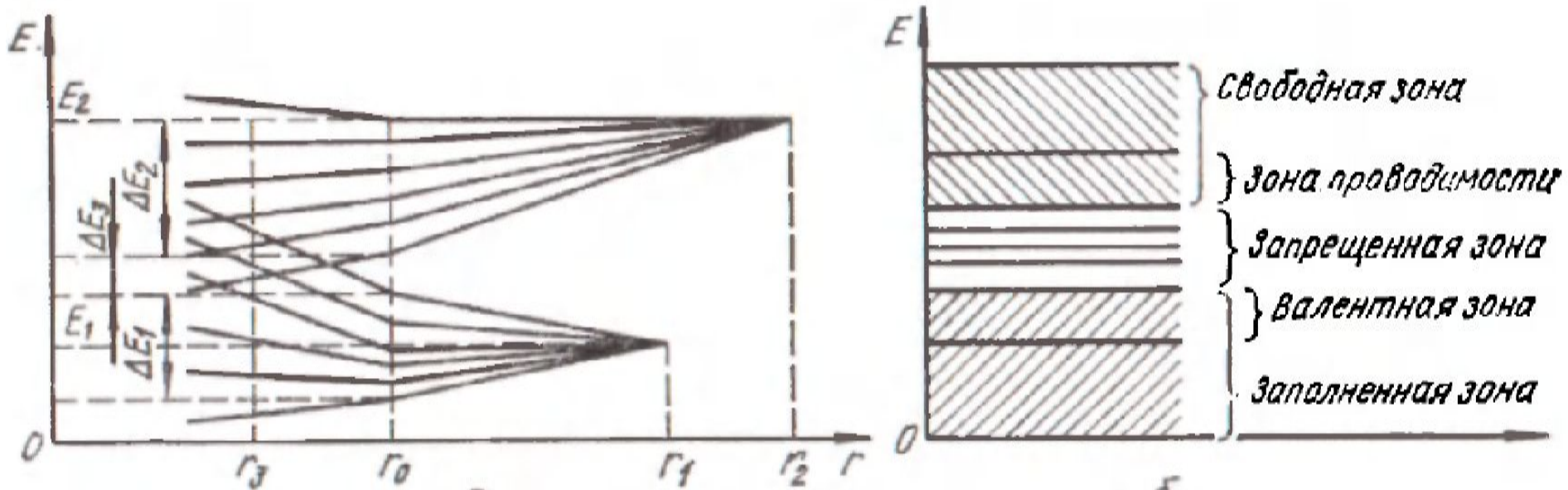
Проводник



Полупроводник



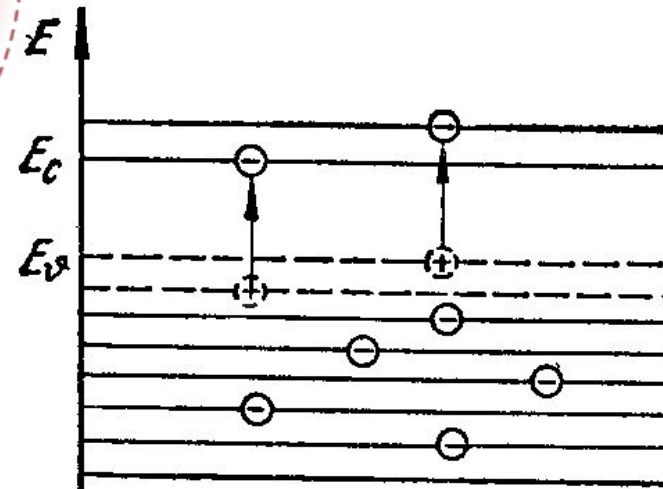
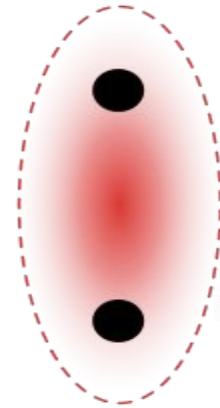
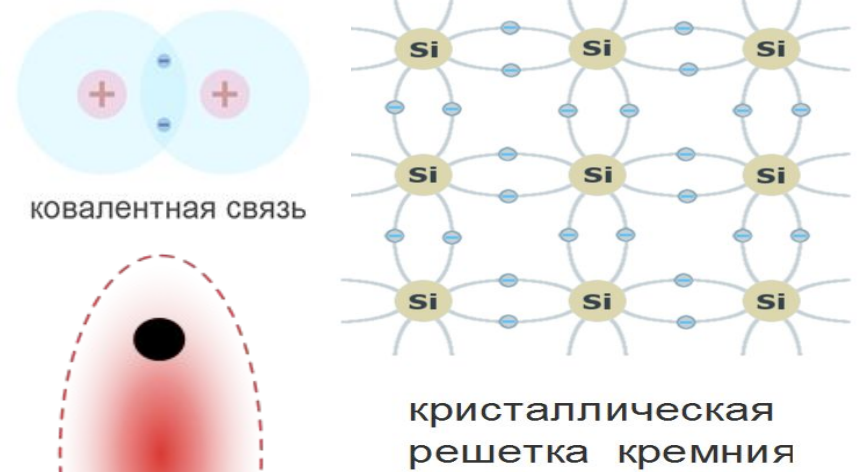
Диэлектрик



Энергия Ферми - это максимально допустимая энергия, ниже которой при нулевой абсолютной температуре все энергетические уровни заняты [$f(E) = 1$], а выше которой все уровни пусты [$f(E) = 0$]. Для полупроводников, у которых при абсолютном нуле валентная зона полностью заполнена, а зона проводимости совершенно свободна, функция распределения имеет разрыв. Уровень Ферми в полупроводнике при абсолютном нуле в запрещённой зоне лежать, при температуре, отличной от нуля - в середине запрещённой зоны.

Кристаллическая решетка кремния

В обычном состоянии, атомы кремния образуют кристаллическую решетку. На внешней электронной оболочке атома находятся четыре электрона. С их помощью, устанавливается ковалентная связь с четырьмя соседними атомами. Каждый электрон в такой связи принадлежит двум атомам одновременно. Таким образом, у каждого атома на внешней электронной оболочке находится восемь электронов. В результате, поскольку последний уровень электронной оболочки оказывается завершённым, у атома очень трудно забрать его электроны и материал ведёт себя как диэлектрик (не проводит электрический ток).



Легирование полупроводников

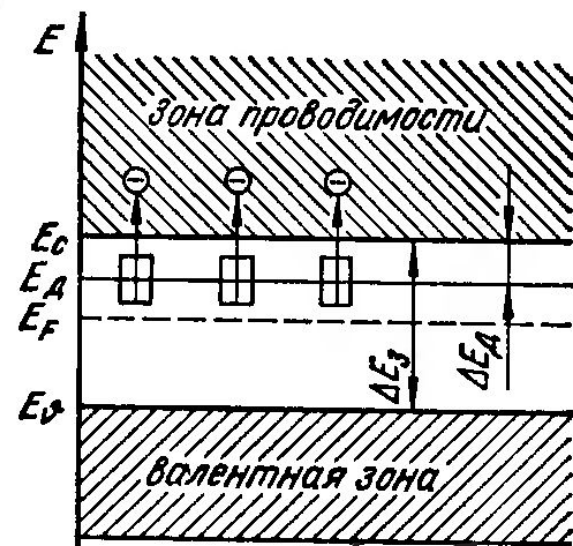
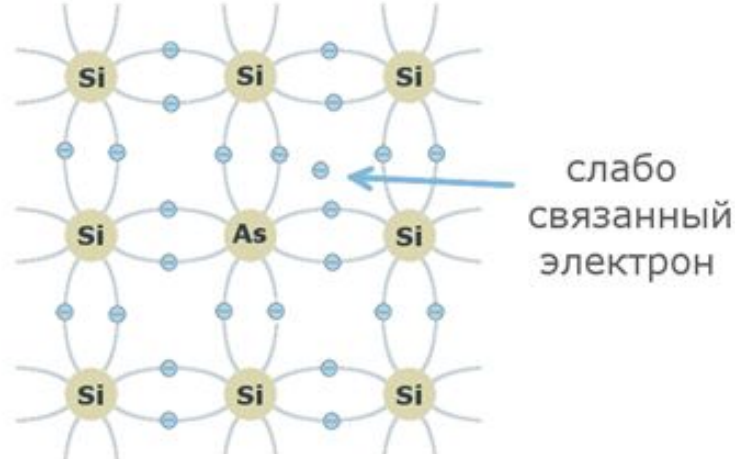
Для того чтобы повысить проводимость полупроводников, их специально загрязняют примесями – атомами химических элементов с другим значением валентности. Примеси с меньшим количеством валентных электронов, чем у полупроводника, называются **акцепторами**. Примеси с большей валентностью – **донорами**. Сам этот процесс называется легированием полупроводников. Примерное соотношение - один атом примеси на миллион атомов полупроводника.

Типы проводимости полупроводников

1. Электронная проводимость

Добавим в полупроводник кремния пятивалентный атом мышьяка (As). Посредством четырех валентных электронов, мышьяк установит ковалентные связи с четырьмя соседними атомами кремния. Для пятого валентного электрона не останется пары, и он станет слабо связанным с атомом.

Под действием электромагнитного поля, такой электрон легко отрывается, и вовлекается в упорядоченное движение заряженных частиц (электрический ток). Атом, потерявший электрон, превращается в положительно заряженный ион с наличием свободной вакансии - дырки.



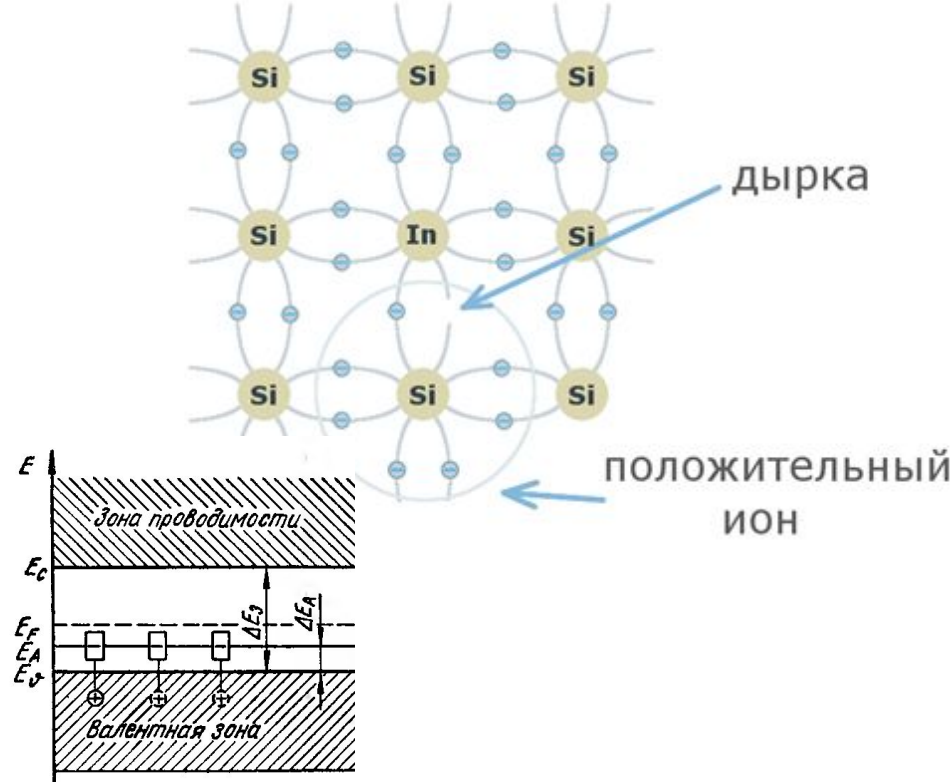
Полупроводники с электронной проводимостью (добавки пятивалентной примеси — доноров типа мышьяк (As) (или др.) наз полупроводниками n- типа.

Несмотря на присутствие дырок в полупроводнике кремния с примесью мышьяка, основными носителями свободного заряда являются электроны. Такая проводимость называется электронной, а полупроводник с электронной проводимостью - полупроводником N-типа.

2. Дырочная проводимость

Введем в кристалл кремния трехвалентный атом индия (In). Индий установит ковалентные связи лишь с тремя соседними атомами кремния. Для четвертого «соседа», у индия не хватает одного электрона. Этот недостающий электрон может быть захвачен атомом индия из ковалентной связи соседних атомов кремния.

Атом индия превратится в отрицательно заряженный ион, а в ковалентной связи соседних атомов образуется вакансия (дырка). В свою очередь, на это место может перескочить электрон из соседней ковалентной связи. В результате получается хаотическое блуждание дырок по кристаллу. Если поместить полупроводник в электромагнитное поле, движение дырок станет упорядоченным, т.е. возникнет электрический ток. Таким образом, обеспечивается дырочная проводимость. Полупроводник с дырочной проводимостью называется полупроводником Р-типа.

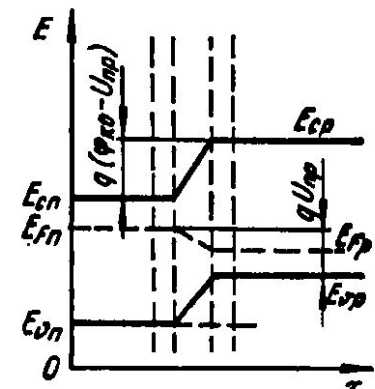
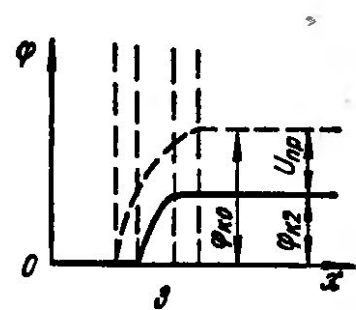
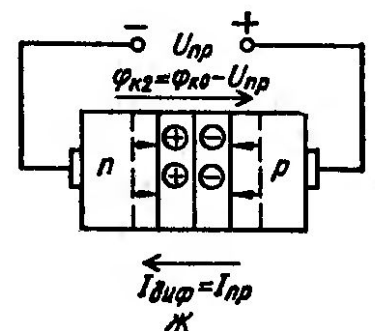
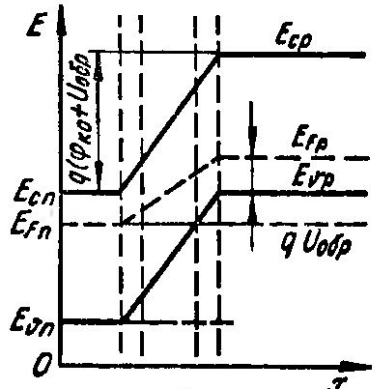
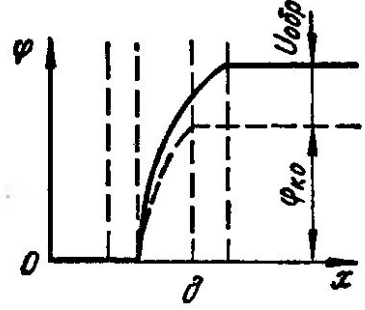
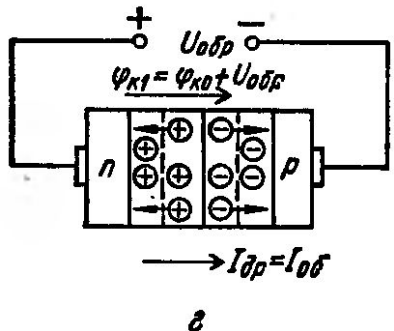
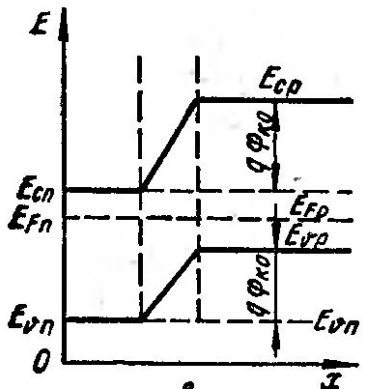
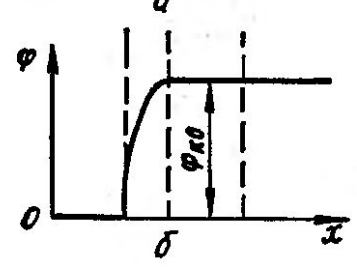
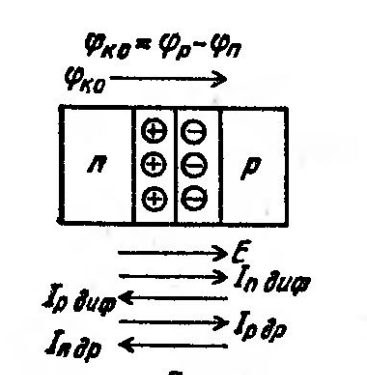


Полупроводники с дырочной проводимостью (добавки трёхвалентной примеси — акцепторов типа индий (In) или др.), наз. полупроводниками р-типа

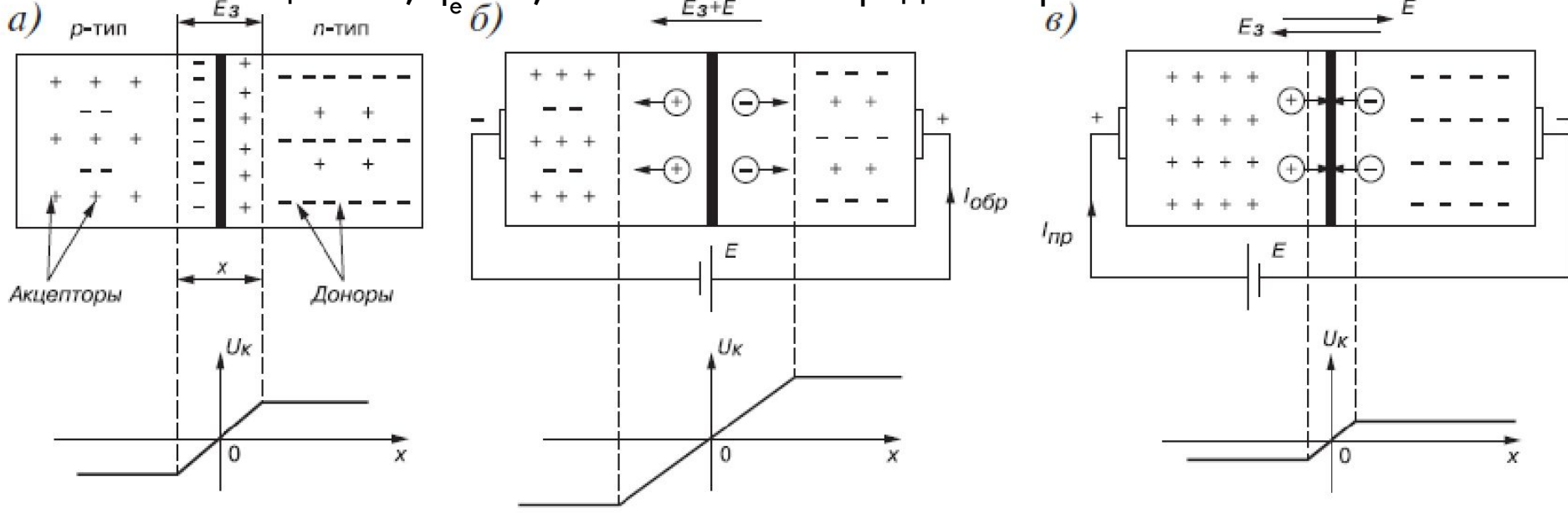
P-n-

переход

P-n-переходом наз. электронно-дырочный переход, получаемый при технологическом соединении (сплавление, диффузия, эпитаксия) полупроводников с электронной (n) и дырочной (p) проводимостями (выращивание - закономерное нарастание одного кристаллического материала из другом при более низких температурах)



При сплавлении полупроводников различных типов создаётся область объёмного заряда по обе стороны от границы раздела, называемая электронно-дырочным или р-n-переходом. При этом возникает так называемый запирающий (барьерный) слой в несколько микрометров, лишенный носителей заряда, с напряженностью E электрического поля, которая препятствует диффузии носителей заряда (рис. 1.2, а). Потенциальная энергия поля $W_0 = q_e (\phi_a - \phi_b) = q_e U_\phi$, где U_ϕ — контактная разность потенциалов; $q_e = 1,6021019 \text{ Кл}$ — заряд электрона.



Если к р-n-переходу приложить *обратное напряжение* (рис. 1.2, б), то создаваемая им напряженность E электрического поля повышает потенциальный барьер и препятствует переходу электронов из n-области в p-область и дырок из p-области в n-область. При этом поток неосновных носителей (дырок из n-области и электронов из p-области), их *экстракция*, образует обратный ток $I_{обр}$. Если включить внешний источник энергии E , как это показано на рис. 1.2, в, то создаваемая им напряженность электрического поля будет противоположной направлению напряженности E_z объёмного заряда, и в область раздела полупроводников будет *инжектироваться* все большее количество дырок (являющимися неосновными для «-области носителями заряда), которые и образуют прямой ток $I_{пр}$. При напряжении 0,3...0,5 В запирающий слой исчезнет, и ток $I_{пр}$ определяется только сопротивлением полупроводника

Емкость р-п перехода.

По обе стороны границы р-п перехода расположены атомы донорной и акцепторной примесей и образуют отрицательные и положительные пространственные заряды. Если к р-п переходу приложить напряжение, то в зависимости от его величины будет изменяться его ширина, а, следовательно, и пространственный заряд. В этой связи р-п переход можно рассматривать как две пластины конденсатора с равными по величине, но противоположными по знаку заряду, т.е. р-п переход обладает емкостью. Различают барьерную и диффузионную емкость. Барьерная емкость определяется:

$$C_{\text{б}} = \frac{Q_{\text{об}}}{U_{\text{об}}}, \quad (12.12)$$

где $Q_{\text{об}}$ – объёмные заряды, образованные ионизированными атомами акцепторной примеси; $U_{\text{об}}$ – обратное напряжение.

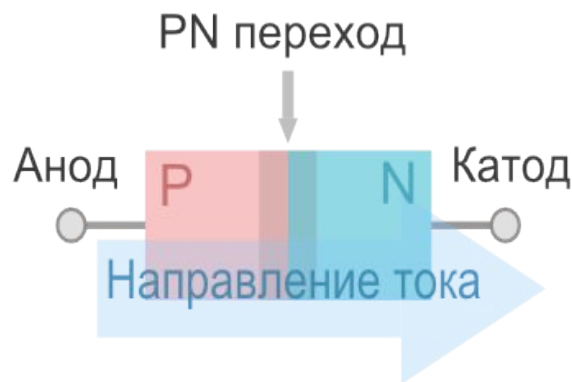
$$C_{\text{диф}} = dQ/dV. \quad C_{\text{диф}} = \frac{(I_p \tau_p + I_n \tau_n)}{\phi_T} = S \frac{j_p \tau_p + j_n \tau_n}{\phi_T} \quad (5.45)$$

При включении р-п перехода в прямом направлении из каждой области в смежную инжектируются неосновные для нее носители заряда. Это связано с диффузией зарядов при понижении потенциального барьера. Если слои тонкие, то около границы р-п перехода возникает избыточная концентрация неосновных носителей. Чтобы нейтрализовать этот заряд из прилегающих слоев отсасываются основные носители. Следовательно, в каждой области у границы р-п перехода возникают равные по значению, но противоположные по знаку заряды $Q_{\text{диф}}$. Емкость, которая связана с изменением инжектированных носителей при изменении напряжения, называют диффузионной. Эта емкость увеличивается с увеличением прямого тока, а барьерная емкость увеличивается при увеличении обратного тока. При расчетах р-п перехода при прямом напряжении учитывают $C_{\text{диф}}$, а при обратном $C_{\text{б}}$.

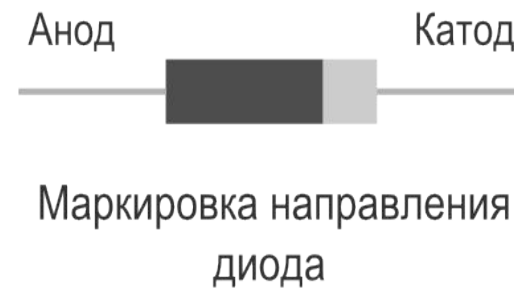
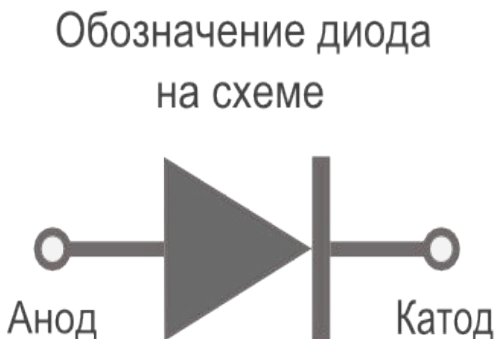
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Основная задача выпрямительного диода – *проводить электрический ток в одном направлении, и не пропускать его в обратном*. Идеальный диод должен быть очень хорошим проводником с нулевым сопротивлением при прямом подключении напряжения (плюс - к аноду, минус - к катоду), и абсолютным изолятором с бесконечным сопротивлением при обратном.

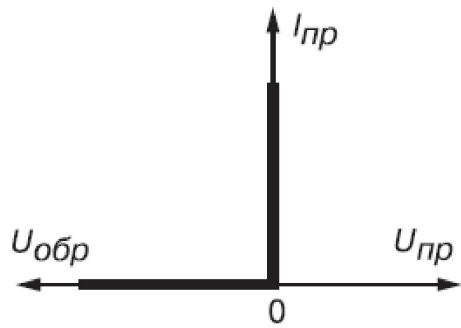
Полупроводниковым диодом называют прибор с одним p-n-переходом, имеющий два вывода: (анод и катод), проводящий электрический ток в одном направлении, и не пропускающий ток в обратном



Строение диода

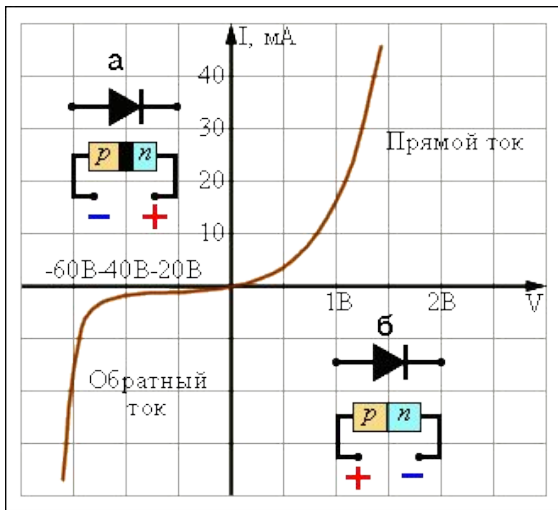
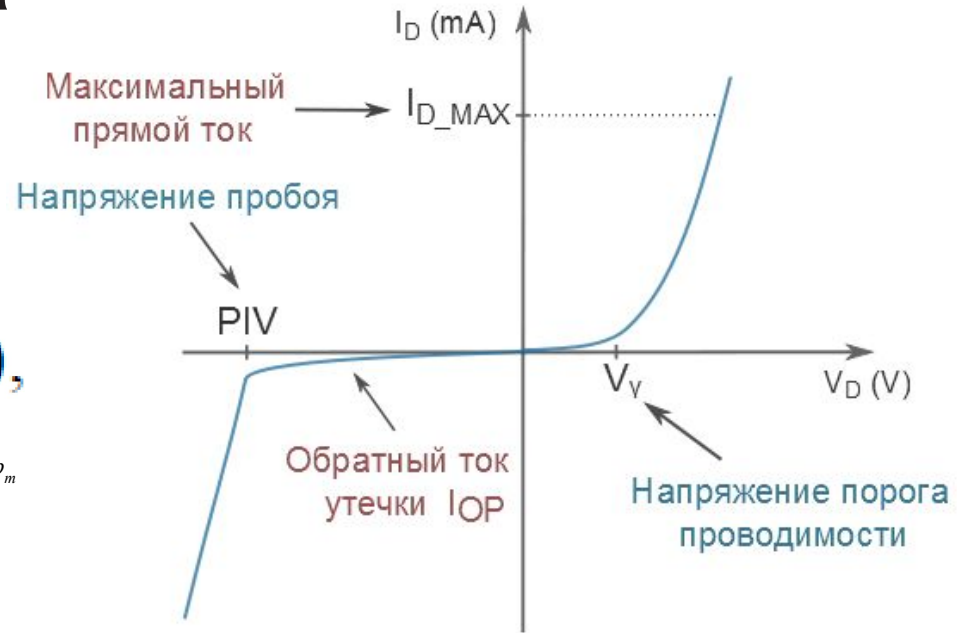


вольтамперная характеристика диода



$$I = I_0 \left(e^{\frac{q_e U}{kT}} - 1 \right) = I_0 \left(e^{U/\varphi_T} - 1 \right),$$

где I_0 — ток насыщения; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; $\varphi_m = T/11600$ — температурный потенциал электрона, равный при $t = 20^\circ\text{C}$,



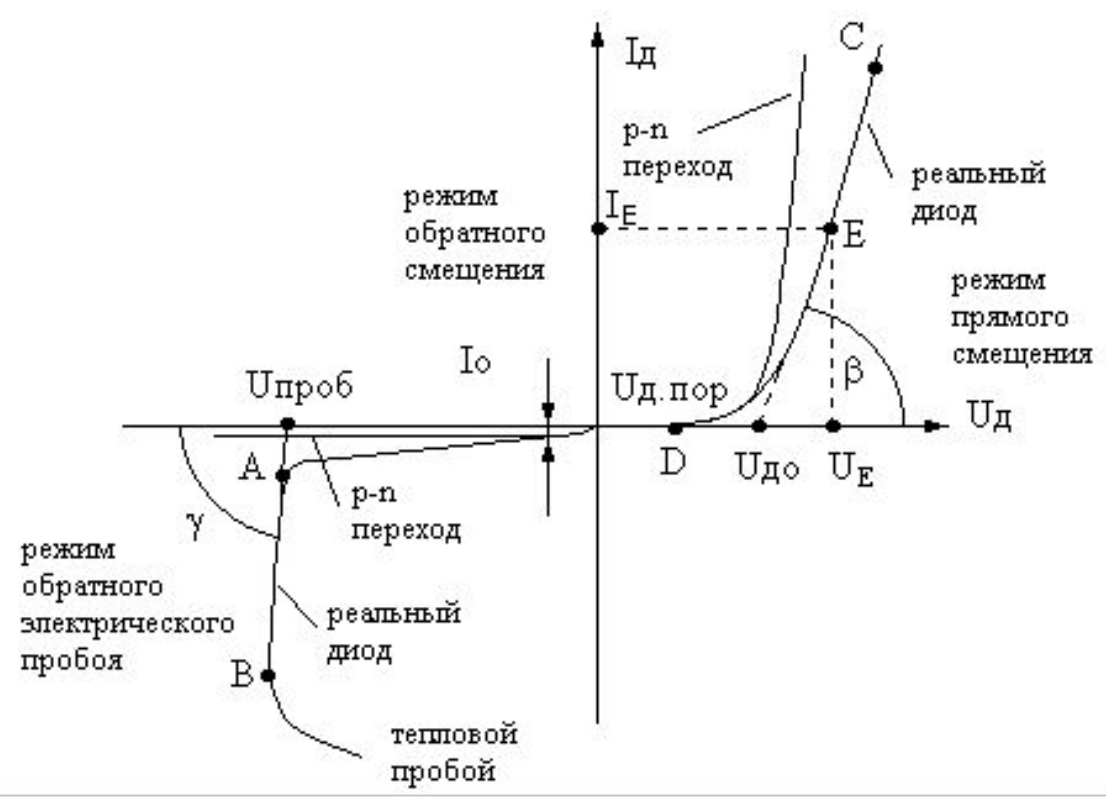
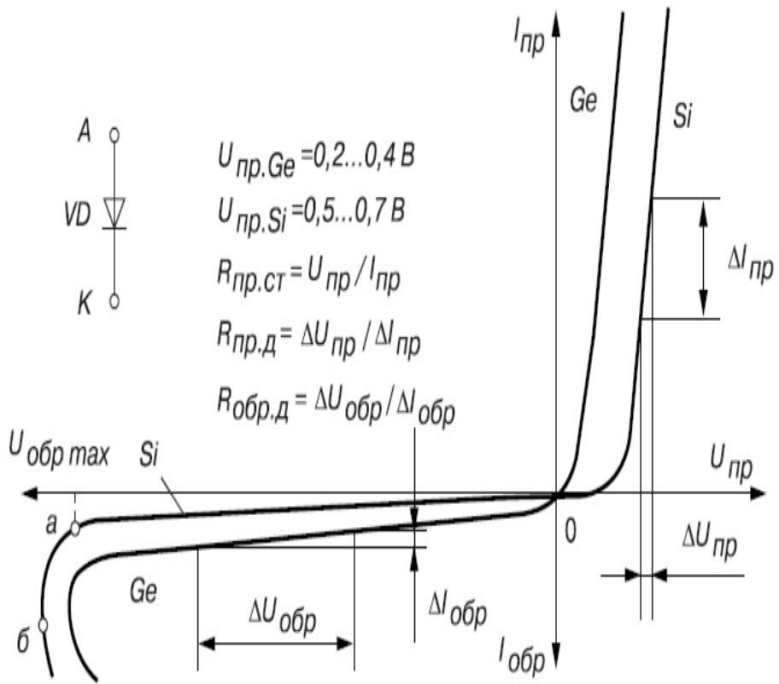
Вольт-амперная характеристика, т. е. зависимость тока, протекающего через p - n -переход, от значения и полярности приложенного к нему напряжения U , достаточно хорошо соответствует выражению

$$I = I_0 \left(e^{\frac{q_e U}{kT}} - 1 \right) = I_0 \left(e^{U/\varphi_T} - 1 \right),$$

где I_0 — ток насыщения; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; $\varphi_T = T/11600$ — температурный потенциал электрона, равный при $t = 20^\circ\text{C}$,

$$\varphi_T = \frac{273 + 20}{11600} \approx 0,025 \text{ В} = 25 \text{ мВ}.$$

При включении p - n -перехода под *прямое* напряжение $U_{пр}$ сопротивление p - n -перехода $R_{пр}$ снижается, а ток $I_{пр}$ возрастает. При *обратном* напряжении $U_{обр}$ обратный ток I неосновных носителей заряда оказывается во много сотен или тысяч раз меньше прямого тока. При напряжении $U > U_{max}$ (см. точку *a* на ВАХ) иода) начинается лавинообразный процесс нарастания обратного тока I , соответствующий электрическому пробое p - n -перехода, переходящий (если не ограничить ток) в необратимый тепловой пробой (после точки *b* на рис.)



Различают электрический (обратимый) и неэлектрический (необратимый) пробой $p-n$ перехода. Электрический пробой $p-n$ перехода бывает двух типов: лавинный и туннельный.

Электрический лавинный пробой возникает в результате внутренней электрической эмиссии электронов под " действием ударной ионизации атомов полупроводника.

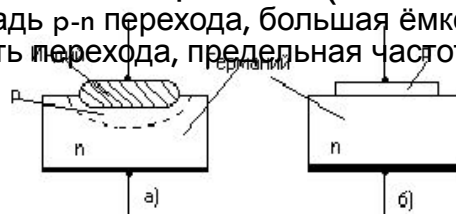
Туннельный пробой возникает за счет туннельного эффекта, при котором длина свободного пробега носителей заряда становится больше ширины $p-n$ перехода и ударная ионизация при этом невозможна.

Электрический пробой наз. обратимым, так как $p-n$ переход может находиться в режиме пробоя значительное число раз, сохраняя при этом свои свойства при уменьшении обратного напряжения. Необратимый : тепловой и поверхностный.

Разновидности диодов

Выпрямительные диоды используют в схемах преобразования (выпрямления) переменного тока в постоянный ток:

плоскостные диоды средней и большой мощности (большая площадь p-n перехода большая площадь p-n перехода, большая ёмкость перехода, предельная частота частот большая площадь p-n перехода, большая ёмкость перехода, предельная частота:



точечные диоды (малая площади p-n перехода точечные диоды (малая площади p-n перехода, малая ёмкость перехода, предельная частота частот точечные диоды (малая площади p-n перехода, малая ёмкость перехода, предельная частота 300—600 МГц точечные диоды (малая площади p-n перехода, малая ёмкость перехода, предельная частота 300—600 МГц. При использовании более острых гипердиодов точечные диоды с предельной частотой порядка десятков гигагерц;



Принцип устройства точечного (а) и микрополосного (б) диодов

Маломощные диоды - мощность рассеивания до 0,3 Вт,
диоды средней мощности - мощность рассеивания 0,3-10 Вт,
диоды большой мощности - мощность рассеяния >10Вт.

Параметры выпрямительных диодов:

$I_{пр}$ — прямой ток;

$U_{пр}$ — прямое напряжение;

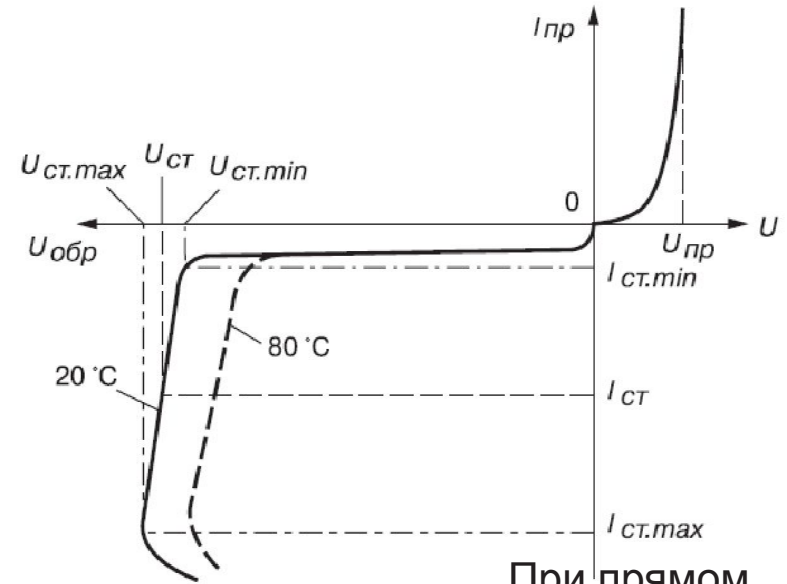
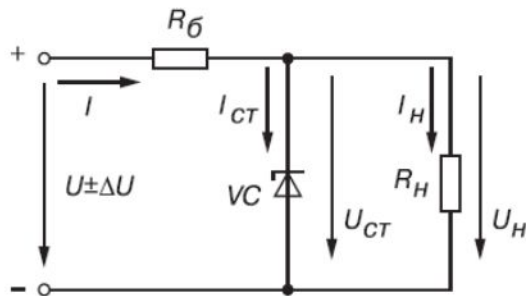
I_{max} — максимальный допустимый прямой ток;

$U_{обр.max}$ — максимальное допустимое обратное напряжение;

— I обратный ток, который нормируется при максимальном допустимом обратном напряжении.

Выпускаются *диодные столбы*, в которых для увеличения обратного напряжения последовательно соединены от 5 до 50 диодов с допустимым обратным напряжением от 2 до 10 кВ

2. Стабилитроны или опорные кремниевые диоды используют в параметрических стабилизаторах напряжения. Рабочим участком ВАХ стабилитрона - участок обратной её ветви (область обратного электрического пробоя *p-n*-перехода), ограничен минимальным и максимальным значениями тока



Основными параметрами стабилитрона являются:

- $U_{cm} = 3...180 \text{ В}$ — напряжение на стабилитроне;
- $R_{\partial} = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta I_{cm}} = \frac{U_{cm.max} - U_{cm.min}}{I_{cm.max} - I_{cm.min}}$ — динамическое сопротивление на участке стабилизации;
- $I_{cm.min}$ и $I_{cm.max}$ — минимальный и максимальный токи стабилизации (от 5 мА до 5 А);
- $TКН \% = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta T} 100 = 0,3...0,4 \text{ \%/град}$ — температурный коэффициент напряжения на участке стабилизации, характеризующий относительное изменение напряжения стабилизации, вызванное изменением температуры на 1°C при постоянном токе, протекающем через стабилитрон.

При прямом включении стабилитрон работает, как обычный диод, $U_{пр} 0,3-0,4 \text{ В}$ мало изменяется при значительных изменениях $I_{пр}$. Прибор, в котором используется прямая ветвь в схеме стабилизации напряжения, называют **стабистором**.

3. Высокочастотные диоды — приборы универсального назначения (для выпрямления токов в широком диапазоне частот — до сотен мегагерц, генерации колебаний СВЧ диапазона, модуляции сигналов, детектирования и других нелинейных преобразований).

Для нормальной работы, чтобы сохранить одностороннюю проводимость на высокой частоте, эти диоды должны иметь точечную структуру участка пробоя.

Параметры:

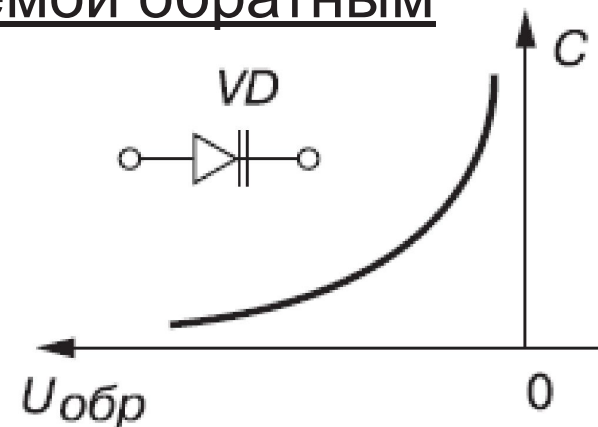
1. Барьерная ёмкость C_b [мкФ]

2. $f_{\text{раб}}$ [МГц]

В современных импортных диодах используется такая характеристика, как "Время восстановления". В ультрабыстродействующих диодах она достигает величин 100 нс.

4. Импульсные диоды используют в ключевых схемах при малых длительностях импульсов и переходных процессов (микросекунды и доли микросекунд). Важным моментом является инерционность включения и выключения диодов (малая длительность рекомбинации носителей заряда — восстановление обратного сопротивления за счет уменьшения барьерной ёмкости p - n -перехода).

4. Варикапы — полупроводниковые диоды, предназначенные для использования их ёмкости, управляемой обратным напряжением U



Основные параметры варикапа:

- C — ёмкость, измеренная между выводами варикапа при заданном обратном напряжении (рис. 1.7). Для различных варикапов ёмкость может быть от нескольких единиц до нескольких сотен пикофарад;
- $k_c = 5...20$ — коэффициент перекрытия по ёмкости отношения ёмкостей варикапа при двух значениях обратных напряжений;

- $Q = \frac{1}{\omega R C_{бар}}$ — добротность варикапа (значение Q — от десятков до нес-

кольких сотен) — это отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте переменного сигнала к активным сопротивлениям потерь R при заданных значениях ёмкости и обратного напряжения.

Варикапы применяют в основном в устройствах высоких и сверхвысоких частот, например, для настройки колебательных контуров.

В общем случае диод обладает барьерной и диффузионной ёмкостями. *Барьерная ёмкость* проявляется при приложении к $p-n$ -переходу обратного изменяющегося во времени напряжения. При этом через $p-n$ -переход протекает ток. Та доля тока (ток смещения), которая не связана с движением носителей заряда через $p-n$ -переход, и определяет барьерную ёмкость
$$C_{бар} = \left| \frac{dq_{обп}}{dU} \right|$$

(появление тока смещения связано с изменением объёмного заряда). Абсолютное значение отношения $\left| \frac{dq_{обп}}{dU} \right|$ взято потому, что объёмный заряд в $p-n$ -переходе может быть положительным и отрицательным.

Диффузионную ёмкость обычно связывают с изменением заряда инжектированных неосновных носителей при изменении напряжения на диоде:

$$C_{диф} = \left| \frac{dq_{инж}}{dU} \right|$$

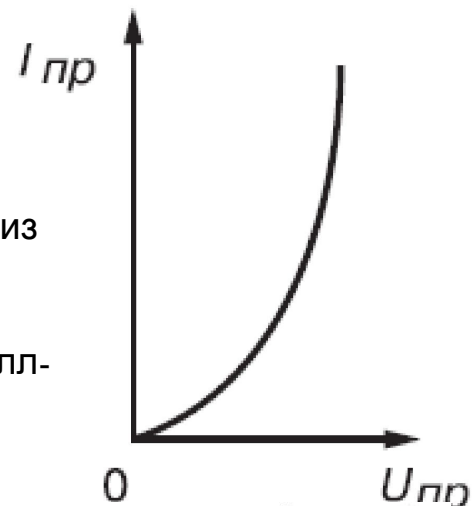
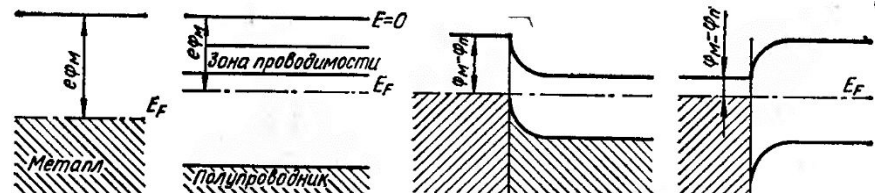
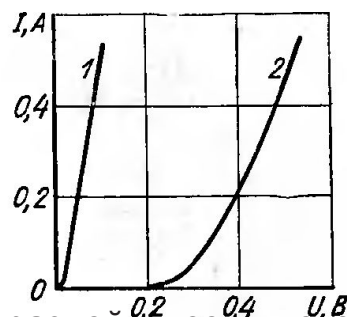
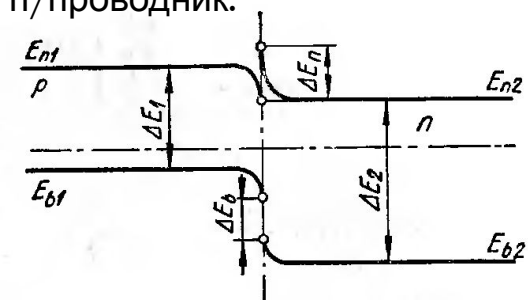
Диффузионная ёмкость проявляется при прямом смещении $p-n$ перехода диода. В качестве варикапов используют диоды при обратном постоянном смещении, когда проявляется только барьерная ёмкость.

5. Диоды Шоттки — это полупроводниковые приборы, в которых используются свойства потенциального барьера (барьера Шоттки) на контакте металл — полупроводник.

ВАХ диодов Шоттки — строгая экспонента

Барьер Шоттки (или Шоттки, (англ. Schottky barrier)) — потенциальный барьер, образующийся в приконтактном слое полупроводника, граничащего с металлом, равный разности работ выхода (энергий, затрачиваемых на удаление электрона из твёрдого тела или жидкости в вакуум) металла и полупроводника.

Используется гетеропереход — p-n- переход, образованный при контакте p-проводников с различной шириной запрещённой зоны либо при контакте металл-p-проводник.

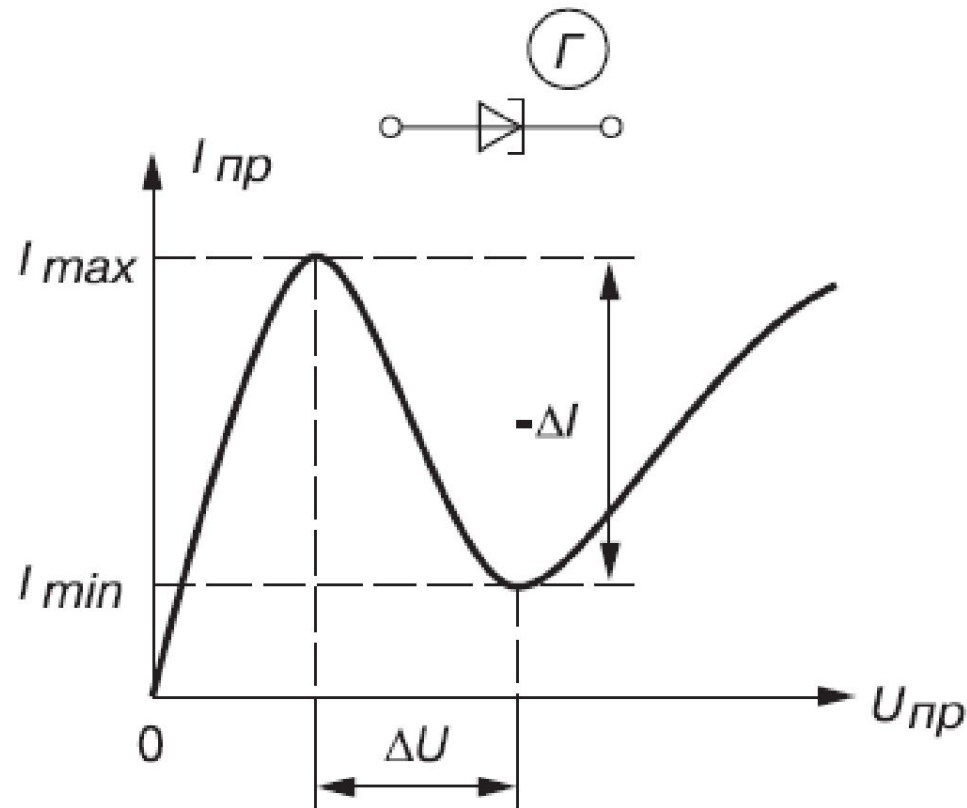


В рассматриваемых диодах из-за разной высоты потенциальных барьеров для электронов и дырок нет инжекции неосновных носителей заряда, нет и таких медленных процессов, как накопление и рассасывание неосновных носителей в базе. В результате инерционность диодов с выпрямлением на контакте металл — полупроводник определяется величиной барьерной ёмкости выпрямляющего контакта ($C_{бар} \approx 1$ пФ). Кроме того, у этих диодов незначительные активные потери (прямое напряжение $U_{пр} \approx 0,4$ В, что на 0,2 В меньше, чем у обычных диодов).

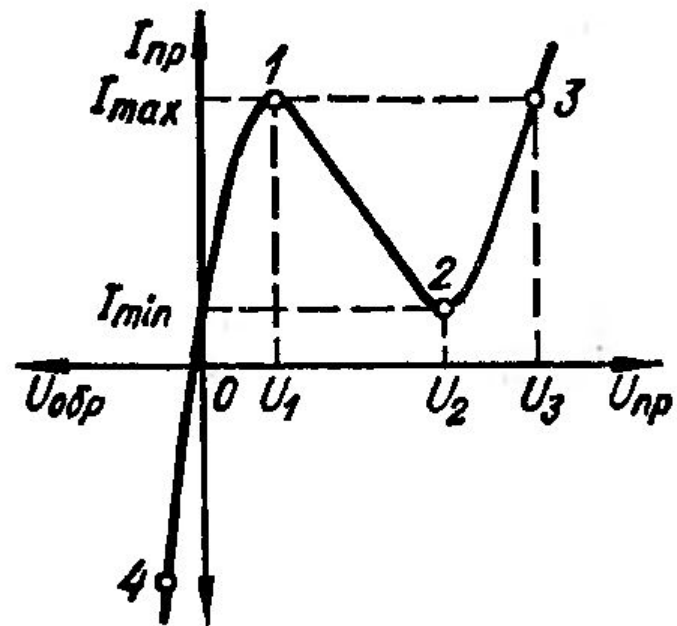
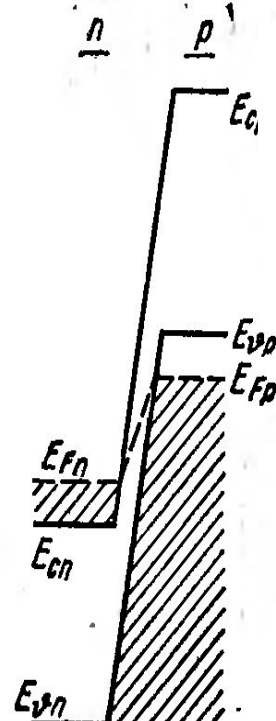
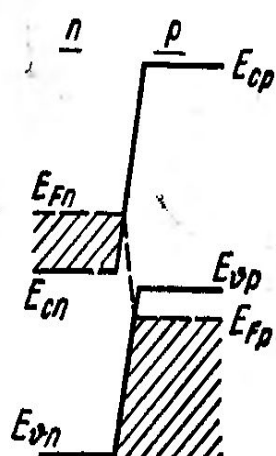
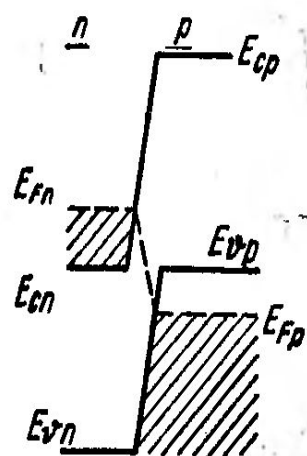
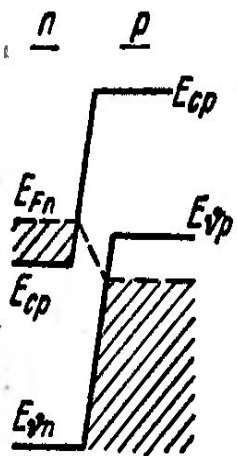
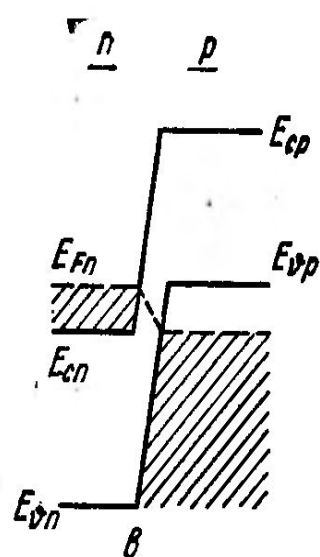
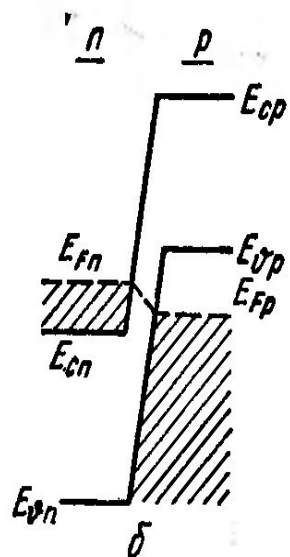
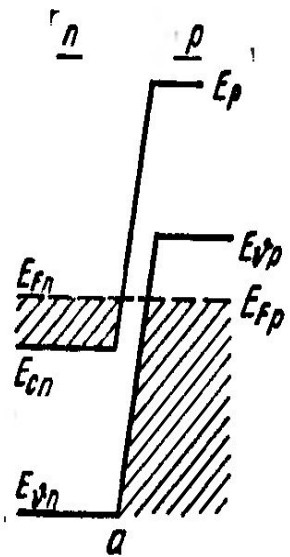
В связи с тем, что барьерная ёмкость и последовательное активное сопротивление в таких диодах небольшие, соответственно мало и время перезарядки ёмкости; это даёт возможность использовать диоды Шоттки в качестве сверхскоростных импульсных диодов ($f = 315$ ГГц), например, в некоторых схемах в качестве быстродействующих логарифмических элементов и в мощных высокочастотных выпрямителях, в которых диоды способны работать на частотах до 1 МГц при $U = 50$ и $I = 10$.

6. Туннельные диоды — это полупроводниковые приборы (не имеющие *p-n*-перехода), использующие эффект Ганна — возникновение на ВАХ участка отрицательного дифференциального сопротивления $R_d = -\Delta U / \Delta I$

Отношение токов $I_{max} / I_{min} = 5...10$. Это свойство диодов Ганна используют при разработке усилителей, генераторов синусоидальных и релаксационных колебаний, в переключающих устройствах с частотами от 100 МГц до 10 ГГц.



ГАННА ЭФФЕКТ - генерация высокочастотных колебаний электрич. тока в полупроводниках с N-образной объёмной вольтамперной характеристикой



7. Светодиоды —излучающие полупроводниковые приборы (индикаторы), непосредственно преобразующие электрическую энергию в энергию некогерентного светового излучения.

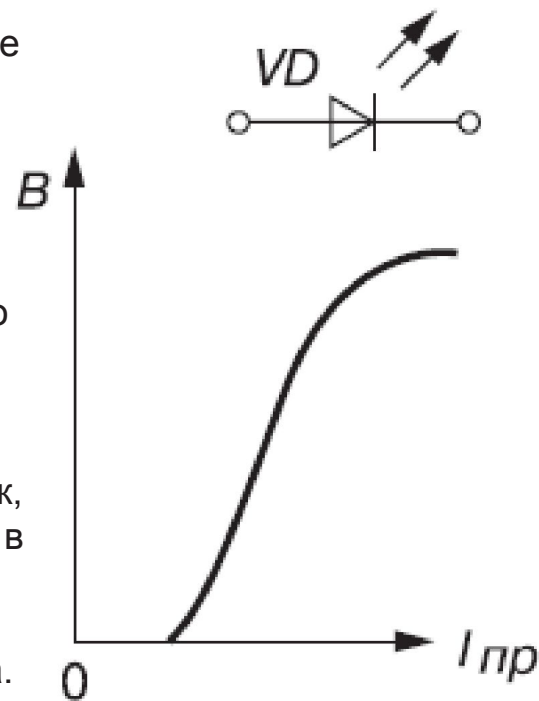
В основе принципа функционирования светодиодов лежит преобразование электрической энергии в электромагнитное излучение, спектр которого полностью или частично лежит в видимой области, диапазон длин волн которой составляет 0,45--0,68 мкм.

При пропускании электрического тока через р-п переход в прямом направлении, носители заряда — электроны и дырки — рекомбинируют с излучением фотонов (из-за перехода электронов с одного энергетического уровня на другой).

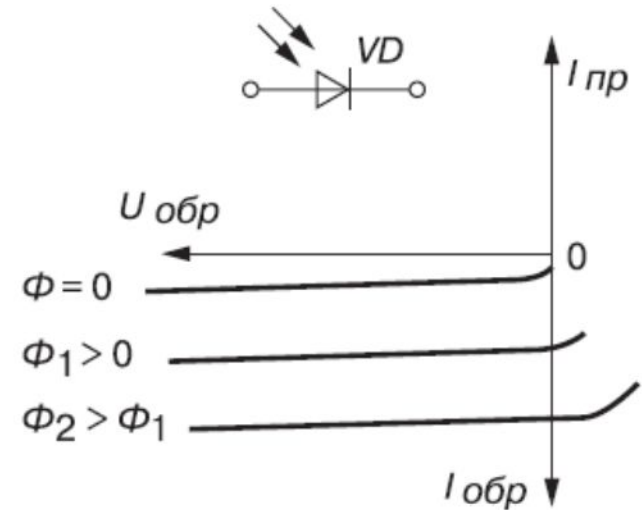
Светодиодная структура представляет собой *р-п*-переход, в котором при протекании прямого тока в несколько миллиампер в обеих областях перехода происходит рекомбинация инжектированных электронов и дырок, но наиболее эффективное преобразование инжектированных электронов в световую энергию протекает в базовой *р*-области.

Максимальное значение энергии, которое может выделиться при рекомбинации, равно ширине запрещённой зоны данного полупроводника. В полупроводниковых материалах с шириной запрещённой зоны менее 1,8 эВ может возбуждаться излучение с длиной волны более 0,7 мкм, которое лежит за пределами диапазона длин волн видимого света. Поэтому основными полупроводниковыми материалами, применяемыми для изготовления серийных светодиодов, являются фосфид галлия (GaP), твёрдые растворы ($GaAsP$, $GaAlP$) и карбид кремния (SiC) с шириной запрещённой зоны более 2 эВ.

Условное изображение и яркостная характеристика $B(I_{пр})$ светодиода, где B — яркость света в канделах



8. Фотодиод — полупроводниковый прибор с $p-n$ -переходом, обратный ток которого зависит от освещенности Φ (рис.).

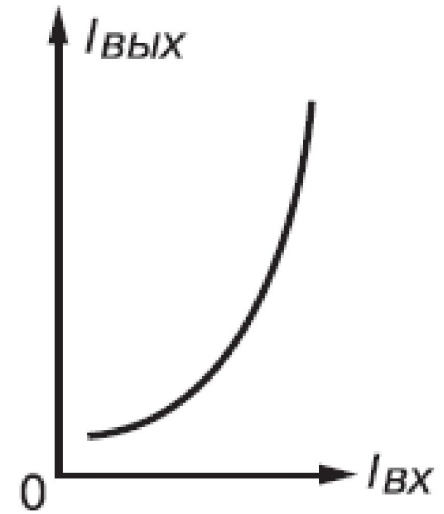
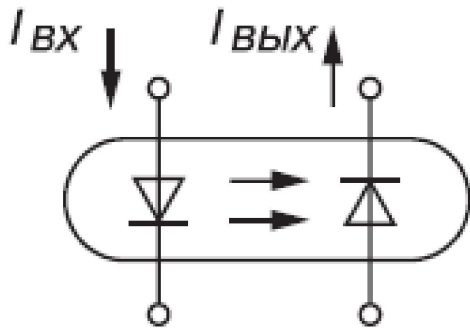


При поглощении квантов света в $p-n$ -переходе или в прилегающих к нему областях кристалла полупроводника образуются новые носители заряда (пары электрон-дырка), поэтому обратный ток (фототок) через фотодиод при освещении возрастает.

С увеличением светового потока Φ сопротивление перехода уменьшается (рис.).

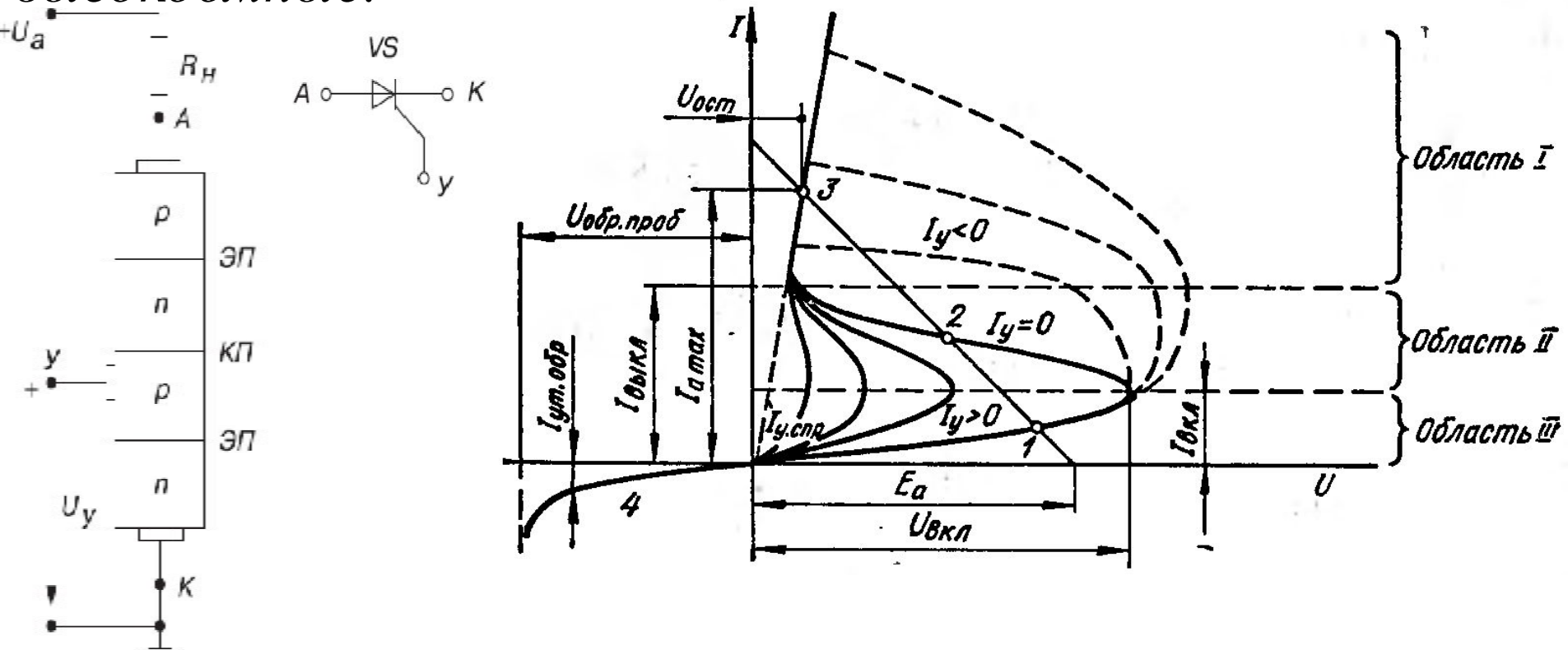
Приборы, предназначенные для использования этого явления, называют *фоторезисторами*, а транзисторы и тиристоры, реагирующие на эффект облучения световым потоком и способные одновременно усиливать фототок, называют соответственно *фототранзисторами* и *фототиристорами*.

9. Диодные оптроны — это приборы, состоящие из оптически связанных между собой элементов оптронной пары (управляемого светодиода и принимающего излучение фотодиода) и предназначенные для выполнения функциональных электрических и оптических преобразований.



На рис. изображена схема диодного оптрона с внутренней прямой оптической связью. Изменение входного тока $I_{ВХ}$ через светодиод сопровождается изменением яркости его свечения и изменением освещенности фотодиода, что приводит к уменьшению сопротивления фотодиода и соответственно к увеличению тока $I_{ВЫХ}$ через выход оптрона. Важным свойством такого оптрона является полная электрическая развязка входа и выхода прибора, что исключает обратную электрическую связь с его выхода на вход.

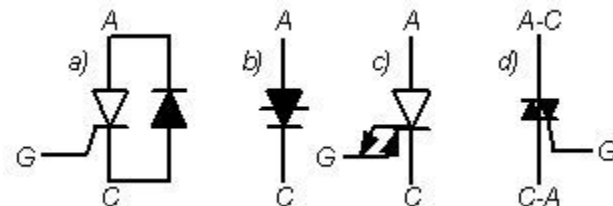
Тиристор — полупроводниковый прибор с тремя и более p - n -переходами, используется в качестве электронного ключа в цепях переключения тока (включён - насыщение, выключен - отсечка). Два внешних слоя тиристора имеют высокую концентрацию основных носителей зарядов, а два внутренних — высокоомные.



1 — запёртое состояние (ток определяется током обратного смещённого центрального перехода); 2 — отрицательного сопротивления; 3 — включённое состояние, (ток определяется величиной сопротивления внешней нагрузки); 4 — обратного напряжения.

Тиристоры:

- диодные (*динисторы*), имеющие два вывода (анод A и катод K);
- триодные (*тринисторы*), имеющие три вывода (анод A , катод K и управляющий электрод $У$);
- симисторы (симметрично управляемые тиристоры);
- запираемые (двухоперационные)



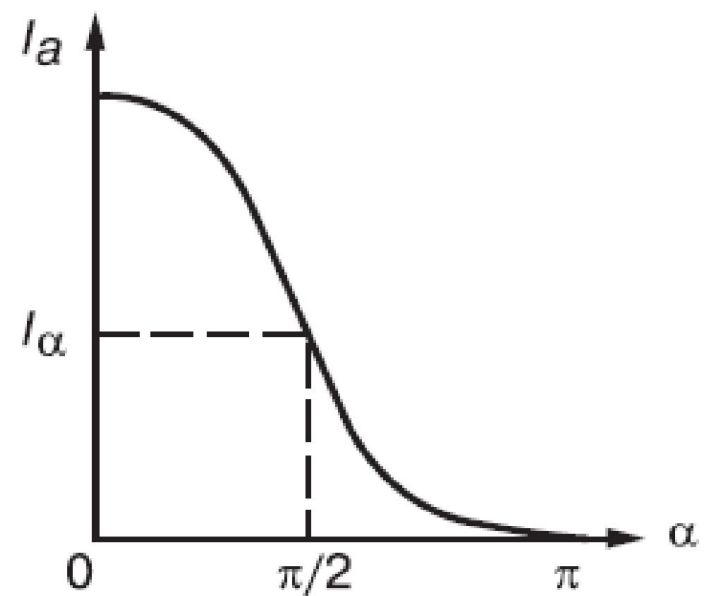
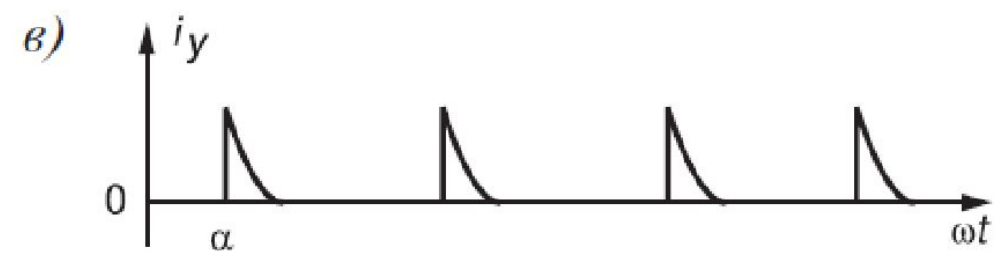
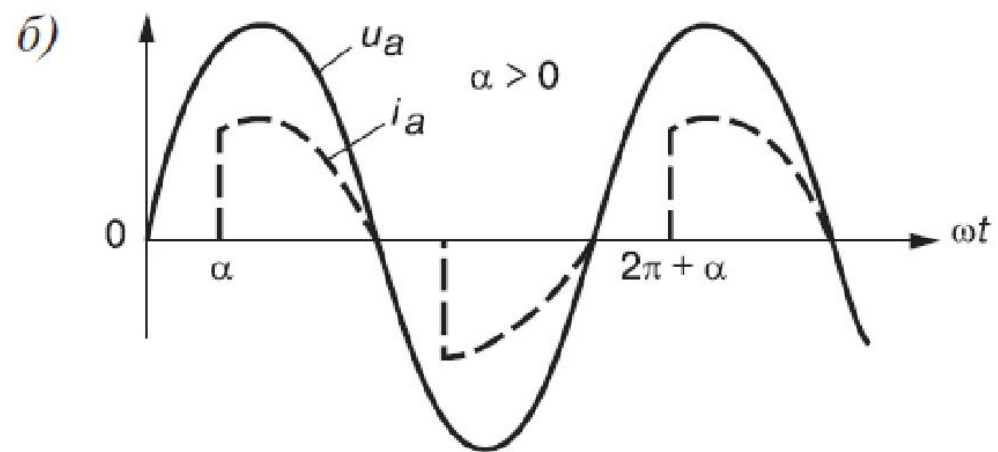
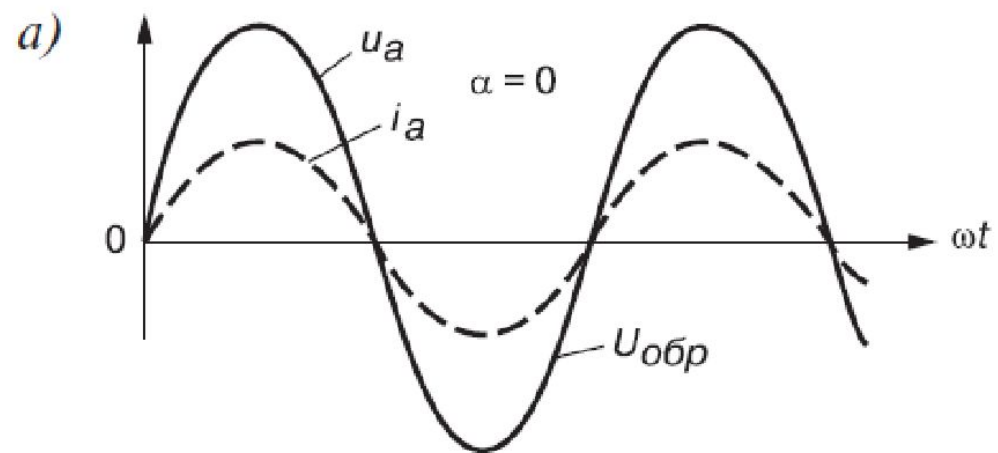
а) – тиристор-диод; б) – диодный тиристор (динистор); в) – запираемый тиристор; г) – симистор

Диодный тиристор (динистор, неуправляемый тиристор) — прибор с тремя $p-n$ -переходами J_1, J_2, J_3 и двумя внешними выводами — *анодом* A и *катодом* K .

Принцип работы динистора. Если подать прямое напряжение U_{np} («+» к A , «—» к K), то два внешних перехода J_1 и J_3 окажутся смещёнными *прямо*, а средний J_2 — *обратно*. Т.е., переходы J_1 и J_3 фактически устранятся и всё напряжение U_{np} окажется приложенным к переходу J_2 в *обратном направлении*. По динистору будет протекать лишь ток утечки I_0 , обусловленный неосновными носителями зарядов (обратный ток перехода J_2). С ростом U_{np} ток I_0 будет возрастать незначительно до тех пор, пока U_{np} не достигнет *напряжения включения* динистора $U_{вкл}$. При этом произойдёт *лавинный пробой* перехода J_2 , динистор откроется и ток I_0 скачком возрастёт до *тока включения* $I_{вкл}$. Дальнейшее увеличение напряжения источника повлечёт за собой рост тока.

В открытом режиме динистор может работать долго, поскольку, во-первых, в переходе J_2 имеет место *лавинный пробой*, являющийся, как указывалось выше, *обратимым*, во-вторых, переход J_2 обильно питается основными носителями зарядов от слоёв J_1 и J_3 . Поэтому после снятия напряжения переход J_2 восстанавливает первоначальные свойства, как в лавинном выпрямительном диоде.

Триодный тиристор (тиристор, однооперационный тиристор, полуправляемый тиристор, незапираемый тиристор, тринистор). Условные изображения, структура и основная характеристика — ВАХ тиристора приведены на рис. 4.4,6. В отличие от динистора в тиристоре имеется третий электрод — *электрод управляющий* ЭУ. В зависимости от расположения ЭУ тиристоры делятся на тиристоры с *анодным* управлением (ЭУ отводится от «-слоя, на рис. 4.4,6 показан пунктиром) и *катодным* управлением (ЭУ отводится от д-слоя, на рис. 4.4, б показан сплошной линией).



Характерная особенность тиристора - то, что его можно *открыть* ЭУ, но *закрыть невозможно*, т.е. тиристор *не полностью* управляется ЭУ. Для его закрытия необходимо снизить, тем или иным способом, прямой ток $I_{пр}$ (ток нагрузки) ниже так наз/ тока *удержания* $I_{уд}$. При приложении к тиристорному переменного напряжения, например синусоидального частотой 50 Гц, он открывается ЭУ с момента набегания положительной полуволны, то есть с момента, когда это напряжение, возрастая, пересекает нулевую ось и закрывается без участия ЭУ с набеганием отрицательной полуволны, то есть с момента, когда это напряжение, снижаясь, пересекает нулевую ось. Такое закрытие тиристора *естественным*. Если к тиристорному приложить обратное напряжение $U_{обр} > U_{обр. пр.}$ произойдет, как у выпрямительного диода и динистора, *тепловой пробой* переходов (один за другим) и тринистор выйдет из строя. Таким образом, тиристор, как и диод, обладает *односторонней проводимостью*. Поэтому его ещё называют *управляемым диодом (вентилем)*.

У современных тиристорных $I_{пр} \ll I_{упр.}$, то есть прямой ток («выходной») значительно больше тока управления («входного»). Поэтому они являются *усилительными приборами*.

Время переключения тока (порядка 50...100 мА) маломощных тиристорных составляет доли микросекунд, а время восстановления сопротивления тиристора при токе $I_a = 10$ А составляет 200...250 мкс. Коэффициент усиления по мощности тиристора

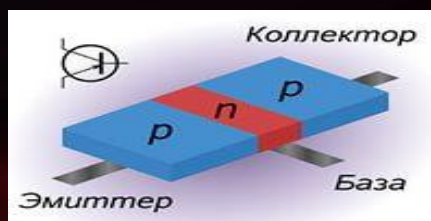
$$K_p = U_a I_a / U_y I_y \approx 250000.$$

Основные параметры тиристорных:

- напряжение на открытом тиристоре $U_{от} = 1...1,5$ В;
- максимальный допустимый ток анода $I_{a.max}$;
- управляющие напряжение U_y и ток I_y ;
- время включения и выключения $t_{вкл}$ и $t_{вык}$;
- допустимое обратное напряжение тиристора $U_{обр max}$.

Транзистор - полупроводниковый электронный прибор, относящийся к категории активных электронных компонентов.

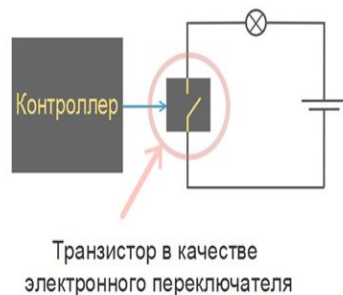
- В зависимости от расположения полупроводниковых слоев, транзисторы подразделяют на два основных типа - NPN-транзисторы и PNP-транзисторы.
Электроды обычного биполярного транзистора называются базой, эмиттером и коллектором. Коллектор и эмиттер составляют основную цепь электрического тока в транзисторе, а база предназначена для управления величиной тока в этой цепи.
На условном обозначении транзистора стрелка эмиттерного вывода показывает направление тока.



БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР (СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ И Н-Транзистор — полупроводниковый прибор для усиления, инвертирования, преобразования электрических сигналов, а также переключения электрических импульсов в электронных цепях различных устройств.

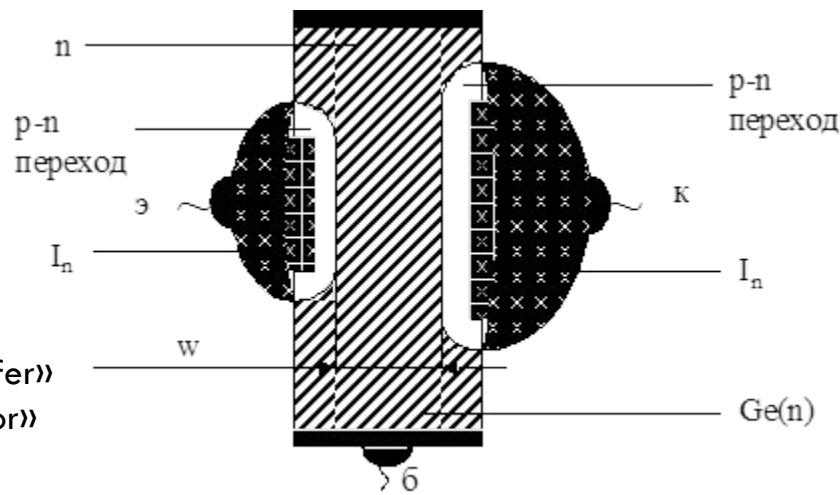
Биполярные транзисторы (БТ) (BJT, Bipolar Junction Transistor).
Полевые (униполярные) транзисторы, (ПТ) (FET, Field Effect Transistor).

Полевые транзисторы делят на транзисторы с управляющим PN-переходом (JFET - Junction FET) и с изолированным затвором (MOSFET- Metal-Oxide-Semiconductor FET)

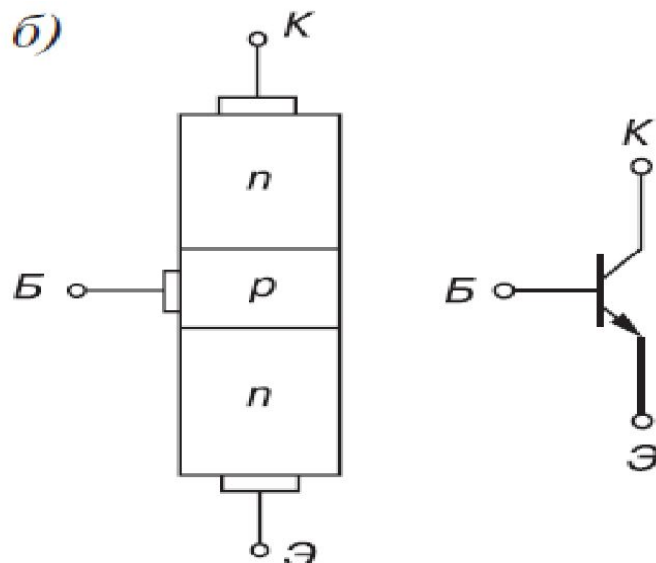
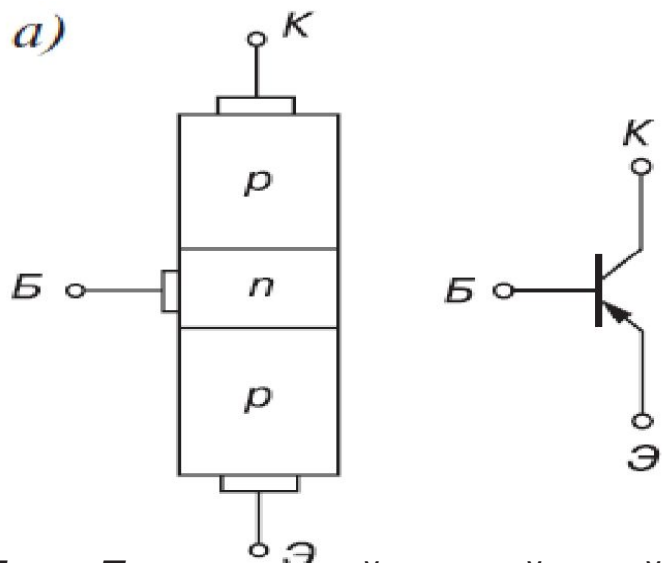


«Транзистор» - «transfer»
(переносить) и «resistor»
(сопротивление).

Реальная структура сплавного транзистора p-n-p



Биполярные транзисторы (BJT - Bipolar Junction Transistor) — полупроводниковые приборы, выполненные на кристаллах со структурой $p-n-p$ (а) или $n-p-n$ (б) с тремя выводами, связанными с тремя слоями (областями): коллектор (К), база (Б) и эмиттер (Э)



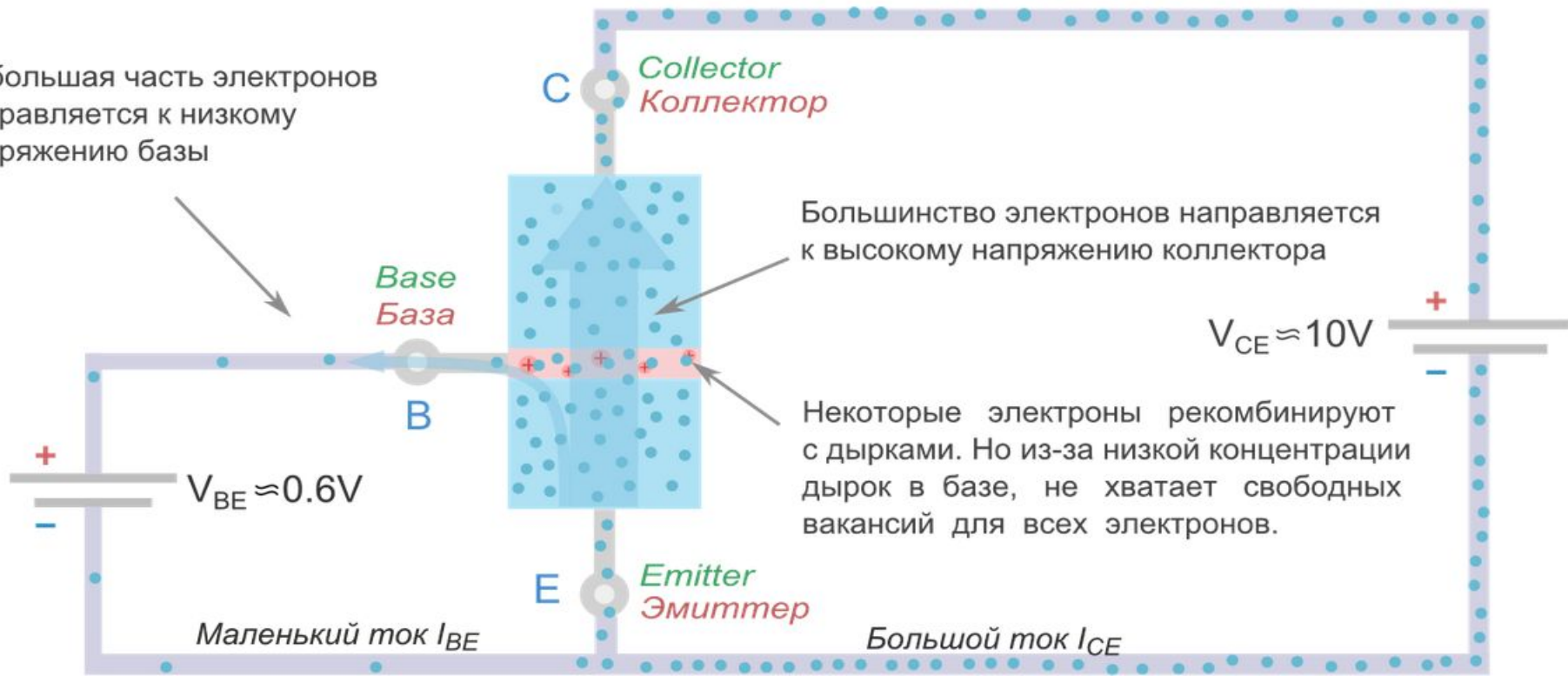
База B — средний тонкий слой, служащий для смещения эмиттерного и коллекторного переходов. Толщина базы меньше длины свободного пробега носителей заряда.

Эмиттер \mathcal{E} — наружный слой, источник носителей заряда с высокой концентрацией носителей, значительно большей, чем в базе.

Коллектор K — Второй наружный слой, принимающий носителей заряда. Ток в биполярном транзисторе определяет движение зарядов двух типов: электронов и дырок. Отсюда его название — *биполярный транзистор*.

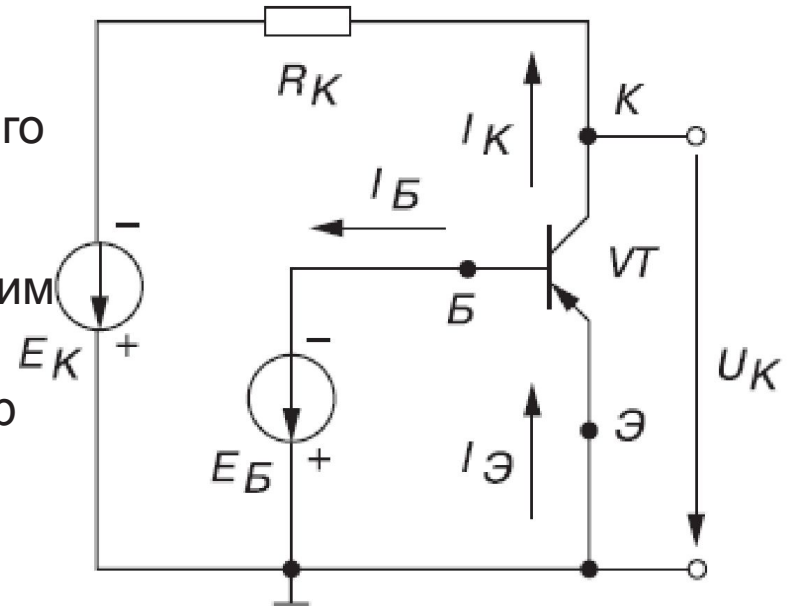
Физические процессы в транзисторах $p-n-p$ -типа и $n-p-n$ -типа одинаковы. Отличие их в том, что токи в базах транзисторов $p-n-p$ -типа переносятся основными носителями зарядов — дырками, а в транзисторах $n-p-n$ -типа — электронами.

Небольшая часть электронов направляется к низкому напряжению базы



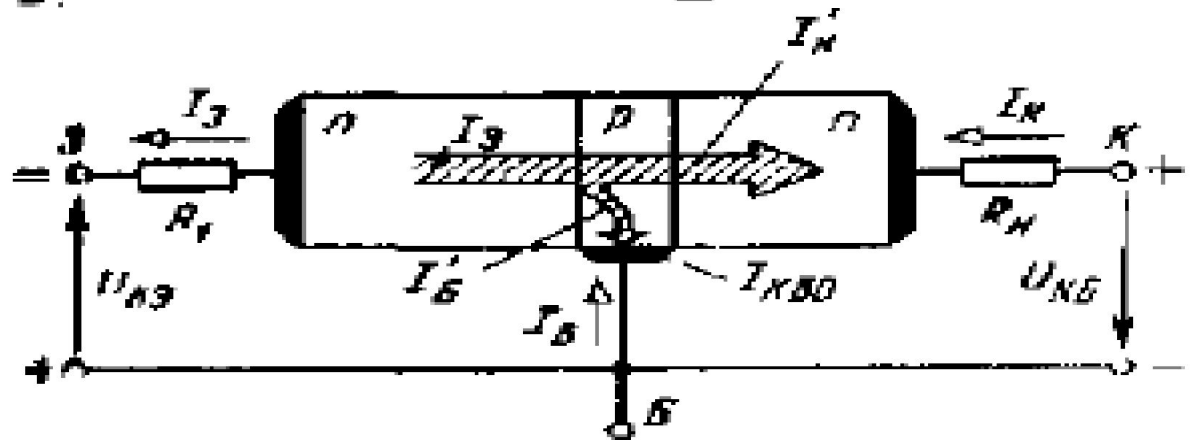
Подав отрицательный потенциал ЭДС источника на коллектор и положительный на эмиттер в схеме включения транзистора с общим эмиттером, мы открыли эмиттерный переход ЭБ и закрыли коллекторный БК. При этом ток коллектора мал и определяется концентрацией неосновных носителей (здесь, электронов) в коллекторе и базе. $I_{K0} = I_{Э0} = I_0$

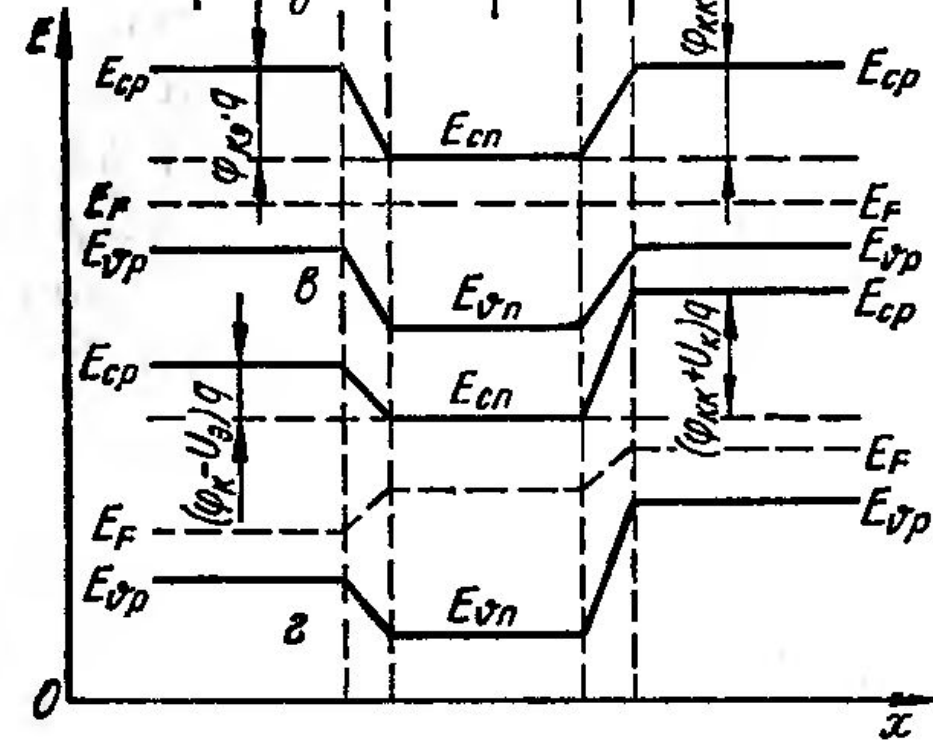
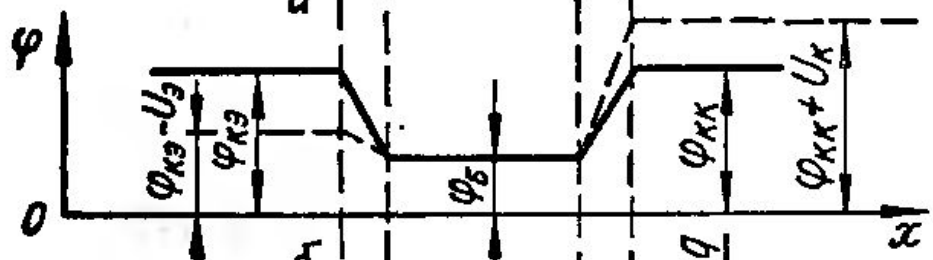
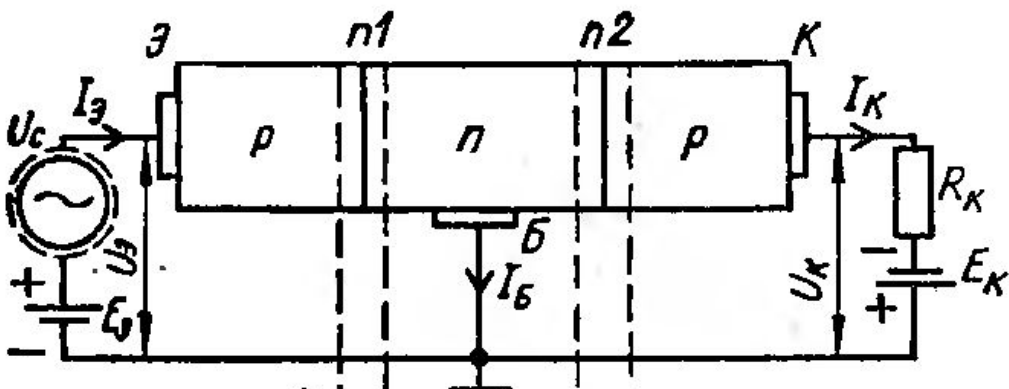
Если между эмиттером и базой приложить небольшое напряжение (0,3-0,5 В) в прямом направлении $p-n$ -перехода ЭБ, то происходит *инжекция дырок* из эмиттера в базу, образуя ток эмиттера I_E . В базе дырки частично рекомбинируют со свободными электронами, но одновременно от внешнего источника напряжения в базу приходят новые электроны, образуя ток базы I_B . Т.к. база в транзисторе выполняется в виде тонкого слоя, только незначительная часть дырок рекомбинирует с электронами базы, а основная их часть достигает коллекторного перехода. Эти дырки захватываются электрическим полем коллекторного перехода, являющегося ускоряющим для дырок. Ток дырок, попавших из эмиттера в коллектор, замыкается через резистор R_K и источник напряжения с ЭДС E_K , образуя ток коллектора I_K во внешней цепи.



$$I'_K = \alpha I_E \quad I_K = \beta I_B$$

$\alpha = 0,95 \dots 0,99$ — коэффициент передачи тока эмиттера
 $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ — динамический коэффициент передачи тока базы



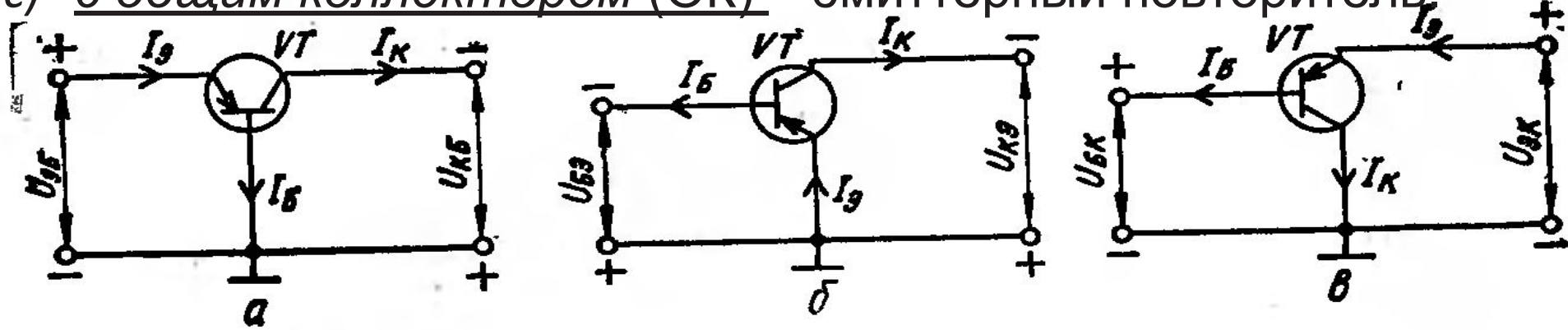


Схемы включения транзисторов

a) с общей базой (ОБ);

b) с общей эмиттером (ОЭ);

c) с общим коллектором (ОК) – эмиттерный повторитель

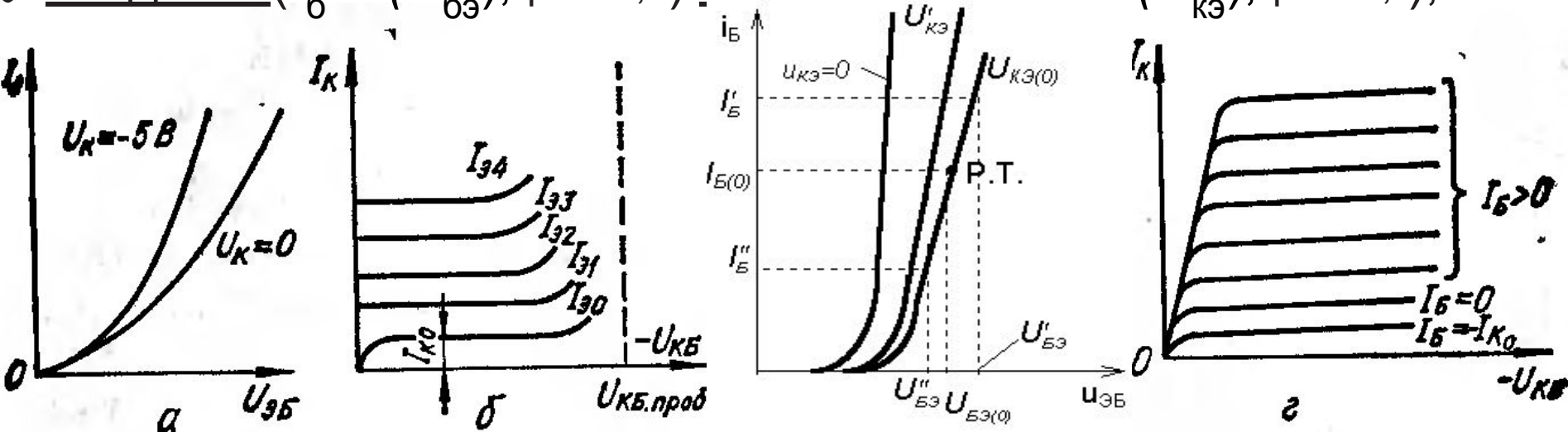


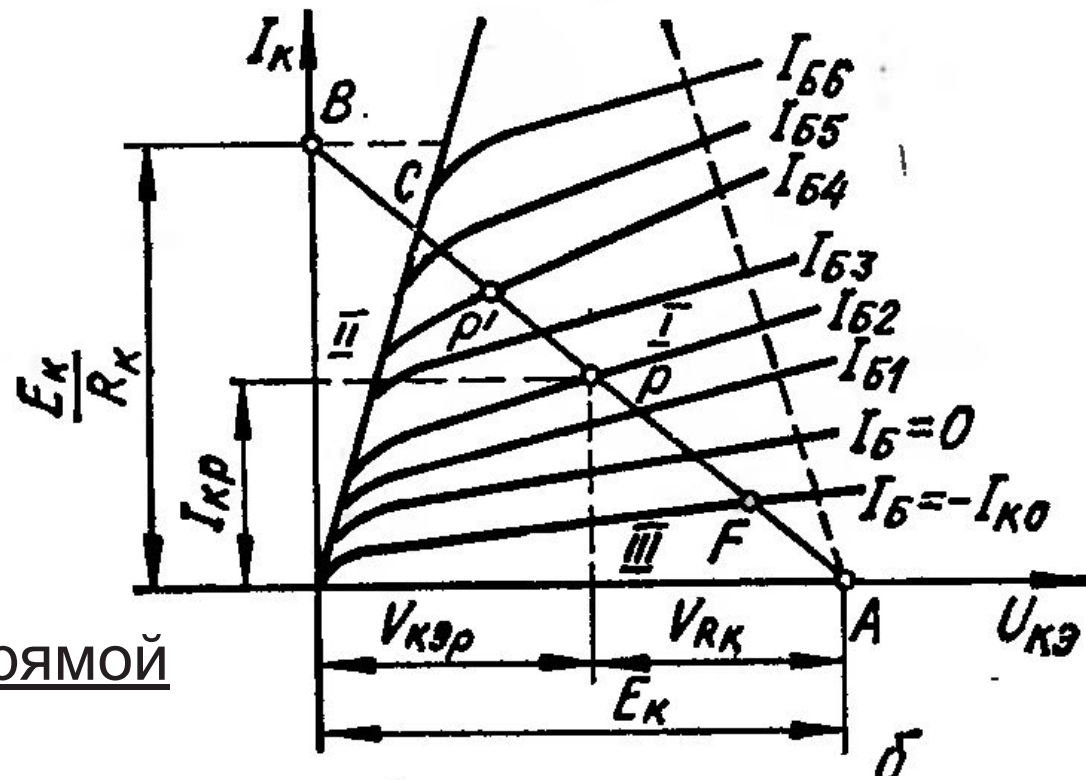
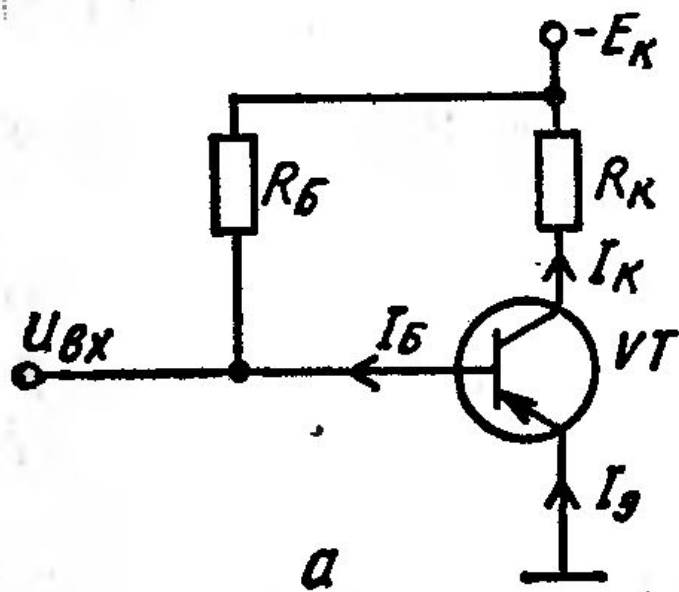
Вольт-амперные характеристики транзистора (ВАХ):

✓ статические (без нагрузки в выходной цепи);

✓ динамические;

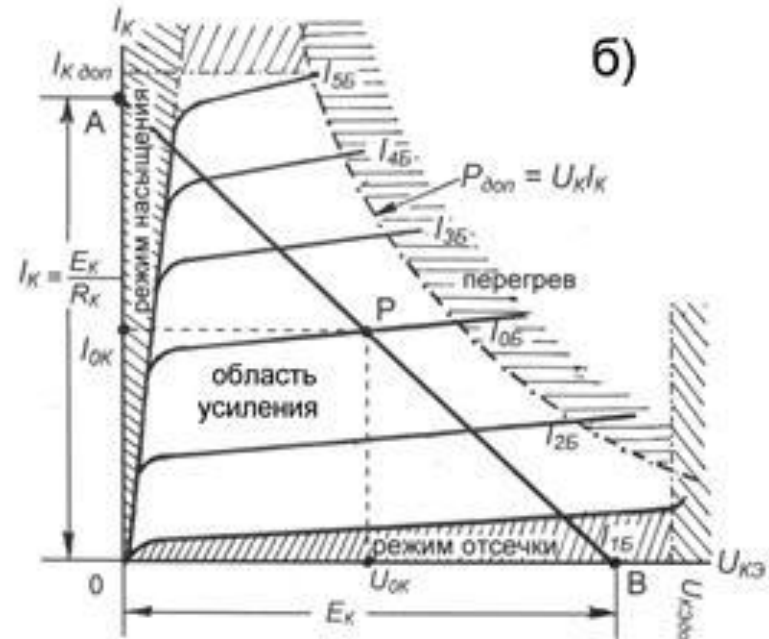
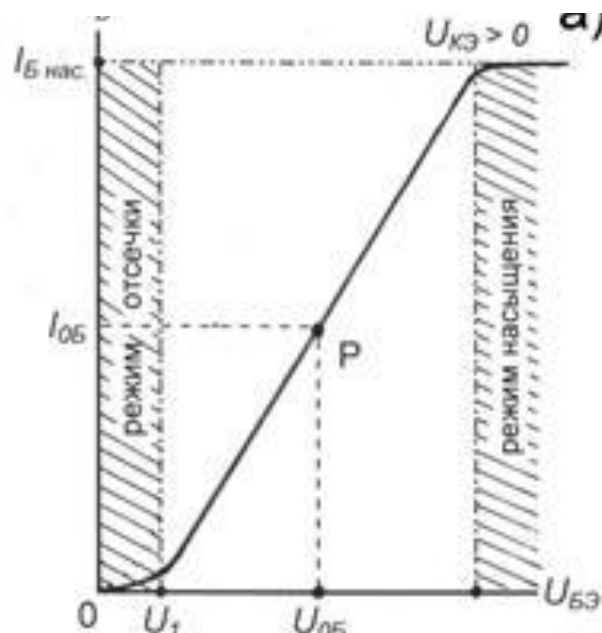
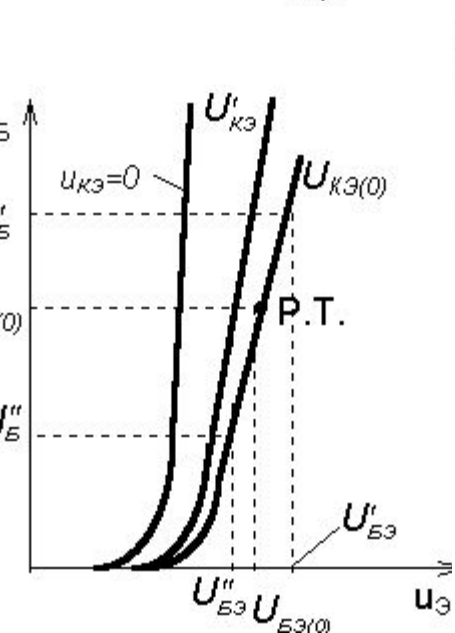
✓ входные ($I_B = f(U_{БЭ})$, рис. а,в) и выходные ($I = f(U_{КЭ})$, рис. б,г);

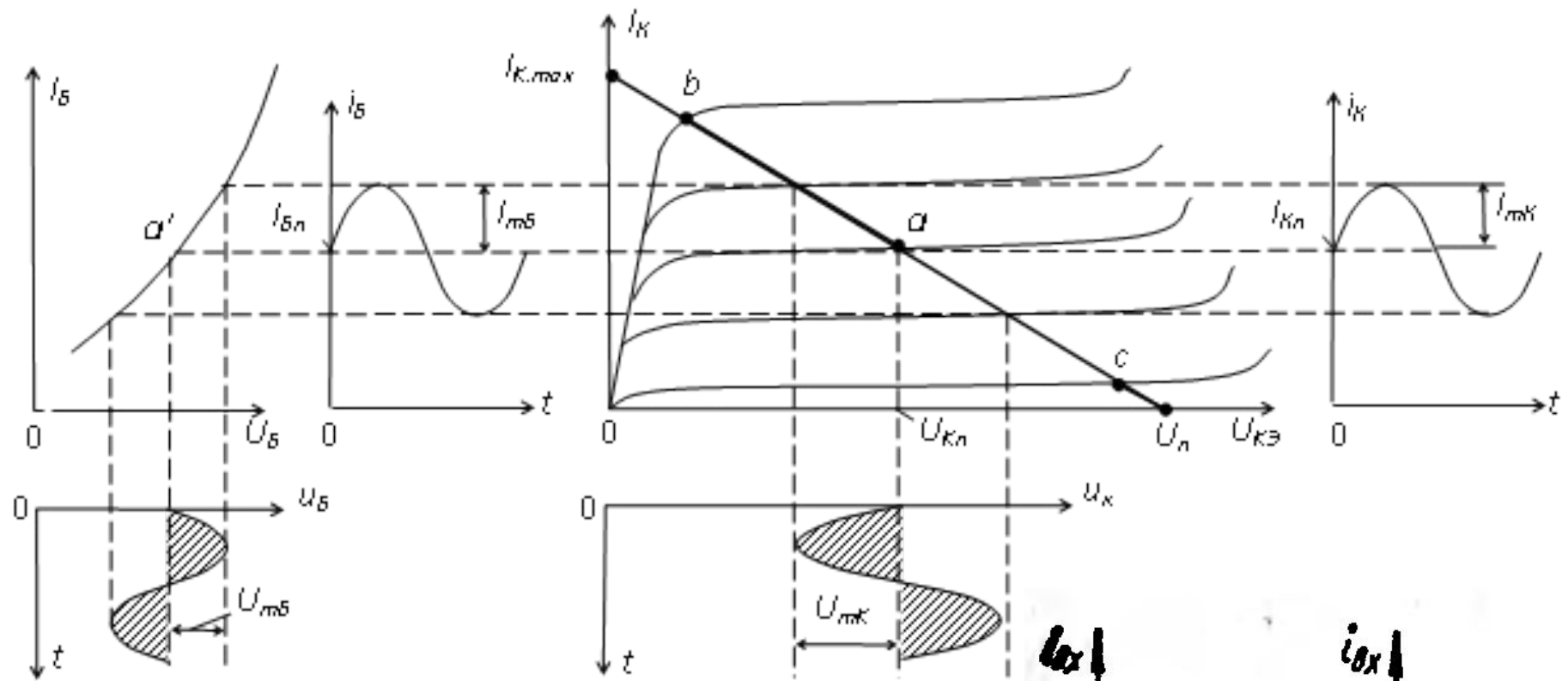




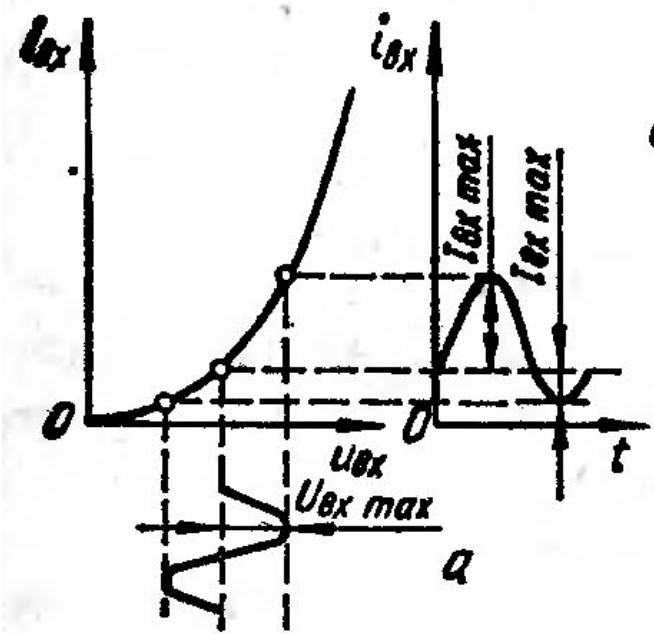
Уравнение нагрузочной прямой

$$U_{кэ} = E_k - I_k R_k,$$





a

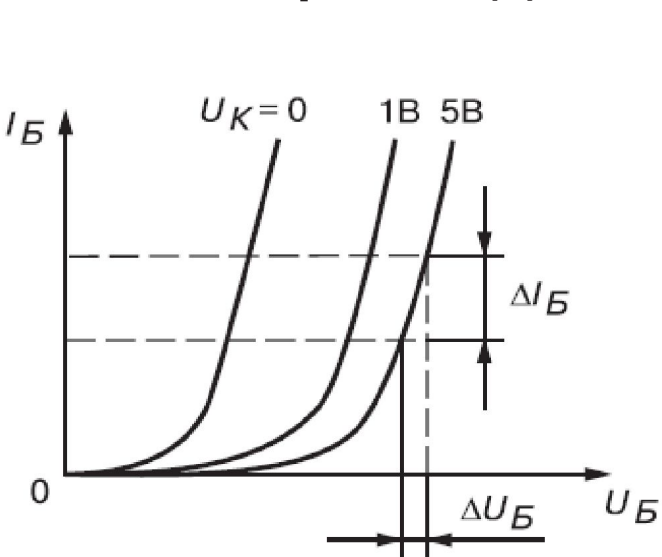


В ВАХ различают три режима работы транзистора:

режим отсечки (3) — оба $p-n$ -перехода закрыты, при этом через транзистор протекает сравнительно небольшой ток I_0 , обусловленный неосновными носителями зарядов;

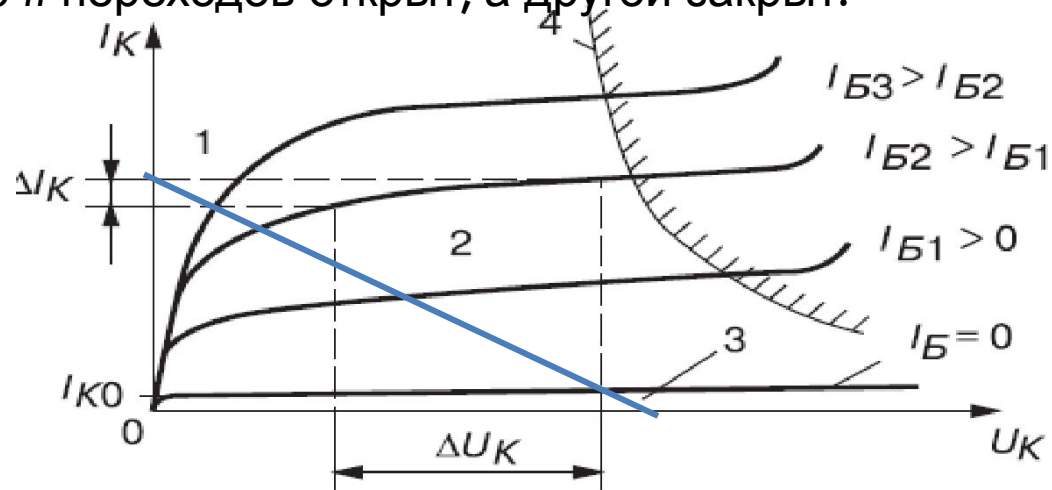
режим насыщения (1) — оба $p-n$ -перехода открыты;

активный режим (2) — один из $p-n$ -переходов открыт, а другой закрыт.



$$R_{вх} = \Delta U_B / \Delta I_B$$

при $U_K = const$



$$R_{вых} = \Delta U_K / \Delta I_K$$

при $U_B = const$

- 1 - область насыщения
- 2 - активная область
- 3 - область отсечки
- 4 - допустимая граница использования по мощности

В режимах отсечки и насыщения управление транзистором практически отсутствует. В активном режиме транзистор выполняет функцию *активного элемента* схем усиления сигналов, генерирования колебаний, переключения и т. п.

Каждый из переходов транзистора — эмиттерный (БЭ) и коллекторный (БК) можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. Если на БЭ напряжение прямое, а на КО обратное, включение транзистора считают нормальным, при противоположной полярности напряжений — инверсным.



$$I \begin{cases} \dot{U}_1 = Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2, \\ U_2 = Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2; \end{cases} \quad II \begin{cases} i_1 = Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2, \\ i_2 = Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2; \end{cases}$$

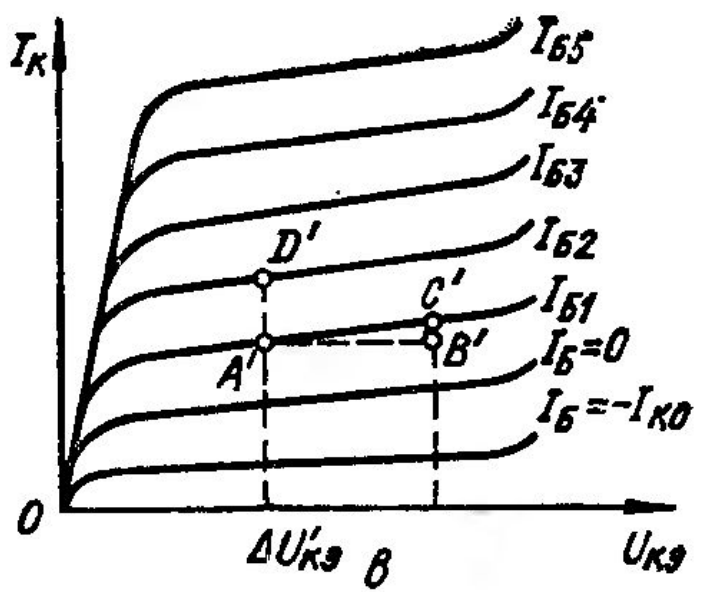
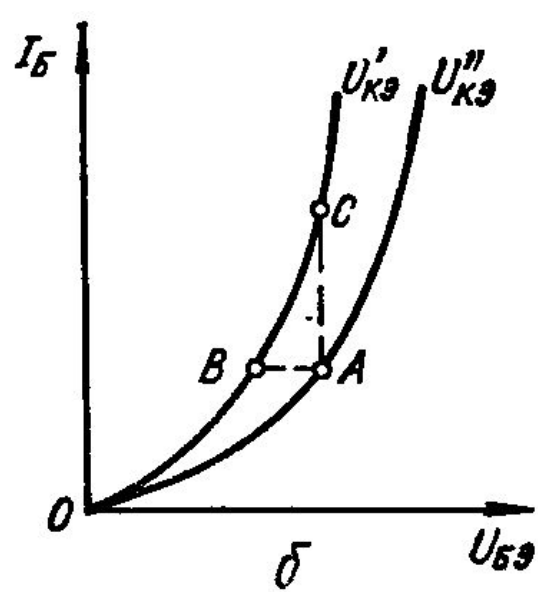
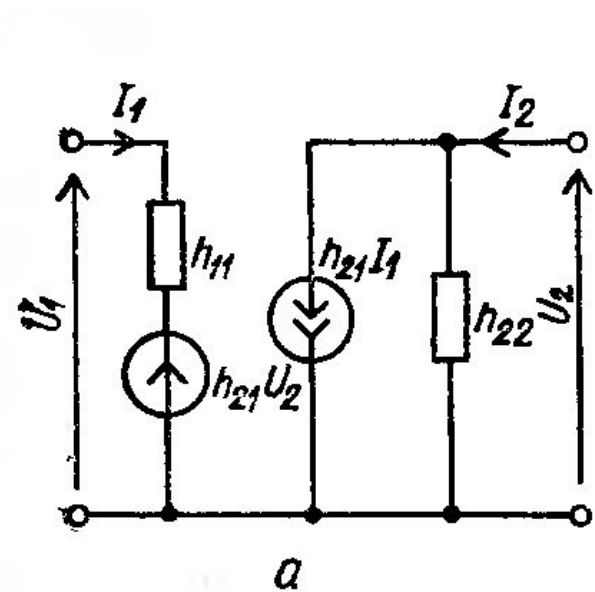
$$III \begin{cases} \dot{U}_1 = h_{11}i_1 + h_{12}U_2, \\ i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}U_2. \end{cases}$$

$h_{11} = \frac{\dot{U}_1}{i_1} \Big|_{\dot{U}_2=0}$ — входное сопротивление, определяемое в режиме короткого замыкания по переменному току на выходе транзистора ($U_2 = 0$);

$h_{12} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \Big|_{I_1=0}$ — коэффициент обратной связи по напряжению, определяемый в режиме холостого хода на входных зажимах ($I_1 = 0$);

$h_{21} = \frac{i_2}{i_1} \Big|_{U_2=0}$ — коэффициент передачи (усиления) по току, определяемый в режиме короткого замыкания по переменному току на выходе ($U_2 = 0$);

$h_{22} = \frac{i_2}{\dot{U}_2} \Big|_{I_1=0}$ — выходная проводимость, определяемая в режиме холостого хода на входе ($I_1 = 0$).



$$h_{11Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} = \frac{AB}{AC} ; \quad h_{12Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{AB}{U''_{КЭ} - U'_{КЭ}}$$

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} = \frac{A'D'}{I''_{Б} - I'_{Б}} ; \quad h_{22Э} = \frac{\Delta I'_{К}}{\Delta U'_{КЭ}} = \frac{B'C'}{A'B'}$$

Отношение тока коллектора к току эмиттера называют *коэффициентом передачи тока*

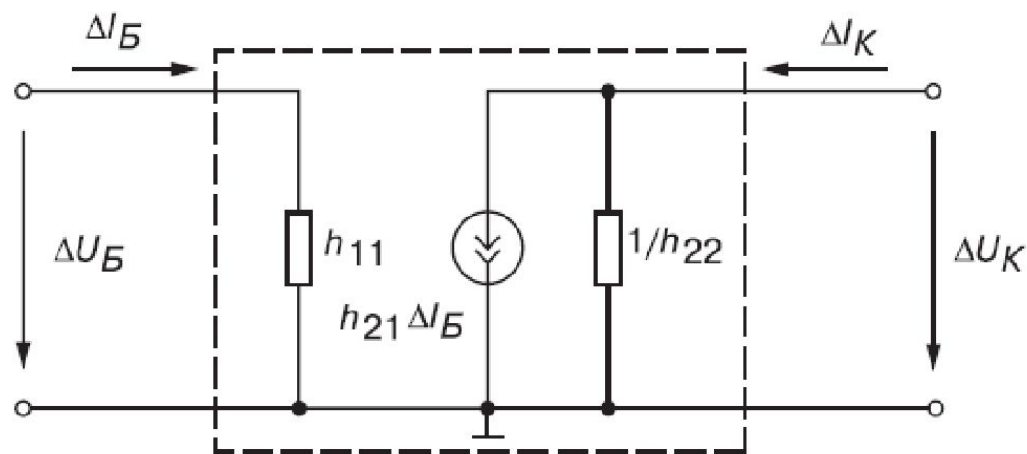
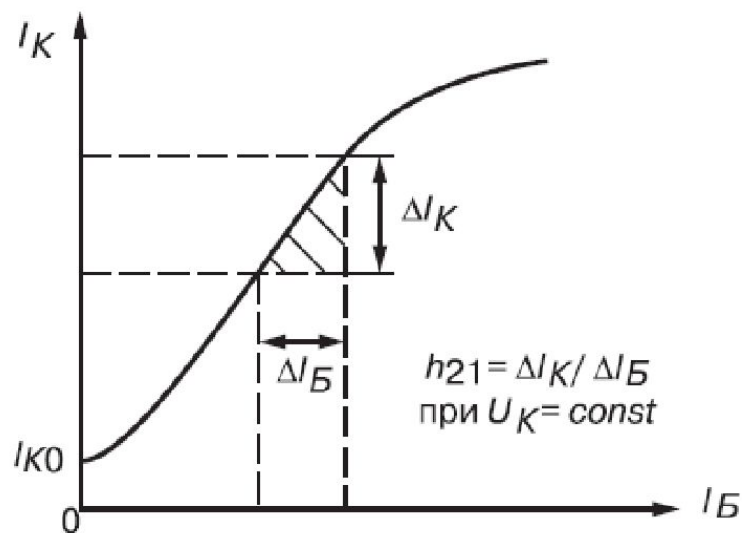
$$\alpha \approx I_K / I_{\text{Э}} \Big|_{U_{\text{БЭ}} = \text{const}} = 0,96 \dots 0,995 < 1,$$

откуда ток базы

$$I_B = I_{\text{Э}} - I_K = (1 - \alpha)I_{\text{Э}} - I_{K0} \ll I_{\text{Э}}.$$

Схема включения транзистора с ОЭ является наиболее распространенной вследствие малого тока базы во входной цепи и усиления входного сигнала как по напряжению, так и по току.

Основные свойства транзистора определяются соотношениями токов и напряжений в различных его цепях и взаимным их влиянием друг на друга.



При расчёте устройств с биполярными транзисторами часто используют h -параметры транзистора, представляя его в виде линейного четырехполюсника (рис. 1.17) (состоящего из резистивных элементов и управляемого источника тока), описываемого системой из двух уравнений:

$$\Delta U_B = h_{11\Omega} \Delta I_B + h_{12\Omega} \Delta U_K;$$

$$\Delta I_K = h_{21\Omega} \Delta I_B + h_{22\Omega} \Delta U_K,$$

где $h_{11\Omega} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta I_B} \right|_{U_K = const}$ ($\Delta U_K = 0$) — входное динамическое сопротивление транзистора ($h_{11\Omega} = 100 \dots 1000 \text{ Ом}$);

$h_{12\Omega} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta U_K} \right|_{I_B = const}$ ($\Delta I_B = 0$) — безразмерный коэффициент внутренней обратной связи по напряжению, значение которого лежит в пределах $0,002 \dots 0,0002$ (при расчётах им часто пренебрегают, т. е. полагают равным нулю);

$h_{21\Omega} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_K = const}$ ($\Delta U_K = 0$) — коэффициент передачи (усиления) тока при постоянном напряжении на коллекторе; его также обозначают K_i или $\beta = 10 \dots 200$;

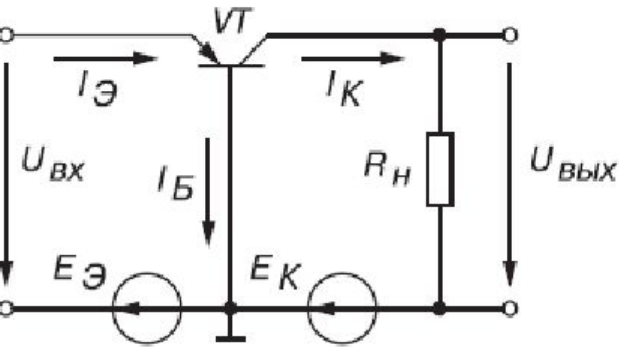
$h_{22\Omega} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_K} \right|_{I_B = const}$ ($\Delta I_B = 0$) — выходная проводимость транзистора при постоянном токе базы ($h_{22\Omega} = 10^{-4} \dots 10^{-6} \text{ См}$).

Биполярный транзистор можно также включить по схеме с *общей базой* (ОБ) и по схеме с *общим коллектором* (ОК), используя в качестве общего вывода для входной и выходной цепей соответственно базу или коллектор.

Коэффициенты усиления транзисторов зависят от частоты входного сигнала (сказывается влияние входной (БЭ) и проходной (БК) ёмкостей).

Схемы включения транзисторов

Схема с ОБ



$$R_{вх} = R_{Э} + R_{Б}(1 - \alpha)$$

(5...100 Ом)

$$h_{21Б} = \alpha \approx 1$$

$$K_{иБ}^* \approx \frac{R_{н}}{R_{ЭБ}}$$

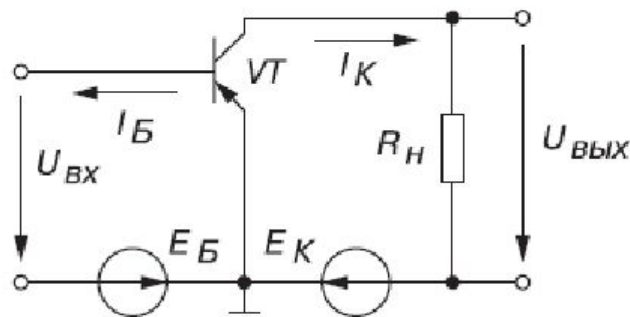
(до 1000)

$$K_{рБ}^* \approx \frac{R_{н}}{R_{ЭБ}}$$

(до 1000)

$$R_{вых} = 0,1...1 \text{ МОм}$$

Схема с ОЭ



$$R_{вх} = R_{Б} + R_{Э}(\beta + 1)$$

(100...1000 Ом)

$$h_{21Э} = \beta = -\alpha / (1 - \alpha)$$

(10...200)

$$K_{иЭ} = \frac{-\beta R_{н}}{R_{БЭ}}$$

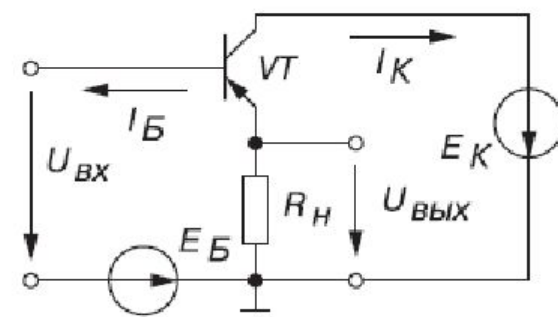
(10...1000)

$$K_{рЭ} = \frac{\beta^2 R_{н}}{R_{БЭ}}$$

(до 10000)

$$R_{вых} = 10...100 \text{ кОм}$$

Схема с ОК



$$R_{вх} = R_{Б} + (R_{Э} + R_{н})(\beta + 1)$$

(30...100 кОм)

$$h_{21К} = \beta + 1$$

(10...100)

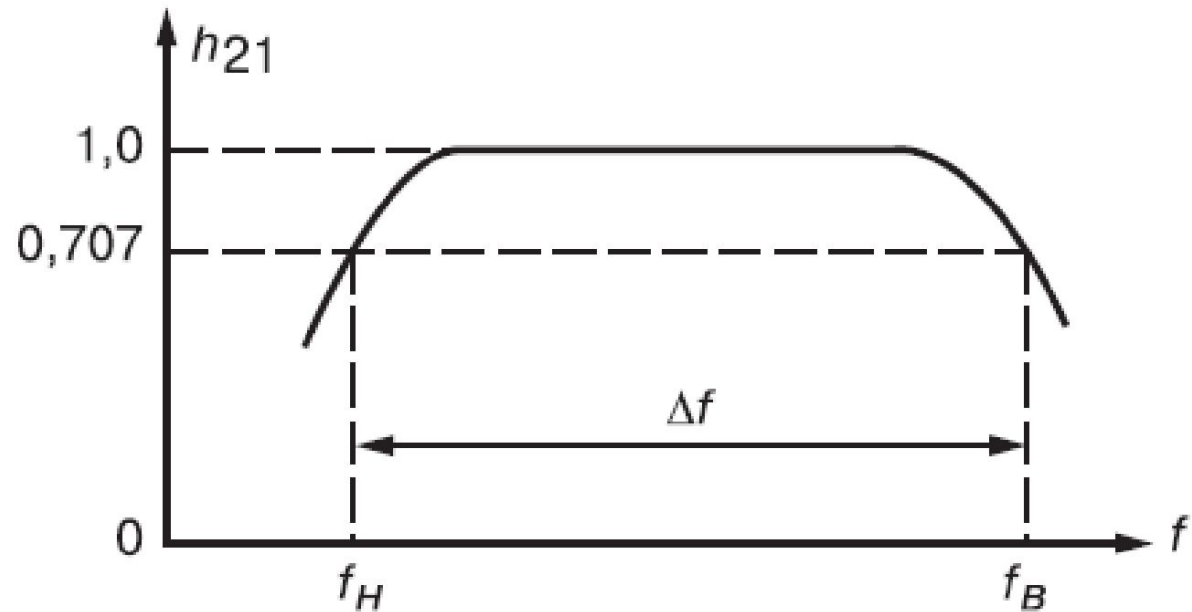
$$K_{иК} \approx 1$$

$$K_{рК} \approx \beta$$

(10...200)

$$R_{вых} = 10...100 \text{ Ом}$$

Физический смысл предельных частот среза f_H и f_B коэффициента передачи тока — это частоты, на которых модуль коэффициента передачи тока снижается не более чем в 2 раз (или на 3 дБ), по сравнению с его значением в полосе пропускания Δf .



Биполярные транзисторы *классифицируют*:

по мощности рассеяния (маломощные (до 0,3 Вт), средней мощности (от 0,3 Вт до 1,5 Вт) и мощные (свыше 1,5 Вт));

по частотным свойствам (низкочастотные (до 3 МГц), средней частоты (330 МГц), высокой (30300 МГц) и сверхвысокой частоты (более 300 МГц));

по назначению: универсальные, усилительные, генераторные, переключательные и импульсные.

При маркировке биполярных транзисторов вначале записывают букву или цифру, указывающую на исходный полупроводниковый материал: Г или 1 — германиевый, К или 2 — кремниевый; затем цифру от 1 до 9 (1, 2 или 3 — низкочастотные, 4, 5 или 6 — высокой частоты, 7, 8 или 9 — сверхвысокой частоты соответственно в каждой группе малой, средней или большой мощности). Следующие две цифры от 01 до 99 — порядковый номер разработки, а в конце буква (от А и выше) указывает на параметрическую группу прибора, например, на напряжение питания транзистора и т. п.

Как работает транзистор

Базовая цепь транзистора управляет током, протекающим в цепи коллектор-эмиттер. Изменяя в небольших пределах малое напряжение, поданное на базу, можно в достаточно широких пределах изменять ток в цепи

Транзистор биполярный



Ток Базы I_B позволяет протекать через Коллектор току I_K не превышающему произведения I_B на коэффициент усиления транзистора h_{21} .

$$I_K \leq I_B \cdot h_{21}$$

Конкретное значение тока I_K зависит от цепи к которой подключены К и Э транзистора, так как транзистор не генерирует ток, а лишь пропускает его от К к Э.

Диапазон значений h_{21} можно найти в документации на транзистор. h_{21} зависит от температуры, от тока коллектора и от других факторов.

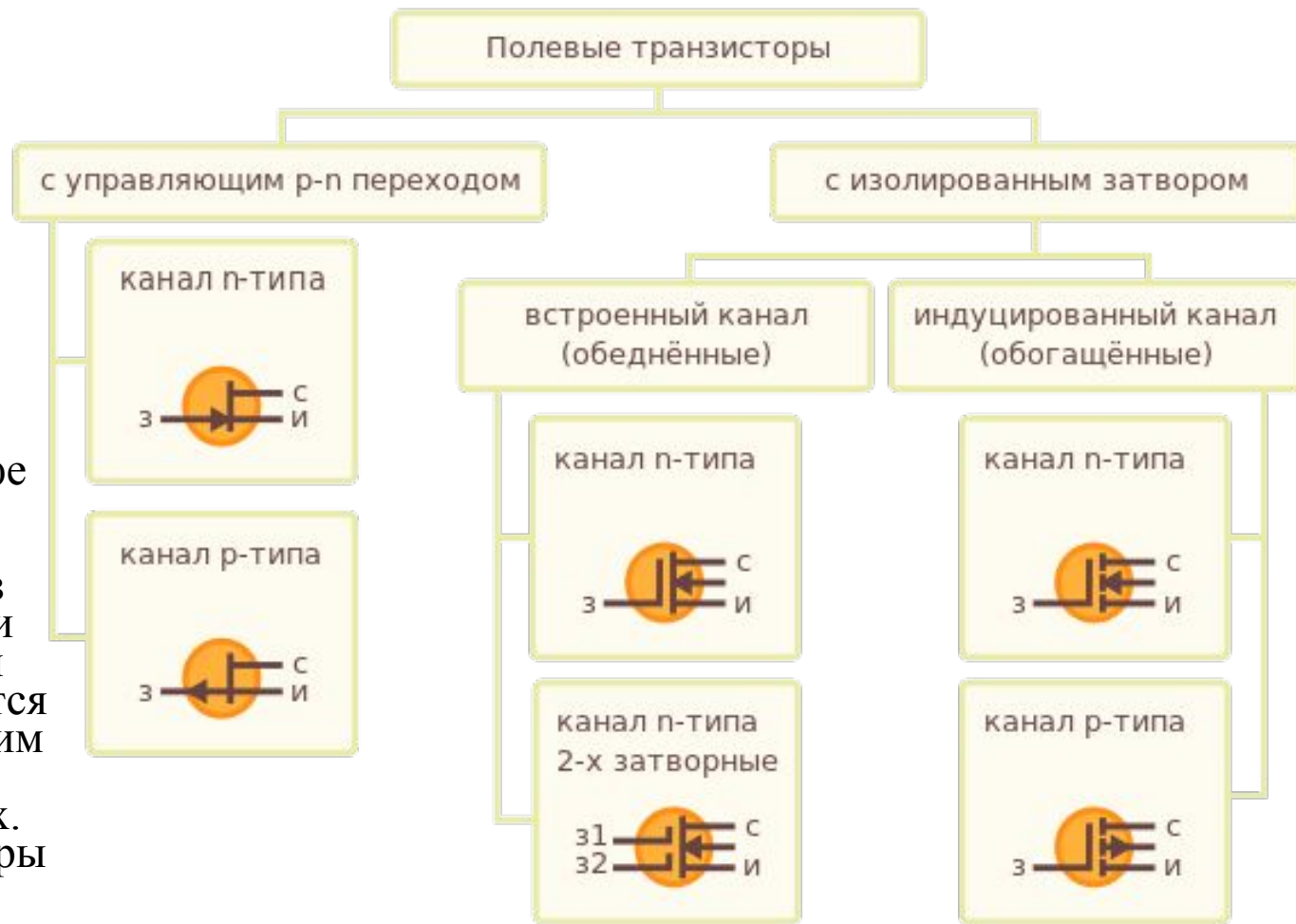
Обычно напряжение Б-Э около 700 мВ.

Минимальное напряжение К-Э при некотором I_K называется напряжением насыщения и обычно близко к 300 мВ.

Для транзисторов **p-n-p** проводимости - направления токов противоположные.

Принцип работы биполярного транзистора со структурой NPN. Ток, поданный на базу, открывает транзистор и обеспечивает протекание тока в цепи коллектор-эмиттер. С помощью малого тока, поданного на базу, можно управлять током большой мощности, идущим от коллектора к эмиттеру.

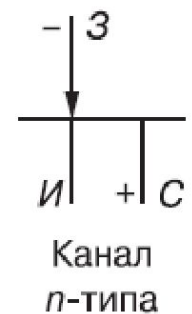
Полевым транзистором (ПТ) наз. трехэлектродный полупроводниковый прибор, в котором электрический ток стока (С) создают основные носители заряда под действием продольного электрического поля, а управление током осуществляет поперечным электрическим полем за счет напряжения на управляющем электроде (между затвором (З) и истоком (И)).



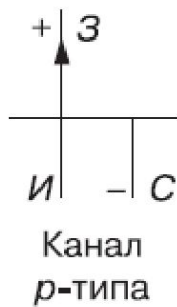
ПТ являются униполярными полупроводниковыми приборами, так как их работа основана на дрейфе носителей заряда одного знака в продольном электрическом поле через управляемый канал *n*- или *p*-типа. Управление током через канал осуществляется поперечным электрическим полем, а не током, как в биполярных транзисторах. Поэтому такие транзисторы называют полевыми.

Полевые транзисторы изготавливают:

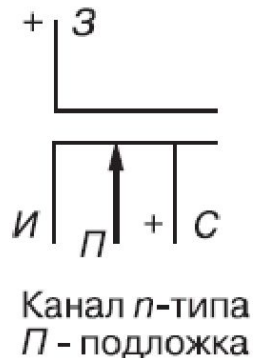
- с управляющим затвором типа *p-n-перехода* (**JFET: Junction-FET**) для использования в высокочастотных (до 1218 ГГц) преобразовательных устройствах (рис. а, б);
- с изолированным (слоем диэлектрика) затвором для использования в устройствах, работающих с частотой до 12 ГГц. Их изготавливают или со *встроенным каналом* в виде МДП структуры (рис. в и г), или с *индуцированным каналом* в виде МОП структуры (**MOSFET: Metal-Oxid-Semiconductor-FET**) (рис. д, е).



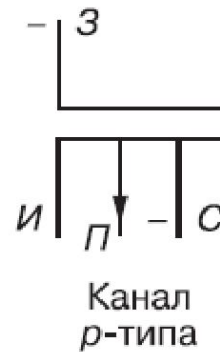
а)



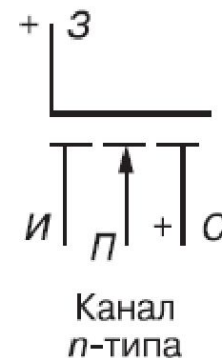
б)



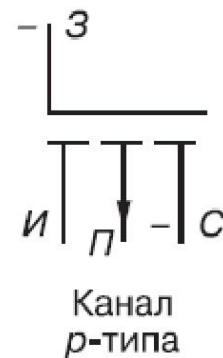
в)



г)

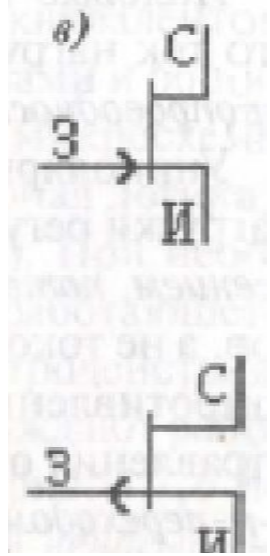
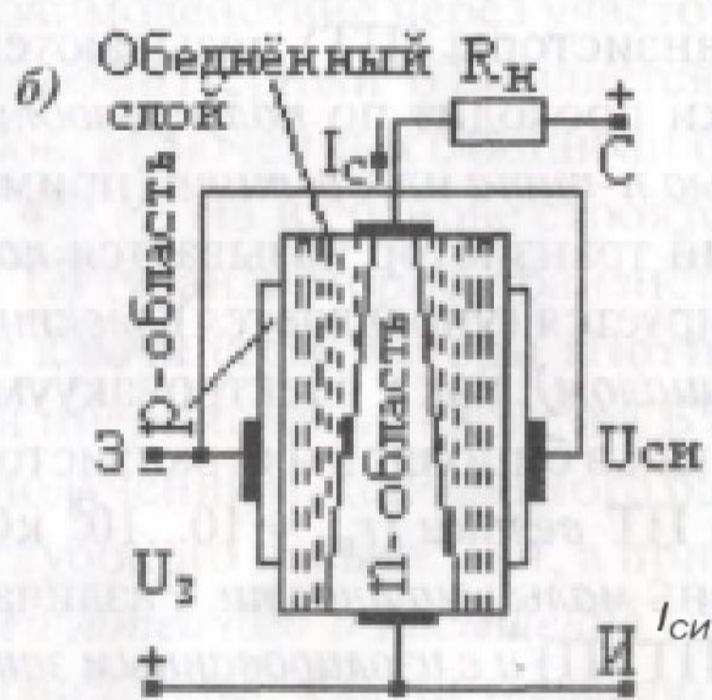
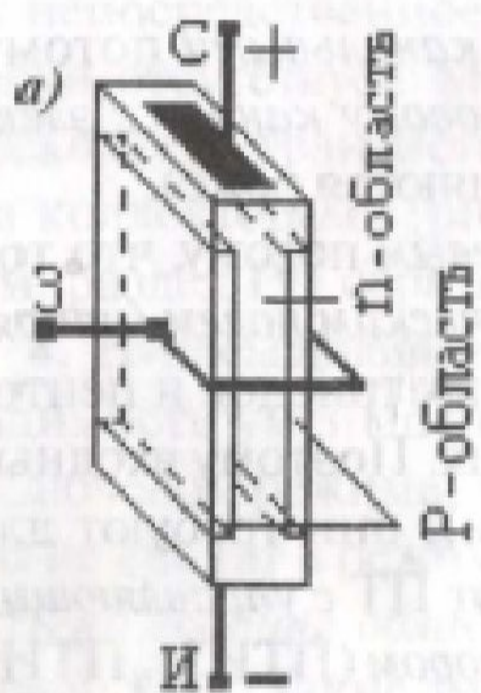


д)



е)

Полевые транзисторы с управляющим затвором типа p-n-перехода (JFET: Junction-FET)



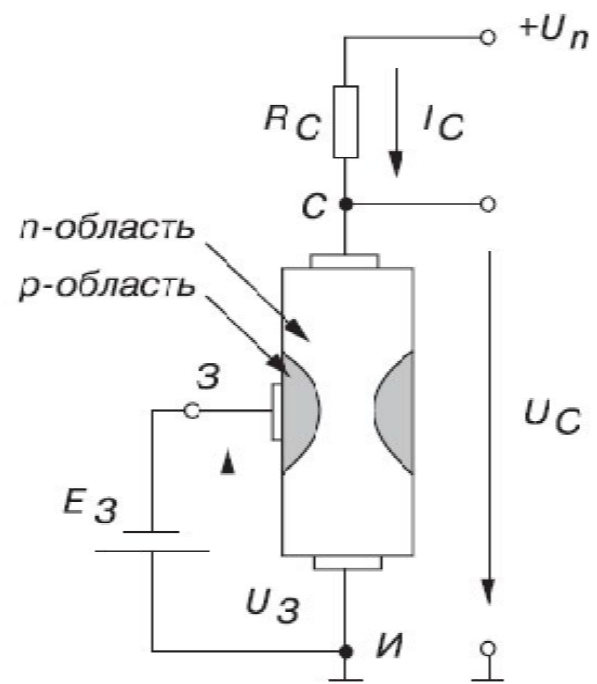
Выходная (стокзатворная характеристика)
 $I_{си} = f(U_{си}), U_{зи} = const$



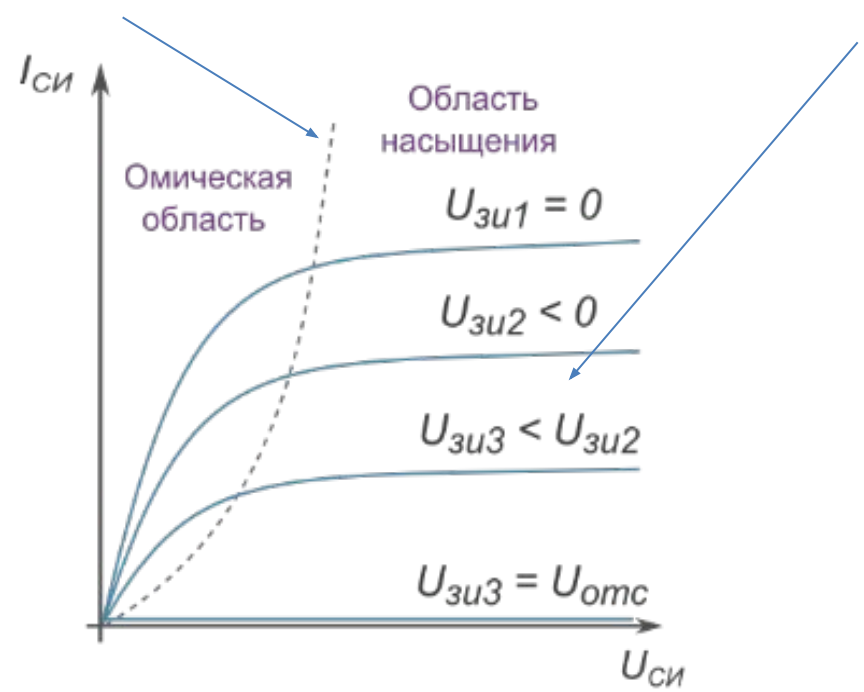


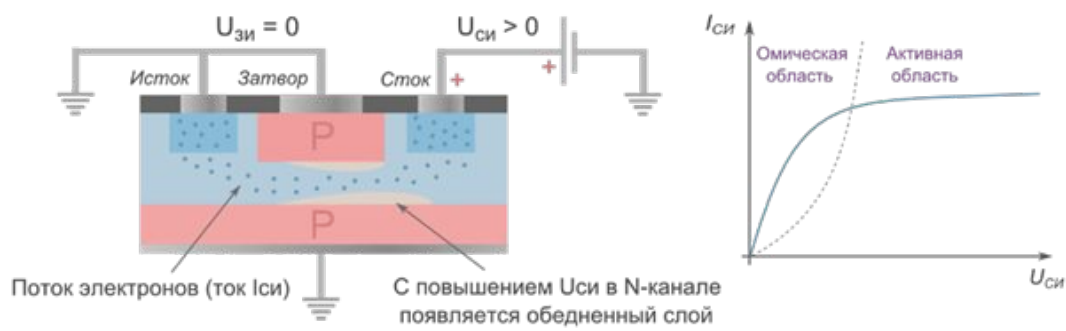
При напряжении $U_3 = U_{30}$, называемым *напряжением отсечки*, сечение канала полностью перекрывается обеднённым носителями заряда барьерным слоем, и ток стока I_{CO} (ток отсечки) определяется неосновными носителями заряда *p-n*-перехода

Включение JFET с каналом n-типа

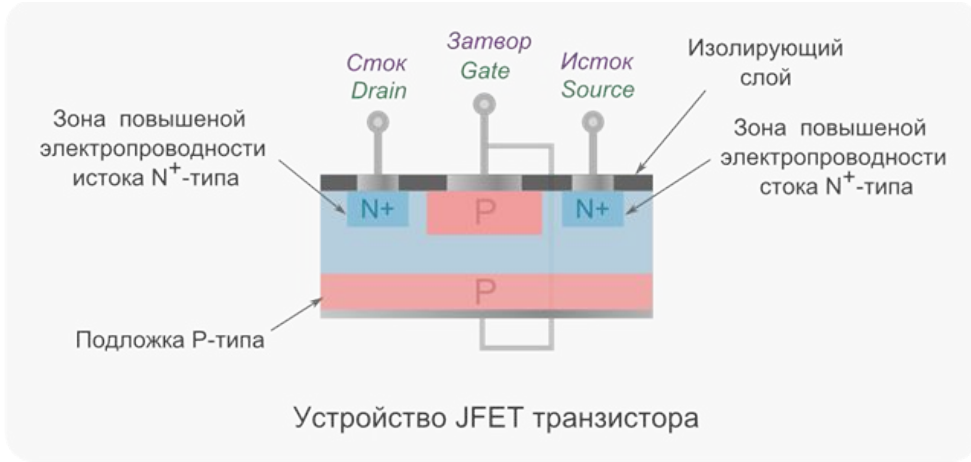
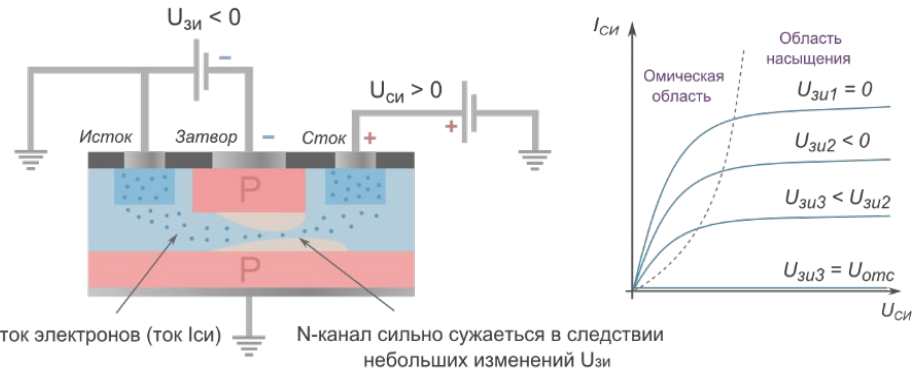


Выходная (стокзатворная характеристика $I_{си} = f(U_{си}), U_{зи} = const$)

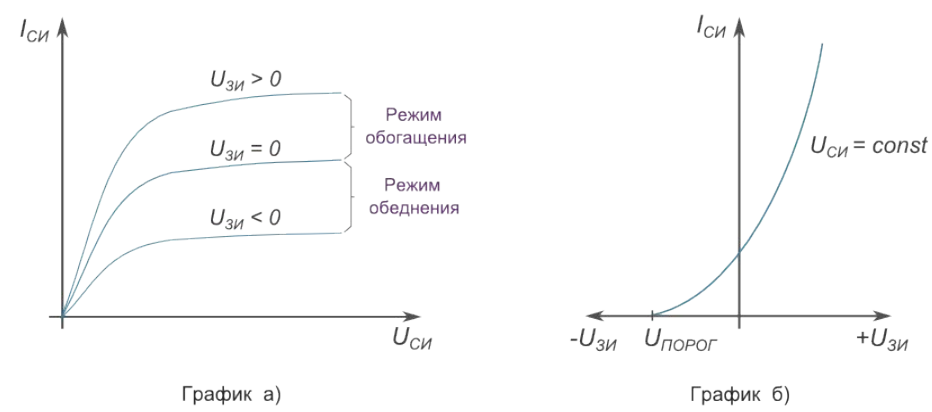




Работа полевого транзистора JFET при $U_{зи} = 0$

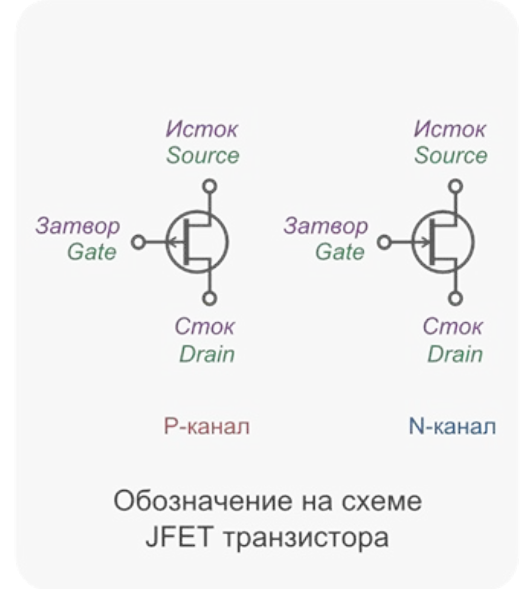
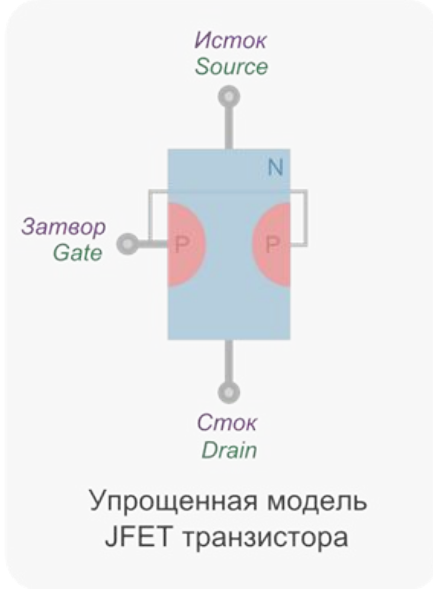


Работа полевого транзистора JFET при $U_{зи} < 0$

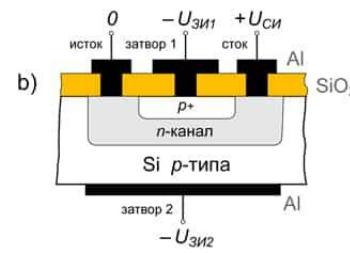
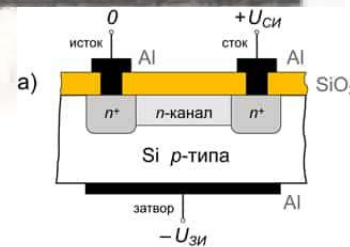
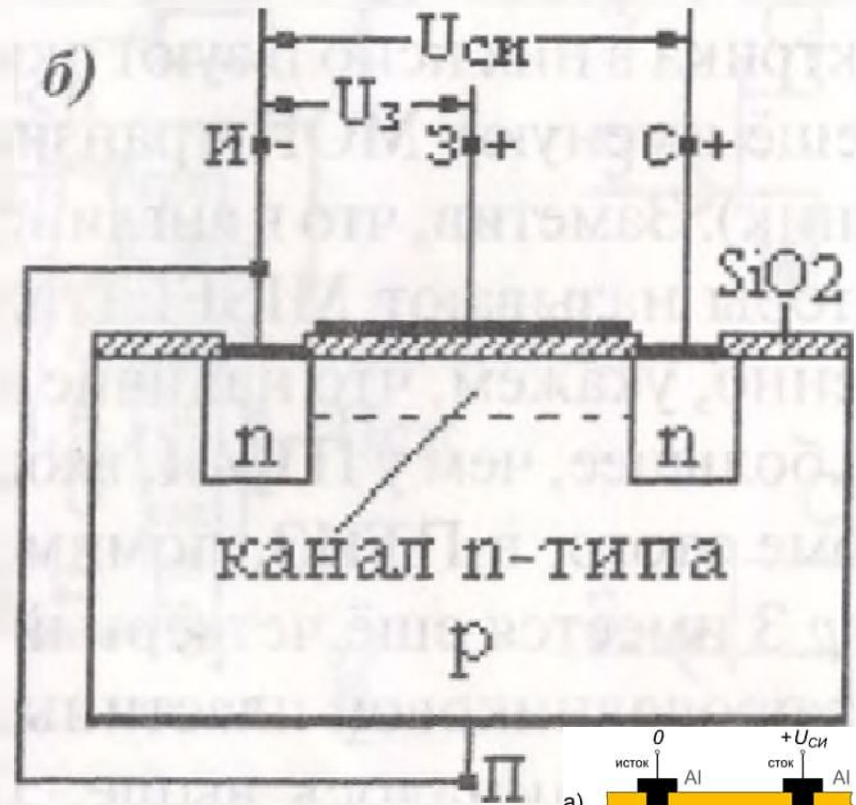
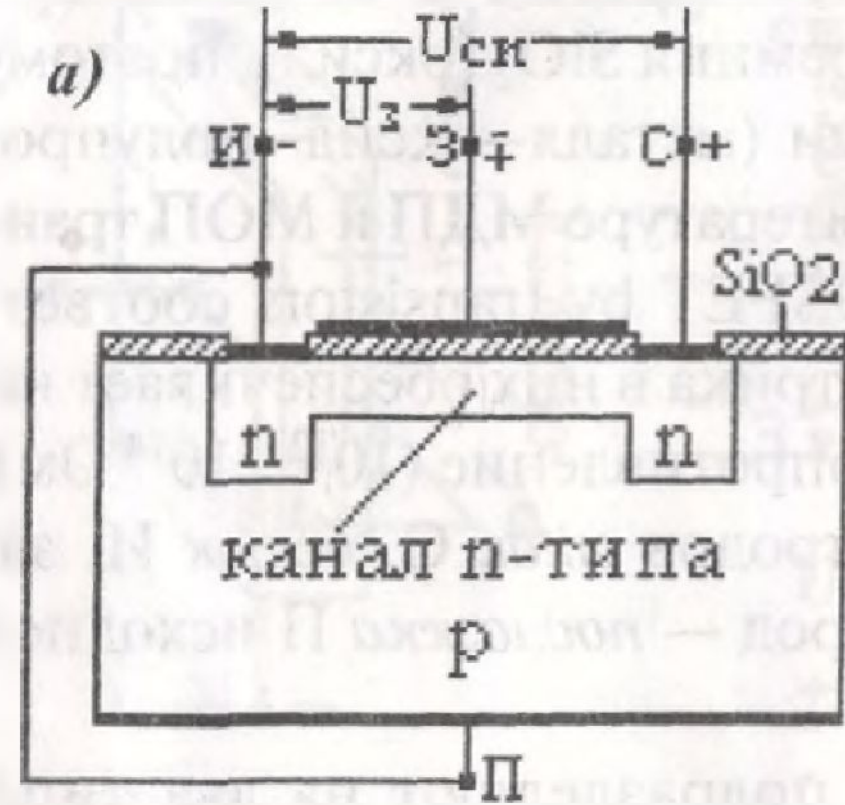


Стоковые (выходные) характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом

Стоко-затворная характеристика МДП-транзистора со встроенным каналом

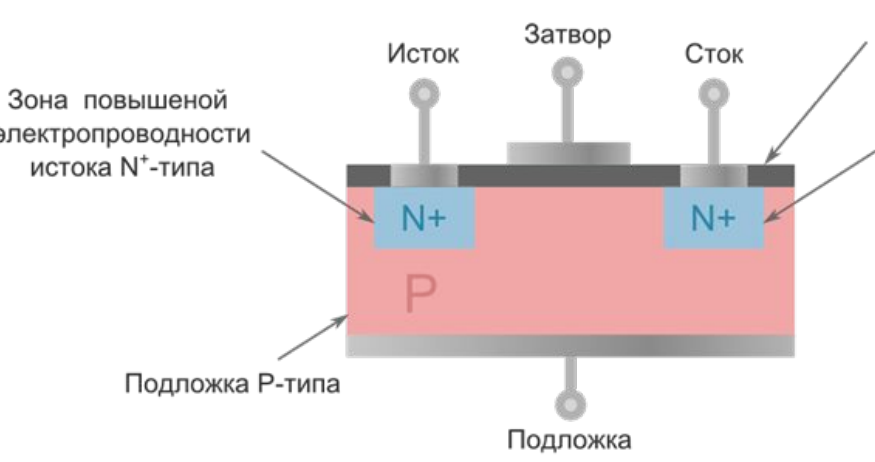


МДП-транзисторы (MOSFET) с встроенным (а) и индуцированным (в) затвором



МДП-транзистора (MOSFET) с индуцированным каналом.

На основании (*подложке*) полупроводника с электропроводностью P-типа (для транзистора с N-каналом) созданы две зоны с повышенной электропроводностью N⁺-типа. Все это покрывается тонким слоем диэлектрика, обычно диоксида кремния SiO₂. Сквозь диэлектрический слой проходят металлические выводы от областей N⁺-типа, называемые *стоком* и *истоком*. Над диэлектриком находится металлический слой *затвора*. Иногда от подложки также идет вывод, который закорачивают с истоком



Устройство МДП-транзистора с индуцированным каналом N-типа



График а)

Стоковые (выходные) характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом

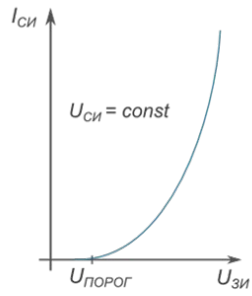
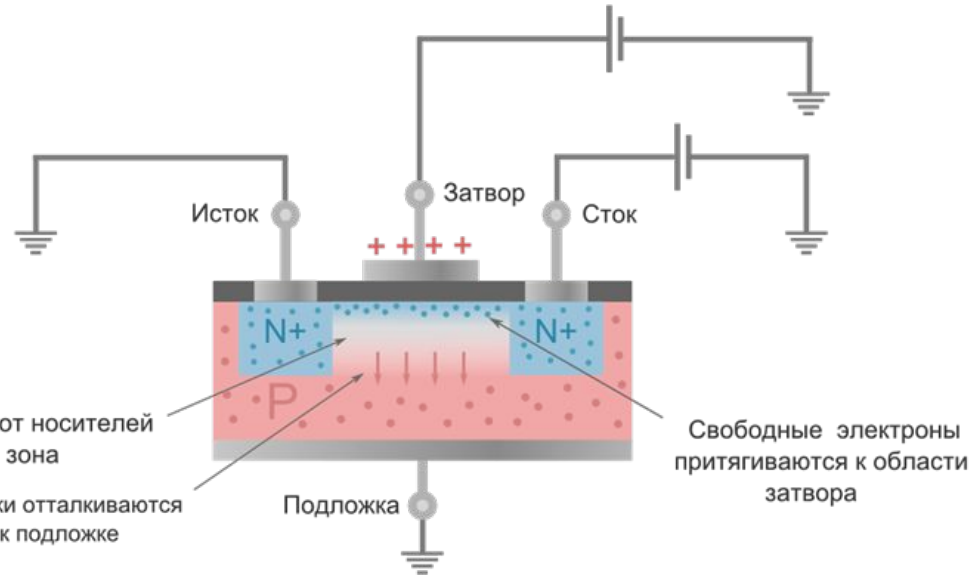


График б)

Стоко-затворная характеристика МДП-транзистора с индуцированным каналом



Работа МДП-транзистора с индуцированным каналом N-типа

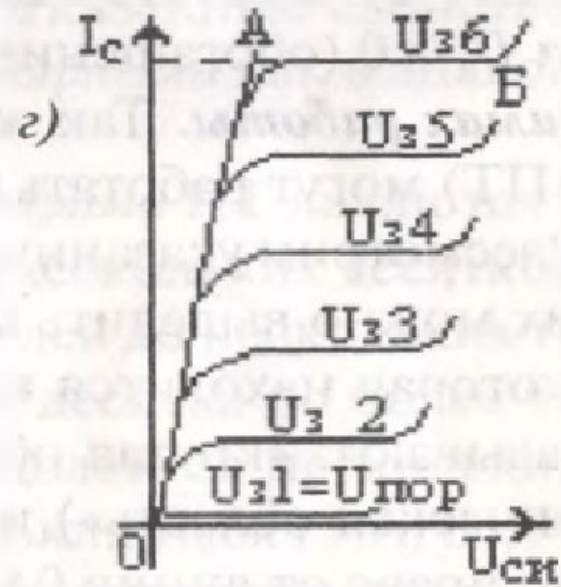
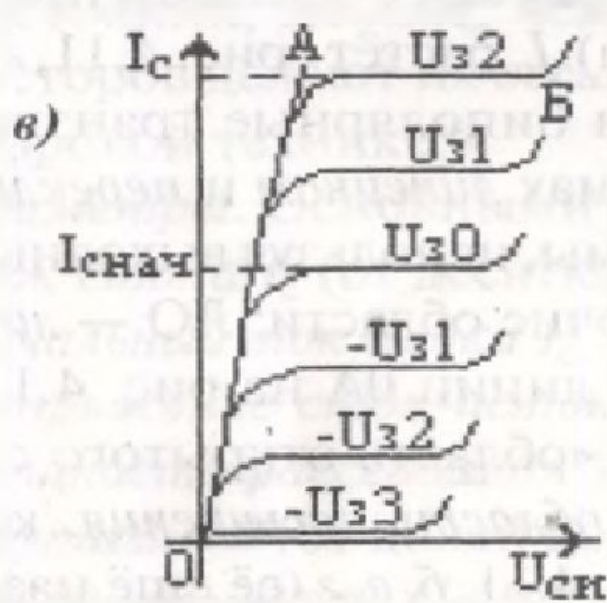
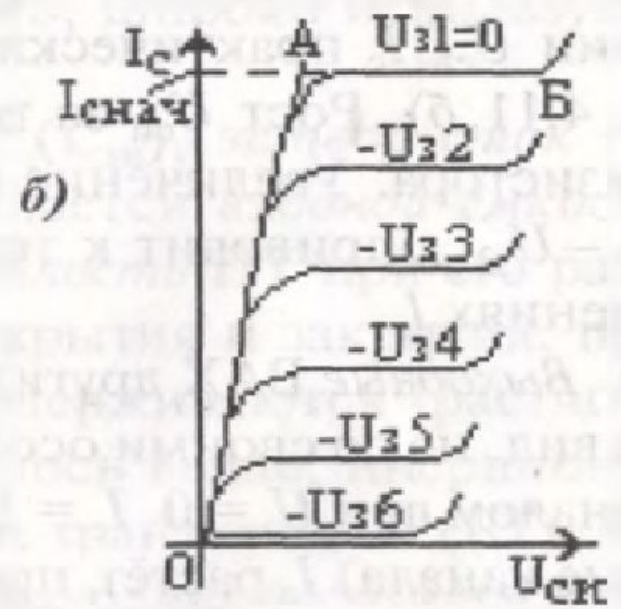
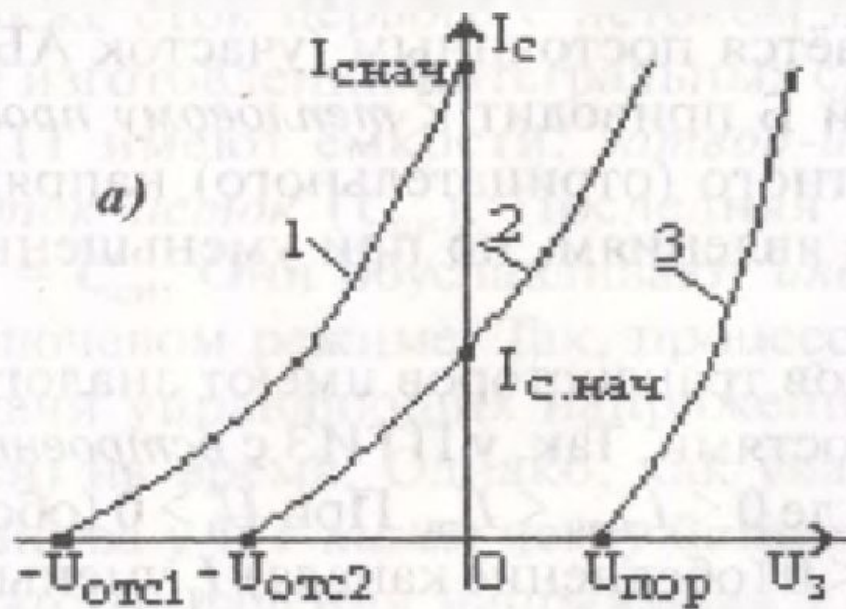


Рис. 4.11. Передаточные (а) и стоковые вольт-амперные характеристики (б, в, г) полевых транзисторов с n-каналами

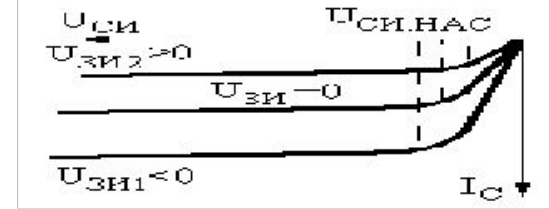
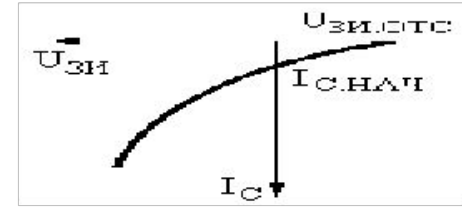
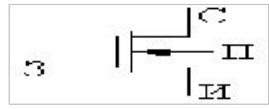
ПТ с изолированным затвором

Встроенный канал

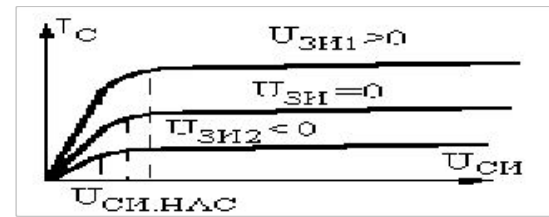
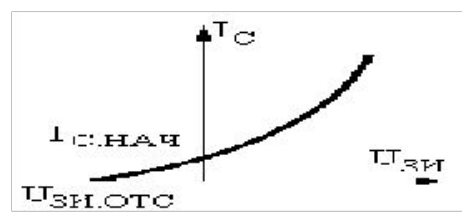
Индукционный канал

ПТ с управляющим р-п-переходом

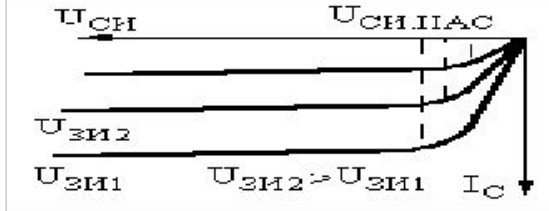
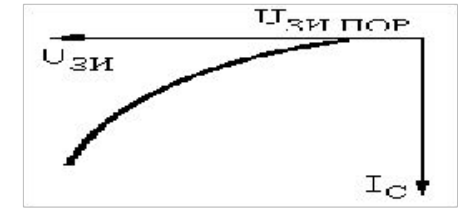
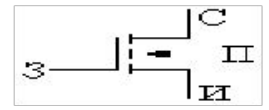
Канал
р-типа



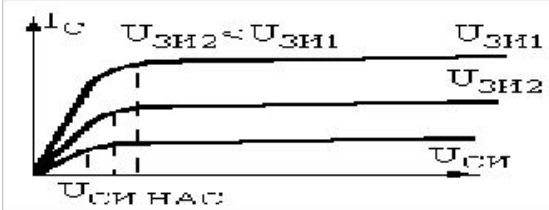
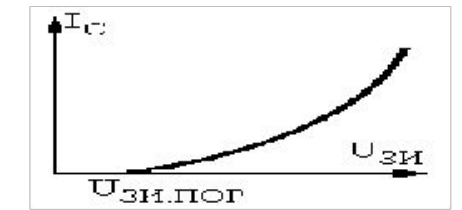
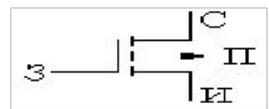
Канал
п-типа



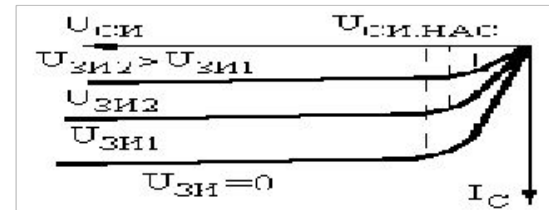
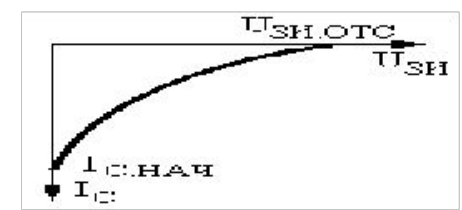
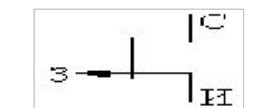
Канал
р-типа



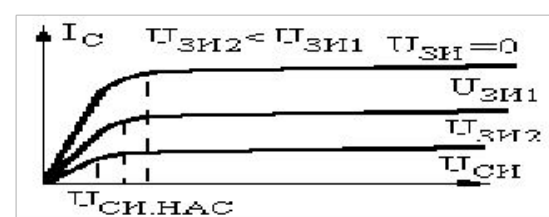
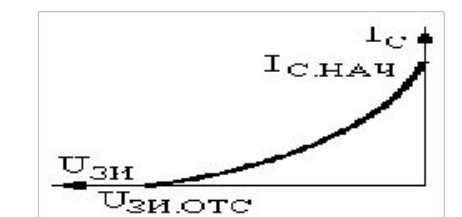
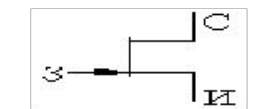
Канал
п-типа



Канал
р-типа



Канал
п-типа



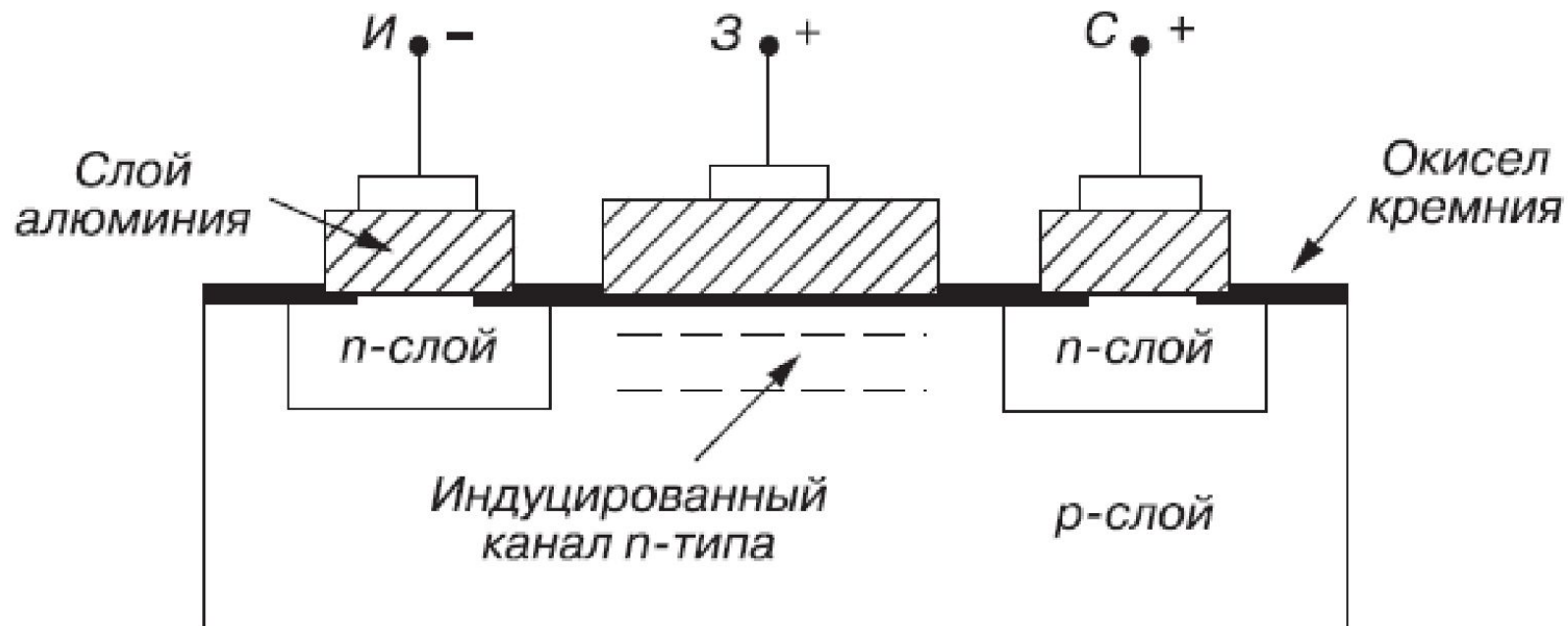
Подключим к транзистору напряжение между стоком и истоком $U_{си}$ любой полярности. Оставим затвор отключенным ($U_{зи} = 0$). В результате через канал пойдет ток $I_{си}$, представляющий собой поток электронов.

Далее, подключим к затвору отрицательное напряжение относительно истока. В канале возникнет поперечное электрическое поле, которое начнет выталкивать электроны из зоны канала в сторону подложки. Количество электронов в канале уменьшится, его сопротивление увеличится, и ток $I_{си}$ уменьшится. *При повышении отрицательного напряжения на затворе, уменьшается сила тока.* Такое состояние работы транзистора называется *режимом обеднения*.

Если подключить к затвору положительное напряжение, возникшее электрическое поле будет притягивать электроны из областей стока, истока и подложки. Канал расширится, его проводимость повысится, и ток $I_{си}$ увеличится. Транзистор войдет в режим обогащения.

Как мы видим, МДП-транзистор со встроенным каналом способен работать в двух режимах - в режиме обеднения и в режиме обогащения.

Структура полевого транзистора с индуцированным *n*-каналом



При напряжении на затворе относительно истока, равным нулю и при наличии напряжения на стоке, ток стока оказывается ничтожно малым. Заметный ток стока появляется только при подаче на затвор напряжения положительной полярности относительно истока, больше так называемого *порогового напряжения* $U_{з.пор}$

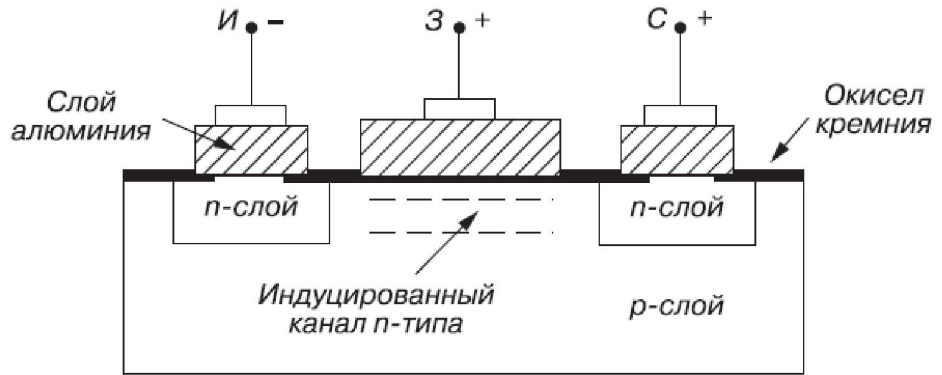


График а)

Стоковые (выходные) характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом

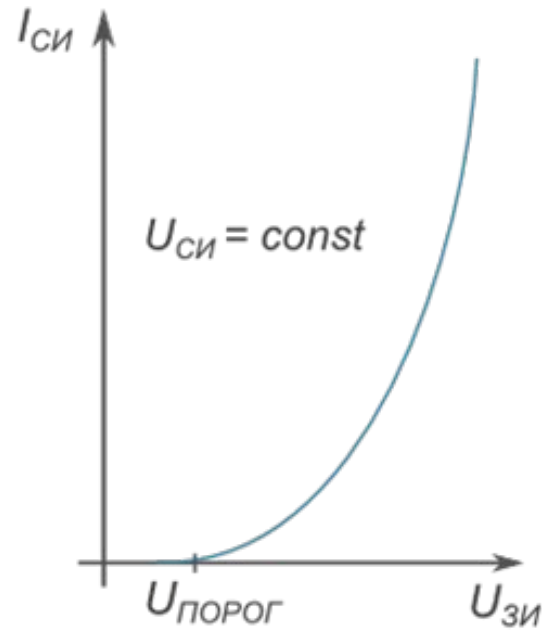
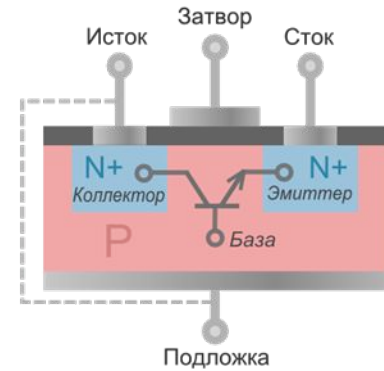
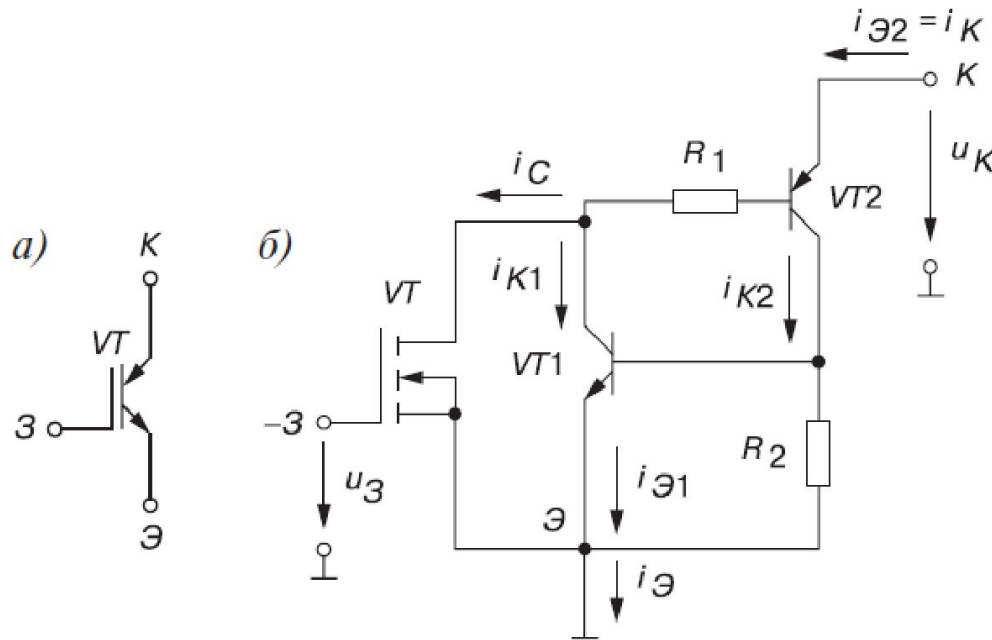


График б)

Стоко-затворная характеристика МДП-транзистора с индуцированным каналом

Недостатком полевых транзисторов с изолированным затвором является большое сопротивление в открытом состоянии, что затрудняет их массовое использование в силовой электронике при напряжениях $U_{си}$ 300 В.

Комбинированный транзистор для работы, в основном, в ключевом режиме, состоящего из управляющего полевого транзистора VT и выходного биполярного каскада $VT1$ и $VT2$, наз. *биполярным транзистором с изолированным затвором (транзистор IGBT)*, не имеет этого недостатка.



Паразитный биполярный NPN-транзистор внутри МДП-транзистора

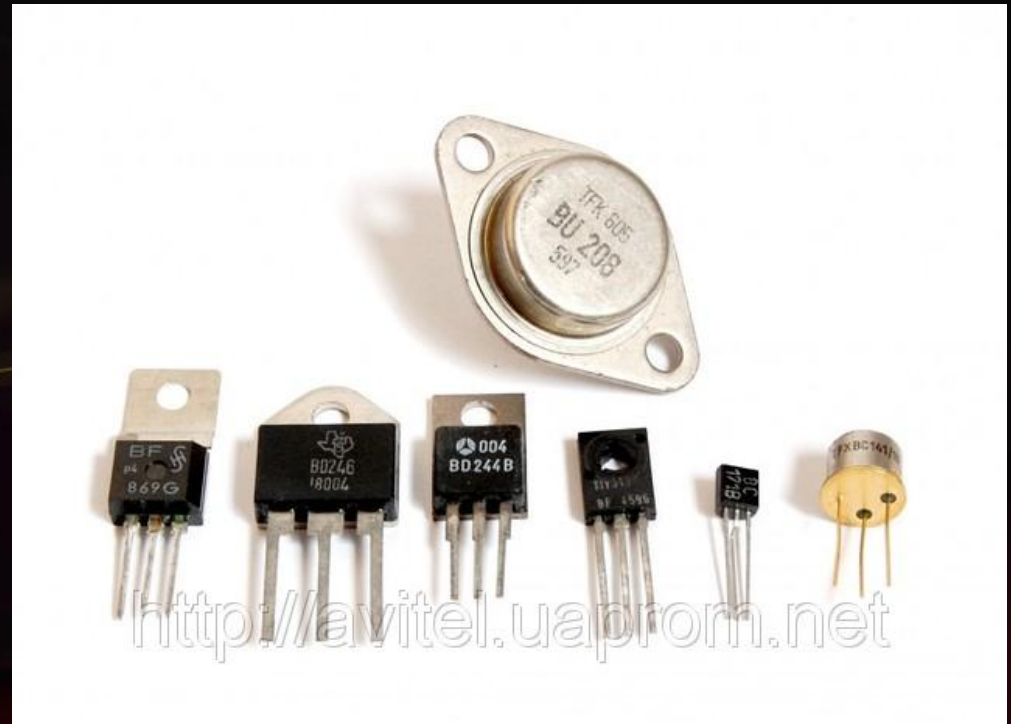
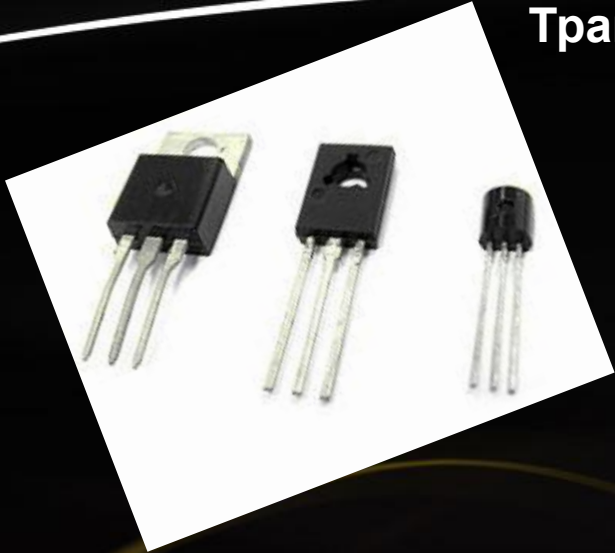
Биполярная часть комбинированного транзистора представляет собой $p-p-p-p$ -структуру, очень похожую на структуру тиристора, имеющую внутреннюю положительную обратную связь, так как ток коллектора i_{K2} транзистора $VT2$ влияет на ток базы транзистора $VT1$ и наоборот. Коэффициенты передачи тока транзисторов $VT1$ и $VT2$ соответственно равны $K_1 = i_{K1}/i_{Э1}$ и $K_2 = i_{K2}/i_{Э2}$, а ток эмиттера

$$i_{Э} = i_{K1} + i_{K2} + i_{С}$$

ТОК СТОКА

$$i_{С} = i_{Э}(1 - \alpha_1 - \alpha_2)$$

Транзисторы различной мощности



<http://avitel.uaprom.net>

Интегральная микросхема (ИМС) - устройство, в котором несколько элементов (резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов) соединены между собой и образуют определенный функциональный узел (логический элемент, усилитель, генератор, стабилизатор напряжения и т. д.), изготовленный на общей основе (подложке) в едином технологическом процессе.

Различают **монолитные ИМС**, в которых на общей полупроводниковой, например, кремниевой подложке изготавливают все элементы, и **гибридные ИМС**, в которых на общей диэлектрической подложке изготавливают только пассивные элементы (резисторы, конденсаторы), а активные элементы (диоды, транзисторы) представляют собой безкорпусные миниатюрные детали навесного монтажа. По типу используемых транзисторов полупроводниковые ИМС принято подразделять **на биполярные и МОПИМС**.

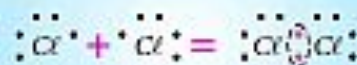
В зависимости от числа компонентов в единице объёма различают ИМС **большой степени интеграции (более 10^3 - 10^7 элементов в 1 см^2)**, **средней ($2 \cdot 10^2$ - 10^3 элементов в 1 см^2)** и **малой степени интеграции (менее $2 \cdot 10^2$ элементов в 1 см^2)**.

В зависимости от функционального назначения ИМС подразделяют на **аналоговые** (линейноимпульсные) и **цифровые** (логические). Аналоговые ИМС серий К140, К174, К544, К570 и др. служат для реализации различных схем генераторов, усилителей и преобразователей аналоговых сигналов. Цифровые ИМС серий К134, К155, К555, К531, К1531 и др. применяются в электронных цифровых вычислительных машинах и в устройствах цифровой обработки информации

Физические и химические свойства атомов

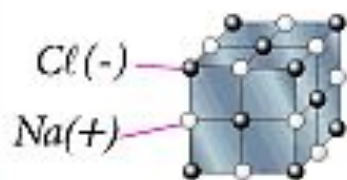
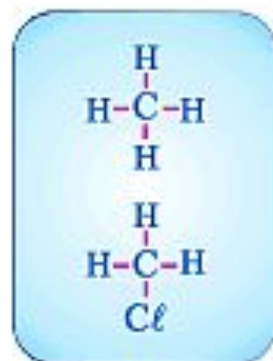
Строение внешних электронных оболочек атомов определяет виды связей в молекулах

I Ковалентная (химическая связь). Молекулы образуются из атомов за счет объединения их внешних валентных электронов.



Молекулы могут быть:

1. Нейтральными ($\text{O}_2, \text{N}_2, \text{Cl}_2, \text{CH}_4$)
2. Полярными (CH_3Cl)

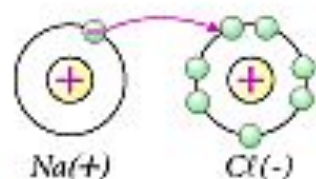


II Ионная связь

Вещества имеют кристаллическую решётку (NaCl)

Вещества с ионной связью бывают:

- 1) с плотной упаковкой ионов (NaCl)
- 2) с неплотной упаковкой (GCl)



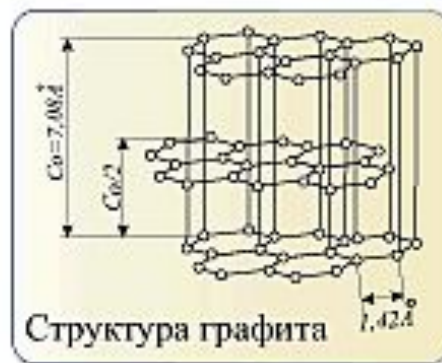
Физические и химические свойства атомов

Электрон

Ион



III Металлическая (химическая) связь. Между узлами с ионами находятся свободные (коллективизированные) электроны (это металлы и их сплавы).



Структура графита

IV Молекулярная связь (связь Ван-дер-Ваальса) Вещества состоят из отдельных молекул и связаны слабыми молекулярными силами.

(графит, парафин, мышьяк, фосфор, H_2, N_2)



Электродвигатель И-1000В



Штырька графитовая

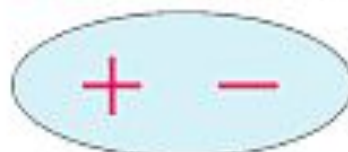
Поляризация диэлектриков

1. Ограниченное смещение связанных зарядов в нейтральных диэлектриках.



Неполярная молекула

$\leftarrow E$ (внешнее электрическое поле)



Поляризованная молекула

2. Ориентация диполей в полярных диэлектриках.

Без внешнего поля



$\leftarrow E$ (внешнее электрическое поле)



Диэлектрики

Основные виды поляризации диэлектриков

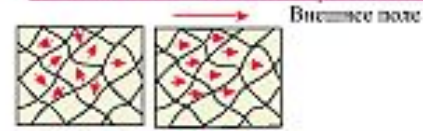
Вид поляризации зависит от строения молекул

I Миграционная поляризация

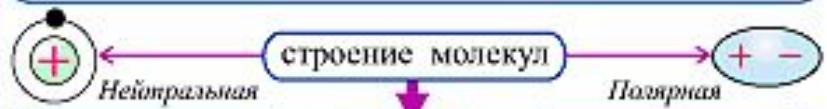


- 1) При низких частотах
 - 2) Со значительным рассеиванием энергии
- В слоистых пластиках: гетинакс, текстолит, стеклотекстолит.

II Спонтанная или самопроизвольная поляризация



- 1) Домены
- 2) Очень сильное рассеивание энергии в сегнетоэлектриках



III Мгновенная

- 1) Быстро
- 2) Упруго
- 3) Без рассеяния энергии

1. Электронная

Во всех видах диэлектриков

2. Ионная

В твердых телах с ионным строением (кварц, слюда, корунд.)

поларизация

IV Замедленная

- 1) Замедленно
- 2) С рассеиванием энергии

Характеризуется: интенсивностью процесса поляризации.

ϵ

нейтральные диэлектрики (1,8 - 2,5)

полярные диэлектрики (3 - 10)

1. Электронно-релаксационная

В диоксид титана, с примесью Са, Ва

2. Ионно-релаксационная

Неорганические стекла

3. Дипольно-релаксационная

В дипольных диэлектриках (органические вещества - целлюлоза)

ИПГУ Росуниверситет Южно-Уральский Государственный университет

Общие сведения о строении вещества

Основные электрические характеристики электротехнических материалов

1. ϵ - диэлектрическая проницаемость.
2. $\rho_v; \rho_s$ - удельные сопротивления.
3. δ и $tg\delta$ - угол диэлектрических потерь.
4. E - напряжённость пробоя (электрическая прочность)

Классификация материалов по способности проводить электрический ток

По величине ρ_v - объемное удельное сопротивление - материалы подразделяются:

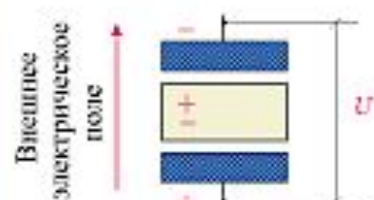
- I Проводниковые**
 1. $\rho_v = 10^{-4} \div 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - металлы и их сплавы.
 2. $\rho_v = 0$ при $t < t_{кр}$ - сверхпроводниковые материалы (многокомпонентные сплавы)
- II Диэлектрики**

$\rho_v = 10^8 \div 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - изоляционные материалы.
- III Полупроводники**

$\rho_v = 10^{-2} \div 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - диоды, транзисторы и др.

ИПГУ Росуниверситет Южно-Уральский Государственный университет

ϵ - Диэлектрическая проницаемость (или коэффициент поляризуемости)



Заряд конденсатора

$$Q = C \cdot U;$$

можно представить:

$$Q = Q_0 + Q_s$$

Q_0 - между обкладками вакуум

Q_s - заряд на поверхности диэлектрика

ϵ - определяет интенсивность процесса поляризации

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_s}{Q_0} = 1 + \frac{Q_s}{Q_0}$$

ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость

$\epsilon = 1$ - только в случае вакуума

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = 1$$

Во всех остальных случаях $\epsilon > 1$

ϵ воздуха = 1,00058

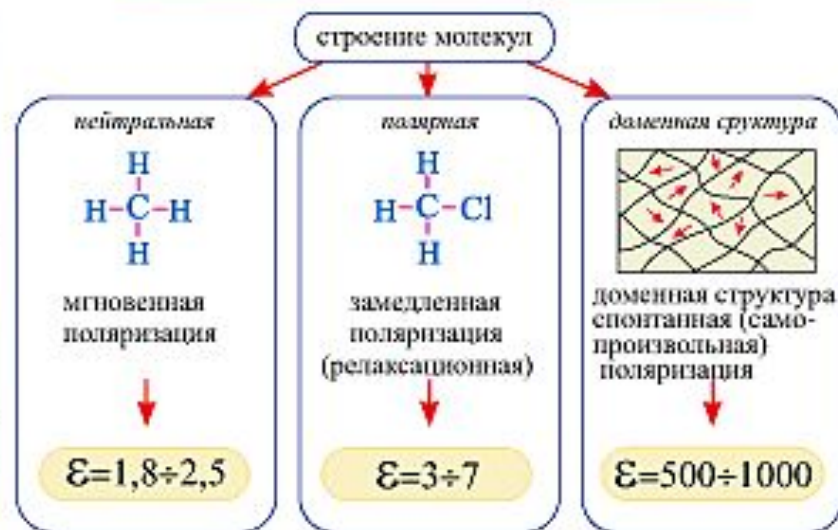
$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon$$
 , где

ϵ_a - абсолютная диэлектрическая проницаемость

ϵ_0 - электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$

ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость.

Диэлектрическая проницаемость



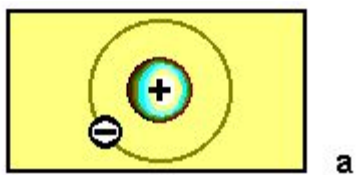
Конденсатор

Величина ёмкости конденсатора

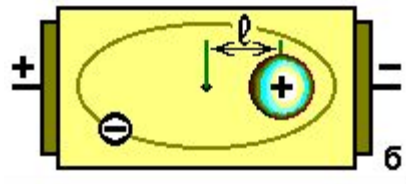
$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 \cdot S}{d} \text{ [Ф]}, \text{ где}$$

S - площадь электродов
d - толщина диэлектрика





а



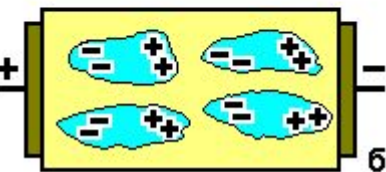
б

Диэлектрик вне электрического поля (а) и в электрическом поле (б)

Электронная поляризация — упругое смещение электронных оболочек относительно ядра атомов диэлектрика под действием внешнего электрического поля. Смещение оболочек в пределах атомов или ионов весьма мало, поэтому дипольный момент диэлектрика лишь в 1,5...2 раза превосходит соответствующий показатель вакуума. Процесс электронной поляризации завершается всего за 10^{-15} с. После исчезновения электрического поля оболочки возвращаются в первоначальное состояние, поляризация исчезает, энергия, затраченная на неё, освобождается без преобразования в тепло. Электронная поляризация свойственна всем диэлектрикам и создаёт в них лишь **бесактивный (дисиплятивный) по характеру** суммарный дипольный момент.



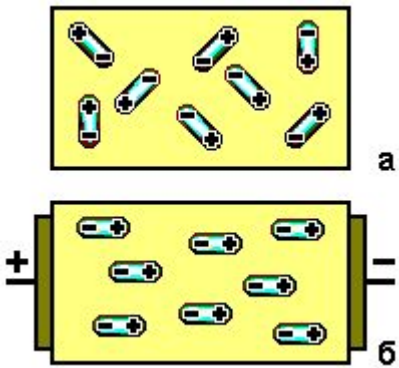
а



б

Диэлектрик вне электрического поля (а) и в электрическом поле (б)

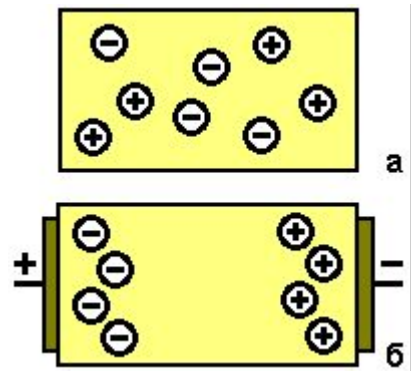
связана с наличием в диэлектрике областей — доменов, в пределах которых диполи имеют одинаковую ориентацию, но слабо связаны друг с другом. Ориентация диполей соседних доменов различна и при отсутствии внешнего электрического поля их суммарный дипольный момент равен нулю. Направление приложенного поля совпадает с ориентацией диполей какого-либо домена, который начинает подчинять своей ориентации диполи соседних областей и расти за их счёт. Процесс завершается одинаковой ориентацией всех диполей диэлектрика. Диэлектрики, в которых процесс спонтанной поляризации протекает весьма интенсивно, называются сегнетоэлектриками. Они способны поляризоваться в десятки тысяч раз сильнее, чем вакуум



Дипольная поляризация — ориентация диполей диэлектрика по внешнему электрическому полю. Дипольная поляризация свойственна диэлектрикам с полярными молекулами, в которых центры положительных и отрицательных зарядов смещены друг относительно друга

Диэлектрик вне электрического поля (а) и в электрическом поле (б)

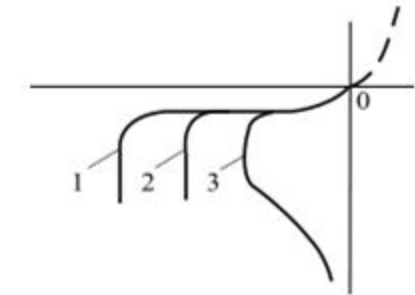
Объёмно-зарядная поляризация — накопление положительных и отрицательных ионов у приложенных к материалу электродов. При создании электрического поля начинается процесс перемещения и накопления положительных ионов у отрицательных, а отрицательных ионов — у положительных электродов. Сначала скорость накопления зарядов наибольшая, затем она уменьшается. Процесс поляризации завершается через 1...2 минуты, причём он более длителен у диэлектриков с высоким удельным электрическим сопротивлением. Всё это время по диэлектрику протекает ток поляризации, вызывающий диэлектрические потери в виде нагрева. Дипольный момент диэлектрика с объёмно-зарядной



Диэлектрик вне электрического поля (а) и в электрическом поле (б)

дополнительных неосновных носителей заряда лавинообразно нарастает, а обратный ток через переход увеличивается. Ток в цепи может быть ограничен только внешним сопротивлением.

Рис. 2.5. Виды пробоя p-n-перехода: 1 – лавинный; 2 – туннельный; 3 – тепловой
Лавинный пробой возникает в высокоомных полупроводниках, имеющих большую ширину p-n-перехода. В этом случае ускоряемые электрическим полем носители заряда успевают в промежутке между двумя столкновениями с атомами получить достаточную энергию для их ионизации. Напряжение лавинного пробоя увеличивается с повышением температуры из-за уменьшения длины свободного пробега между двумя столкновениями носителей заряда с атомами. При лавинном пробое напряжение на p-n-переходе остается постоянным, что соответствует почти вертикальному участку в обратной ветви 1 вольт-амперной характеристики (см. рис. 2.5).



Пробой р-п перехода

При обратном смещении р-п перехода, обратный ток создается неосновными носителями заряда. При значительном увеличении обратного напряжения на **р-п переход**, генерация неосновных носителей может резко вырасти и в результате наступит пробой перехода.

Пробой - это скачкообразное изменение тока, при неизменном напряжении. В зависимости от причин его вызвавших различают лавинный, туннельный и тепловой пробой. На рисунке пробой изображен на участке 1-2.

Лавинный пробой – возникает в широком [электронно-дырочном переходе](#). Неосновные носители заряда, ускоряются большим обратным напряжением и приобретают значительную энергию, которой хватает, чтобы столкнувшись с атомами кристаллической решётки, оторвать валентные электроны. Электрон, уходя со своего места, создаёт дырку. И вновь созданные носители снова ускоряются полем и также отрывают другие электроны. Процесс происходит лавинообразно. Отсюда название пробоя.

Туннельный пробой возникает в узких р-п переходах. Под действием большой напряженности поля, валентные электроны отрываются от своих атомов, образуя при этом дырку, и увеличивают обратный ток. Такой пробой возникает только в узких переходах, потому что в них при небольших значениях напряжения, возникает значительная напряжённость электрического поля.

Это - **электрические** виды пробоя. Здесь разрушения электронно-дырочного перехода не происходит, эти процессы обратимы и используются, например в стабилитронах.

В отличие от электрических пробоев, **тепловой пробой**, процесс необратимый. При повышении температуры, термогенерация носителей увеличивается. Следовательно, увеличивается обратный ток, что в свою очередь вызывает еще больший нагрев перехода. В результате структура кристалла разрушается и переход расплавляется.

Причинами теплового пробоя может быть плохой теплоотвод или перенапряжение диода. То есть в результате лавинного или туннельного пробоя, возник слишком большой ток, который вызвал чрезмерный нагрев перехода.

