

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ВЫСШАЯ ШКОЛА ПЕЧАТИ И МЕДИАИНДУСТРИИ**

Кафедра «Полиграфические системы».

Доцент , к.т.н. Михайлова Ольга Михайловна

Структура дисциплины «Электротехника и электроника»

«Электротехника
и электроника »

```
graph TD; A[«Электротехника и электроника »] --> B[Электротехника Раздел 1.]; A --> C[Электроника Раздел 2];
```

Электротехника
Раздел 1.

Электроника
Раздел 2

электроника

промышленная

физическая

Физика
твёрдого тела

технология

микроэлектроника
интегральная
схема

технология
изготовления
ИС

материалы
степень
интеграции
производство



Полупроводниковые приборы

Элементная база цифровых схем

Полупроводниковые
приборы

Диоды

Биполярные
транзисторы

Полевые
транзисторы

Тиристоры

Полупроводниковые
Запоминающие
структуры

Функционально
Интегрированные
элементы



примеси

A central dark grey rounded rectangle containing the word 'примеси' (impurities).

Донорные(P, As)

A dark grey rounded rectangle containing the text 'Донорные(P, As)' (Donor (P, As)).

Акцепторные(Al, B, Ga)

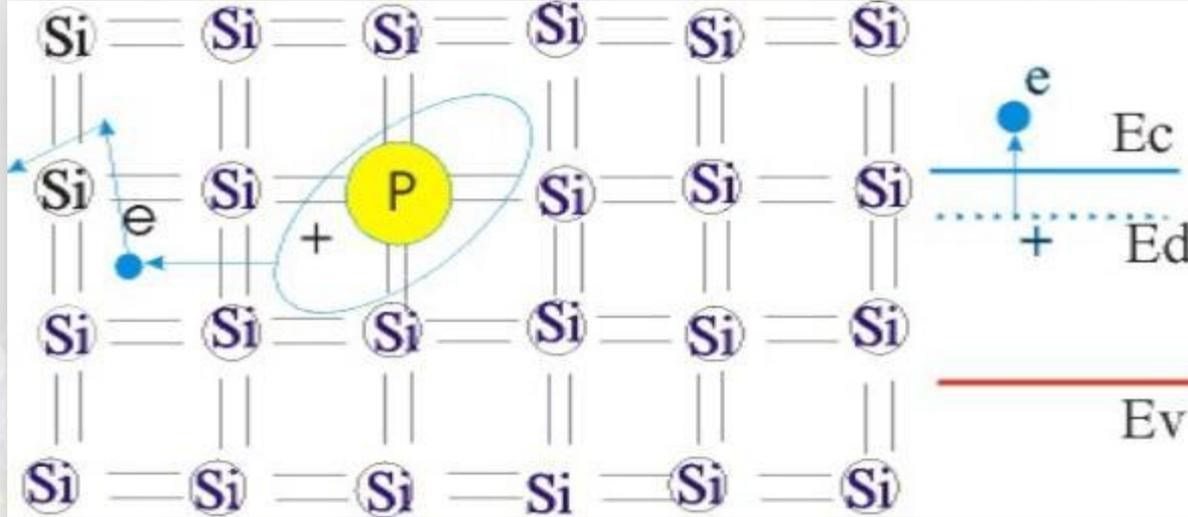
A dark grey rounded rectangle containing the text 'Акцепторные(Al, B, Ga)' (Acceptor (Al, B, Ga)).

Собственный полупроводник-беспримесный и бездефектный полупроводник с идеальной кристаллической решеткой

A vertical text block on the left side of the slide, describing the properties of an intrinsic semiconductor.



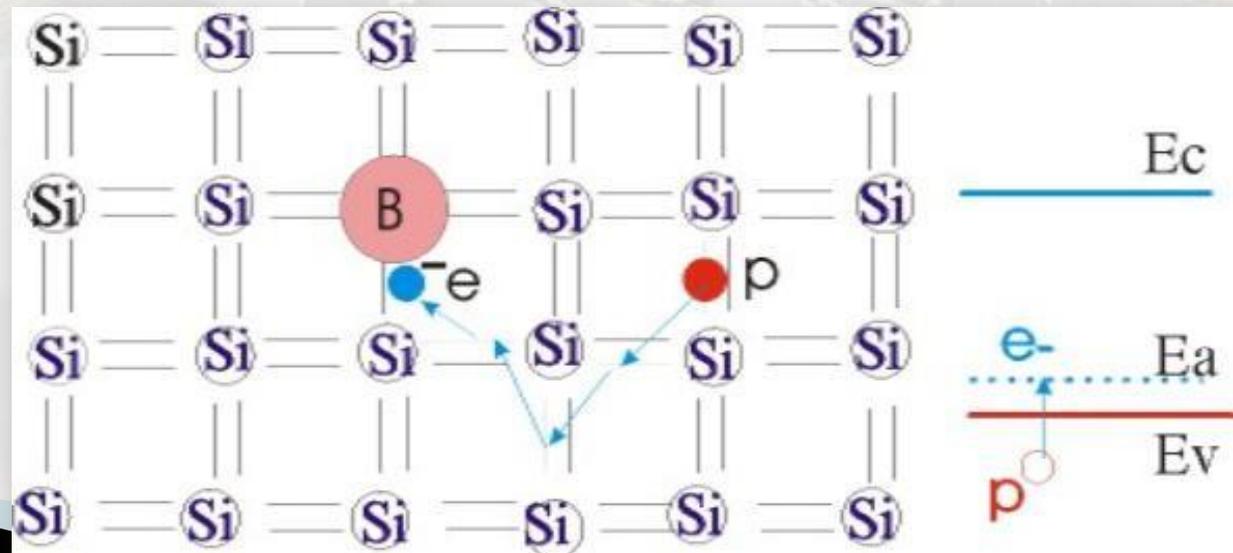
Легирование донорными примесями



Возникновение
электронного
полупроводника
(до-норного, n-
полупроводника)

Легирование акцепторными примесями

Возникновение
акцепторного
полупроводника

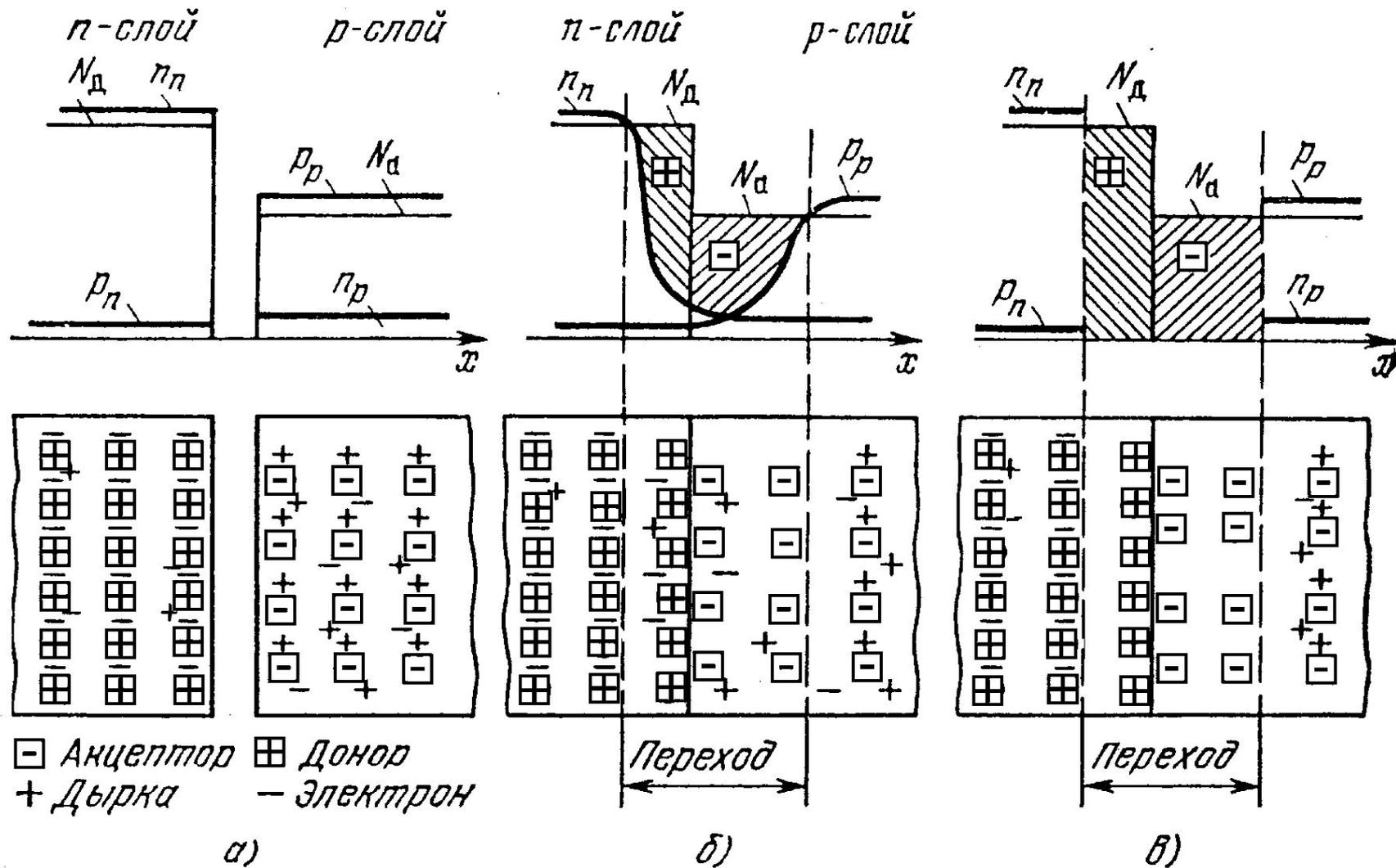


ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД – это граничный слой между двумя областями, физические характеристики которых значительно различаются.



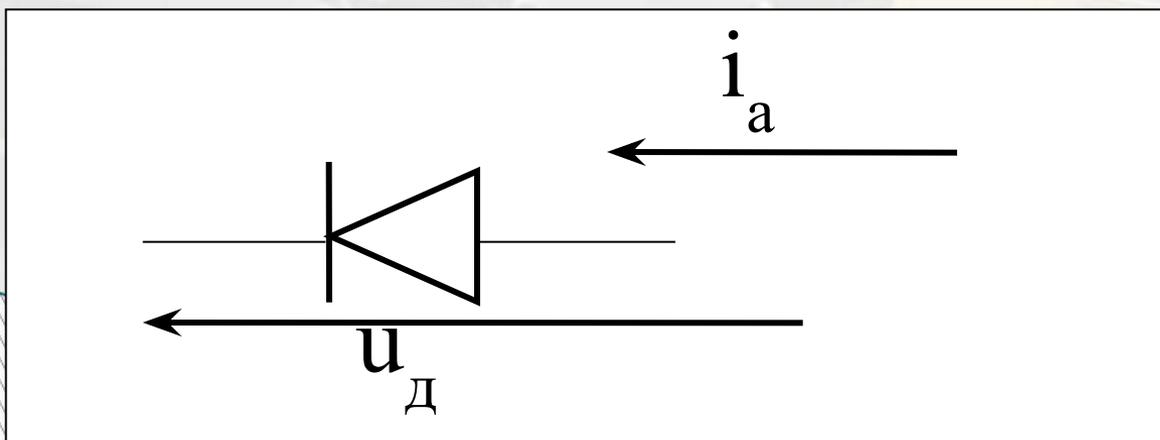
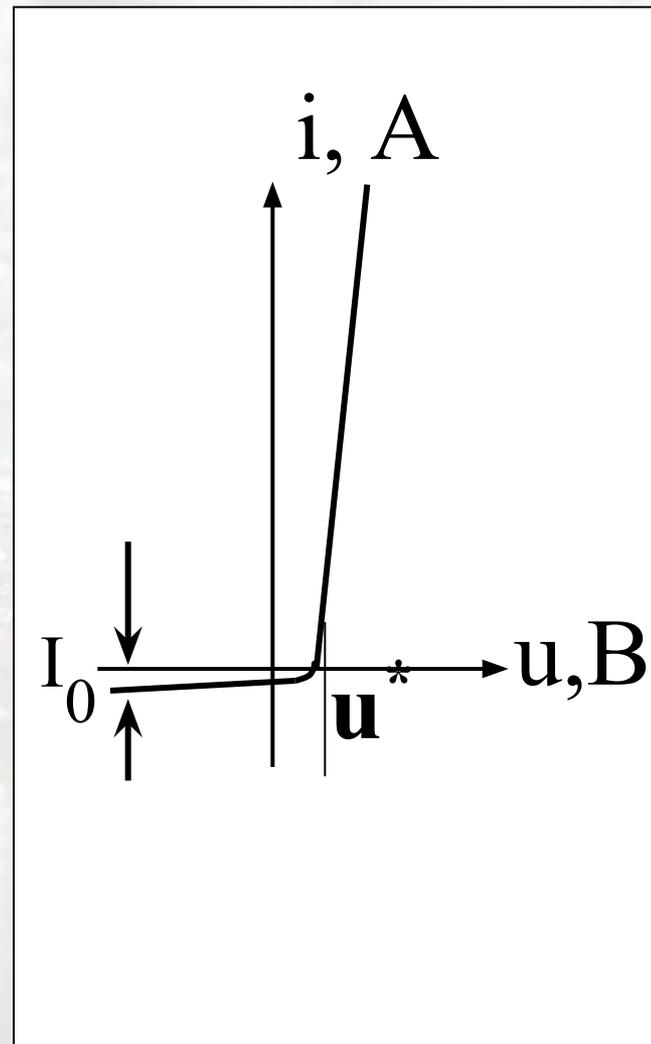
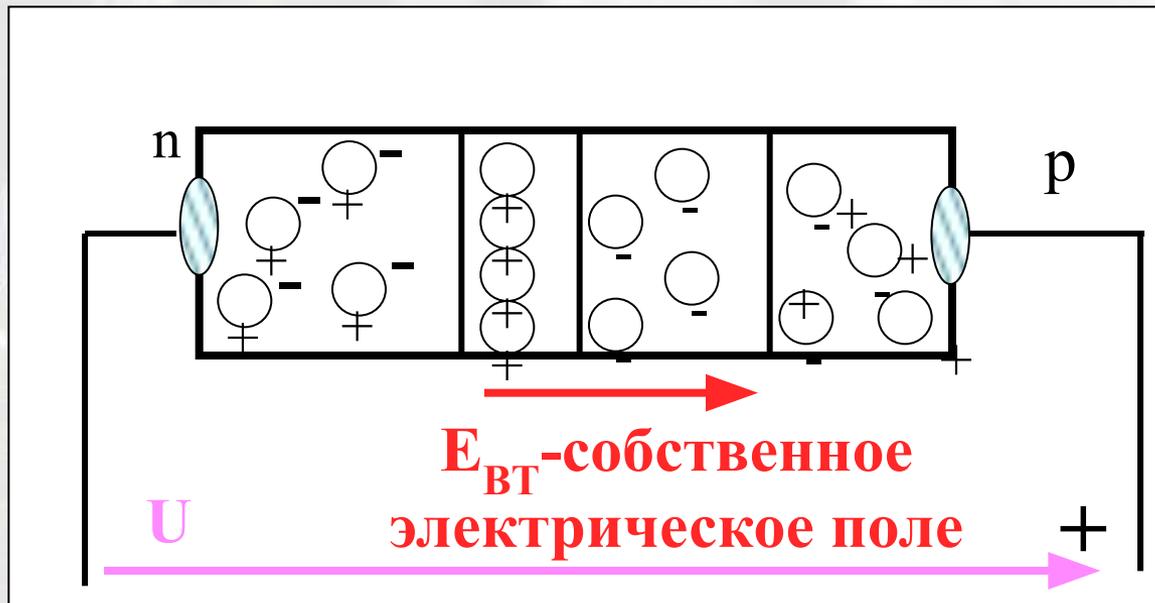
По соотношению концентраций примесей в р- и n- слоях переходы делят:

- симметричные
- несимметричные
- односторонние

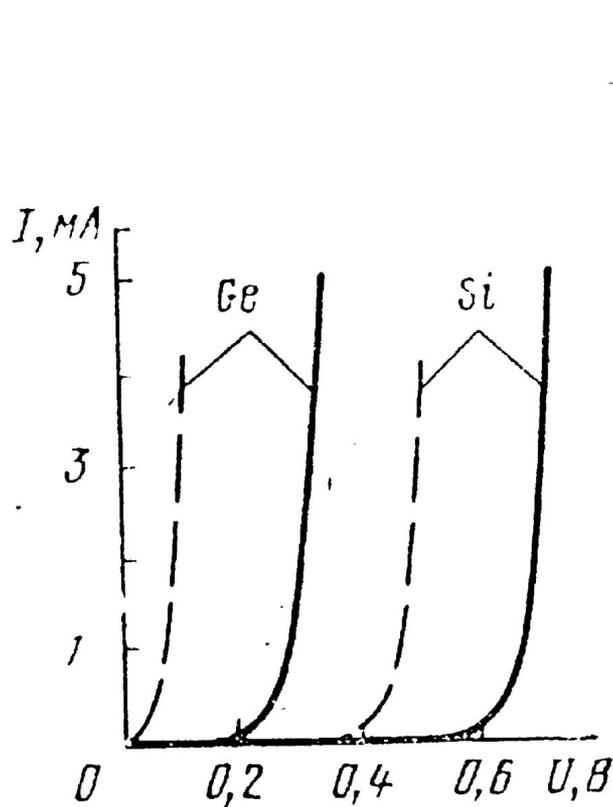


состояние слоев; б – объемные заряды в реальном переходе; в – объемные заряды в идеализированном переходе.

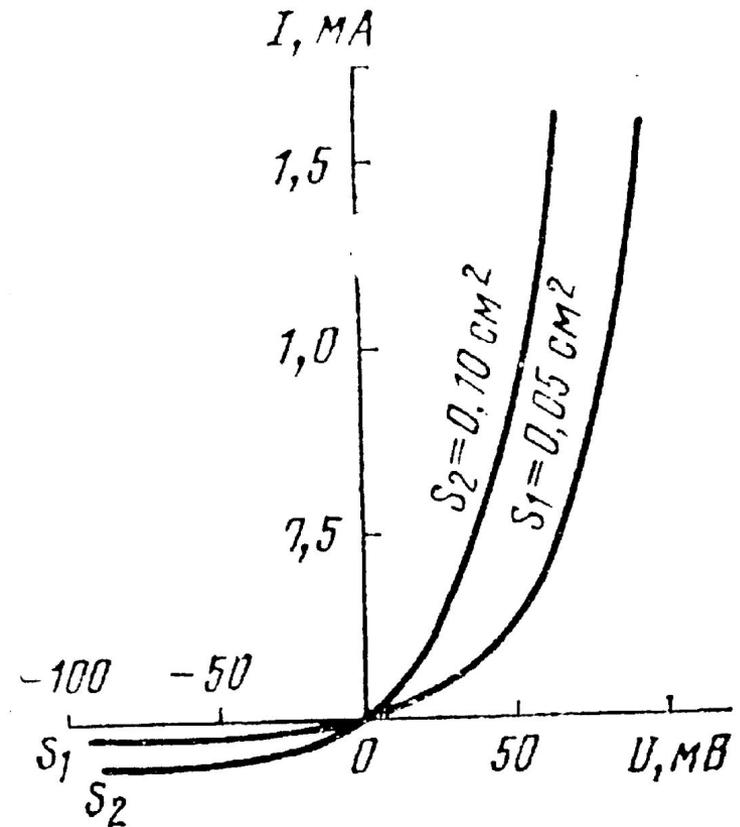
Электрические p-n-переходы



Прямое напряжение уменьшается с увеличением площади перехода



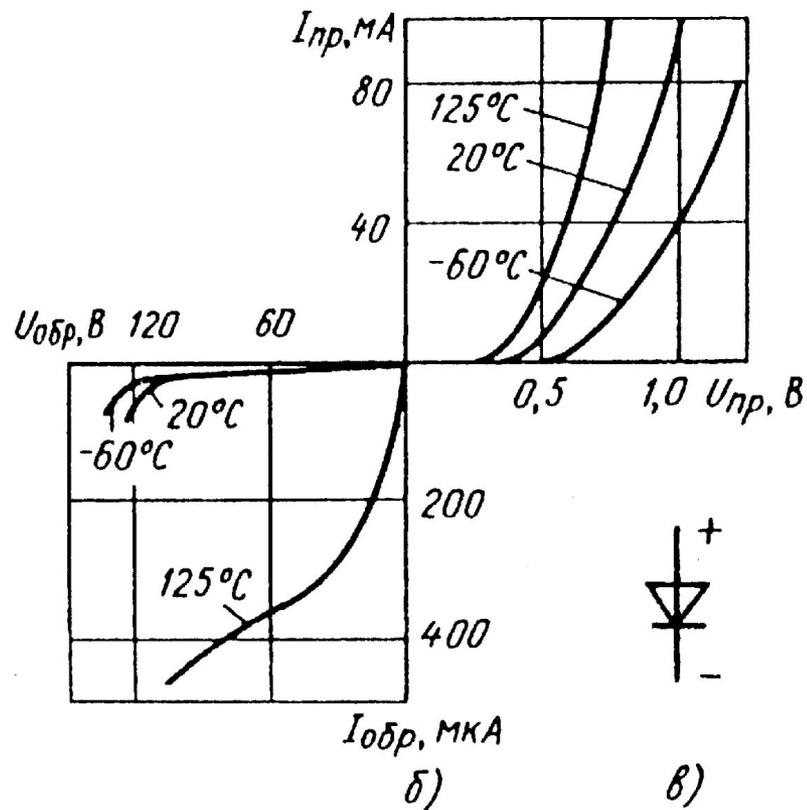
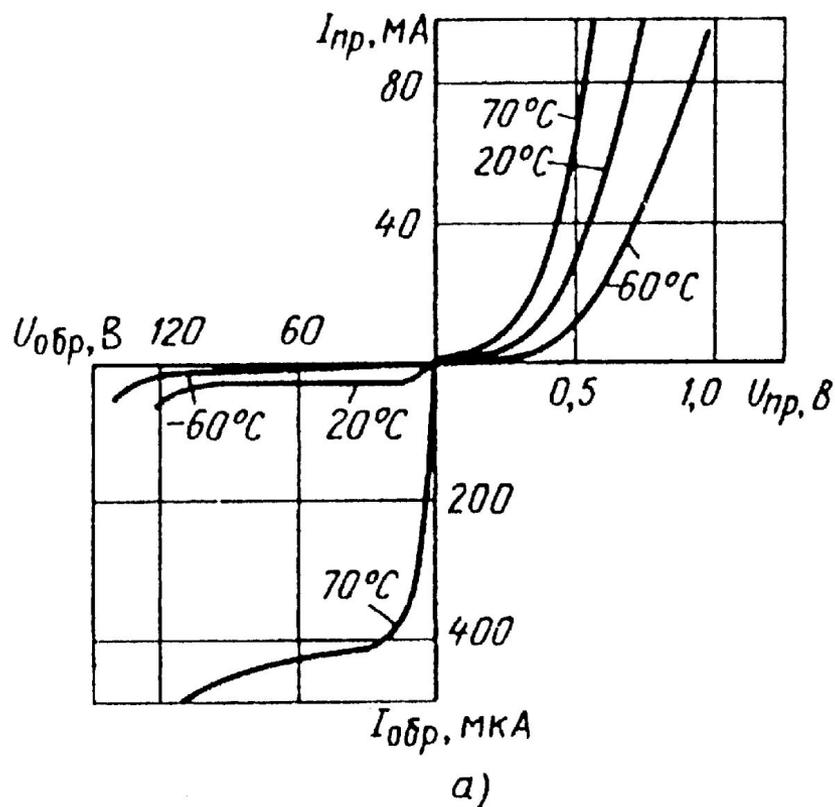
z)



d)

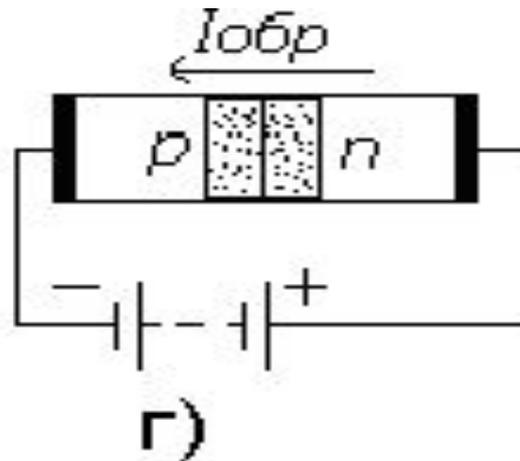
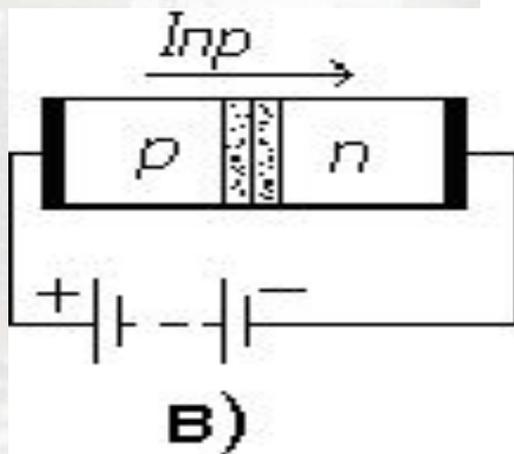
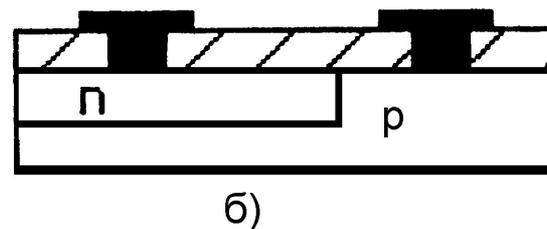
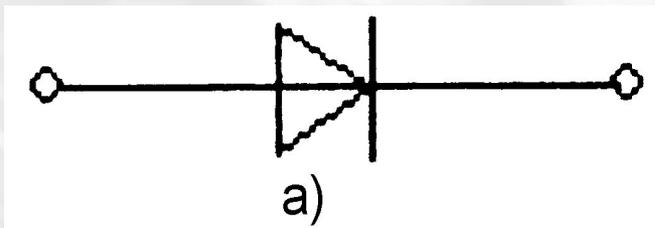
ВАХ идеализированных диодов (p—n - переходов) при разной ширине запрещенной зоны (Γ) и разной площади перехода (д)

Чем меньше тепловой ток, тем больше прямое напряжение и наоборот .



ВАХ идеализированных диодов (р - n - переходов) при разной температуре (а), (б).

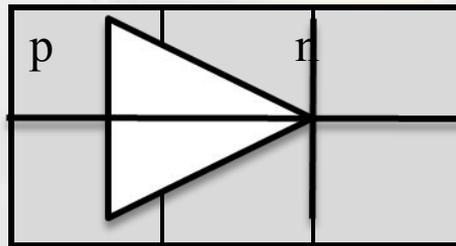
Электронно-дырочные переходы



Полупроводниковый диод: а – условное обозначение; б – структура; в – прямой p-n-переход; г – обратный p-n-переход.

Полупроводниковые диоды

- Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним электрическим р-n-переходом и двумя выводами.
- В зависимости от технологических процессов, использованных при их изготовлении, различают *точечные диоды, сплавные и микросплавные, с диффузионной базой, эпитаксиальные* и др.

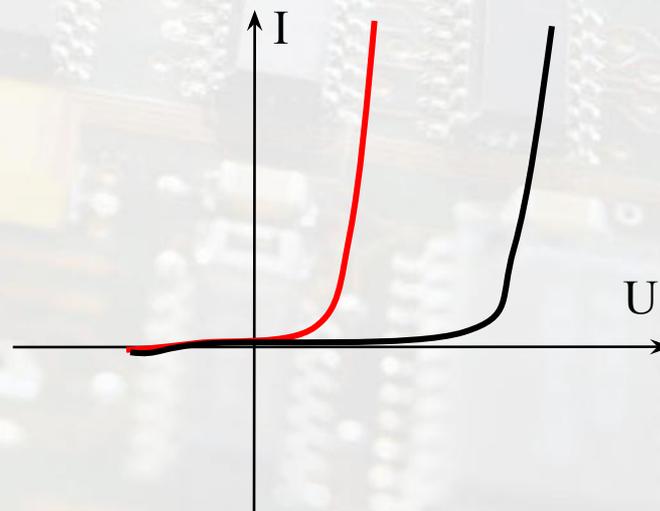


1. Выпрямительные диоды

▣ *Выпрямительные диоды* предназначены для преобразования переменного тока в постоянный.

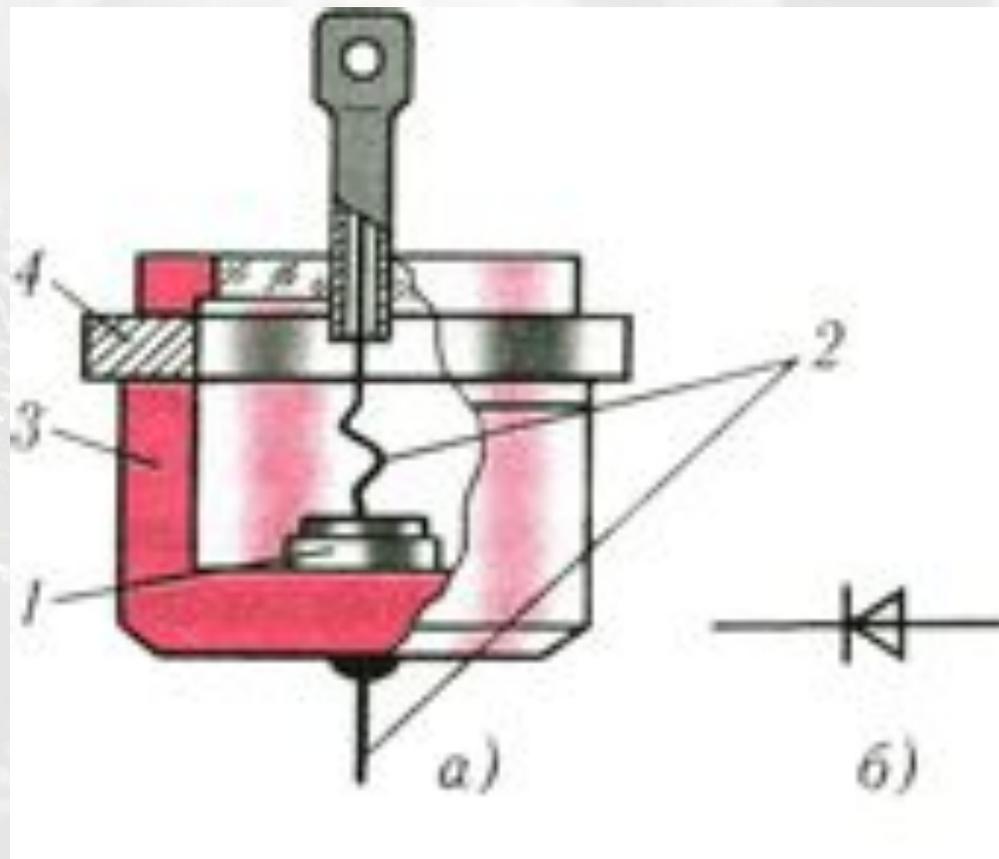
материал	микро режим	нормальный режим
Si (кремний)	0,5 В	0,7 В
Ge (германий)	0,15 В	0,3 В

*ВАХ для кремневого
германиевого диодов*



Si (кремний)
Ge (германий)

Выпрямительный диод



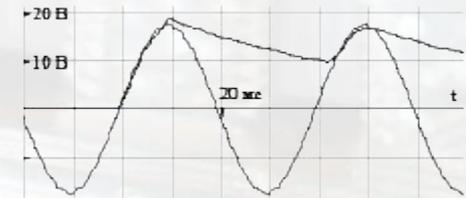
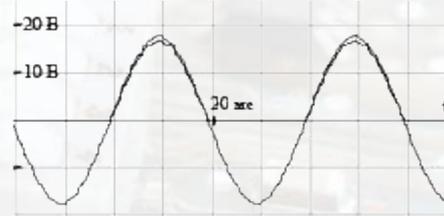
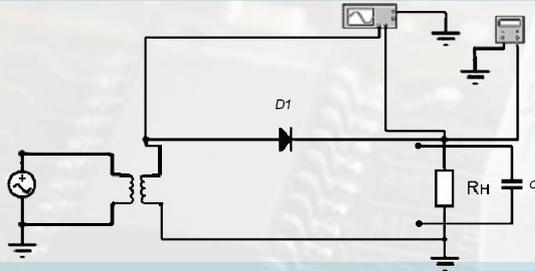
Диодные выпрямители

схема

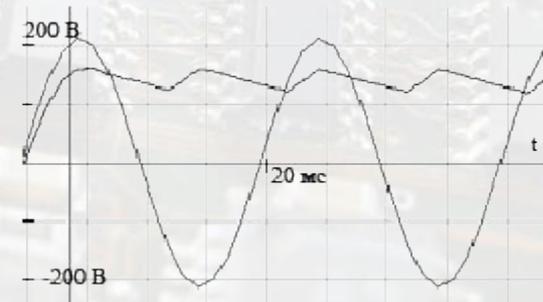
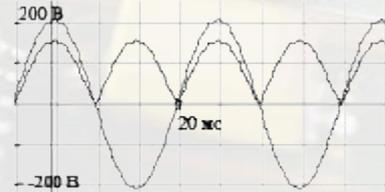
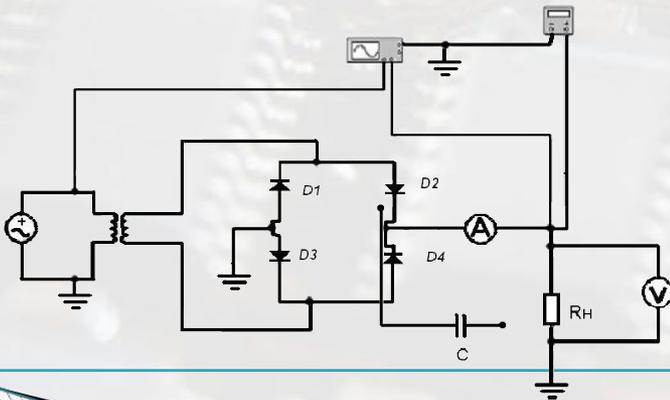
$U_{\text{вых}}(t)$ без ёмкости

$U_{\text{вых}}(t)$ с ёмкостью

❖ Однополупериодный диодный выпрямитель



❖ Двухполупериодный диодный выпрямитель



2. Стабилитроны



- ▣ **Стабилитрон** — полупроводниковый диод, предназначенный для стабилизации напряжения.
- ▣ На ВАХ стабилитронов имеется участок со слабой зависимостью напряжения от тока, режим туннельного или лавинного про-

▣ $I_{ст} = (I_{max} + I_{min}) / 2. \quad R_0 / R_d \gg 1$

▣ $\Delta U_{ст} = R_0 (\Delta I_H - \Delta I_{ст})$

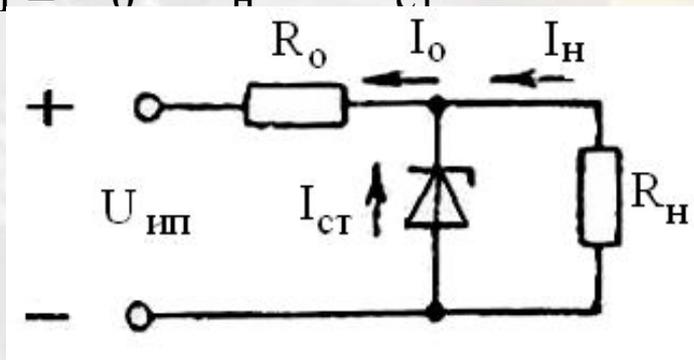
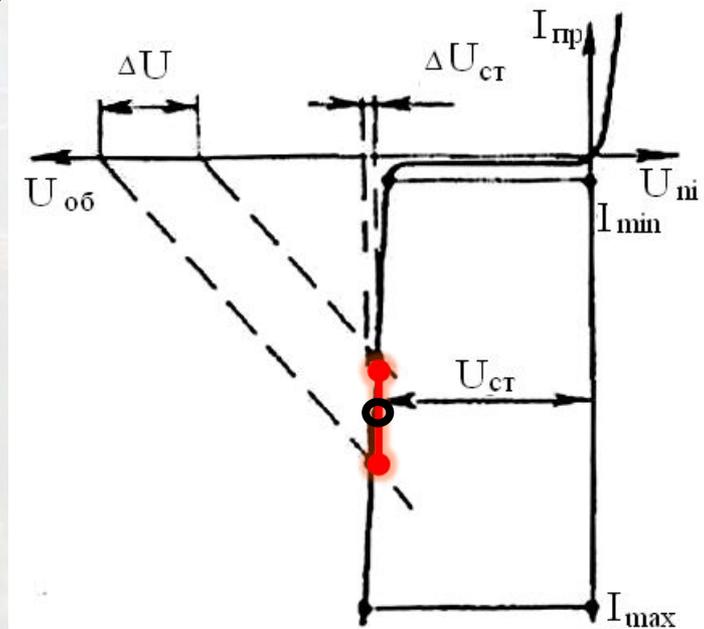


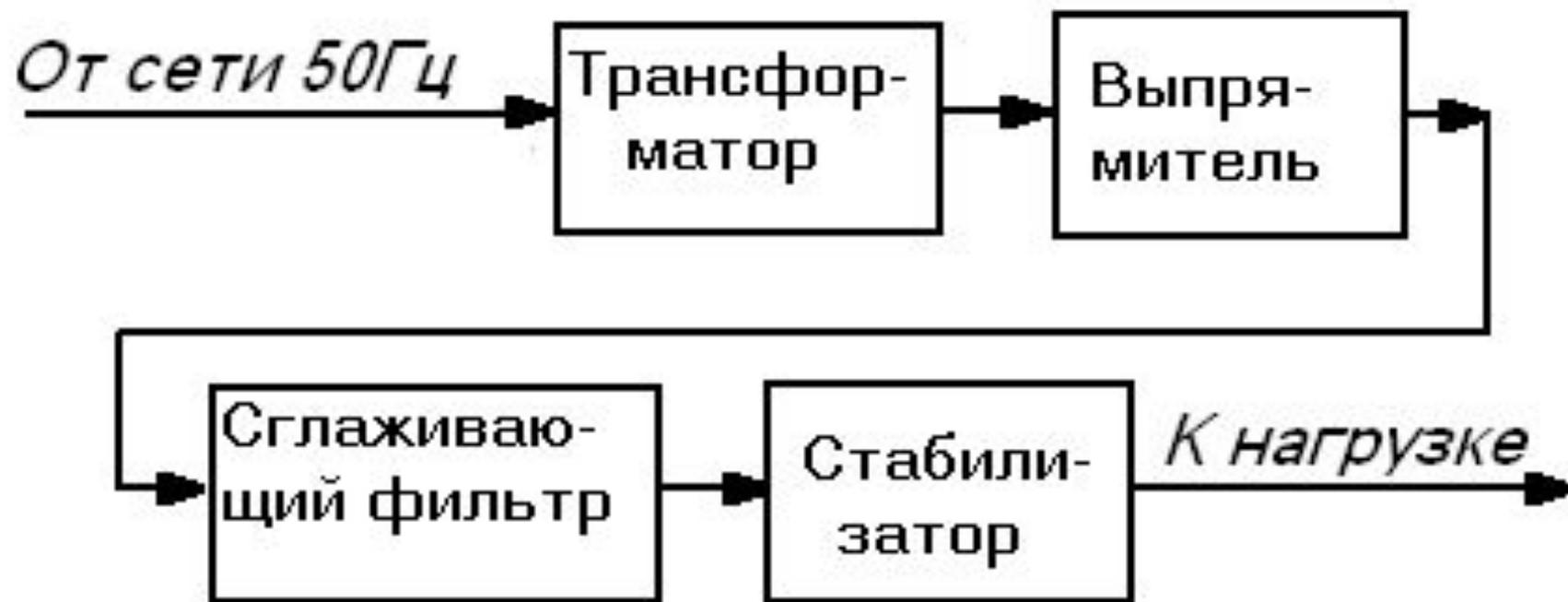
схема включения
стабилитрона



участ

напряжения от тока

Структурная схема источника питания



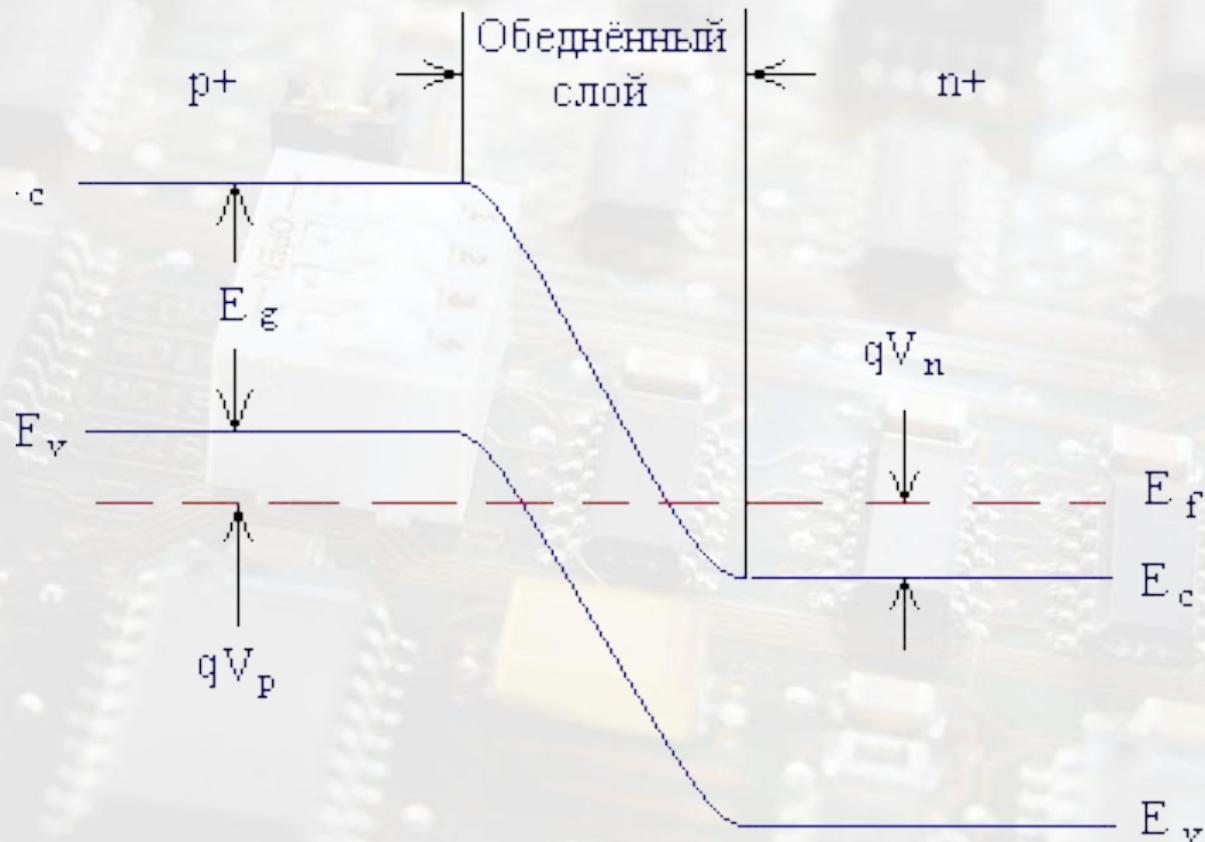
3. Варикапы



- ▣ **Варикап** — нелинейный управляемый конденсатор.
- ▣ В полупроводниковых диодах зависимость барьерной емкости от напряжения нелинейна, поэтому любой полупроводниковый прибор с р-п-переходом, в принципе, может быть использован как конденсатор с емкостью, управляемой напряжением.
- ▣
$$C_B(U) = C_B(0) \left(\frac{U_K}{U_0} + U \right)^{1/n},$$

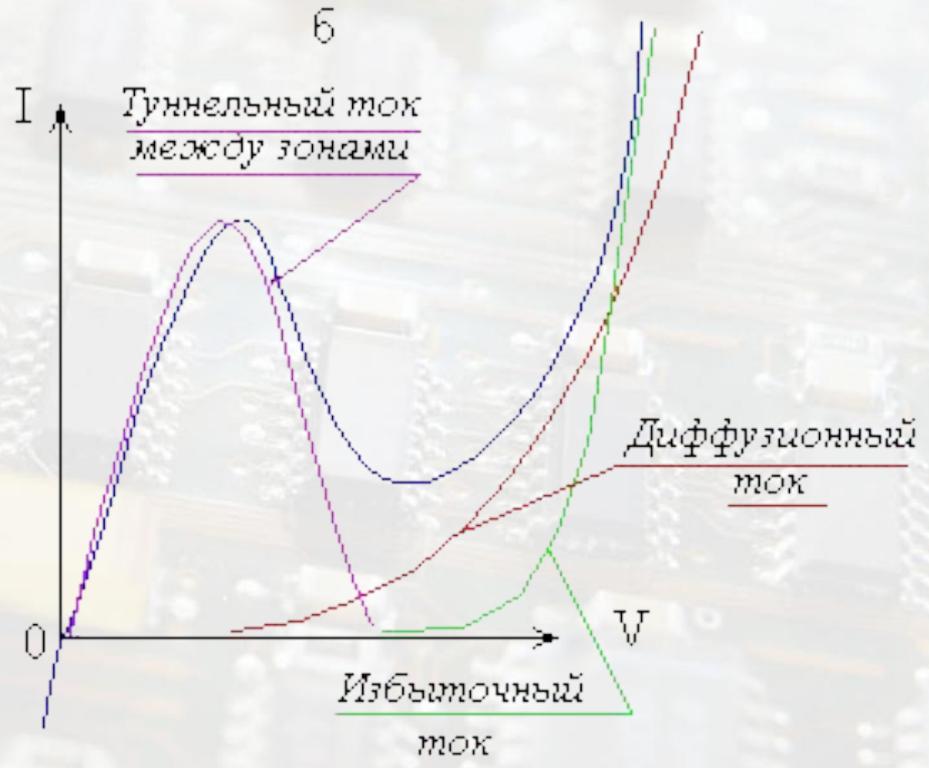
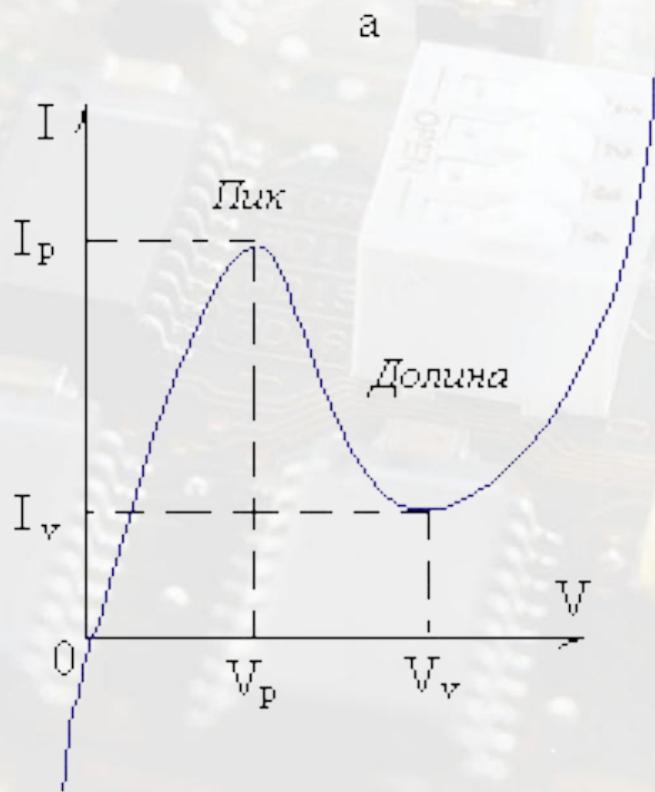
$C_B(0)$ — емкость при нулевом напряжении на диоде; U_K — значение контактного потенциала; U — приложенное обратное напряжение ($n = 2$ для резких переходов и $n = 3$ для плавных переходов).

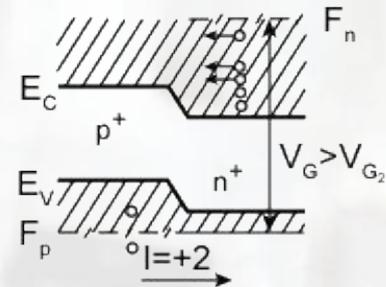
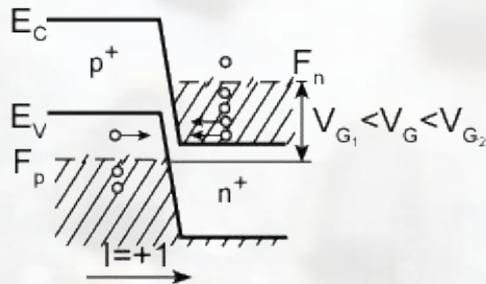
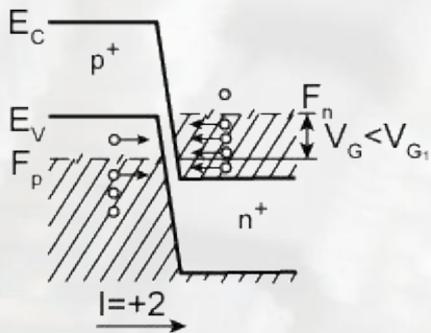
Туннельный диод



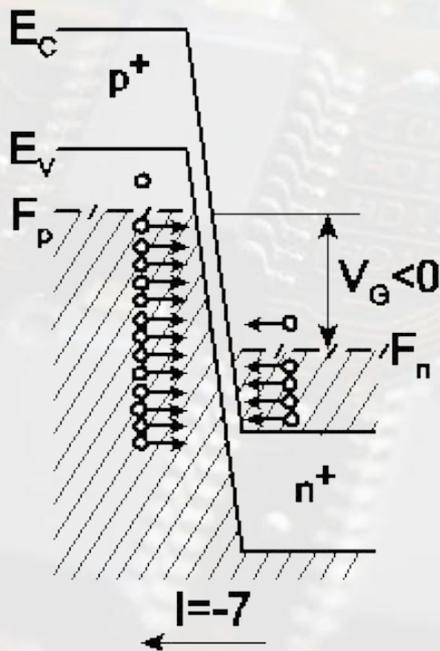
Энергетическая диаграмма туннельного диода в состоянии термического равновесия. V_p и V_n - степени вырождения p-области и n-области соответственно

Статическая вольт-амперная характеристика туннельного диода

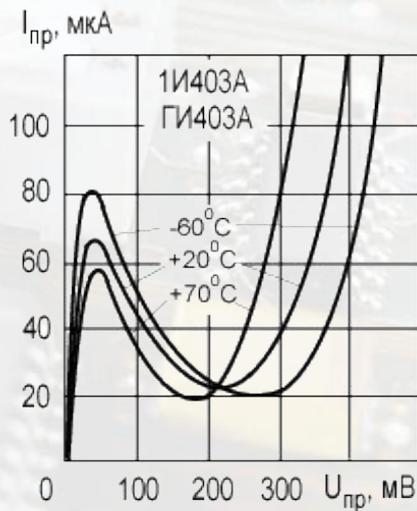




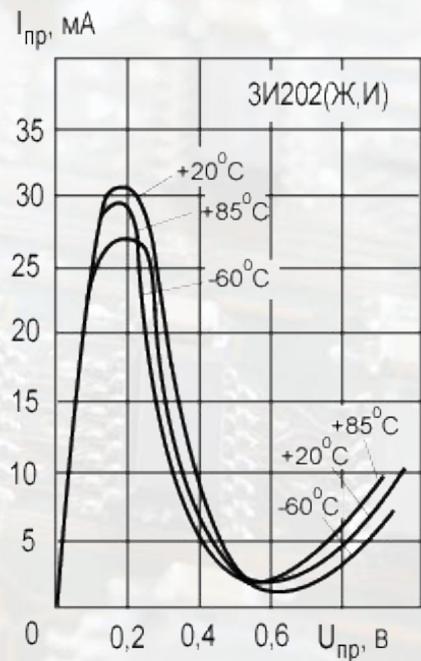
Зонные диаграммы туннельного диода при прямом смещении



при обратном смещении



а



б

Температурные зависимости прямого тока от напряжения в туннельных диодах:

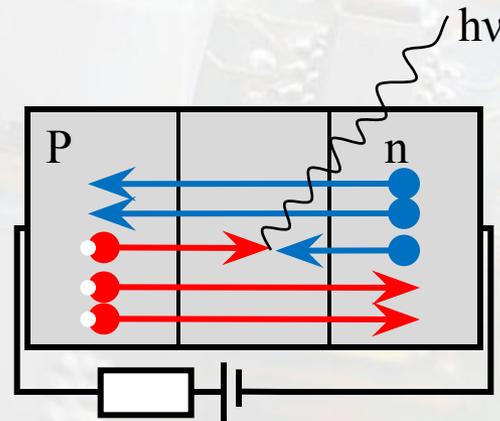
а) германиевый диод 1И403;

б) арсенидгаллиевый диод 3И202

5. Светодиоды

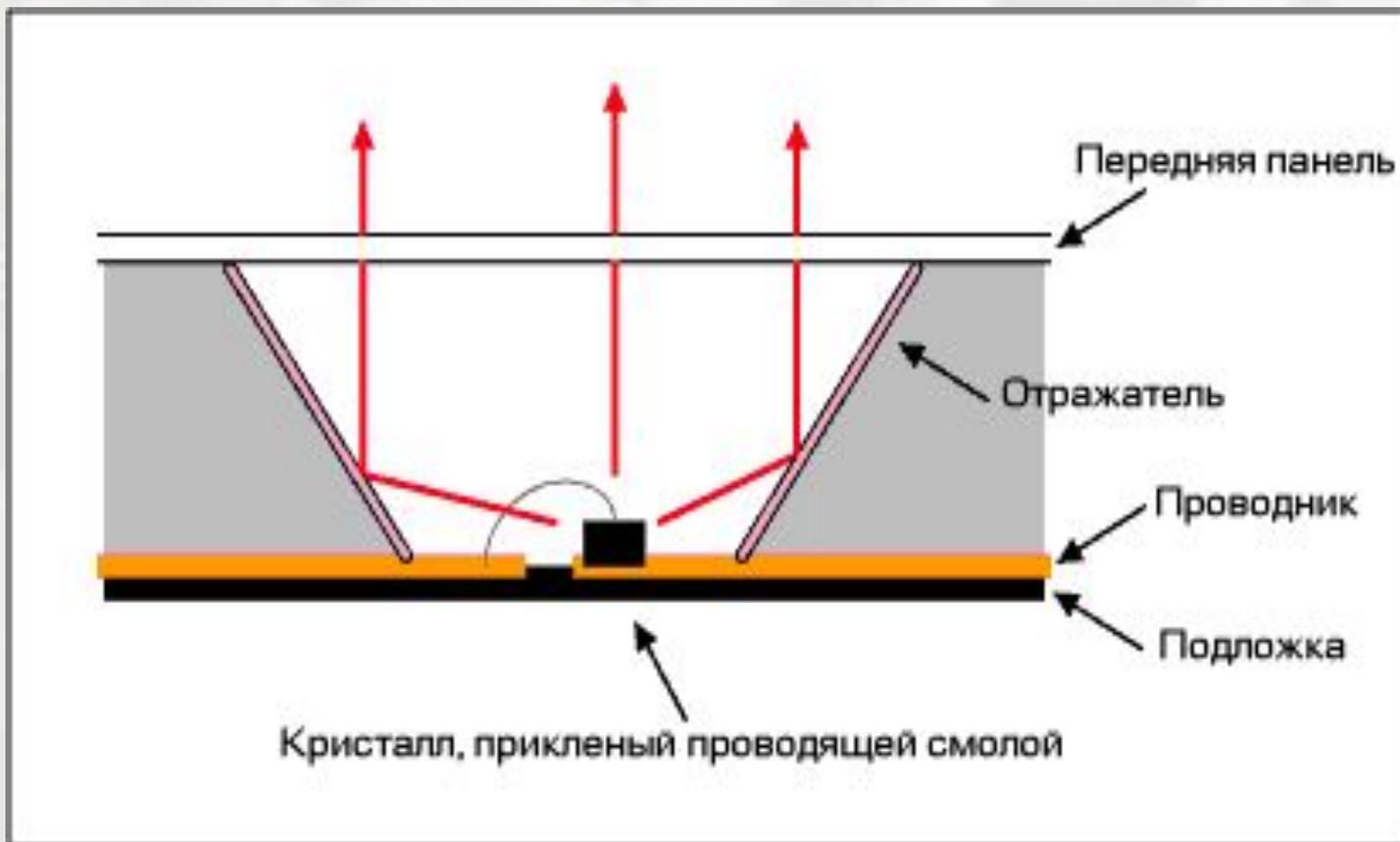


- ▣ *Светодиод* — полупроводниковый диод с одним p-n переходом, способный излучать видимый свет за счёт инжекционной электролюминесценции в диапазоне прямого напряжения ($1,2 \div 2 \text{ В}$).

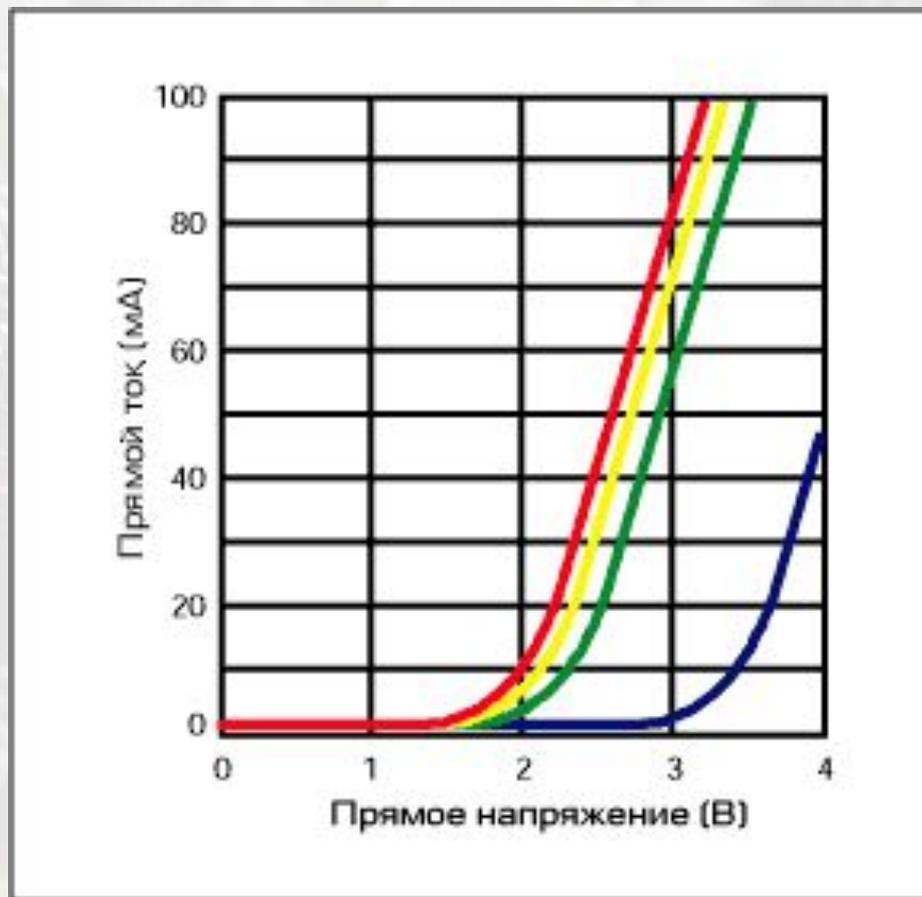


принцип работы светодиода

Внутренность светодиода!



Изменение прямого напряжения светодиода от тока и излучаемого цвета.



Базовая структура светодиода индикатора.

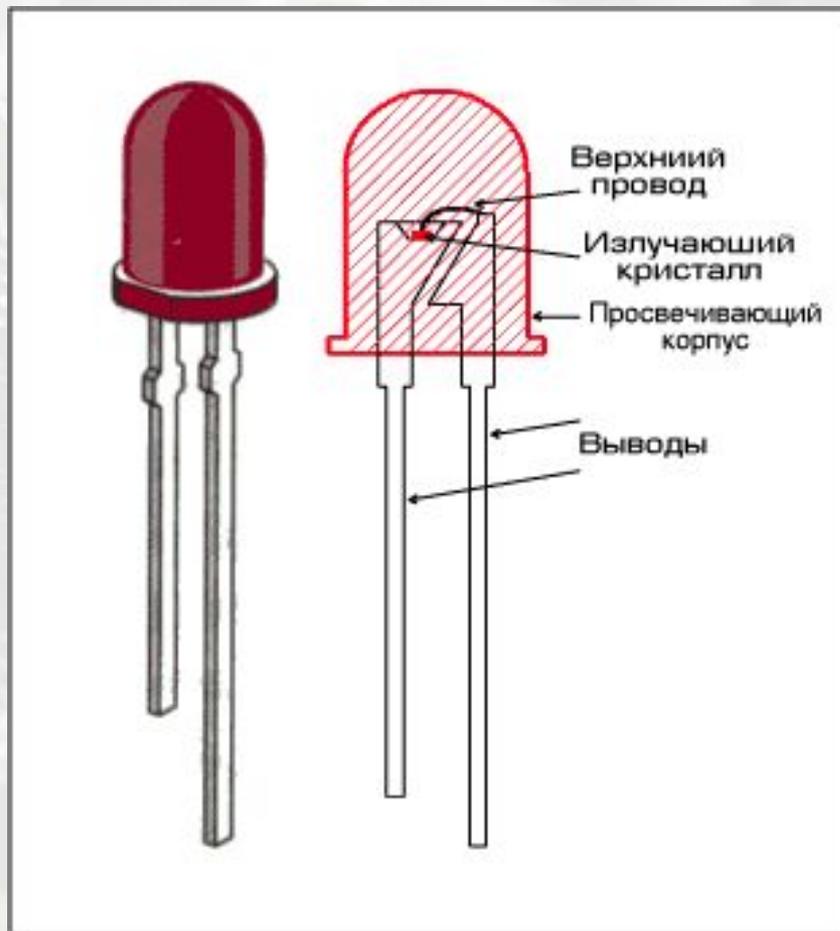
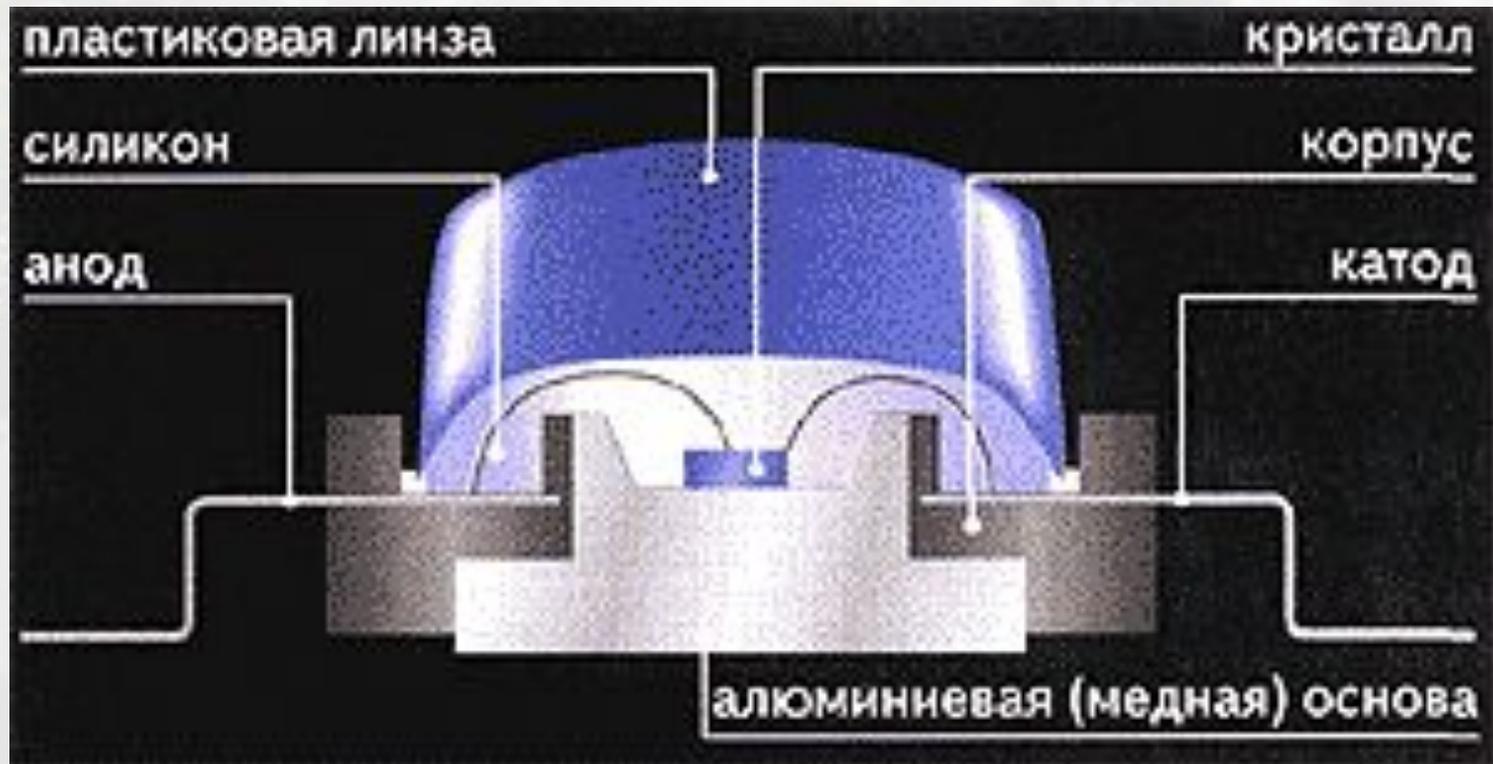
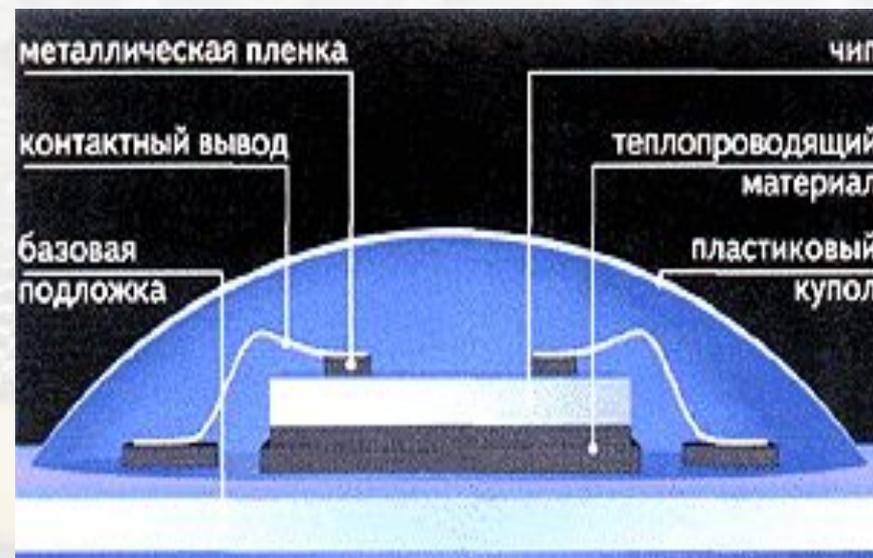
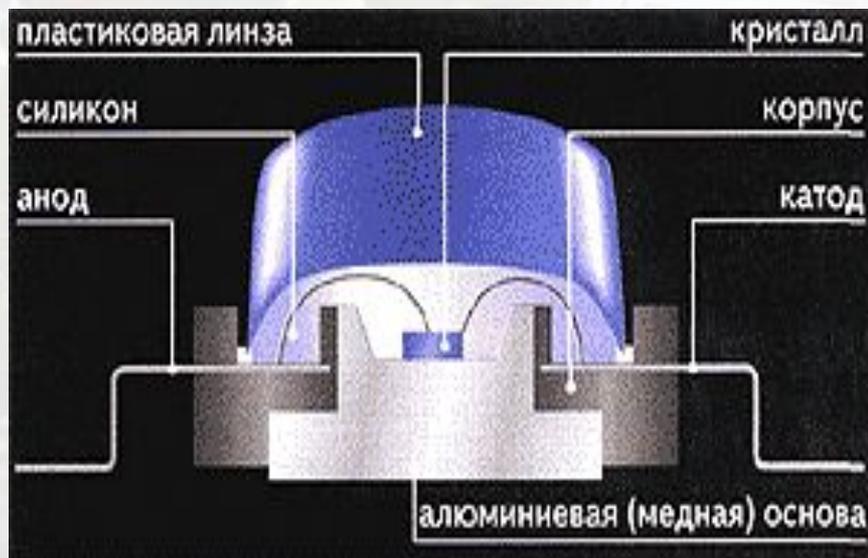


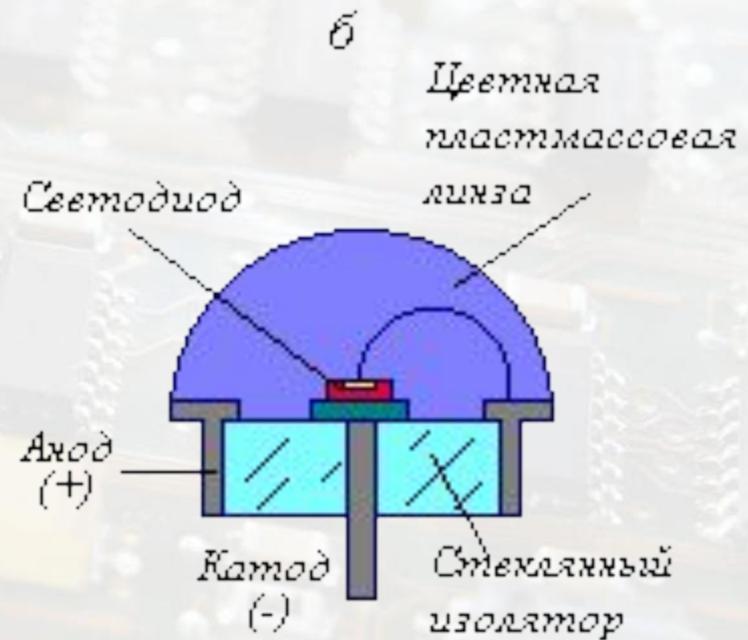
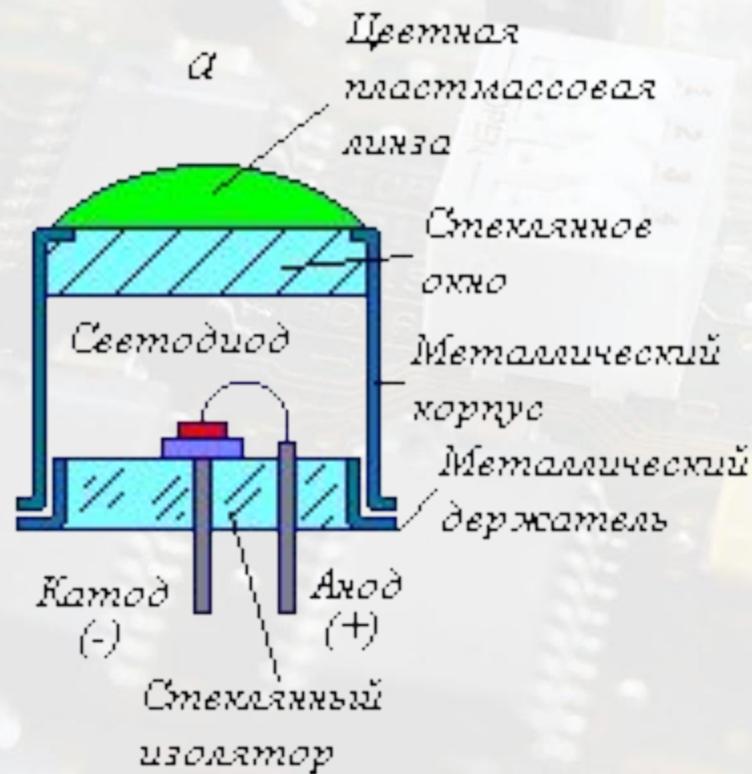
Схема составных частей стандартного светодиода.



Разновидности видов колб.



Схемы конструкций различных светодиодных источников



Где применяют светодиоды?

все виды световой рекламы

замена неона

дизайн помещений

дизайн мебели

архитектурная и ландшафтная подсветка

одноцветные дисплеи с бегущей строкой

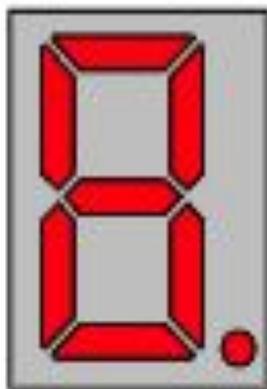
магистральные информационные табло

полноцветные дисплеи для больших видео экранов

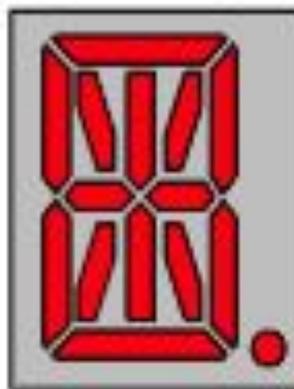
внутреннее и внешнее освещение в автомобилях, грузовиках и автобусах

дорожные знаки и светофоры

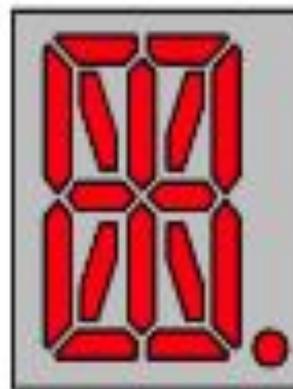
Разновидности цифровых индикаторов.



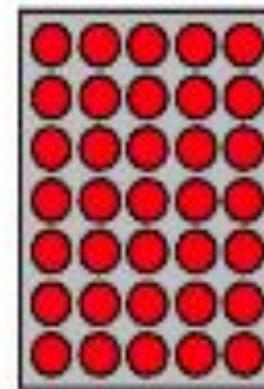
7-сегментов
+ точка



14-сегментов
+ точка



16-сегментов
+ точка



Матрица
5x7

Преимущества светодиодов.

Экономично

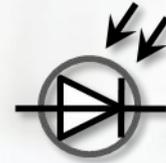
Удобно

Надежно

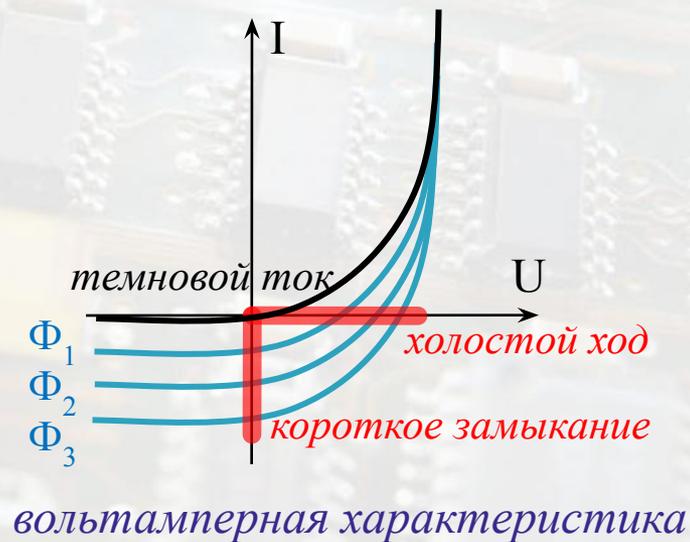
Красиво

Компактность

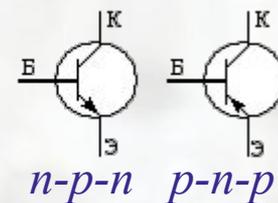
6. Фотодиоды



- ▣ **Фотодиод** — полупроводниковый диод с одним p-n переходом с внутренним фотоэффектом.
- ▣ **Фотогальванический эффект** — протекание фототока под действием света.



Биполярные транзисторы



- **Транзистор** — полупроводниковый прибор, способный *усиливать* электрическую мощность.
- Принцип работы усилительного прибора основан на изменении его *активного* или *реактивного* сопротивления под воздействием сигнала малой мощности.
- **Биполярными** транзисторами называют полупроводниковые приборы с двумя или несколькими взаимодействующими электрическими *p-n-пере-*ходами и тремя или более выводами. Их усилительные свойства обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда.

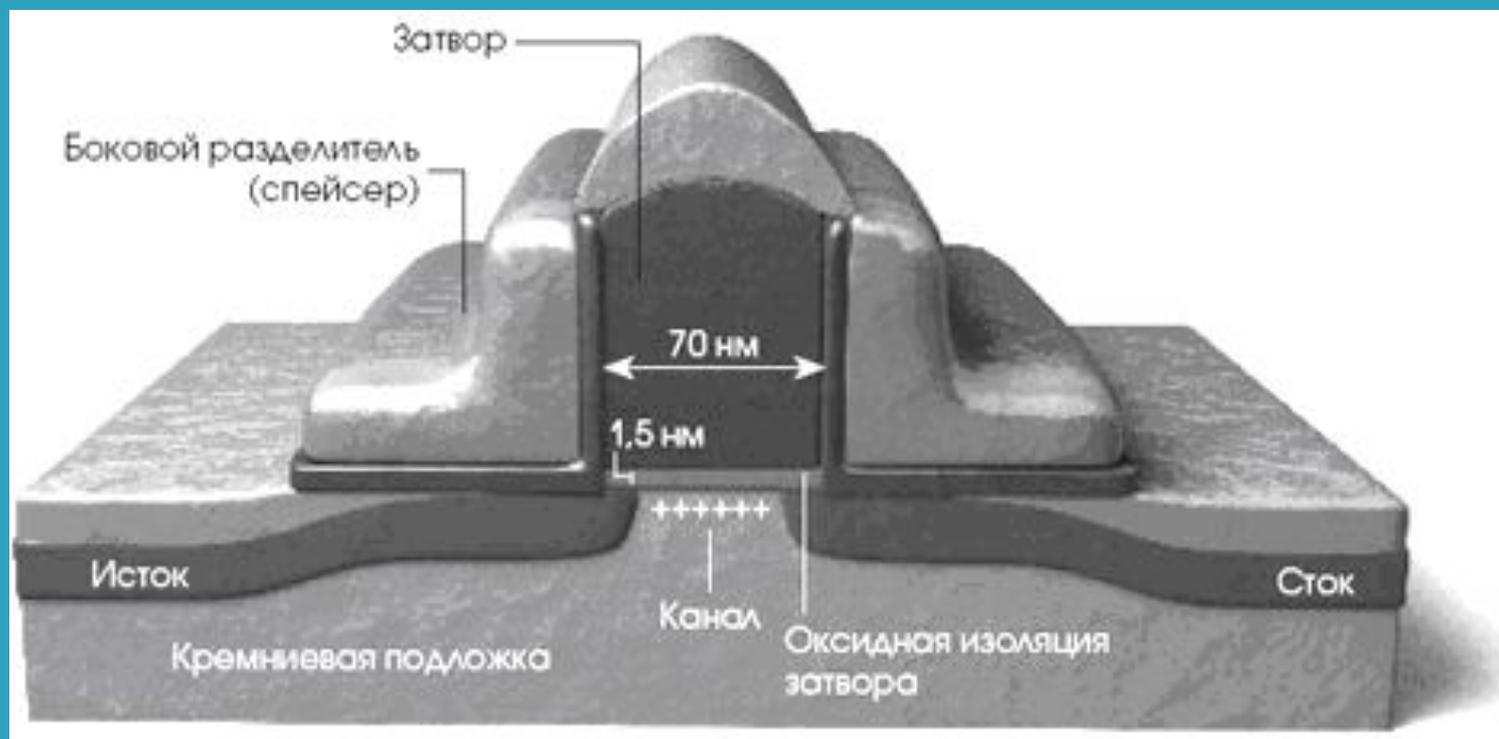
История создания транзистора

В 1947 году В 1947 году Уильям Шокли В 1947 году Уильям Шокли, Джон Бардин В 1947 году Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн В 1947 году Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн в лабораториях Bell Labs В 1947 году Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн в лабораториях Bell Labs впервые создали действующий биполярный транзистор В 1947 году Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн в лабораториях Bell Labs впервые создали действующий биполярный транзистор. По технологии изготовления он относился к классу...

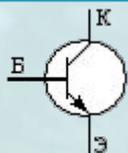


Копия первого в мире работающего транзистора

Структура нанотранзистора



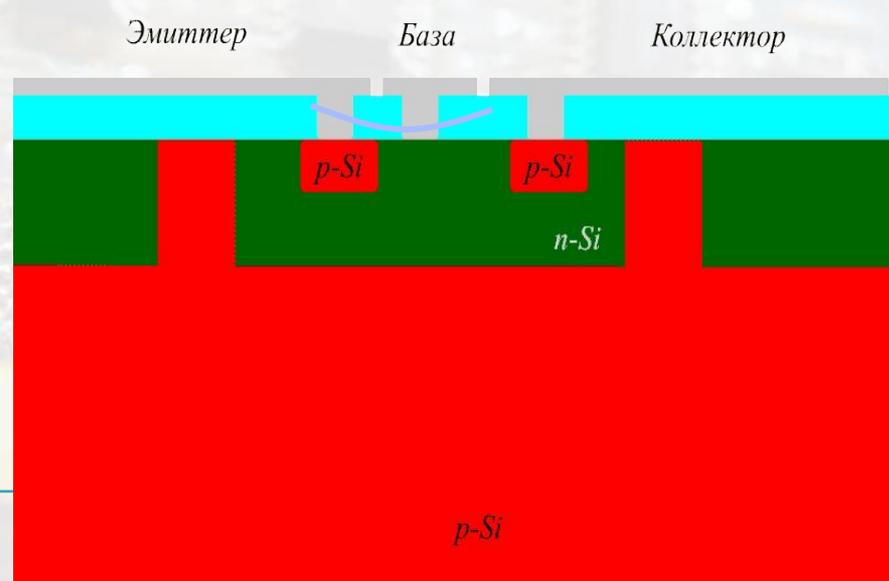
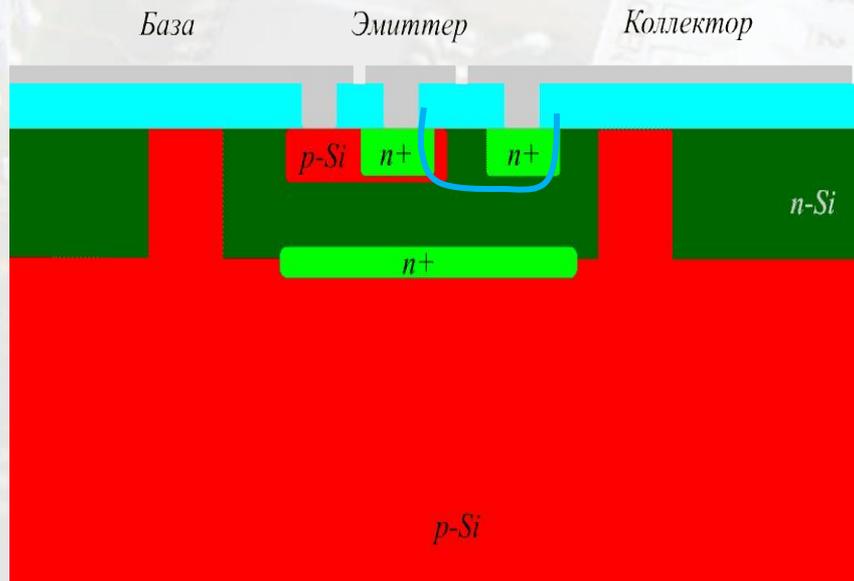
Структура транзисторов



n-p-n транзистор

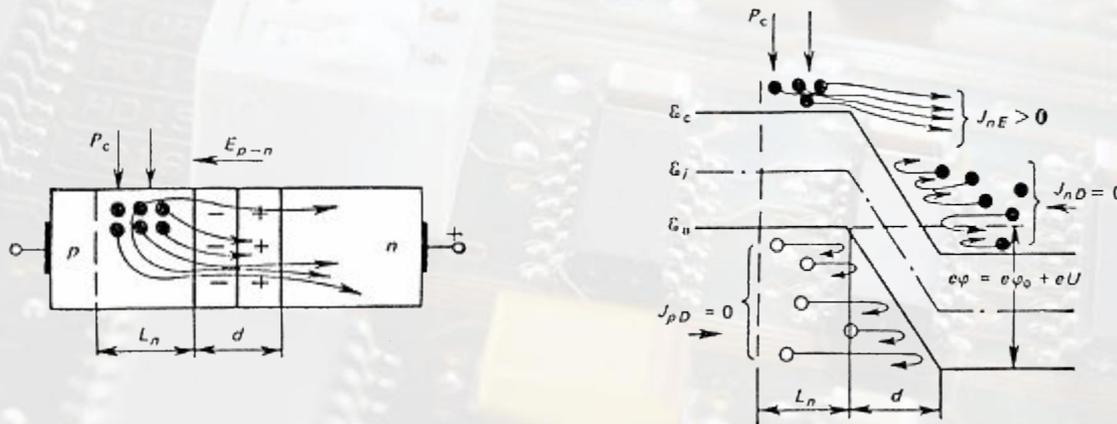


p-n-p транзистор



Физические процессы

- Принцип работы биполярного транзистора основан на изменении сопротивления обратно смещенного $p-n$ -перехода за счет инжекции носителей заряда.



*Схема инжекции
электронов в p -область на модели — а
и на энергетической диаграмме — б*

Основные параметры

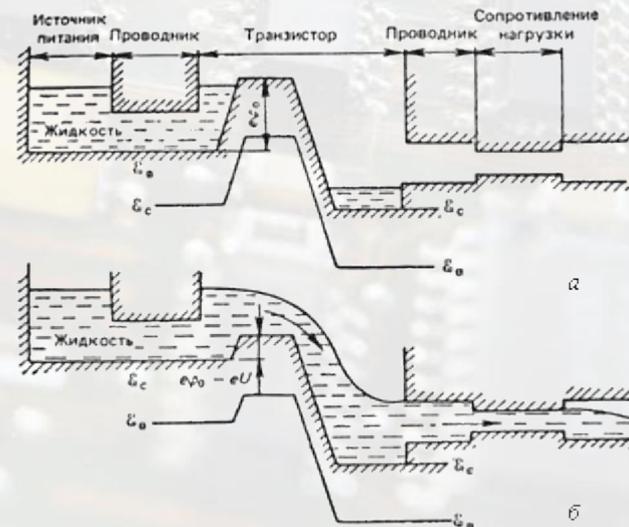
- коэффициент передачи эмиттерного тока в коллектор:
- коэффициент инжекции:
- коэффициент переноса:

$$a_N = \frac{I_K}{I_{\Sigma}} \Big|_{U_{КБ}} \quad a_N = \gamma \beta^*$$

$$\gamma = \frac{I_{n\varepsilon}}{I_{\Sigma}} \Big|_{U_{КБ}} \quad \beta = \frac{a_N}{1 - a_N}$$

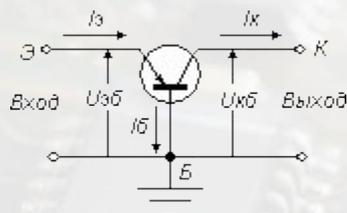
$$\beta^* = \frac{I_{nК}}{I_{n\varepsilon}} \Big|_{U_{КБ}}$$

Гидравлическая модель, иллюстрирующая принцип работы усилителя на биполярном транзисторе:
а — эмиттерный переход закрыт;
б — эмиттерный переход открыт



Схемы включения

с общей базой



В схеме ОБ коэффициент усиления по току $K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}} < 1$, коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} > 1$, $K_P > 1$

с общим эмиттером

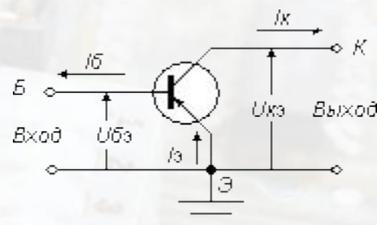


Схема ОЭ характеризуется относительно высокими входным и выходным сопротивлениями, $K_I > 1$, $K_U > 1$, $K_P > 1$

с общим коллектором

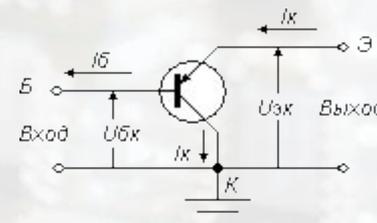


Схема ОК с самым высоким входным и самым низким выходным сопротивлениями: $K_I > 1$, $K_U < 1$, $K_P > 1$

Режимы работы

№	Название режима	$U_{ЭБ}$	$U_{КБ}$
1	Активный (нормальный)	прямом	обратном
2	Насыщения (двух инъекций)	прямом	прямом
3	Отсечки	обратном	обратном
4	Инверсный	обратном	прямом
5	Лавинный пробой		

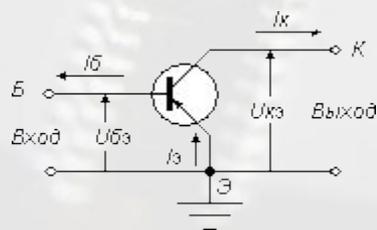
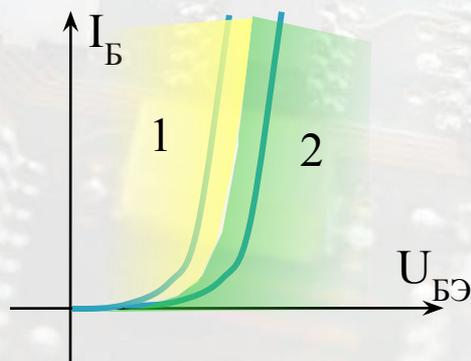
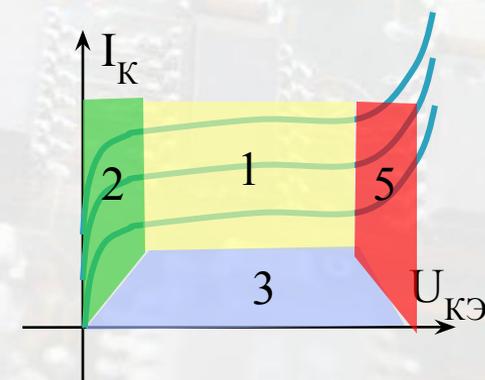


схема
включения

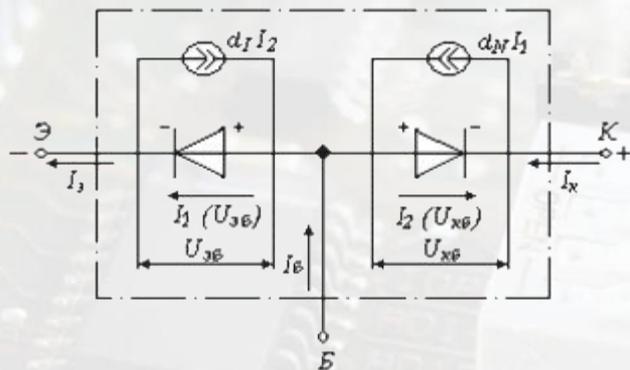


входная
характеристика

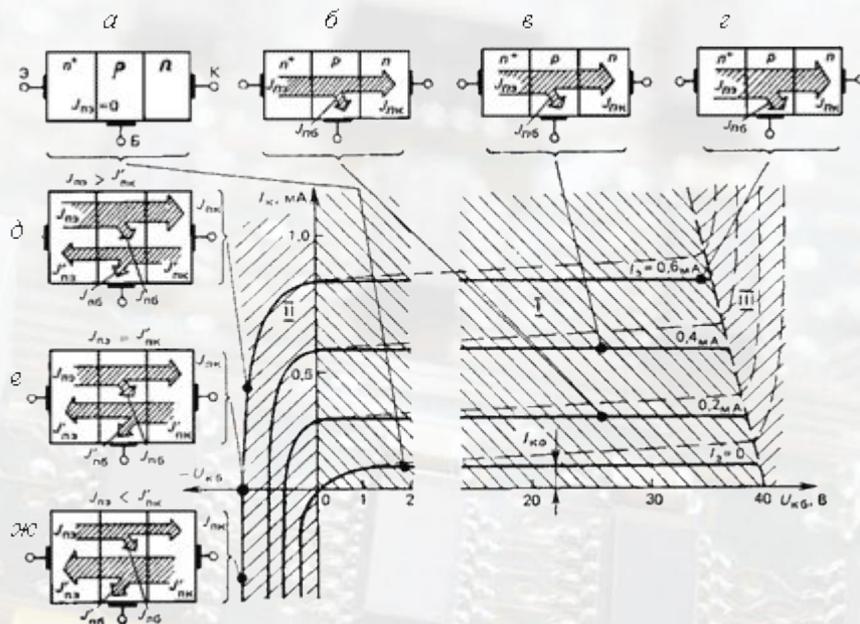


выходная
характеристика

Модель Эберса-Молла



Модель Эберса-Молла



Выходные характеристики в схеме включения с ОБ, построенные в соответствии с математической моделью Эберса-Мола — сплошные линии (реальные характеристики показаны пунктирными линиями); I — область нормального активного режима, II — область насыщения, III — область лавинного пробоя; $J_{пк}$, $J_{пэ}$, $J_{пб}$ — потоки электронов, инжектированных из эмиттера; $J'_{пк}$, $J'_{пэ}$, $J'_{пб}$ — потоки электронов, инжектированных из коллектора (а–ж)

H-параметры транзисторов

$$H_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

м] □ входное сопротивление при коротком замыкании на выходе.

$$H_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_2=0}$$

□ коэффициент обратной связи по напряжению.

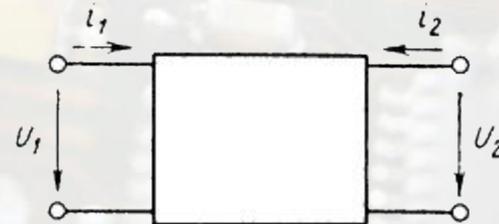
$$H_{21} = \left. \frac{i_1}{i_2} \right|_{u_2=0}$$

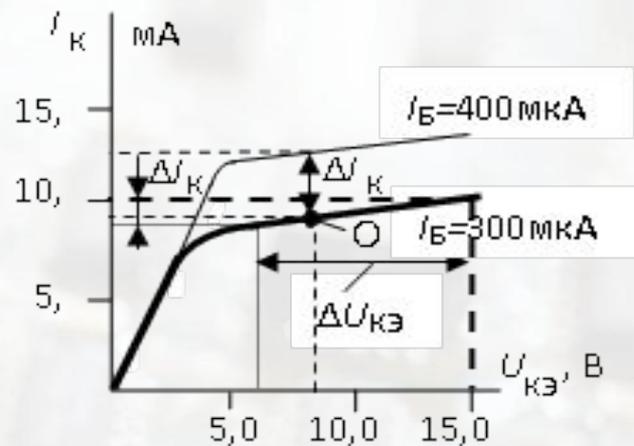
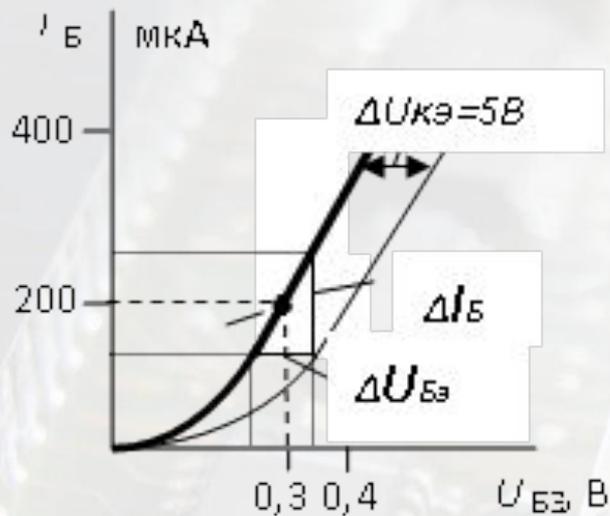
□ коэффициент передачи тока при коротком замыкании на выходе.

$$H_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0} \quad [\text{Ом}^{-1}]$$

□ выходная проводимость при холостом ходе на входе.

*Схема транзистора,
представленного в виде активного
четырёхполюсника*





$$h_{11Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} = \frac{0,34 - 0,25}{(230 - 120) \cdot 10^{-6}} = \frac{0,09}{110 \cdot 10^{-6}} = 810 \text{ Ом}$$

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} = \frac{(12,5 - 9,5) \cdot 10^{-3}}{(400 - 300) \cdot 10^{-6}} = \frac{3,0 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-6}} = 30$$

$$h_{12Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{0,34 - 0,25}{5} = \frac{0,09}{5} = 0,018$$

$$h_{22Э} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{(10,0 - 8,0) \cdot 10^{-3}}{15,0 - 6,0} = \frac{2,0 \cdot 10^{-3}}{9,0} = 0,22 \cdot 10^{-3} \text{ Сим.}$$



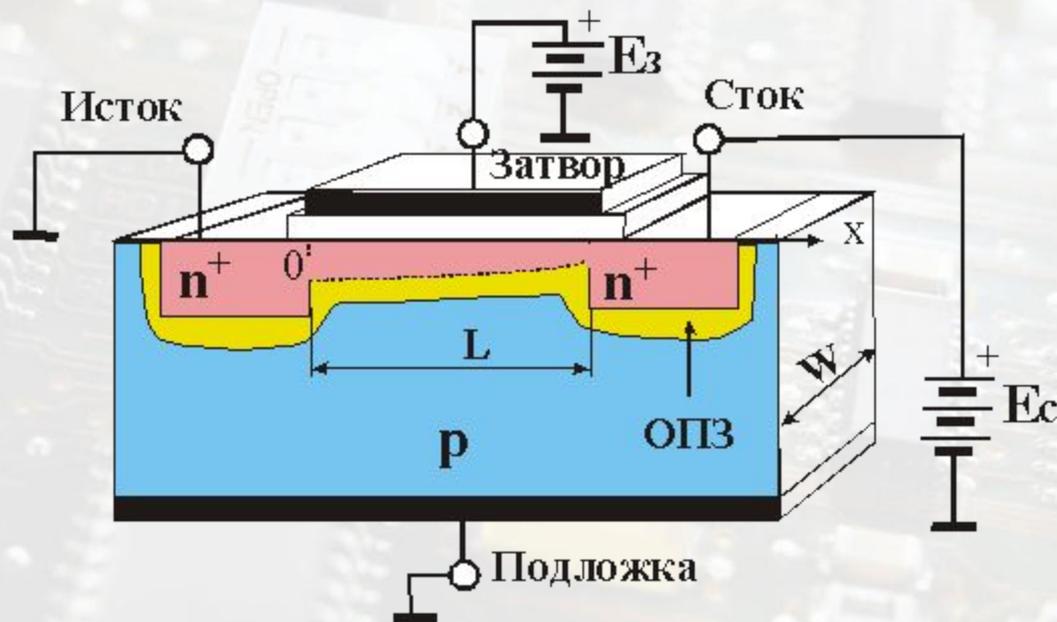
Полупроводниковые приборы

Униполярные транзисторы

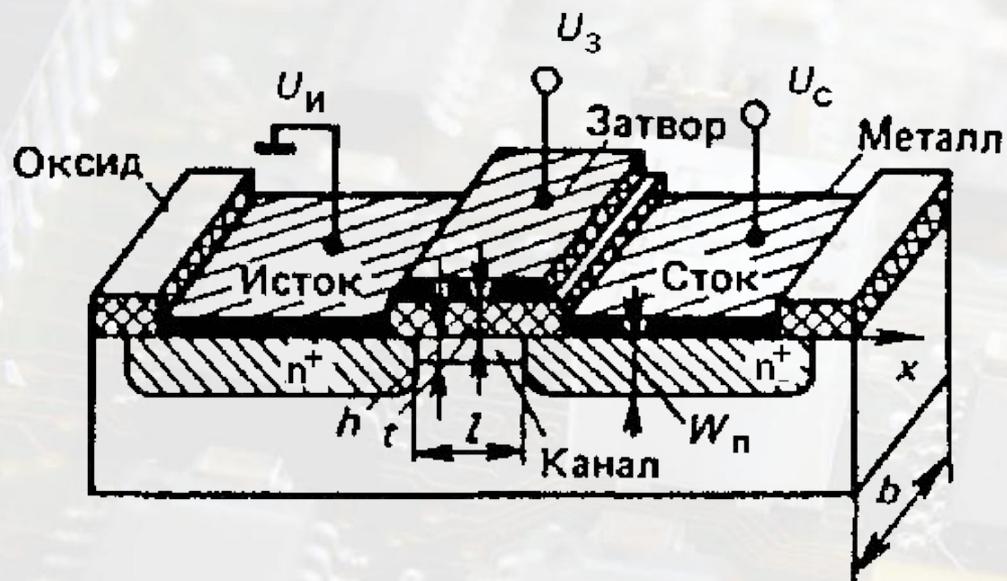
Структура МДП-транзистора



Структура МДП-транзистора

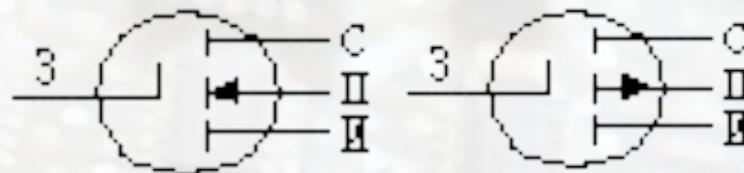


МДП-транзисторы



Структура МДП-транзистора

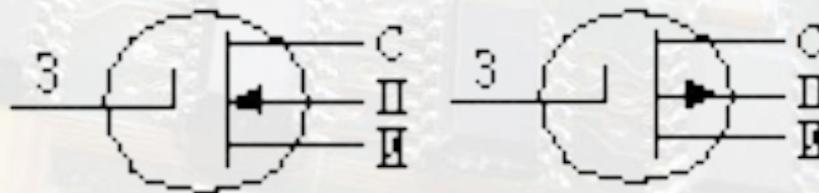
С индуцированным



n-каналом

p-каналом

Со встроенным



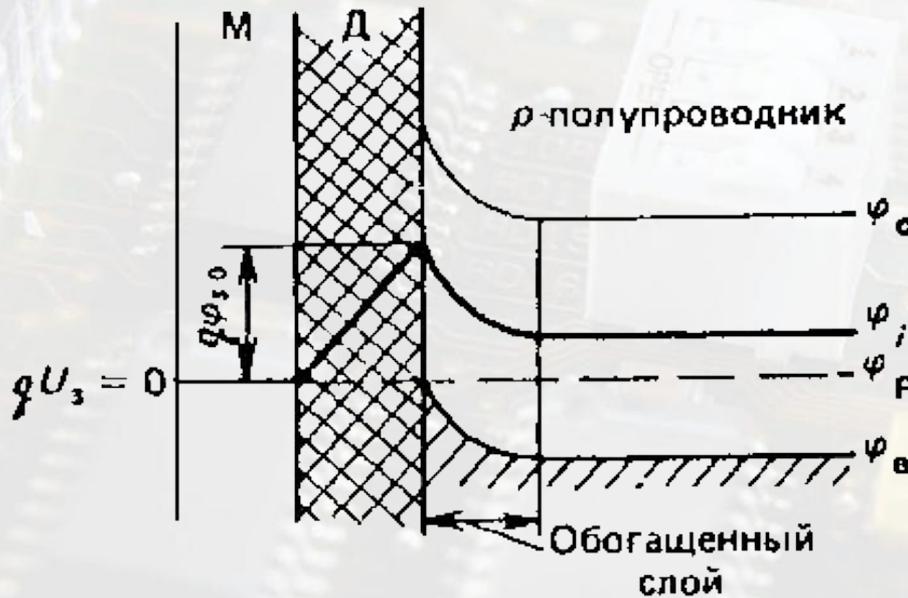
n-каналом

p-каналом

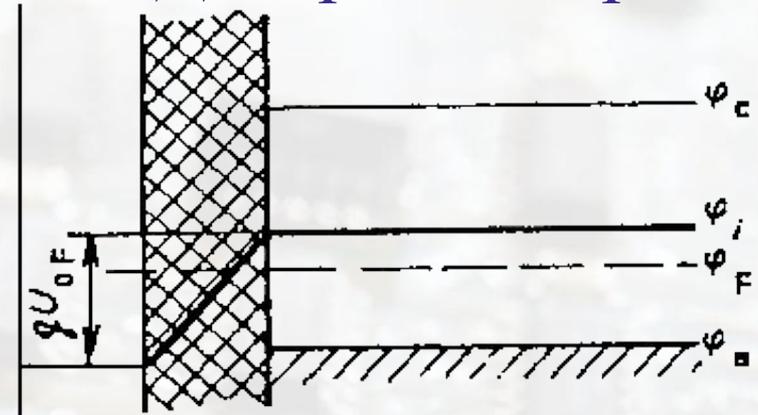
Пороговое напряжение

Энергетические диаграммы МДП-транзистора

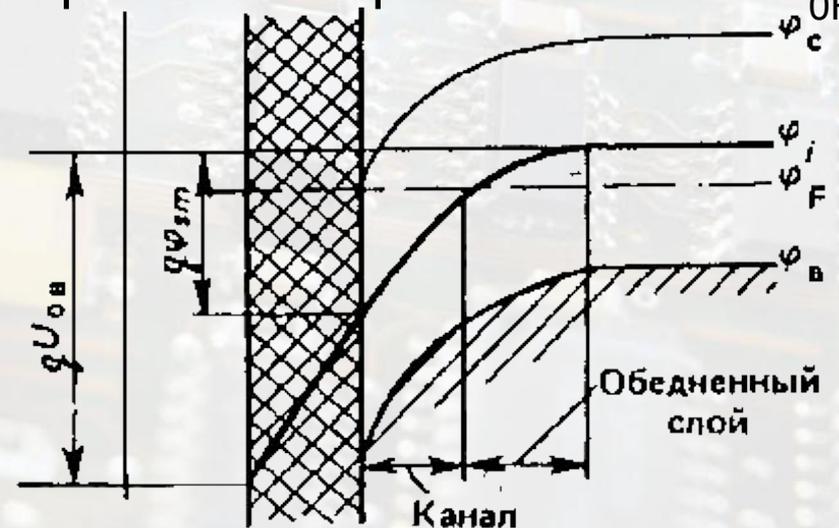
Удельная ёмкость
$$C_0 = \epsilon_p \epsilon_0 / t$$



Исходное состояние



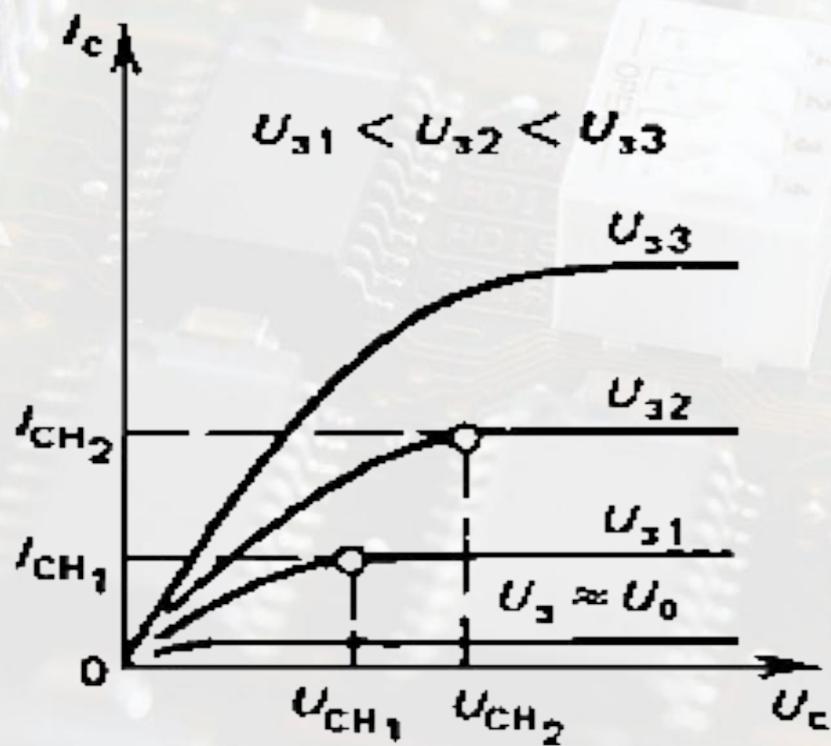
Состояние после подачи напряжения спрямления зон U_{OF}



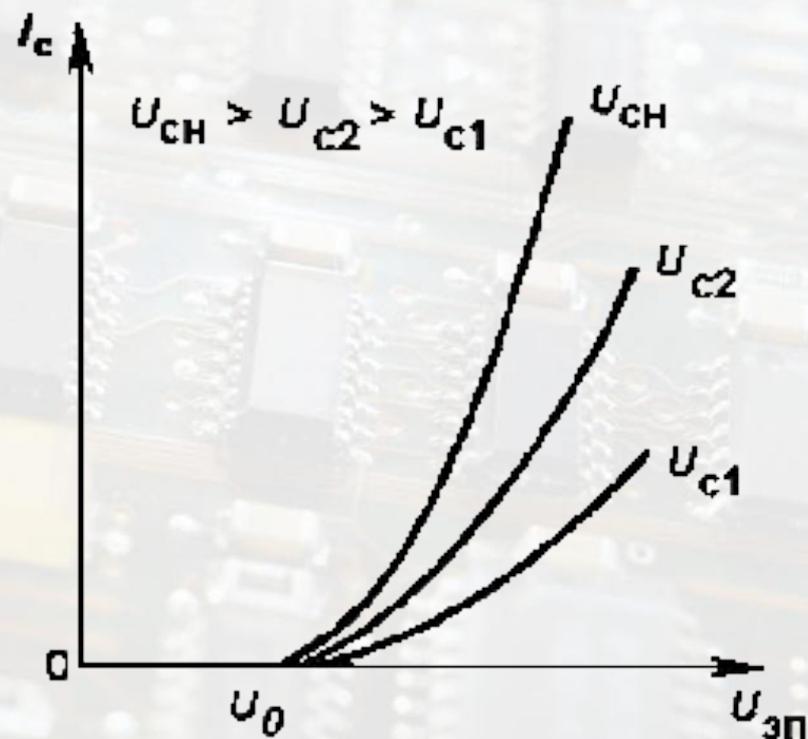
Состояние после подачи напряжения изгиба зон U_{OV}

Статические характеристики МДП-транзистора

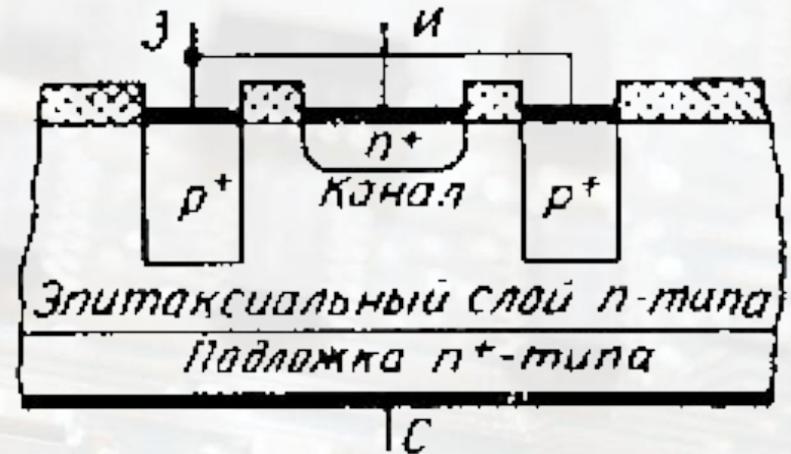
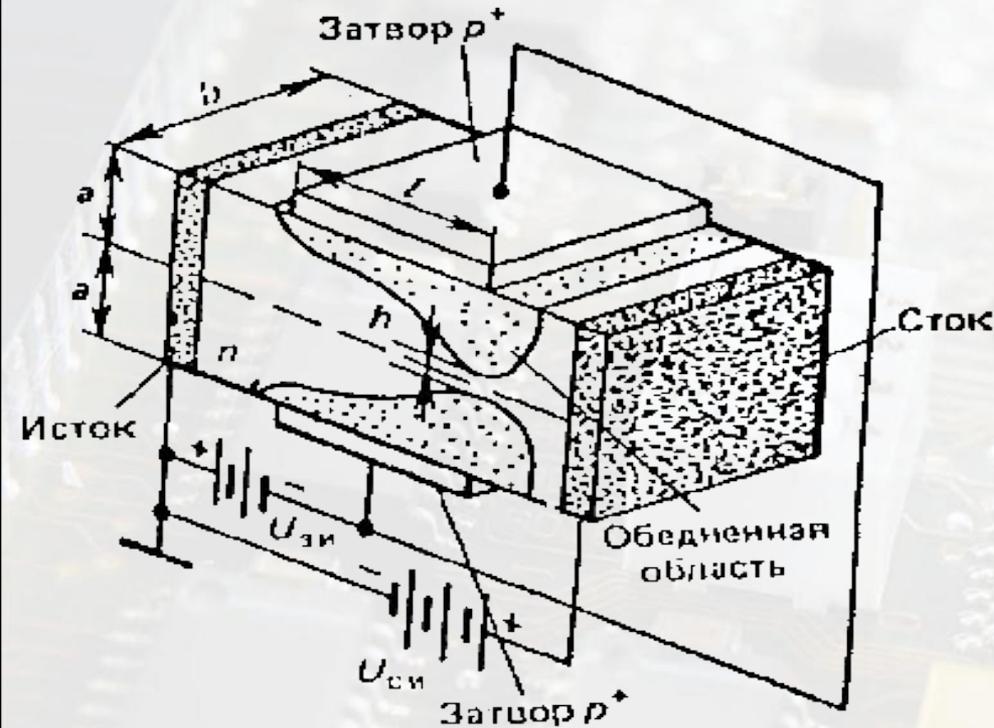
Выходные



Передаточные



Полевые транзисторы

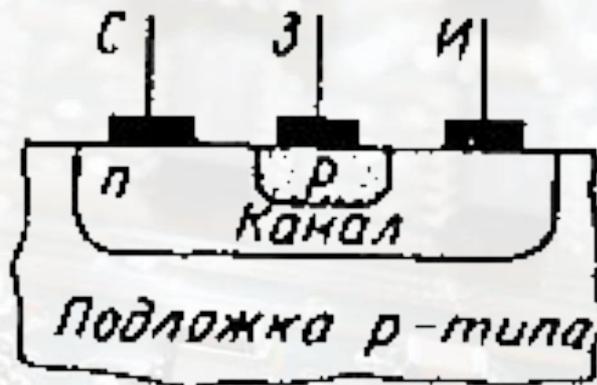
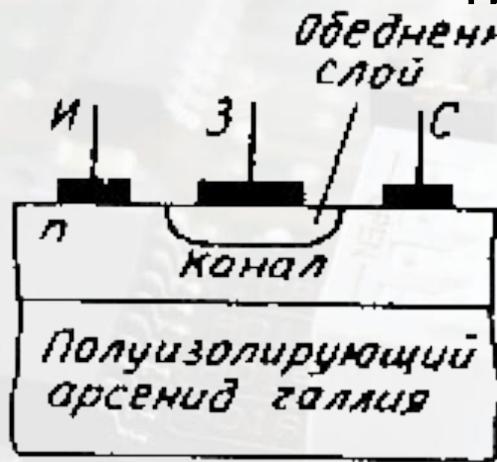


Структура полевого транзистора с повышенным быстродействием

Упрощенная структура полевого транзистора с управляющим p-n переходом

Полевые транзисторы

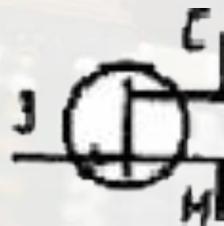
Типовые структуры



Условные обозначения транзистора, имеющего канал



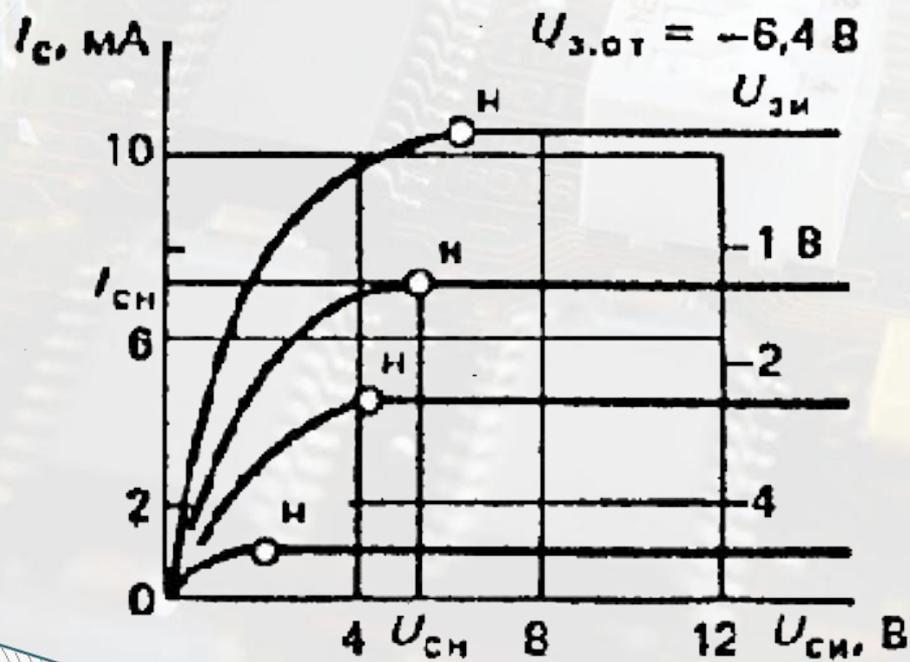
n-типа



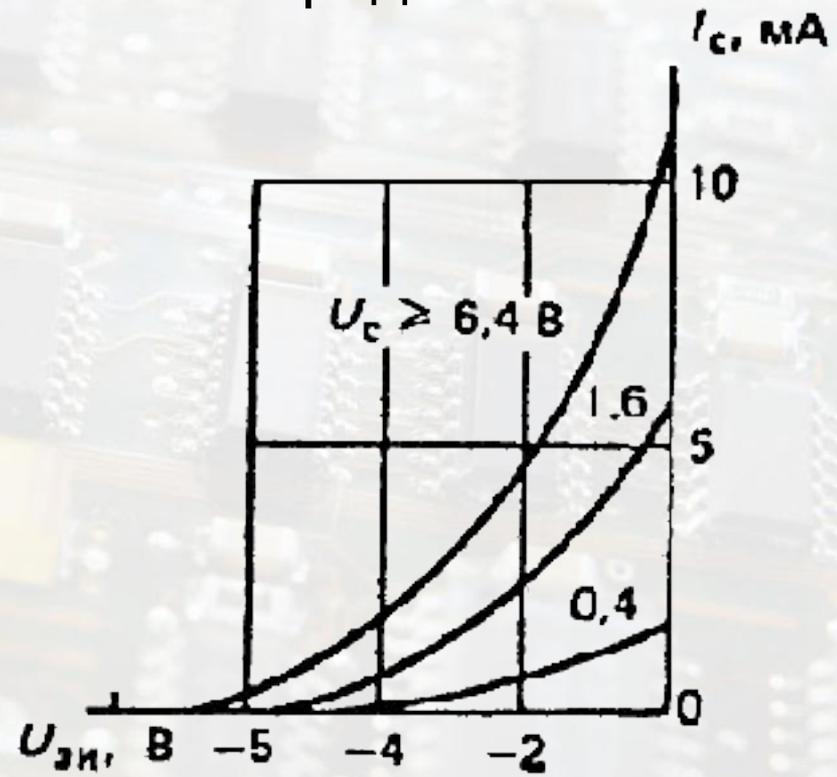
p-типа

Статические характеристики полевого транзистора

Выходные

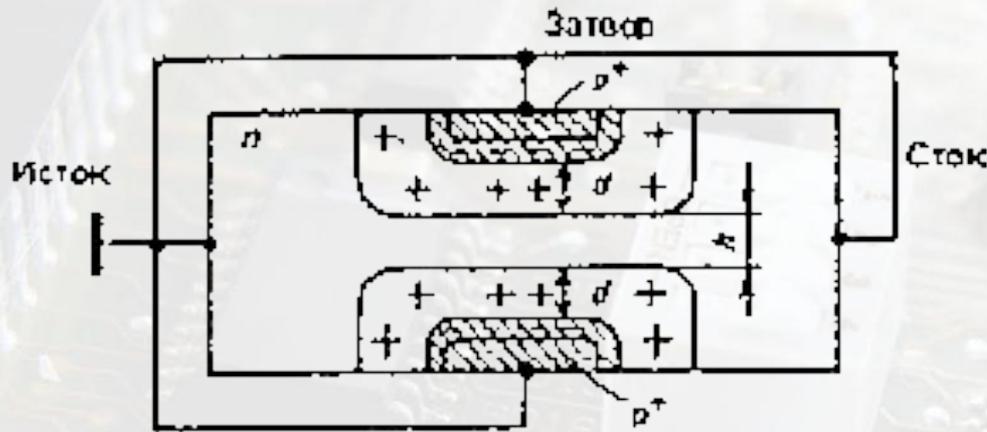


Передаточные

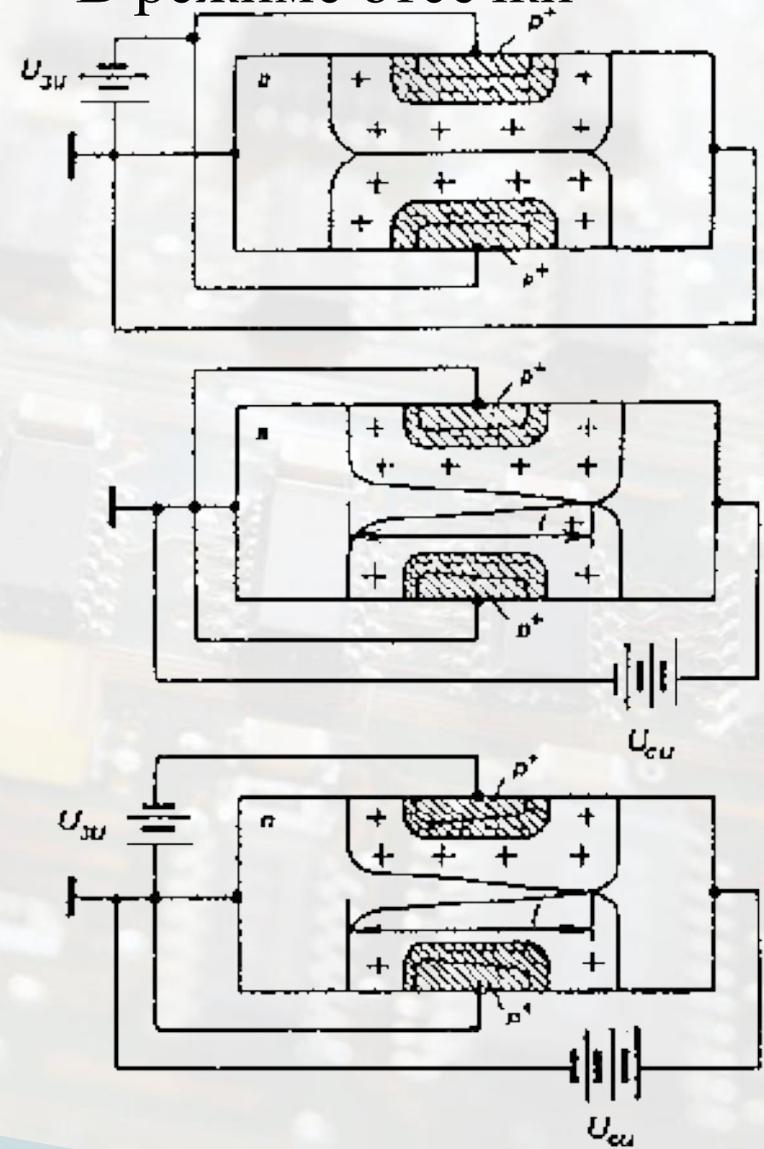


Модель полевого транзистора

В равновесном состоянии



В режиме отсечки



Малосигнальные параметры

- Крутизна

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{3И}} \right|_{U_{СИ}} ;$$

- Внутреннее сопротивление

$$R_C = \left. \frac{dU_{СИ}}{dI_c} \right|_{U_{3И}} ;$$

- Малосигнальные параметры связаны соотношением:

$$K = SR_C$$

- Коэффициент усиления

$$K = \left. \frac{dU_{СИ}}{dU_{3И}} \right|_c .$$



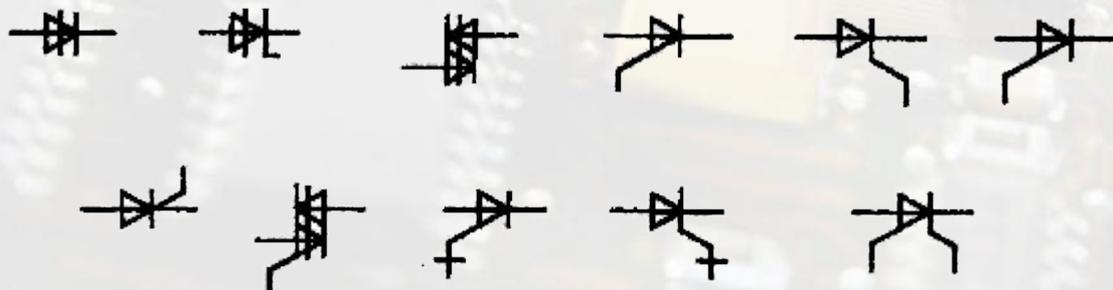
Полупроводниковые приборы

Тиристоры

Тиристоры

- **Тиристором** называется полупроводниковый прибор с тремя и более *p-n*-переходами, ВАХ которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением.
- **Тиристоры** изготавливают из **кремния**

Условные обозначения тиристоров



Тиристоры

Диодные
(динисторы)

□ Несимметричные

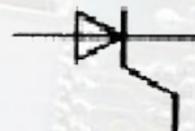


□ Симметричные



Триодные
(тринисторы)

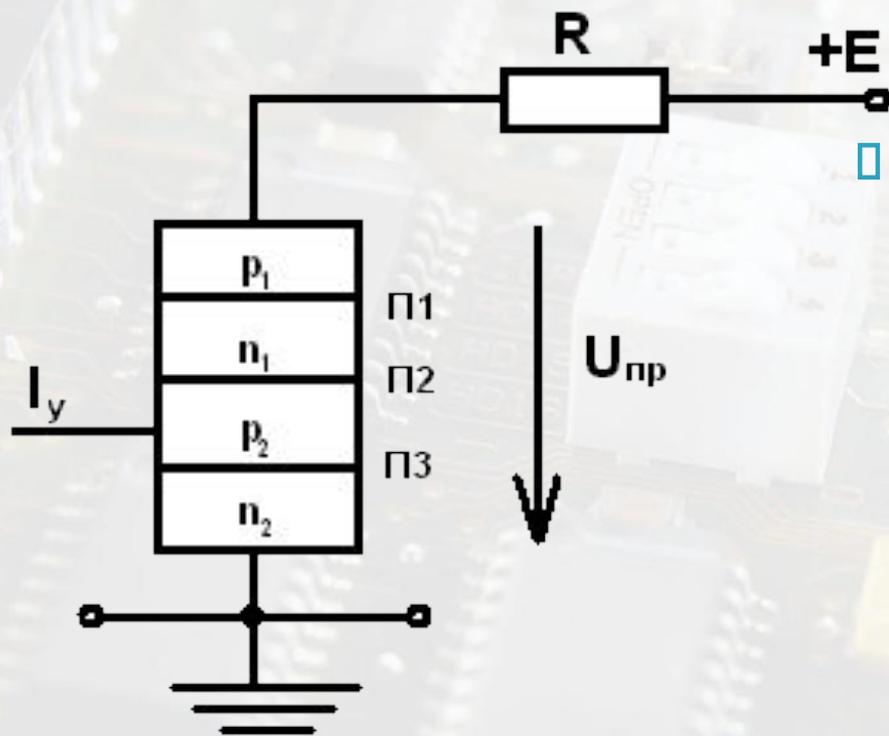
□ Несимметричные



□ Симметричные

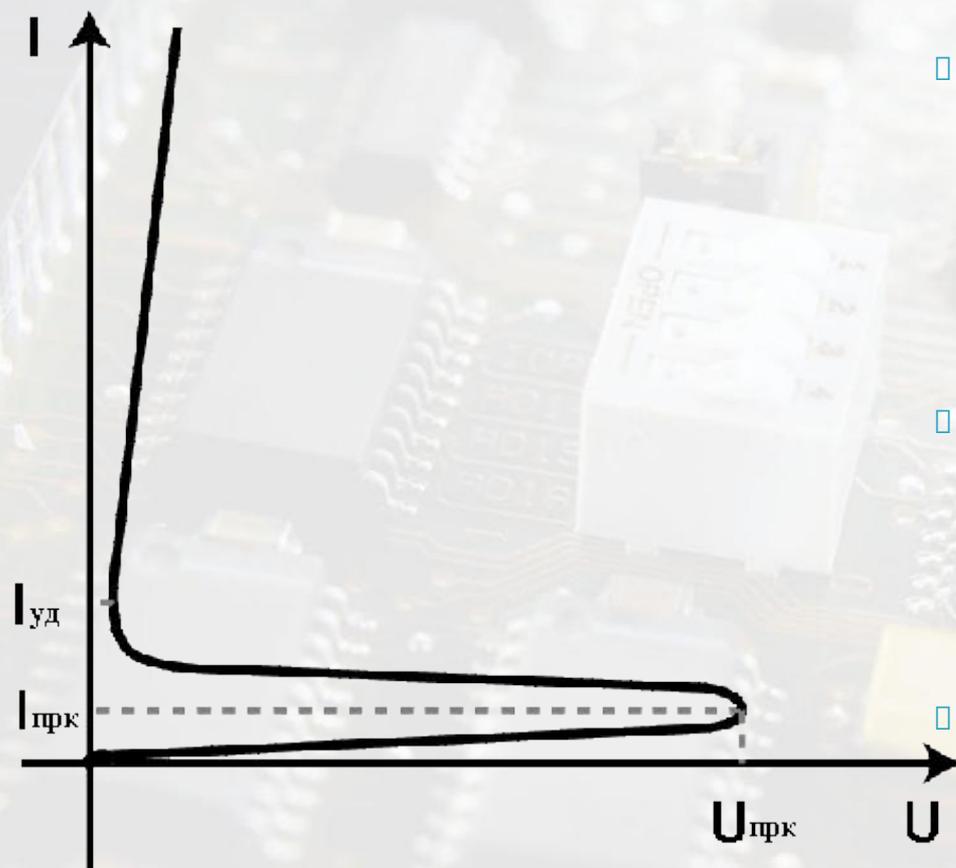


Триодный тиристор



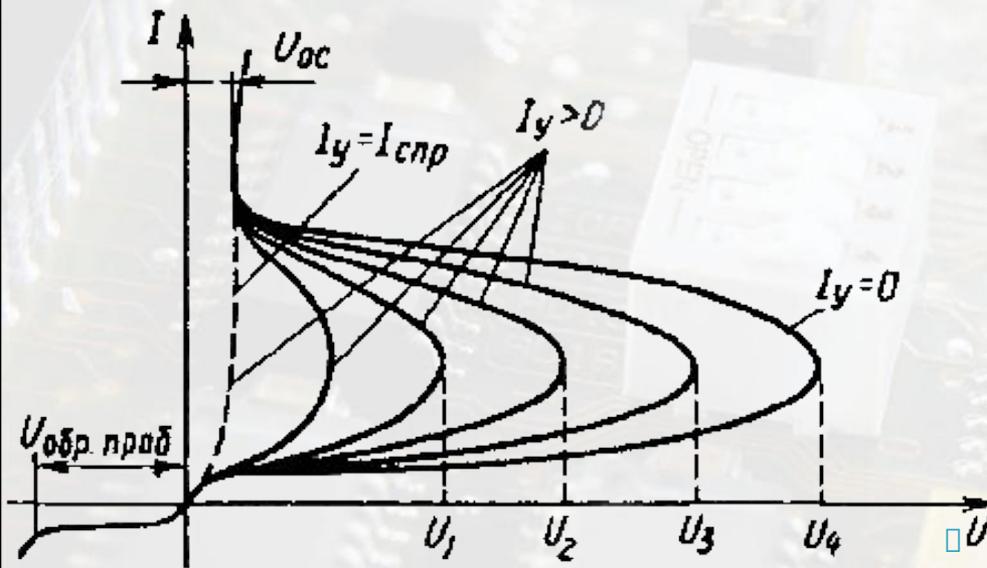
□ Рассмотрим триодный тиристор, построенный на основе диодного тиристора с добавлением управляющего электрода

ВАХ Тиристора



- При повышении прямого напряжения (за счёт увеличения $E_{пит}$) ток тиристора сначала увеличивается незначительно, пока прямое напряжение не приблизится к некоторому критическому значению, называемому напряжением включения.
- Происходит лавинообразный процесс и лавинное умножение носителей заряда. С увеличением электронов и дырок ток в переходе быстро возрастает. Падение напряжения на тиристоре падает.
- Переход П2 при этом не разрушается, и если уменьшит ток, то восстанавливается сопротивление перехода.

ВАХ Тиристора



- Увеличение тока через запертый коллекторный $p-n$ -переход в первом приближении аналогично увеличению приложенного напряжения, так как в обоих случаях увеличивается вероятность лавинного размножения носителей заряда. Поэтому изменяя ток, можно менять напряжение, при котором происходит переключение тиристора, и тем самым управлять моментом его включения.

- U Для того чтобы запереть тиристор, нужно либо уменьшить рабочий ток до значения $I < I_{уд}$ путем понижения питающего напряжения до значения ниже U_2 , либо задать в цепи управляющего электрода импульс тока противоположной полярности.