



Електроніка та мікропроцесорна техніка.

Фізико-математичні засади
електроніки

Частина 2



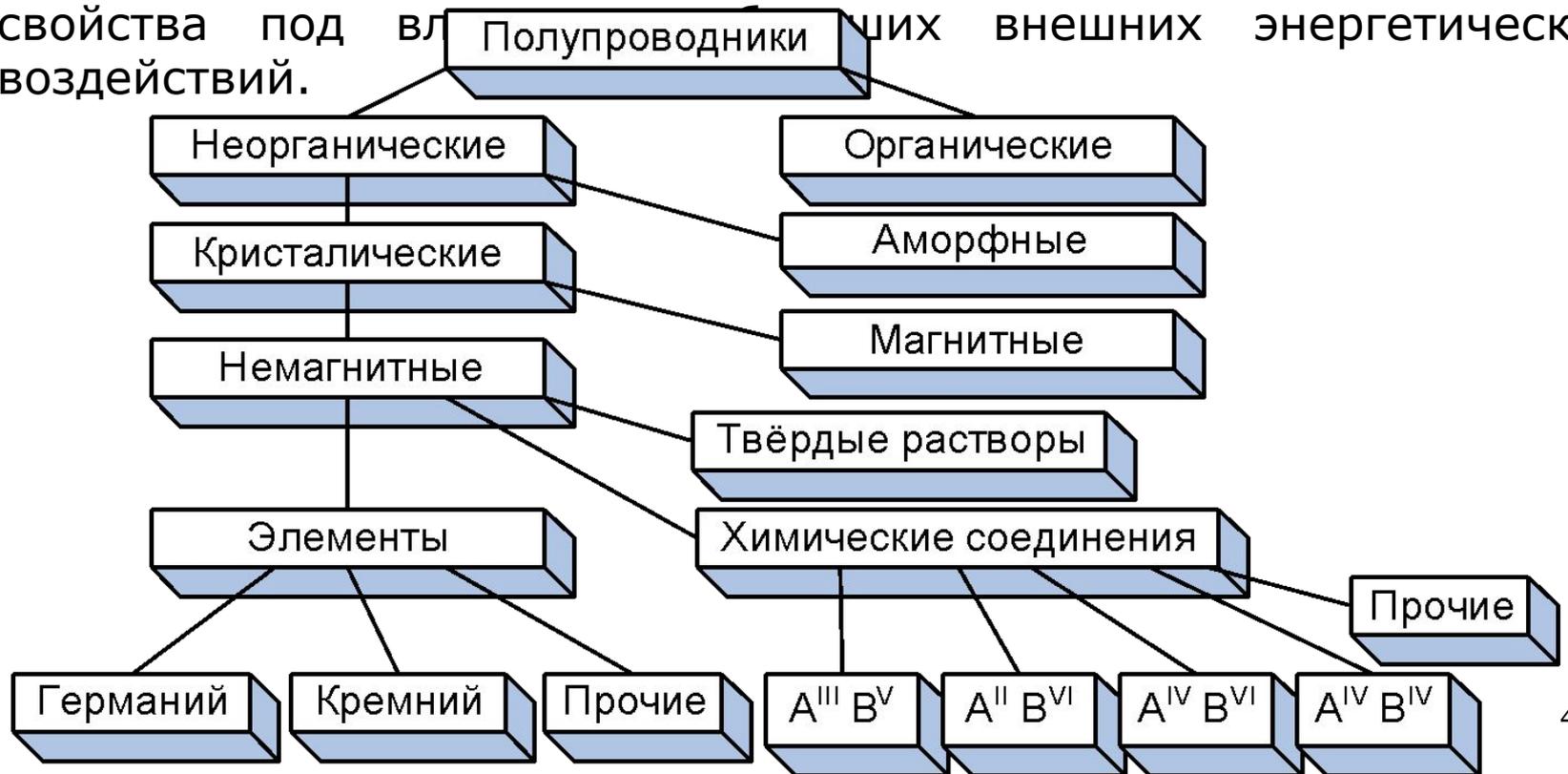
1.2 Диоды



Полупроводниковые материалы

Полупроводниковые материалы

Полупроводниковыми свойствами могут обладать как неорганические, так и органические вещества, кристаллические и аморфные, твердые и жидкие, немагнитные и магнитные. Несмотря на существенные различия в строении и химическом составе, материалы этого класса роднит одно замечательное качество - способность сильно изменять свои электрические свойства под влиянием внешних энергетических воздействий.



Полупроводниковые материалы

- кремнийкремний, Si
- германий, германий, Ge
- серое олово, серое олово, α -Sn
- карбид кремния, карбид кремния, SiC
- нитрид боранитрид бора, BN
- нитрид алюминиянитрид алюминия, AlN
- фосфид алюминияфосфид алюминия, AlP
- арсенид алюминияарсенид алюминия, AlAs
- нитрид галлиянитрид галлия GaN
- арсенид индияарсенид индия, InAs
- антимонид индияантимонид индия, InSb
- селенид цинкаселенид цинка, ZnSe
- селенид кадмияселенид кадмия, CdSe
- теллурид кадмиятеллурид кадмия, CdTe
- теллурид цинкателлурид цинка, ZnTe
- теллурид ртутителлурид ртути, HgTe

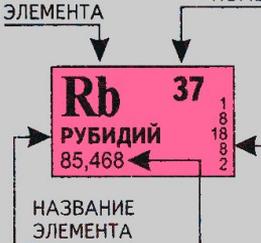
ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

www.calc.ru



Д.И. Менделеев
1834-1907

СИМВОЛ ЭЛЕМЕНТА ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР



НАЗВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ АТОМНАЯ МАССА

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПО СЛОЯМ

- s-элементы
- p-элементы
- d-элементы
- f-элементы

Периоды	Ряды	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В																Энергетические уровни	
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			a
		a	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б		
1	1	H водород 1,008																He Гелий 4,003	2
2	2	Li Литий 6,941	Be Бериллий 9,0122	B Бор 10,811	C Углерод 12,011	N Азот 14,007	O Кислород 15,999	F Фтор 18,998										Ne Неон 20,179	10
3	3	Na Натрий 22,99	Mg Магний 24,312	Al Алюминий 26,982	Si Кремний 28,086	P Фосфор 30,974	S Сера 32,064	Cl Хлор 35,453										Ar Аргон 39,948	18
4	4	K Калий 39,102	Ca Кальций 40,08	Sc Скандий 44,956	Ti Титан 47,956	V Ванадий 50,941	Cr Хром 51,996	Mn Марганец 54,938	Fe Железо 55,849	Co Кобальт 58,933	Ni Никель 58,7								
	5	Cu Медь 63,546	Zn Цинк 65,37	Ga Галлий 69,72	Ge Германий 72,59	As Мышьяк 74,922	Se Селен 78,96	Br Бром 79,904											Kr Криптон 83,8
5	6	Rb Рубидий 85,468	Sr Стронций 87,62	Y Иттрий 88,906	Zr Цирконий 91,22	Nb Ниобий 92,906	Mo Молибден 95,94	Tc Технеций [99]	Ru Рутений 101,07	Rh Родий 102,906	Pd Палладий 106,4								
	7	Ag Серебро 107,868	Cd Кадмий 112,41	In Индий 114,82	Sn Олово 118,69	Sb Сурьма 121,75	Te Теллур 127,6	I Иод 126,905											Xe Ксенон 131,3
6	8	Cs Цезий 132,905	Ba Барий 137,34	57-71 Лантаноиды		Hf Гафний 178,49	Ta Тантал 180,948	W Вольфрам 183,85	Re Рений 186,207	Os Осмий 190,2	Ir Иридий 192,22	Pt Платина 195,09							
	9	Au Золото 196,967	Hg Ртуть 200,59	Tl Таллий 204,37	Pb Свинец 207,19	Bi Висмут 208,98	Po Полоний [210]	At Астат [210]											Rn Радон [222]
7	10	Fr Франций [223]	Ra Радий [226]	89-103 Актиноиды		Rf Резерфордий [261]	Db Дубний [262]	Sg Сиборгий [263]	Bh Борий [262]	Hn Ханий [265]	Mt Мейтнерий [265]								
Высшие оксиды		R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₅	RO ₃	R ₂ O ₇	RO ₄										
Летучие водородные соединения					RH ₄	RH ₃	H ₂ R	HR											

Л А Н Т А Н О И Д Ы

57 La Лантан 138,906	58 Ce Церий 140,12	59 Pr Празеодим 140,908	60 Nd Неодим 144,24	61 Pm Прометий [145]	62 Sm Самарий 150,4	63 Eu Европий 151,96	64 Gd Гадолиний 157,25	65 Tb Тербий 158,926	66 Dy Диспрозий 162,5	67 Ho Гольмий 164,93	68 Er Эрбий 167,26	69 Tm Тулий 168,934	70 Yb Иттербий 173,04	71 Lu Лютеций 174,97
----------------------------	--------------------------	-------------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	------------------------------	----------------------------	-----------------------------	----------------------------	--------------------------	---------------------------	-----------------------------	----------------------------

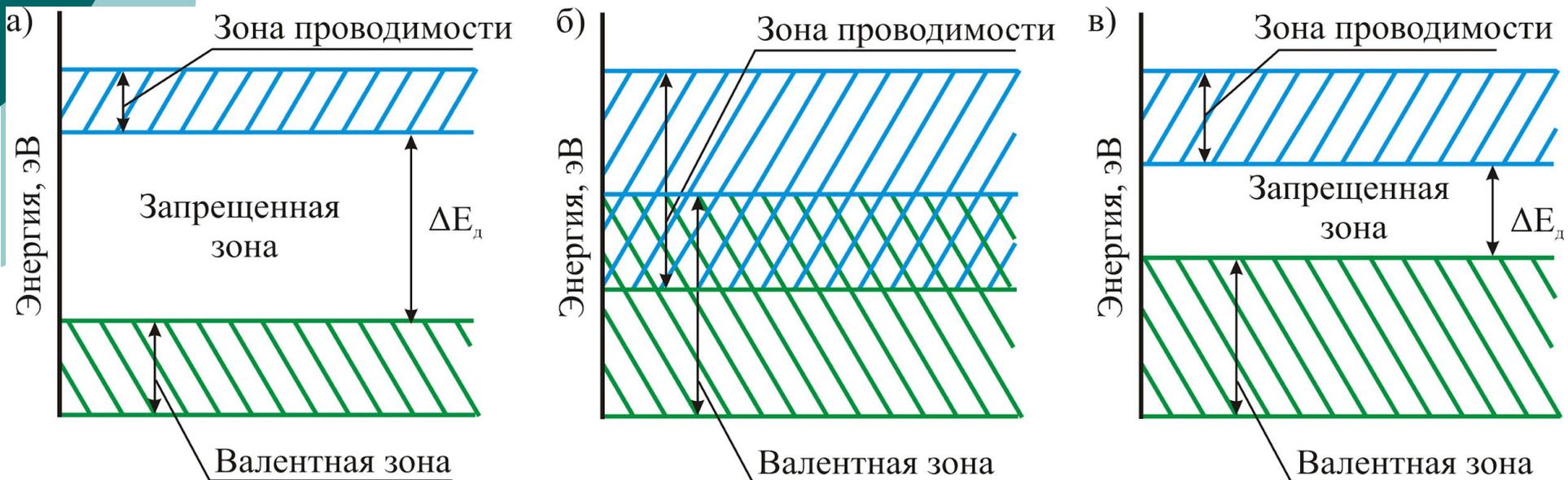
А К Т И Н О И Д Ы

89 Ac Актиний [227]	90 Th Торий 232,038	91 Pa Протактиний [231]	92 U Уран 238,29	93 Np Нептуний [237]	94 Pu Плутоний [244]	95 Am Америций [243]	96 Cm Кюрий [247]	97 Bk Берклий [247]	98 Cf Калифорний [251]	99 Es Эйнштейний [254]	100 Fm Фермий [257]	101 Md Менделевий [258]	102 No Нобелий [259]	103 Lr Лоуренсий [260]
---------------------------	---------------------------	-------------------------------	------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	-------------------------	---------------------------	------------------------------	------------------------------	---------------------------	-------------------------------	----------------------------	------------------------------

Зонная теория проводимости твердых тел

Для пояснения отличительной особенности изоляторов, проводников и полупроводников используют **зонную теорию**, согласно которой электроны вращаясь вокруг своего ядра на разных орбитах, обладают различной энергией.

<http://www.youtube.com/watch?v=w12Ehm6BSB4>



Энергетические зоны изолятора (а), проводника (б) и полупроводника (в).

Уровень энергий в которой находятся валентные электроны образуют *валентную зону*.

Уровень энергий в которой находятся свободные электроны, участвующие в проводимости образуют зону проводимости.

Валентная зона и зона проводимости разделяются запрещенной зонной.

Ширина запрещенной зоны:

- Германий (Ge) 0,85 эВ;
- Кремний (Si) 1,1 эВ;
- Фосфид индия (InP) 1,26 эВ;
- Металлы (Cu) 0 эВ;
- Изоляторы >3 эВ.

Электропроводность веществ определяется содержанием свободных электронов.

В металлах в 1 см^3 содержатся около 10^{22} э/см^3 , а в полупроводниках $10^9 \div 10^{10} \text{ э/см}^3$.

Для создания тока $I=1 \text{ А}$ необходимо пропускать $n_e \approx 10^{18}$ электронов в секунду.

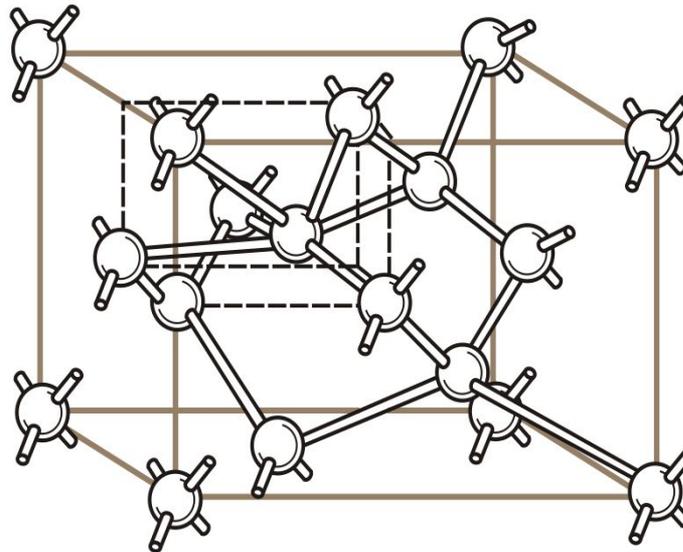
Электронная и дырочная проводимость

1. Собственная проводимость

Для изготовления полупроводниковых приборов используют главным образом германий и кремний.

Эти материалы имеют кристаллическое строение, для которого характерно закономерное и упорядоченное расположение атомов в пространстве. Между атомами кристаллической решетки существуют связи, образуемые внешними (валентными) электронами, которые взаимодействуют не только с ядром своего атома, но и с ядрами соседних атомов, образуя ковалентные связи.

а)

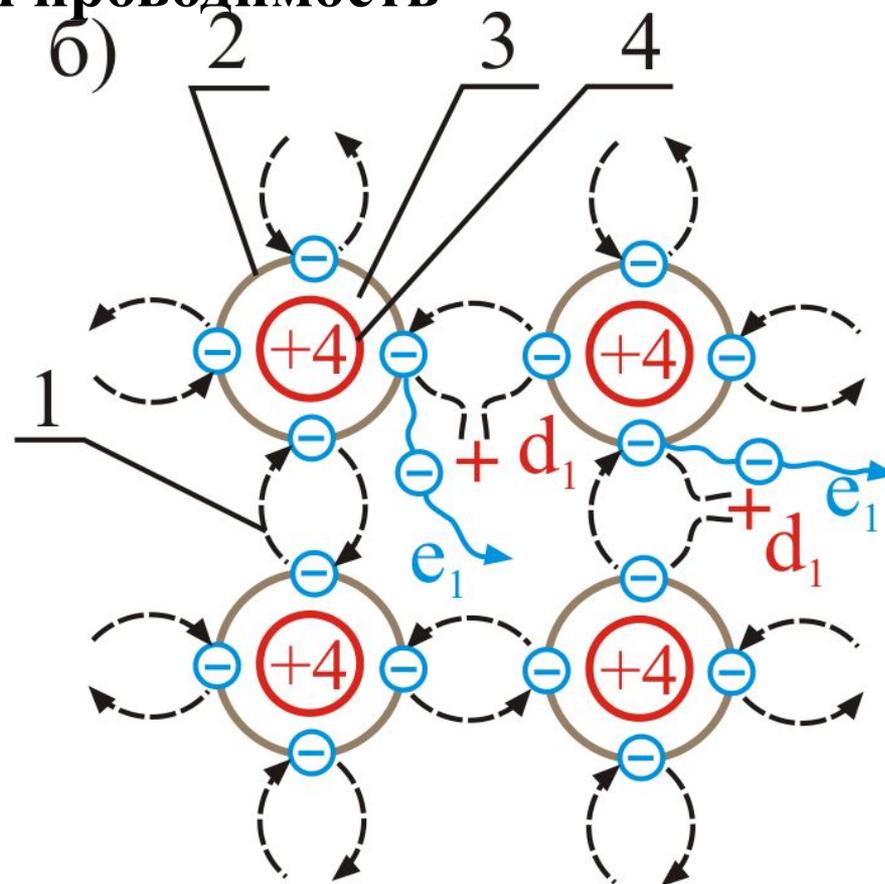


Пространственная схема кристаллической решетки кремния или германия (а)

Электронная и дырочная проводимость

1. Собственная проводимость

схема связей между атомами в элементарной ячейке кристалла (б): 1 – двойная электронная связь; 2 – внешняя оболочка; 3 – атом; 4 – ядро



При уходе электрона со своей орбиты в зону проводимости происходит разрыв ковалентных связей между атомами и образуются свободные электроны $e \ominus$ на месте разрыва – дырки $d \oplus$

В химически чистом полупроводнике $n_e = n_d$.

2. Примесная проводимость полупроводников

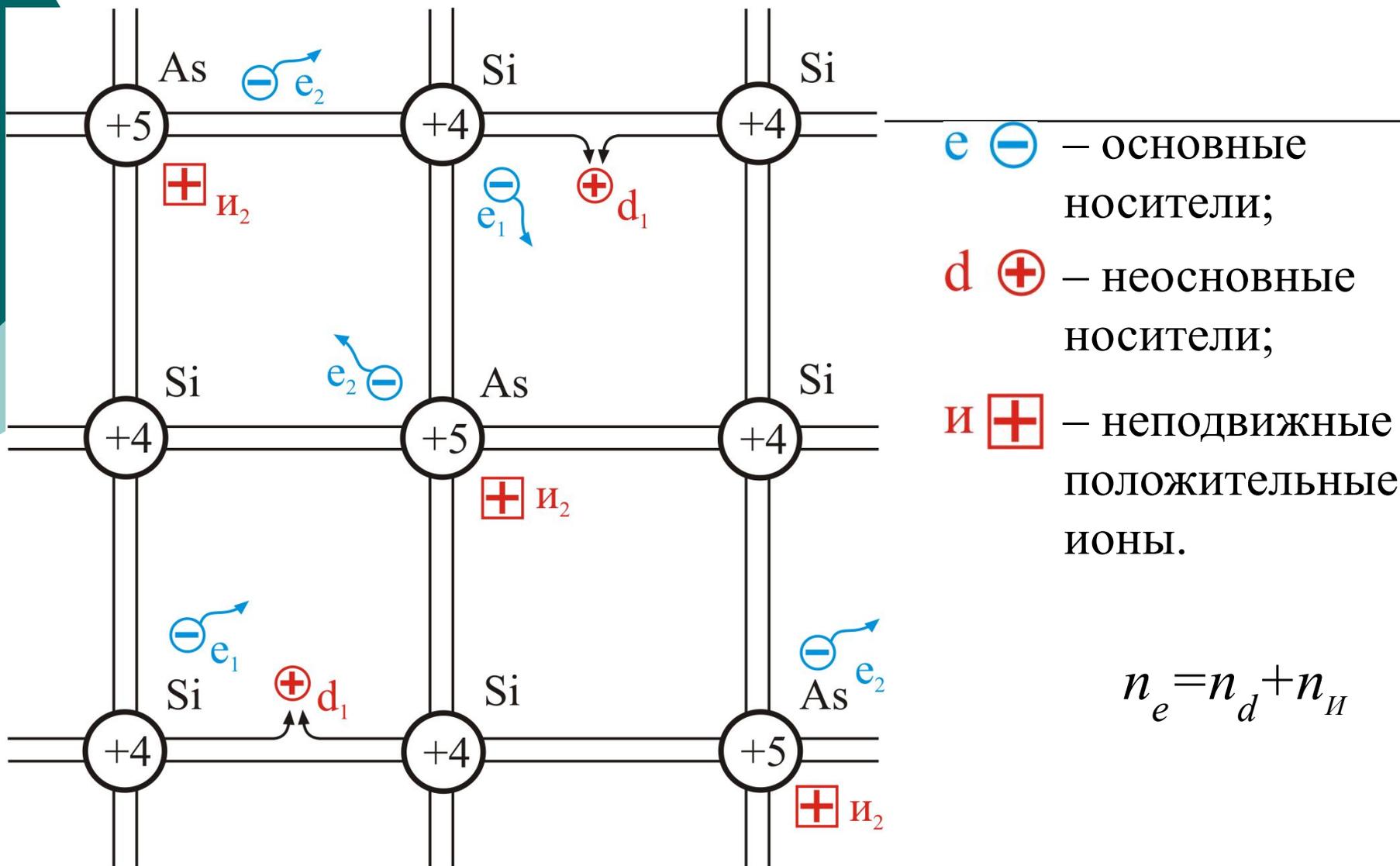
В кристалле полупроводника можно создать искусственным путем такие условия при которых число электронов не будет равно числу дырок и, следовательно, электропроводность его будет вызываться движением электрических зарядов преимущественно какого-либо одного знака: либо электронов, либо дырок. При этом проводимость полупроводника резко возрастает.

Получение *n* полупроводников

Для получения полупроводников с избытком электронов, названные *n* полупроводниками, необходимо в химически чистый полупроводник внедрить примеси элементов 5 группы (например мышьяк As или сурьма Sb).

Примеси, увеличивающие число свободных электронов в полупроводнике, называют *донорными примесями* (донор – поставщик).

Рассмотрим изменения в кристаллической решетке кремния при введении примесей мышьяка As.



$$n_e = n_d + n_{И}$$

Кристаллическая решетка кремния Si с введенными атомами мышьяка As

Для получения полупроводников с избытком дырок, названных p полупроводниками, необходимо в химически чистый полупроводник внедрить примеси элементов третьей группы (например индий In, галий Ga).

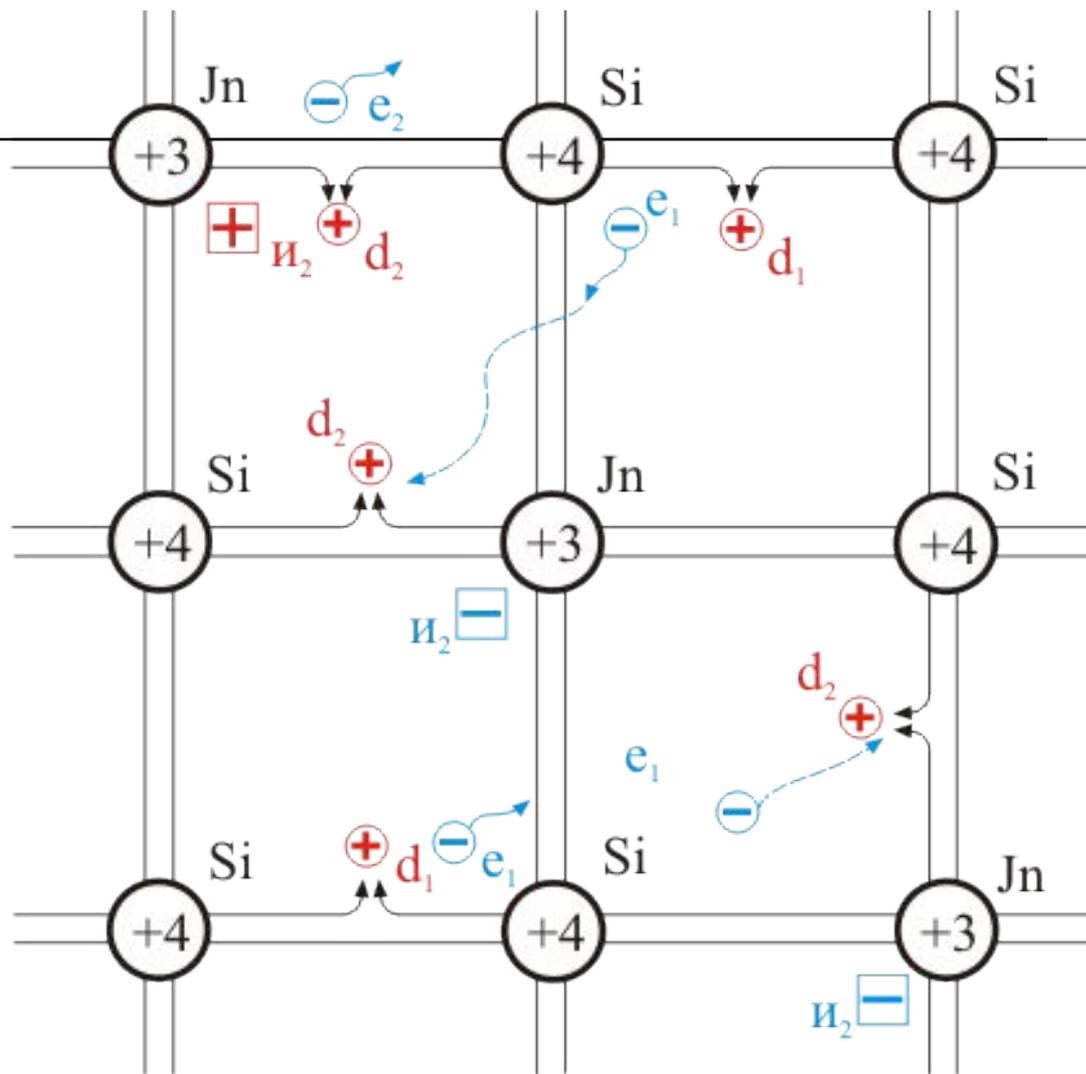
Примеси, создающие в полупроводнике дырочную проводимость, называются *акцепторными* (акцептировать – захватывать).

• Получение p полупроводников

Рассмотрим изменения в кристаллической решетке кремния при введении примесей индия Jn.

- d ⊕ — основные носители;
- e ⊖ — неосновные носители;
- и ⊖ — неподвижные отрицательные ионы.

$$n_d = n_e + n_{и}$$



Кристаллическая решетка кремния Si с введенными атомами индия Jn

Твердотельная электроника

Основные твердотельные приборы, используемые в электронных устройствах:

- диоды плоскостные и точечные;
- диоды для усиления и генерации СВЧ-мощности: туннельный диод, лавинно-пролетный диод, диод Ганна;
- инжекционные и лавинные S-диоды (диоды S -типа), динисторы и тиристоры.
- биполярные транзисторы;
- полевые транзисторы — транзисторы с р-п-переходом в качестве затвора и с изолированным затвором;
- аналоговые транзисторы со статической индукцией, с проникаемой базой и с металлической базой

Электрические переходы

Электрическим переходом в полупроводнике называется граничный слой между двумя областями, физические характеристики которых имеют существенные физические различия.

Различают следующие виды электрических переходов:

- 1) электронно-дырочный или р-п-переход – переход между двумя областями полупроводника, имеющие разный тип электропроводности;
- 2) переходы между двумя областями, если одна из них является металлом, а другая полупроводником р- или п-типа (переход металл – полупроводник);
- 3) переходы между двумя областями с одним типом электропроводности, отличающиеся значением концентрации примесей;
- 4) переходы между двумя полупроводниковыми материалами с различной шириной запрещенной зоны (гетеропереходы).

Электронно-дырочный переход

Граница между двумя областями монокристалла полупроводника, одна из которых имеет электропроводность р-типа, другая – n-типа,

называется электронно-дырочным переходом (р-n-переходом).



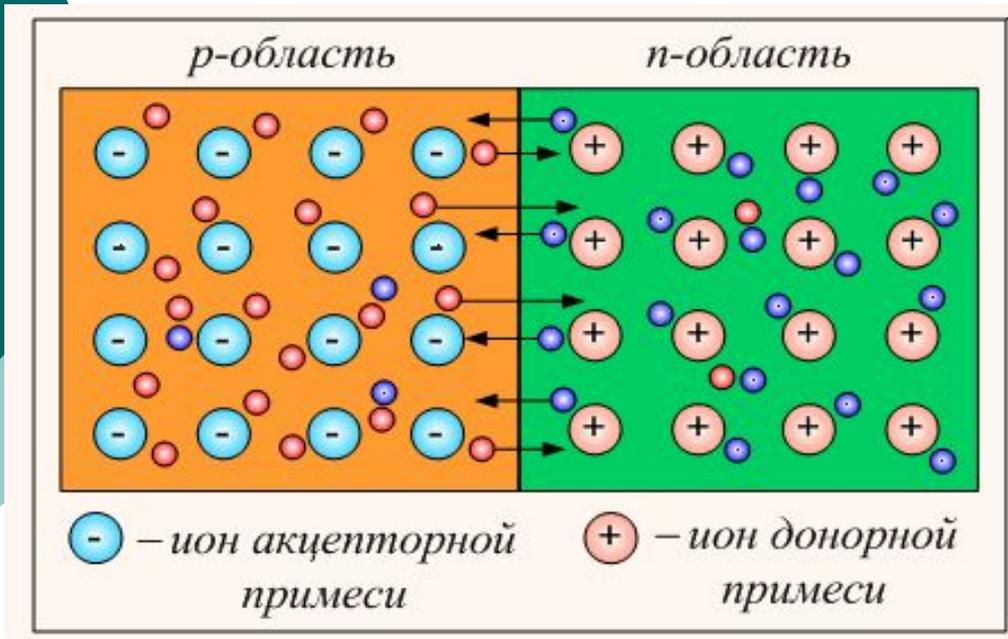
Считаем что
граница раздела монокристаллов плоская,
место соединения является идеальным,
внешнее электрическое поле отсутствует.

Обычно концентрация примесей существенно
различна $N_a \gg N_D$ или $N_a \ll N_D$.

Концентрация основных носителей
значительно больше концентрации неосновных

.

Электронно-дырочный переход

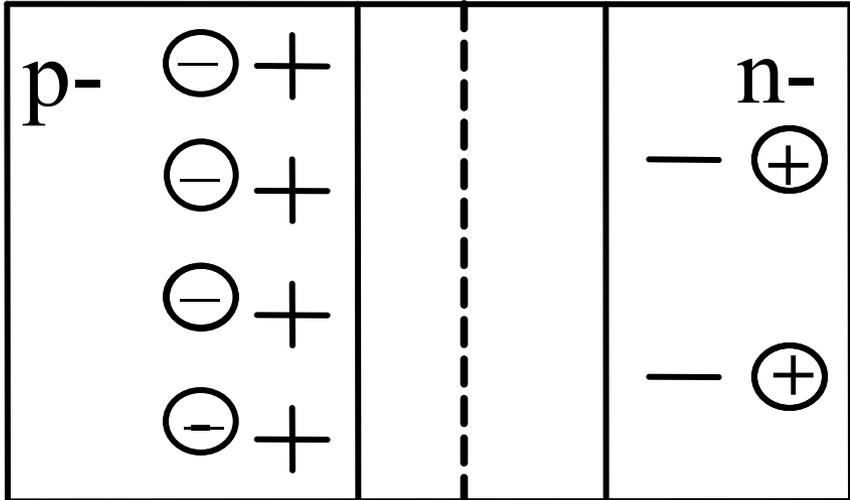


Начальный момент образования р-п-перехода

соответствует отрицательно заряженный ион акцепторной примеси, находящийся неподвижно в узле кристаллической решетки, а в области п каждому свободному электрону соответствует положительно заряженный ион донорной примеси, в результате чего весь монокристалл остается электрически нейтральным.

С одной стороны введена акцепторная примесь, обусловившая возникновение здесь электропроводности типа р, а с другой стороны введена донорная примесь, благодаря которой там возникла электропроводность типа п.

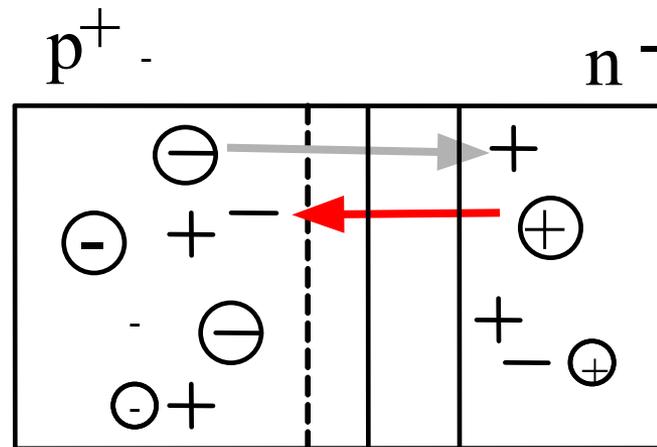
Каждому подвижному положительному носителю заряда в области р (дырке)

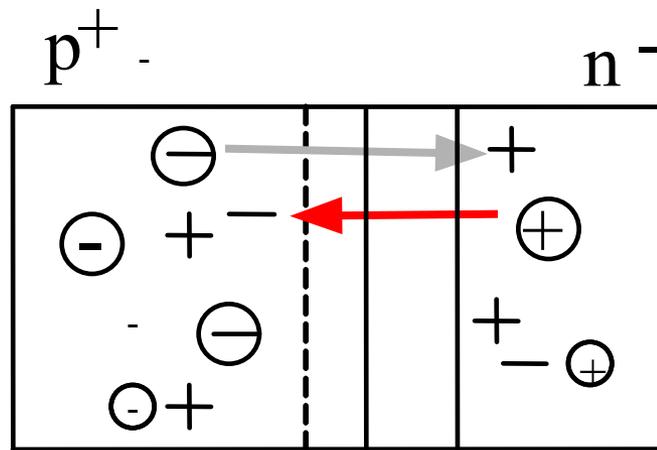




Следовательно, в такой структуре имеется градиент концентрации подвижных носителей заряда каждого знака.

Под действием разности концентраций электроны из n-области будут перемещаться в p-область, а дырки из p-области – в n-область.





На месте ушедшей дырки в p-области навелся отрицательный заряд да еще электрон пришел из n-области, на месте ушедшего электрона n-области навелся положительный заряд впридачу пришел положительный заряд из p-области.

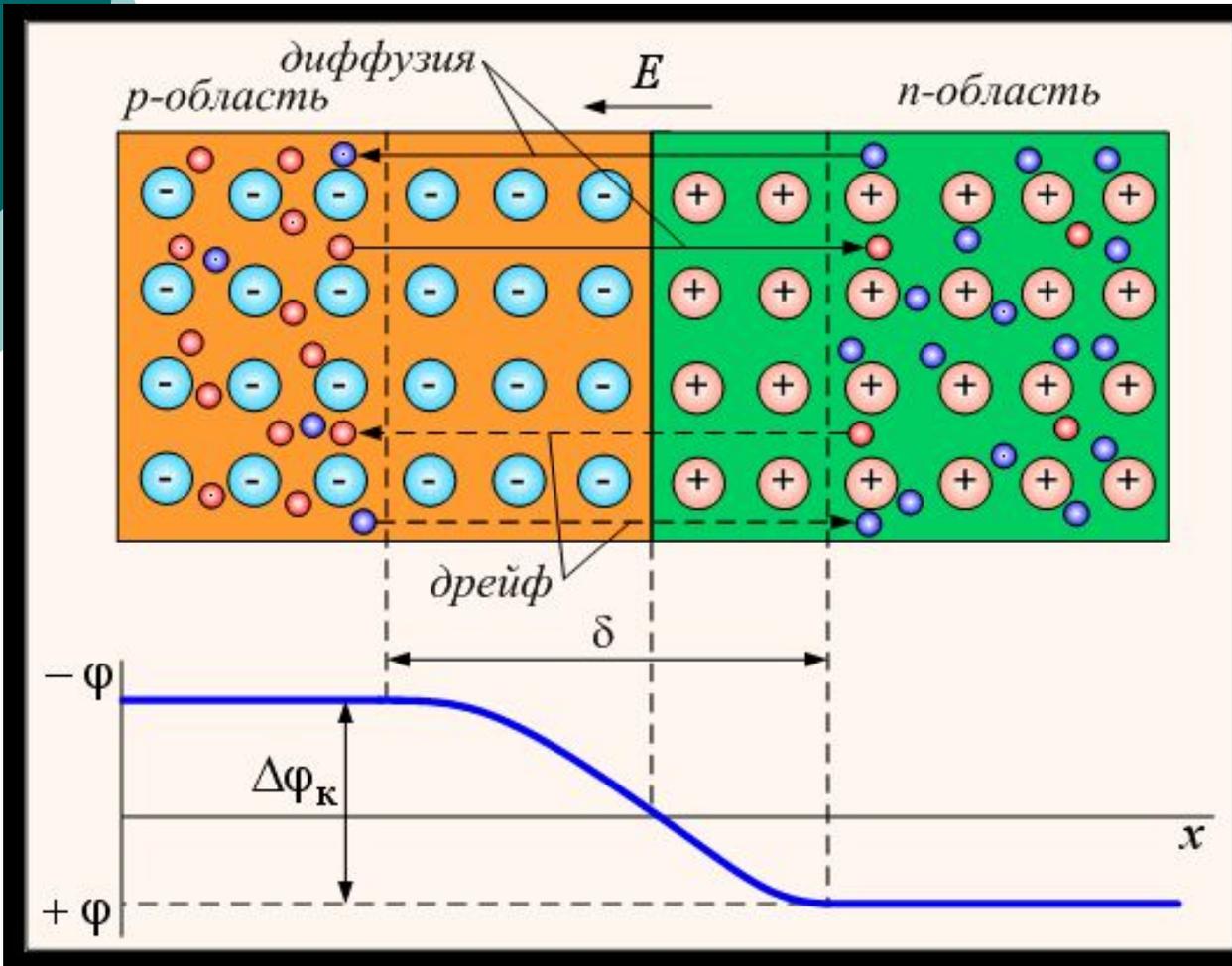
Этот двойной электрический слой создаёт электрическое поле с напряжённостью E_0 и приводит к появлению внутри полупроводника потенциального барьера φ_0 .

Это поле вызывает также направленное движение неосновных носителей заряда через переход – дрейфовый ток, направленный навстречу диффузному току

$$I_{др} = I_{ДРр} + I_{ДРn}$$

Электронно-дырочный переход

Между этими зарядами возникает электрическое поле, которое называют полем потенциального барьера, а разность потенциалов на границе раздела двух зон, обуславливающих это поле, называют контактной разностью



потенциалов $\Delta\varphi_k$. Это электрическое поле начинает действовать на подвижные носители электрических зарядов, препятствуя протеканию электрического тока, образуя так называемый запирающий слой.

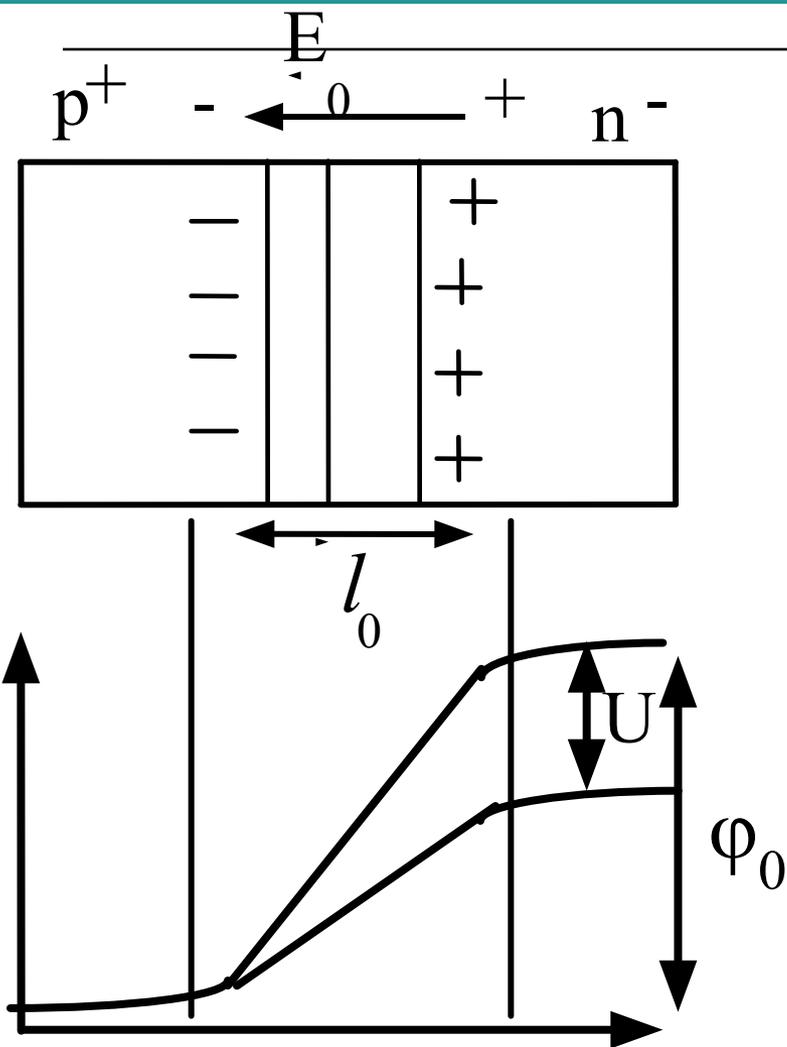
р-n-переход при отсутствии внешнего напряжения



В конце концов эти токи сравняются

$$I_{\text{др}} = I_{\text{диф}}$$

Наступит равновесное состояние и результирующий ток окажется равным нулю

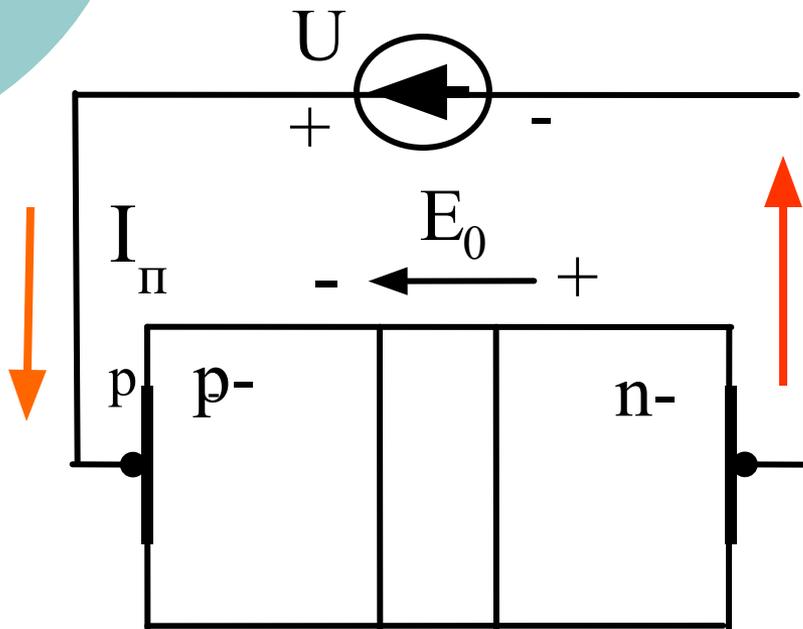


Структуру с повышенной концентрацией носителей принято обозначать символом p^+ .

Подключение внешнего источника напряжения к р-п-переходу

Прямое (согласное) включение р-п-перехода

Подключим к р-п-переходу внешний источник напряжения U плюсом (+) к р-, а (-) к п-слою.



Изменится высота потенциального барьера φ_0 . Внешнее напряжение окажется приложенным в основном к запирающему слою как к участку с наибольшим сопротивлением.

Напряжение U оказалось включенным
встречно с внутренним электрическим полем
 E_0 .

В результате высота потенциального барьера
снижается на величину внешнего напряжения
 U .

$$\varphi = \varphi_0 - U$$

Количество носителей, обладающих энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера, увеличивается.

Увеличивается диффузионная составляющая $I_{\text{диф}}$ тока через p-n-переход.

В каждой области появляются дополнительные избыточные концентрации носителей.

При этом нарушается условие равновесного состояния.

Носители собственной электропроводности также начнут встречено движение, образуя дрейфовый ток.

Учитывая, что концентрации неосновных много меньше концентрации основных носителей, можно отметить, что дрейфовый ток $I_{др}$ этих носителей от приложенного напряжения зависит очень слабо.

Таким образом, результирующий ток через р-п-переход

$$I_{рез} = I_{диф} - I_{др} > 0$$

Нарушенное условие равновесного состояния р-п-структуры должно быть восстановлено за счет источника внешнего напряжения. Ушедшие из р-слоя дырки восполняются положительными зарядами источника U , ушедшие электроны – электронами источника U .

В результате появляется ток во внешних выводах р-п-структуры.

Этот ток далее будем называть
прямым током.

Внешнее напряжение при таком включении
– прямым U_{np} .

p-n-структура - включена согласно.

Высота потенциального барьера φ_0
составляет доли вольта. Поэтому достаточно
приложить напряжение U_{np} доли вольта, чтобы
p-n-переход начал открываться.

Уменьшение результирующего поля у р-n-перехода приводит к уменьшению объёмного заряда и уменьшению длины запирающего слоя l_0 .



Процесс внедрения носителей заряда в какую-либо область полупроводника, для которой они являются неосновными, называется *инжекцией*.

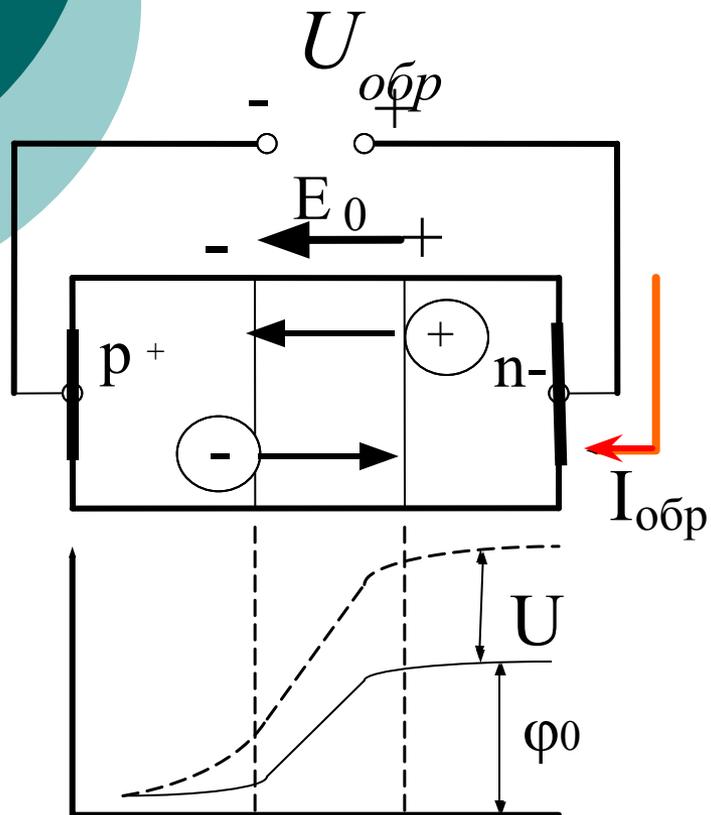
Включение р-n-перехода в обратном направлении

Включим внешнее напряжение U (+) к n-области. При этом увеличивается высота потенциального барьера на величину

$$\varphi = \varphi_0 + |U|$$

$$I_{рез} = I_{диф} - I_{др} = -I_{др}$$

Поле р-n-перехода втягивает все подошедшие к нему неосновные носители независимо от высоты потенциального барьера.



Ток неосновных носителей через р-n-переход называется **обратным**.

Внешнее напряжение при таком подключении далее будем называть **обратным** и обозначать $U_{обр}$.

Обратный ток называют ещё тепловым током, т.к. его величина очень сильно зависит от температуры р-n-перехода.

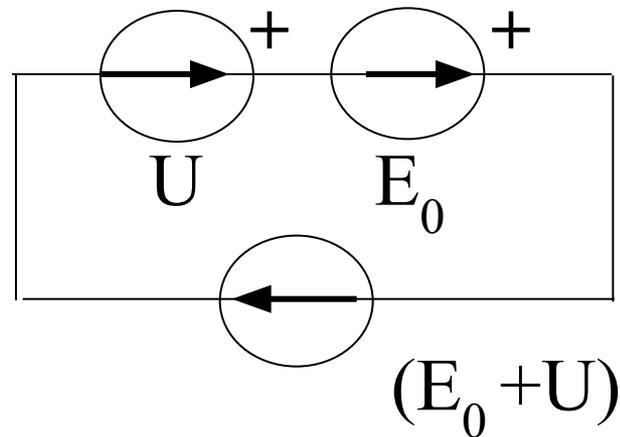
В связи с тем, что прямой ток много больше обратного тока $I_{пр} \gg I_{обр}$ можно говорить об **однаправленной проводимости р-п-перехода.**

При обратном включении р-п-перехода суммарная напряжённость электрического поля возрастает.

Поэтому возрастает заряд электрического слоя, а также ширина перехода l_0 .

Причём возрастает в основном за счёт высокоомного п-слоя.

Процесс ~~втягивания неосновных~~
носителей заряда при обратном включении
называется экстракцией.

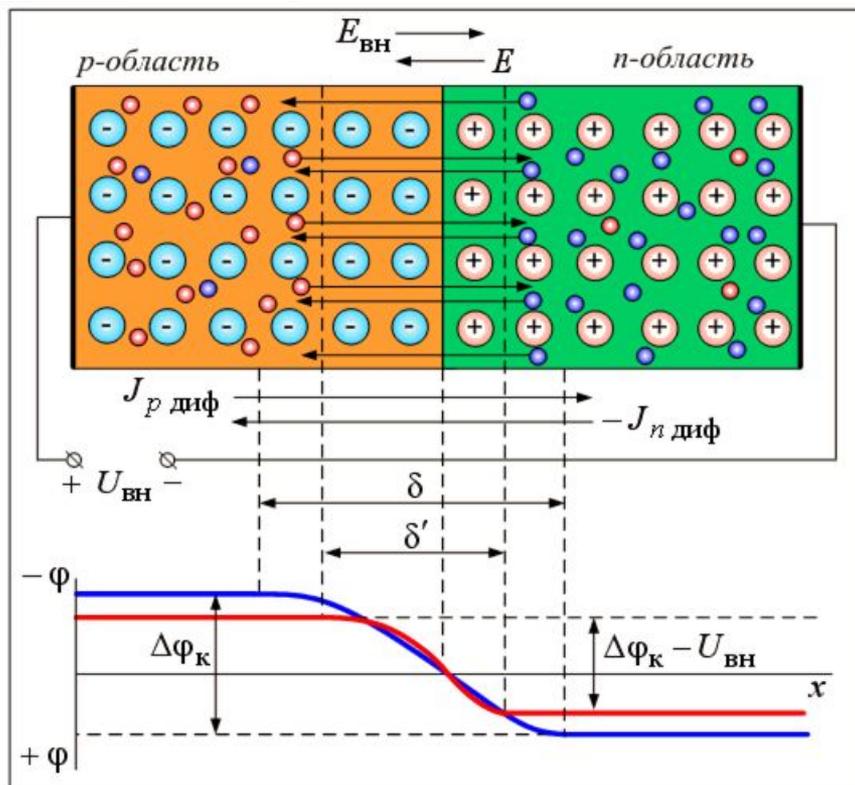


Таким образом

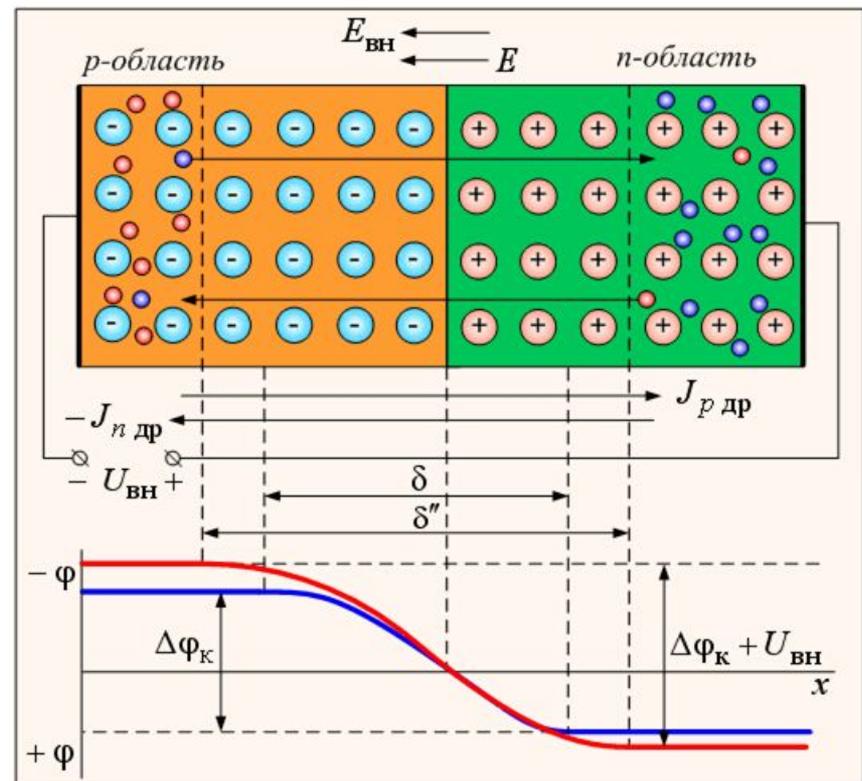
При $U > 0$ переход включен в прямом направлении (согласно) и ток возрастает

Резюме. Вентильные свойства р-п-перехода

р-п-переход, обладает свойством изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от направления протекающего через него тока. Это свойство называется вентильным, а прибор, обладающий таким свойством, называется **электрическим вентилем**.



Прямое включение – электрическое внешнее поле компенсирует внутреннее



Обратное – электрическое внешнее поле суммируется с внутренним, барьер больше

Вольт-амперная характеристика p-n-перехода (ВАХ)

Зависимость тока через p-n-переход от приложенного к нему напряжения хорошо описывается экспоненциальной зависимостью

$$I_{p-n} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

$$\varphi_T = \frac{k}{q} T \quad - \text{температурный потенциал.} \quad (2)$$

Вольт-амперная характеристика p-n-перехода (ВАХ)

$$I_{p-n} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

k – постоянная Больцмана,

q – заряд электрона,

T – температура,

I_0 – обратный ток.

При $T = 293^\circ\text{K} = 20^\circ\text{C}$

$$\varphi_T = 0,025\text{В} = 25\text{mВ} \quad (2)$$

ВАХ р-п-перехода

При прямом включении и $U_{\text{пр}} > 0,1\text{В}$

$$e^{\frac{U}{\varphi_T}} \gg 1$$

$$I_{\text{пр}} \approx I_0 \cdot e^{\frac{U}{\varphi_T}}$$

При обратном
включении

$U_{\text{обр}} > (0,1 - 0,2)\text{В}$

$$e^{\frac{-U}{\varphi_T}} \ll 1$$

$$I_{\text{обр}} \approx -I_0$$

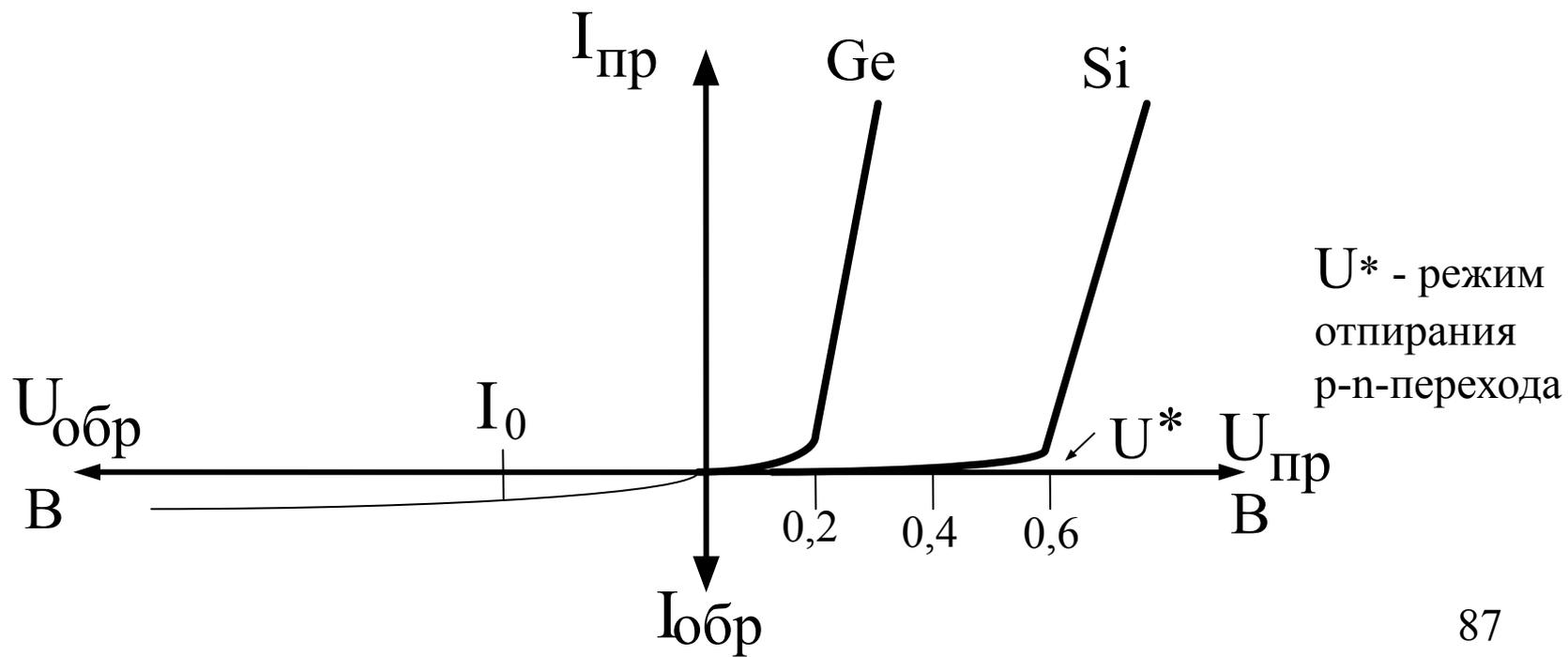


Зависимость тока через р-п-переход от приложенного к нему напряжения, выраженная в графическом виде, называется вольт-амперной характеристикой (ВАХ).

$$I_{\text{P-n}} = f(U)$$

$$I_{p-n} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

На основании выражения можно построить ВАХ р-п-перехода



Запишем (1) иначе

$$U_{p-n} = \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{I_{np}}{I_0} + 1\right) \quad (3)$$

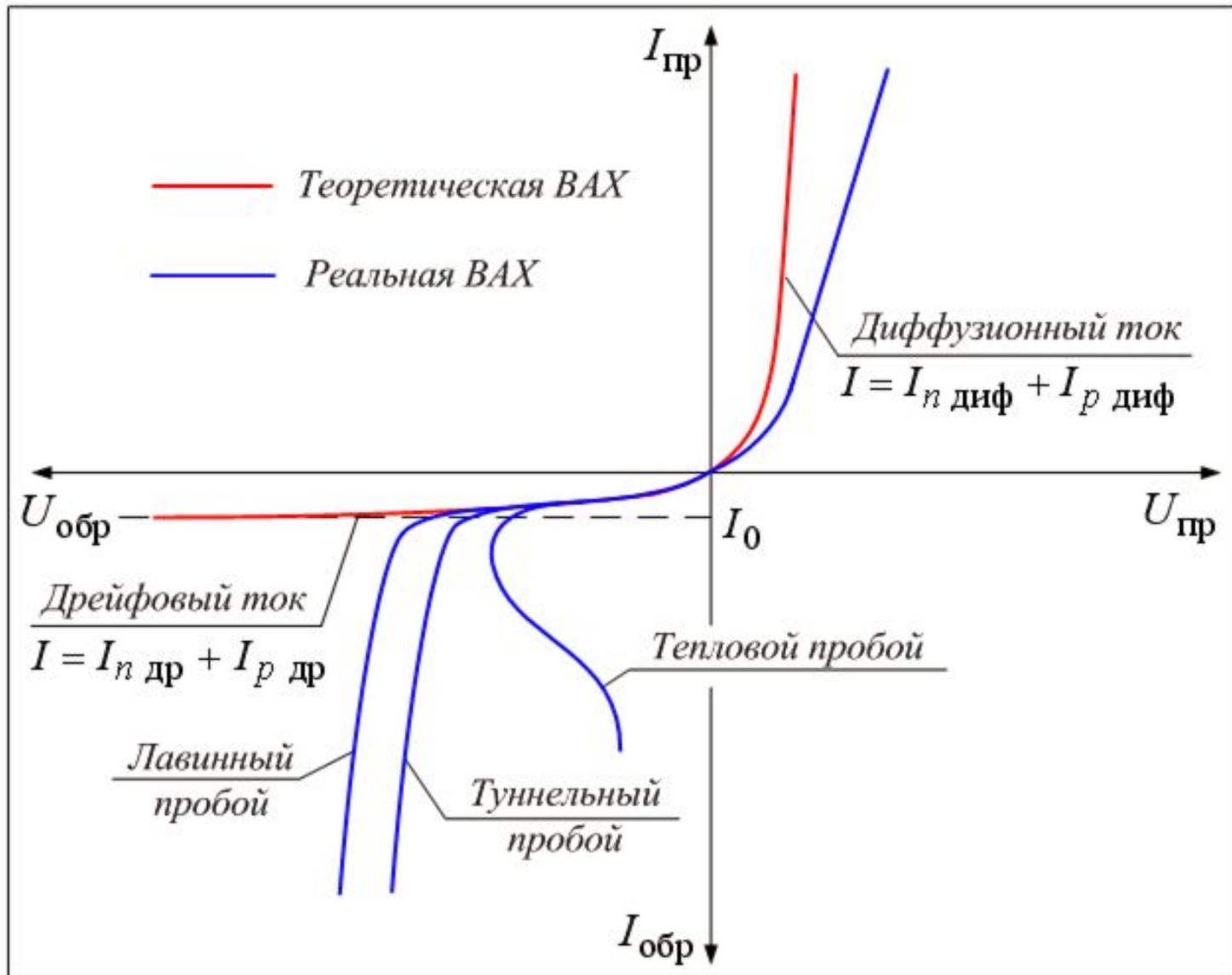
Таким образом

Свойство односторонней электропроводности р-п-перехода отражено в вольтамперной характеристике.

Прямое падение напряжения составляет доли вольта, (для Si 0.64 - 0.69 В),
прямой ток – десятки-сотни миллиампер.

Обратное напряжение – сотни вольт,
обратный ток – единицы-десятки микроампер.

Вольт-амперная характеристика p-n-перехода



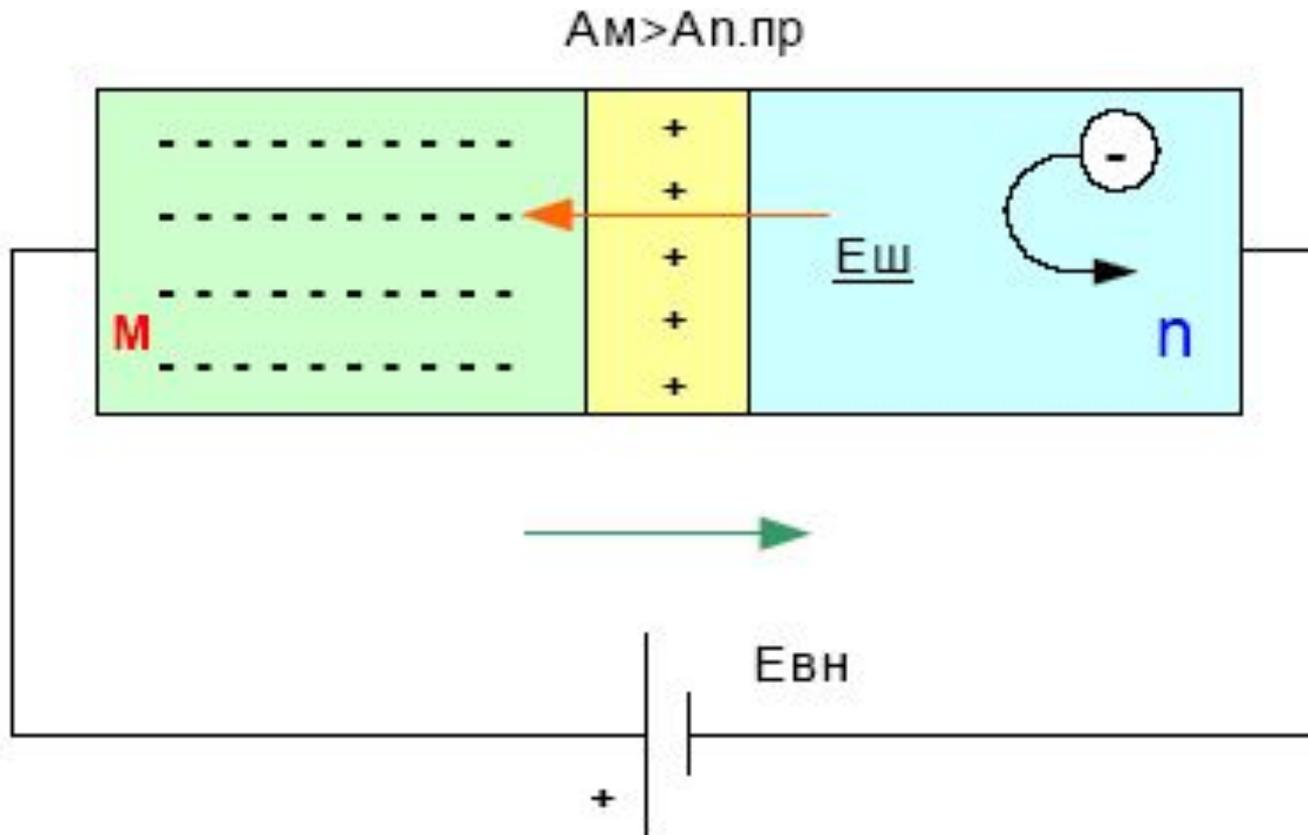
Контакт «металл – полупроводник»

Переходный слой, в котором существует контактное электрическое поле при контакте «металл – полупроводник», называется переходом Шоттки, по имени немецкого ученого Вальтера Германа Шоттки, который в 1938 г. первый получил основные математические соотношения для электрических характеристик переходов.

- Контактное электрическое поле на переходе Шоттки сосредоточено практически в полупроводнике, так как концентрация носителей заряда в металле значительно больше концентрации носителей заряда в полупроводнике. Перераспределение электронов в металле происходит в очень тонком слое, сравнимом с межатомным расстоянием.
- В зависимости от типа электропроводности полупроводника и соотношения работ выхода в кристалле может возникать обедненный, инверсный или обогащенный слой носителями электрических зарядов.

Переход Шоттки «металл-полупроводник»

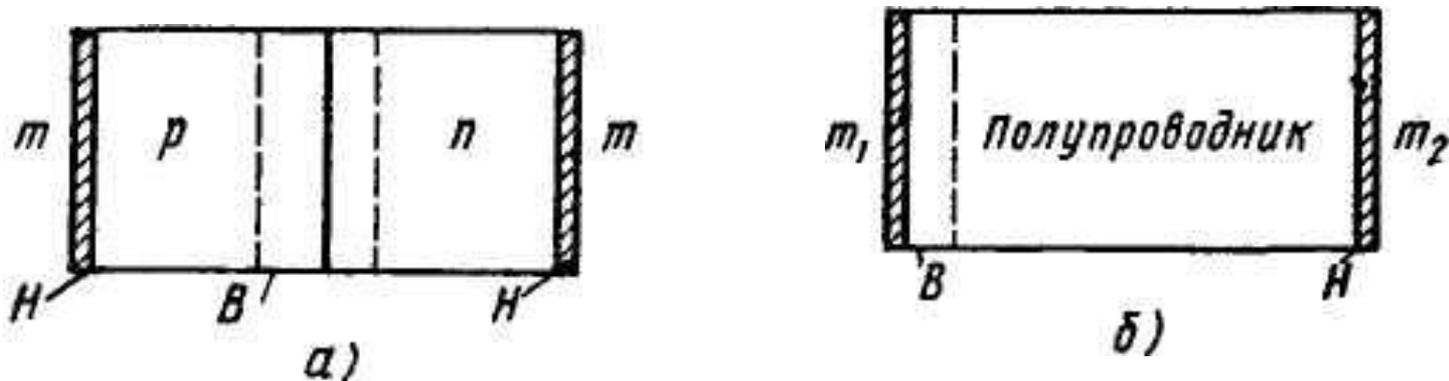
Переход Шоттки возникает на границе раздела металла и полупроводника n-типа, причём металл должен иметь работу выхода электрона большую, чем полупроводник. Обратный ток через переход Шоттки будет полностью отсутствовать, так как в металле не существует неосновных носителей зарядов.



Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод — это полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом и двумя внешними выводами, в котором используется то или иное свойство выпрямляющего перехода.

В качестве выпрямляющего электрического перехода в полупроводниковых диодах может быть электронно-дырочный переход, гетеропереход или контакт металл — полупроводник.



Структура полупроводниковых диодов:

а — с электронно-дырочным переходом;

б — с выпрямляющим контактом металл-полупроводник;

B — выпрямляющие контакты;

n — невыпрямляющие контакты.

Полупроводниковые диоды

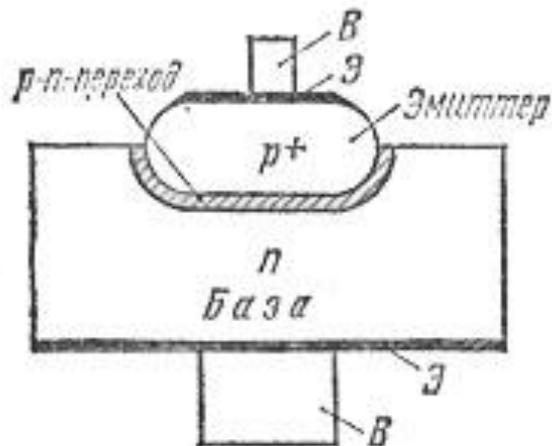


Одна из областей р-п-структуры, называемая *эмиттером*, имеет большую концентрацию основных носителей заряда, чем другая область, называемая *базой*.

База и эмиттер с помощью электродов Э соединяются с металлическими выводами В, посредством которых диод включается в электрическую цепь.

Основным структурным элементом полупроводникового диода, определяющим его функциональные свойства, является *р-п-переход* — тонкий промежуточный слой между р-п-областями. ⁵⁵

Полупроводниковые диоды



В зависимости от соотношения линейных размеров p - n - перехода и характеристической длины различают плоскостные и точечные диоды.

Характеристической длиной для диода является наименьшая из двух величин: средняя длина диффузии неосновных носителей в базе или толщина базы.

У **плоскостного** диода линейные размеры, значительно больше, а у **точечного** меньше характеристической длины.

Диод с толстой базой — это диод, толщина базы которого значительно превышает диффузионную длину неосновных носителей заряда ($W_n > L_p$).

Параметры диода

1) **Активное сопротивление.**

Для диода с толстой базой в области низких частот сопротивление не зависит от частоты.

При высоких частотах сопротивление падает обратно пропорционально корню квадратному из частоты, что в логарифмическом масштабе дает прямую линию

○ 2) **Диффузионная емкость.**

Диффузионная емкость диода с толстой базой не зависит от частоты на низких частотах и обратно пропорциональна корню квадратному из частоты при высоких частотах.

Низкочастотное значение диффузионной емкости диода с тонкой базой значительно меньше, чем диода с толстой базой.

○ 3) **Постоянная времени.**

При низких частотах постоянная времени диода с толстой базой много больше постоянной времени диода с тонкой базой. При высоких частотах постоянные времени любого диода должны быть равны между собой и равны $1/\omega$.

Пробой диода

Пробой диода — это явление резкого увеличения обратного тока через диод при достижении обратным напряжением некоторого критического для данного диода значения. В зависимости от физических явлений, пробой различают:

лавинный, туннельный и тепловой.

- **Лавинный пробой** связан с образованием лавины носителей заряда под действием сильного электрического поля, при котором носители приобретают энергии, достаточные для образования новых электронно-дырочных пар в результате ударной ионизации атомов полупроводника.
- Процесс ударной ионизации характеризуют **коэффициентами ударной ионизации**. Чтобы количественно охарактеризовать увеличение тока из-за процесса ударной ионизации в *p-n*-переходе диода вводят **коэффициенты лавинного умножения M_p и M_n** , показывающие, во сколько раз увеличивается ток данных носителей в результате ударной ионизации.

Пробой диода

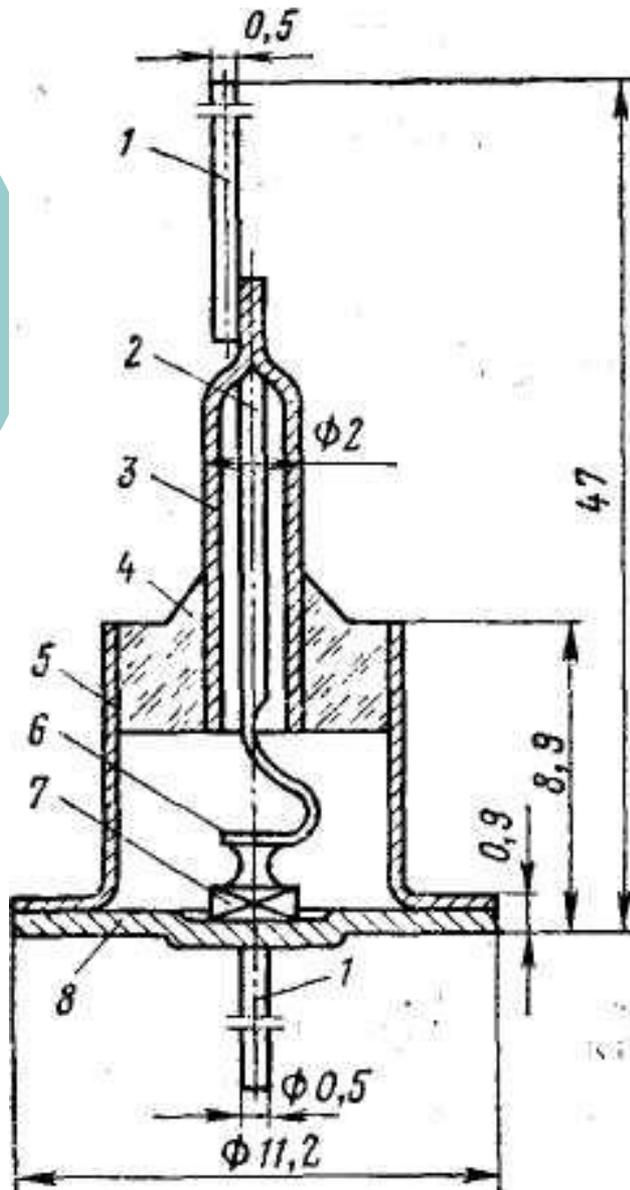
Туннельным пробоем электронно-дырочного перехода называют электрический пробой перехода, вызванный квантовомеханическим туннелированием носителей заряда сквозь запрещенную зону полупроводника без изменения их энергии. Туннелирование электронов возможно при условии, если ширина потенциального барьера, который необходимо преодолеть электронам, достаточно мала. При одной и той же ширине запрещенной зоны (для одного и того же материала) ширина потенциального барьера определяется напряженностью электрического поля, т. е. наклоном энергетических уровней и зон. Следовательно, условия для туннелирования возникают только при определенной напряженности электрического поля или при определенном напряжении на электронно-дырочном переходе — при пробивном напряжении. Значение этой критической напряженности электрического поля составляет примерно $8 \cdot 10^5$ В/см для кремниевых переходов и $3 \cdot 10^5$ В/см — для германиевых. Так как вероятность туннелирования очень сильно зависит от напряженности электрического поля, то внешне туннельный эффект проявляется как пробой диода.

Пробой диода

Особенности теплового пробоя в реальных диодах

Тепловой пробой в реальных диодах всегда происходит с образованием так называемого «шнура» или канала высокой проводимости, температура в котором превышает среднюю температуру остальной части $p-n$ -перехода. В свою очередь, образование шнура может быть вызвано либо дефектами в реальном $p-n$ -переходе, либо статистической флуктуацией плотности обратного тока по площади $p-n$ -перехода. Действительно, если в каком-нибудь месте $p-n$ -перехода в некоторый момент времени плотность обратного тока оказалась несколько выше плотности обратного тока в остальной части $p-n$ -перехода, то температура этого места $p-n$ -перехода будет выше из-за большей выделяющейся там удельной мощности. Увеличение температуры приведет к росту плотности обратного тока в данном месте $p-n$ -перехода в связи с увеличением тепловой генерации носителей либо в самом переходе, либо в областях полупроводника, прилегающих к $p-n$ -переходу. Локальное увеличение плотности тока вызовет локальное увеличение температуры, увеличение температуры вызовет увеличение плотности тока и т. д.

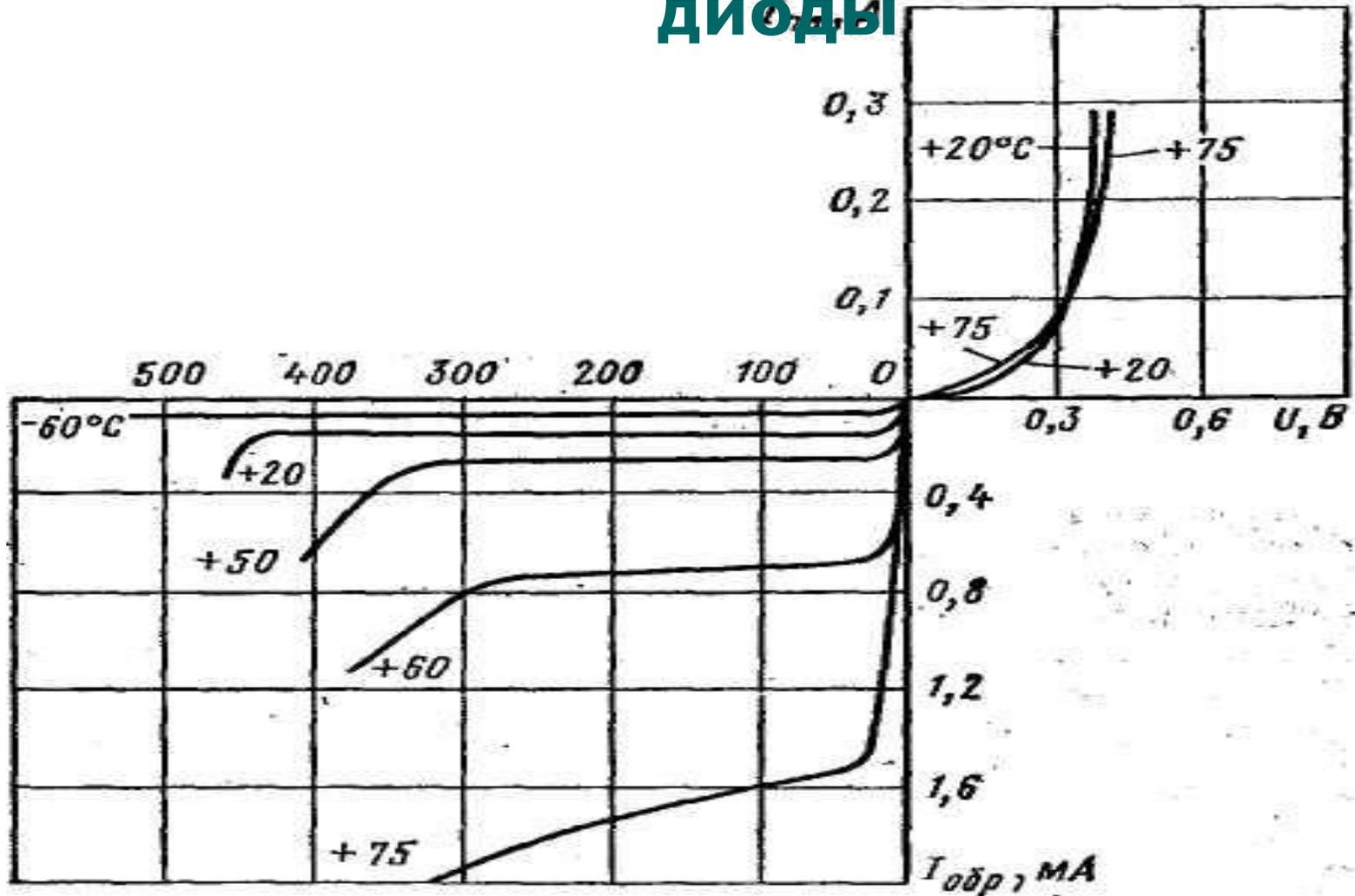
Выпрямительные плоскостные диоды



Конструкция германиевого
плоскостного диода Д7:

- 1 — наружные выводы;
- 2 — внутренний вывод;
- 3 — коваровая трубка;
- 4 — стеклянный проходной изолятор;
- 5 — коваровый баллон (корпус);
- 6 — электрод;
- 7 — кристалл германия;
- 8 — кристаллодержатель

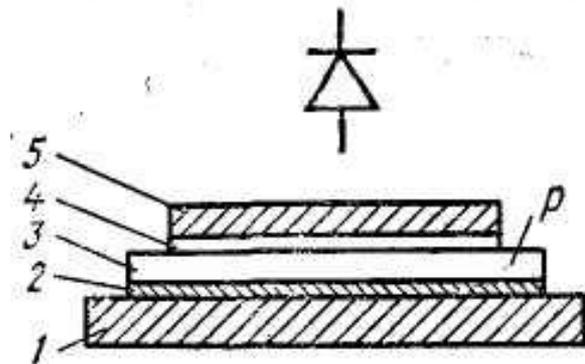
Выпрямительные плоскостные диоды



Вольт-амперные характеристики германиевого диода при различных температурах окружающей среды.

Селеновые выпрямители

Селеновые выпрямительные пластины изготавливают на стальной или алюминиевой подложке (основании). В целях обеспечения возможно меньшего переходного сопротивления на подложку наносят дополнительное покрытие. На стальные основания гальваническим методом осаждают никель, а на алюминиевые — тонкий слой (1—2 мкм) висмута или никеля (висмут наносят испарением в вакууме).



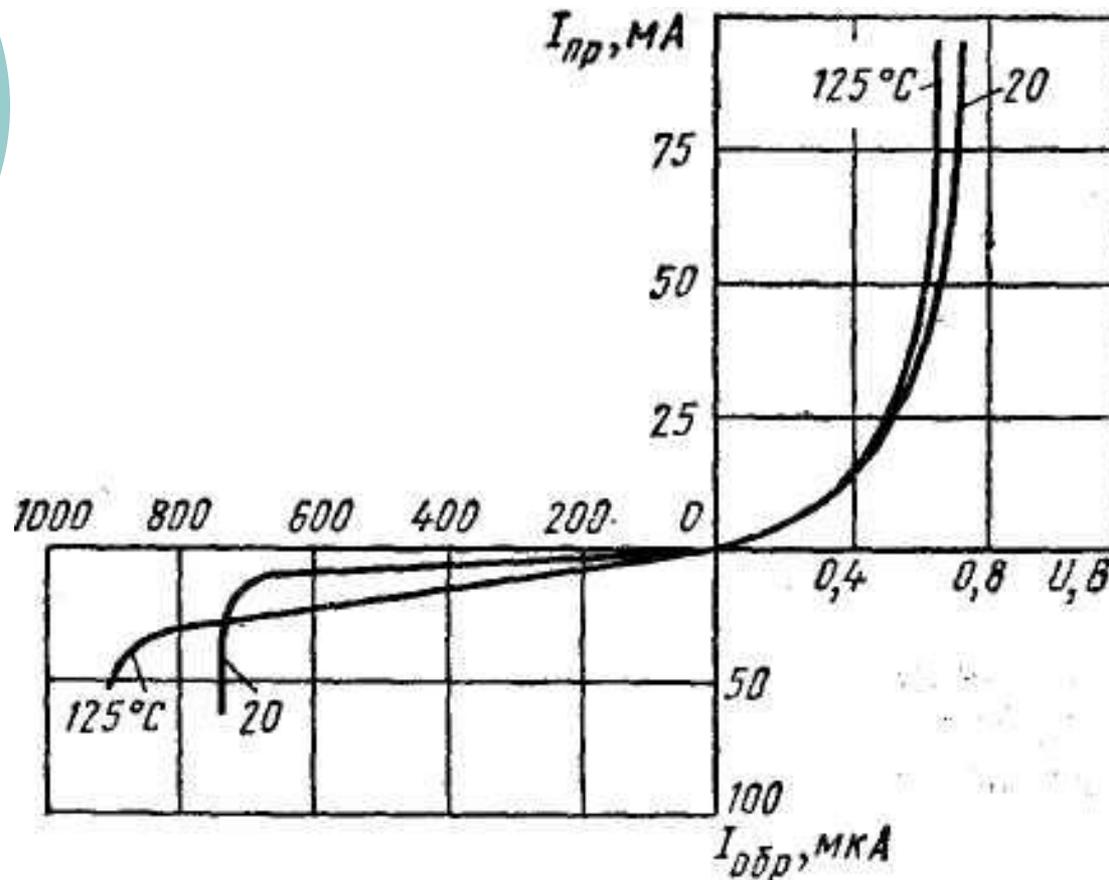
Структура селеновой выпрямительной пластины:

- 1 — стальная или алюминиевая подложка;
- 2 — слой висмута или никеля;
- 3 — слой селена;
- 4 — слой селенида кадмия;
- 5 — электрод из сплава висмута, кадмия и олова



Кремниевые выпрямительные плоскостные диоды

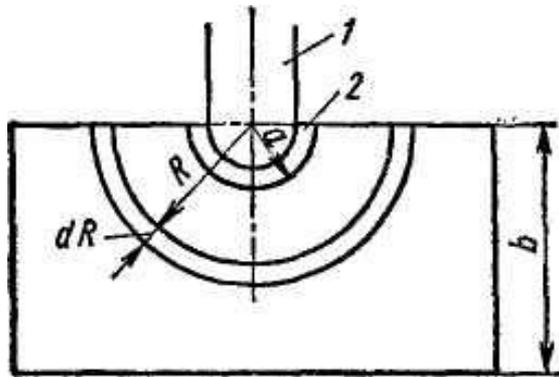
- Выпрямительный полупроводниковый диод — это полупроводниковый диод, предназначенный для выпрямления переменного тока.



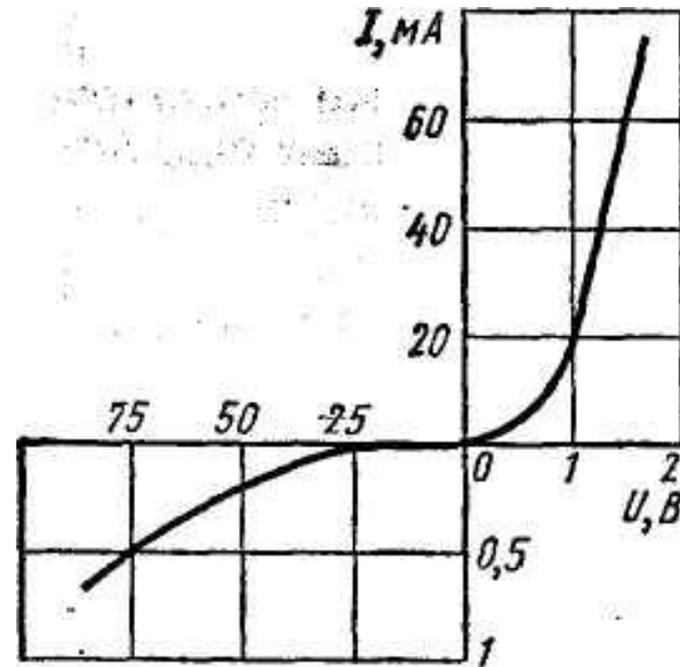
Вольт-амперные характеристики кремниевого диода Д211 при разных температурах окружающей среды.

Выпрямительные точечные высокочастотные диоды

Конструкция германиевого точечного диода показана на рисунке. Диод состоит из кристалла германия, припаянного к кристаллодержателю, контактного электрода в виде тонкой проволоочки и стеклянного баллона.



Структура точечного р-п-перехода:
 1 — металлический проволочный электрод;
 2 — слой полупроводника с электропроводностью р-типа в полупроводнике n-типа



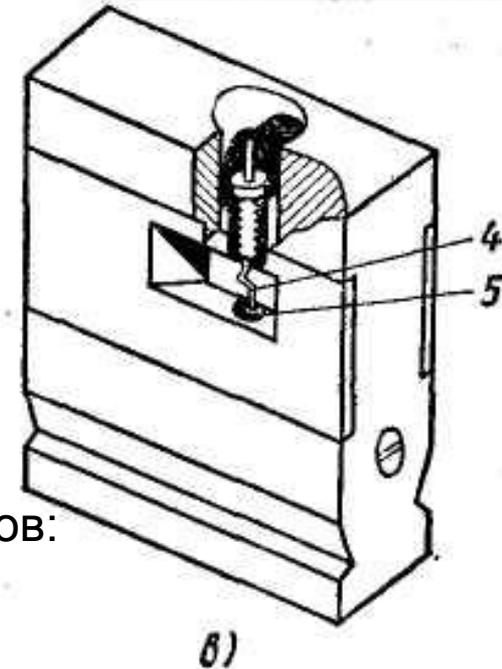
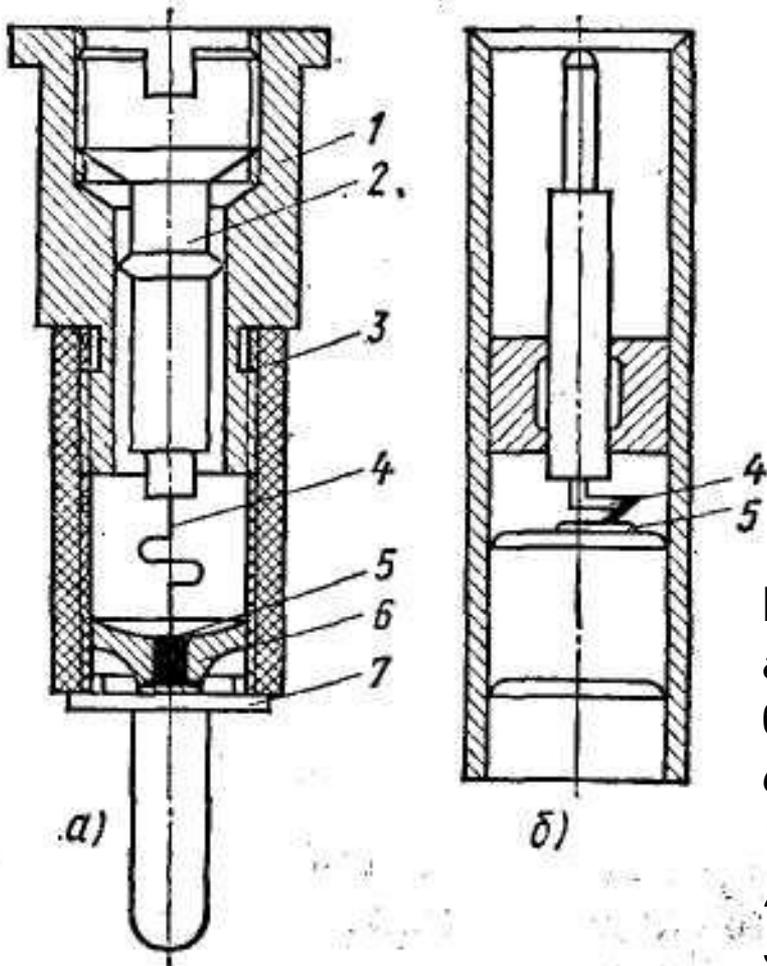
Вольт-амперная характеристика германиевого точечного диода

Сверхвысокочастотный диод



Сверхвысокочастотный диод — полупроводниковый диод, предназначенный для работы в сантиметровом диапазоне волн. Диод содержит между двумя сильно легированными областями высокой проводимости $n+$ и $p+$ активную базовую i -область с низкой проводимостью и большим временем жизни носителей заряда, то есть $p-i-n$ -переход. Это позволяет снизить его емкость и повысить частоту работы элемента.

Сверхвысокочастотный диод



Конструкция СВЧ- диодов:

а — патронная;

б — коаксиальная;

в — волноводная;

1 — верхний фланец;

2 — настроечный штифт;

3 — керамическая втулка;

4 — контактная пружинка;

5 — кристалл полупроводника;

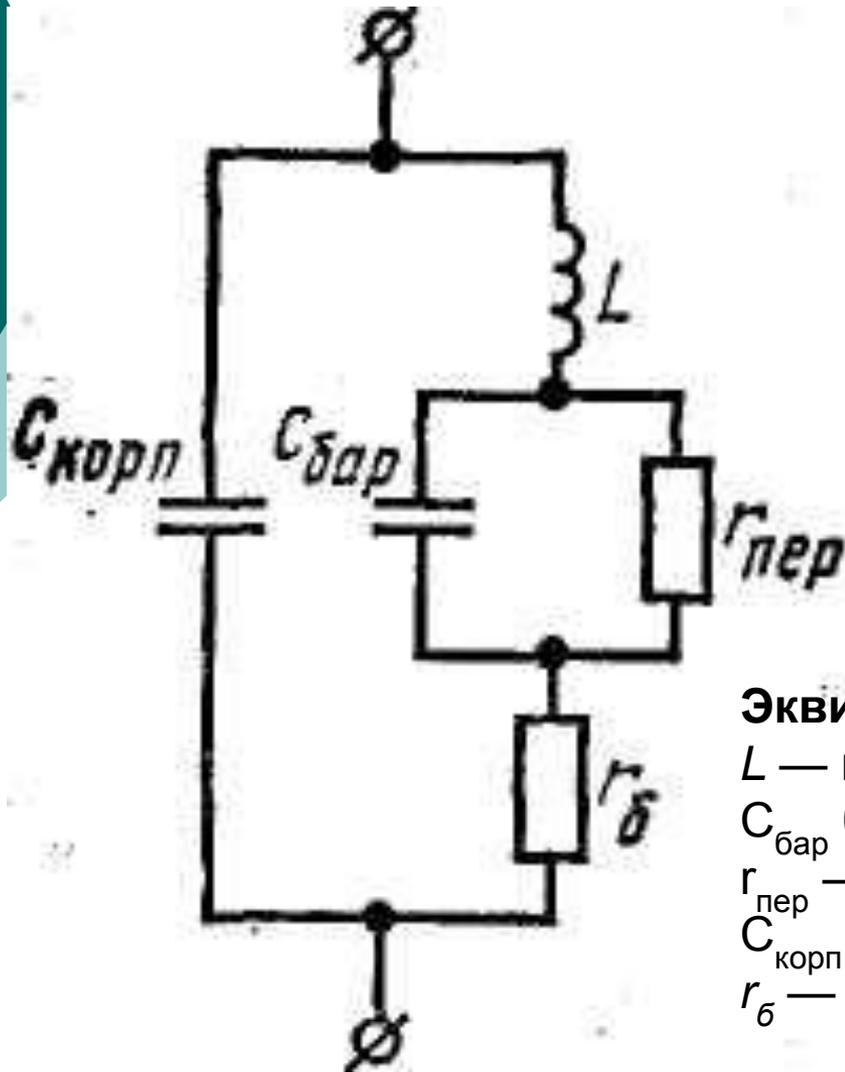
6 — кристаллодержатель;

7 — нижний фланец

Отступление

Эквивалентная схема (схема замещения, эквивалентная схема замещения) — электрическая схема, в которой все реальные элементы заменены максимально близкими по функциональности цепями из идеальных элементов.

Сверхвысокочастотный диод



Эквивалентная схема СВЧ-диода:

- L — индуктивность контактной пружины;
- $C_{бар}$ — барьерная емкость р-п-перехода;
- $r_{пер}$ — сопротивление р-п-перехода;
- $C_{корп}$ — емкость корпуса;
- $r_{б}$ — сопротивление растекания.

СВЧ - диоды

Переключательные диоды

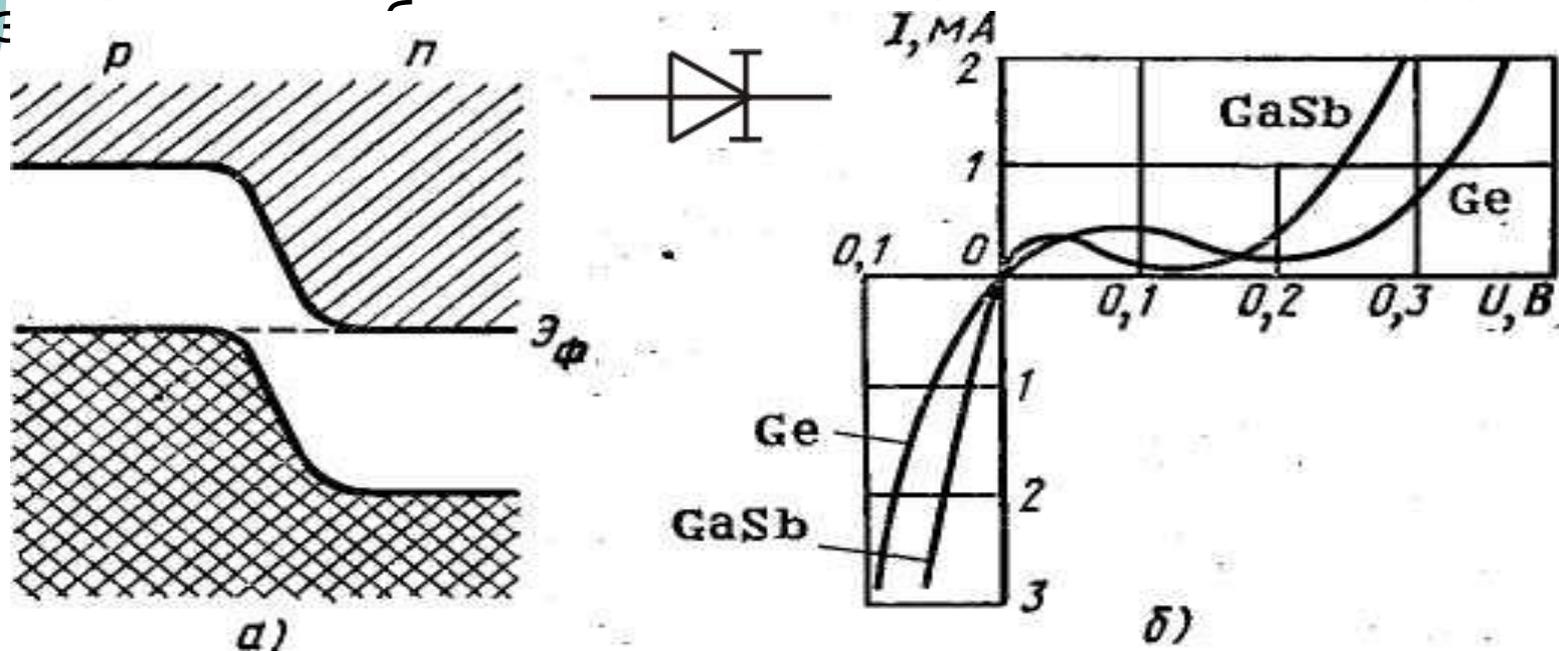
В переключательных диодах используется резкое изменение сопротивления диода переменному току при подаче на него прямого и обратного постоянного смещения. Переключательные диоды можно подразделить на *резонансные* и *нерезонансные*.

○ **Преобразовательные диоды**

Преобразовательные СВЧ-диоды применяют в качестве *смесителей*, *умножителей* и *модуляторов*. Все эти функции диоды могут выполнять благодаря нелинейности вольт-амперной характеристики.

Обращенные диоды

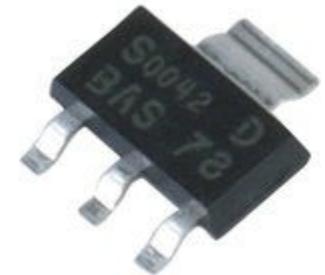
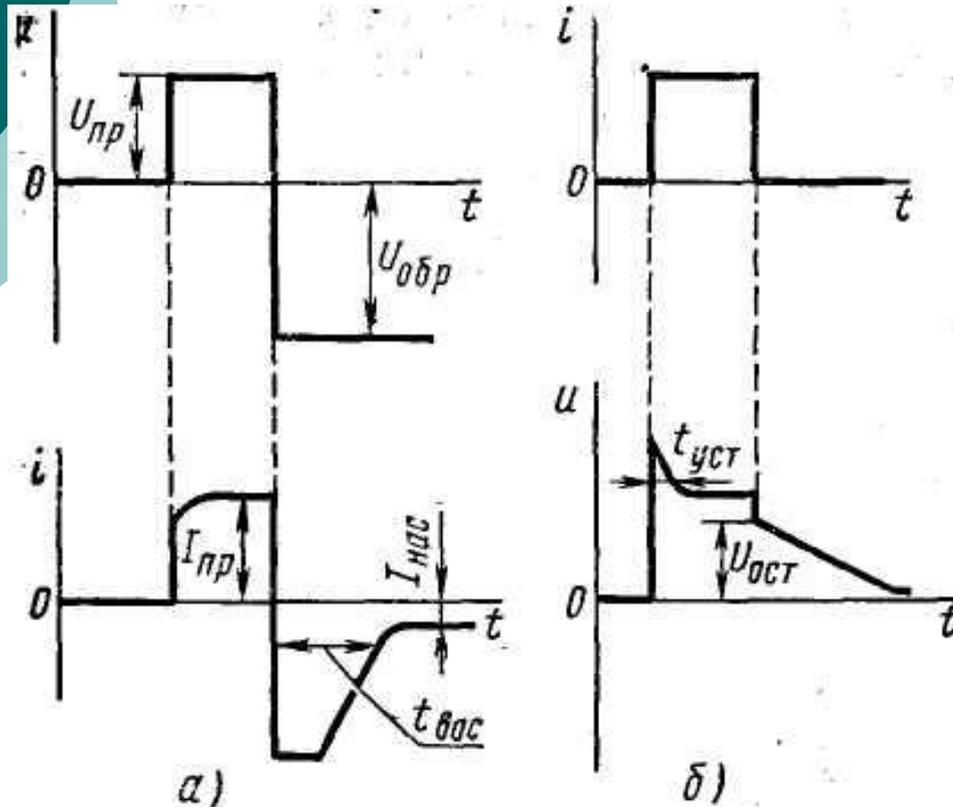
Обращенным называют диод на основе полупроводника с критической концентрацией примесей, в котором проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта



Энергетическая диаграмма (а) и вольт-амперные характеристики (б) обращенных диодов

Импульсные диоды

Импульсный полупроводниковый диод — это полупроводниковый диод, предназначенный для применения в импульсных режимах. Импульсные диоды чаще всего работают при больших сигналах.



Осциллограммы токов и напряжений для импульсных диодов при его работе в схемах с генератором напряжения (а) и с генератором тока (б)

Варикапы



Варикап — это полупроводниковый диод, в котором используется зависимость емкости от величины обратного напряжения и который предназначен для применения в качестве элемента с электрически управляемой емкостью.

Основные параметры

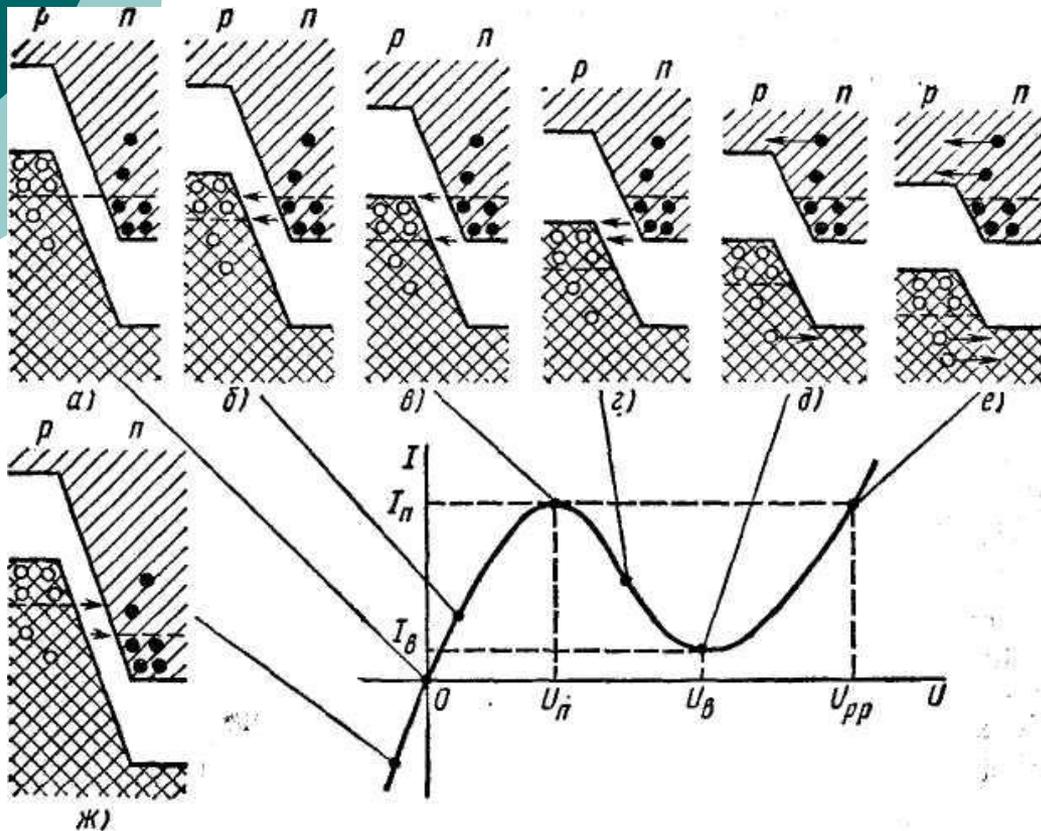
- 1. Емкость варикапа C_v** — емкость, измеренная между выводами варикапа при заданном обратном напряжении. Для различных варикапов емкость может быть от нескольких единиц до нескольких сотен пикофарад.
- 2. Коэффициент перекрытия по емкости K_c** — отношение емкостей варикапа при двух заданных значениях обратных напряжений. Значение этого параметра составляет обычно несколько единиц.
- 3. Добротность варикапа Q_v** — отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте переменного сигнала к сопротивлению потерь при заданном значении емкости или обратного напряжения. Добротность — это величина, обратная тангенсу угла диэлектрических потерь. Добротность варикапов измеряют обычно при тех же напряжениях смещения, что и емкость. Значение добротности — от нескольких десятков до нескольких сотен.

Туннельные диоды

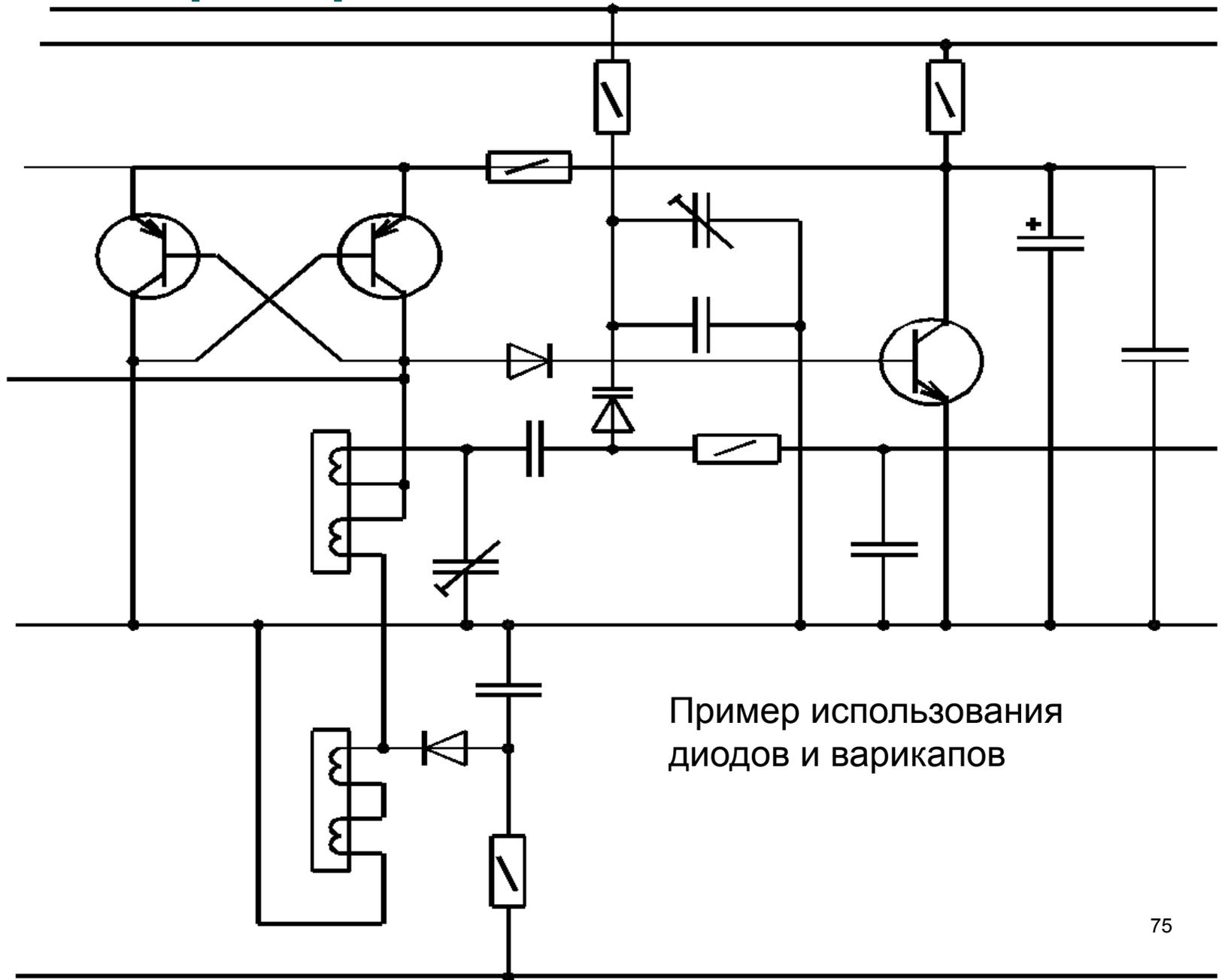
Туннельный диод — это полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольт-амперной характеристике при прямом напряжении участка отрицательной дифференциальной проводимости.

Ведет-амперная характеристика и энергетические диаграммы туннельного диода при:

- а — отсутствии напряжения;
- б — небольшом прямом напряжении;
- в — напряжении пика;
- г — напряжении, соответствующем отрицательному дифференциальному сопротивлению;
- д — напряжению впадины;
- е — напряжении, вызывающем значительный инжекционный ток;
- ж — обратном напряжении



Пример включения диодов



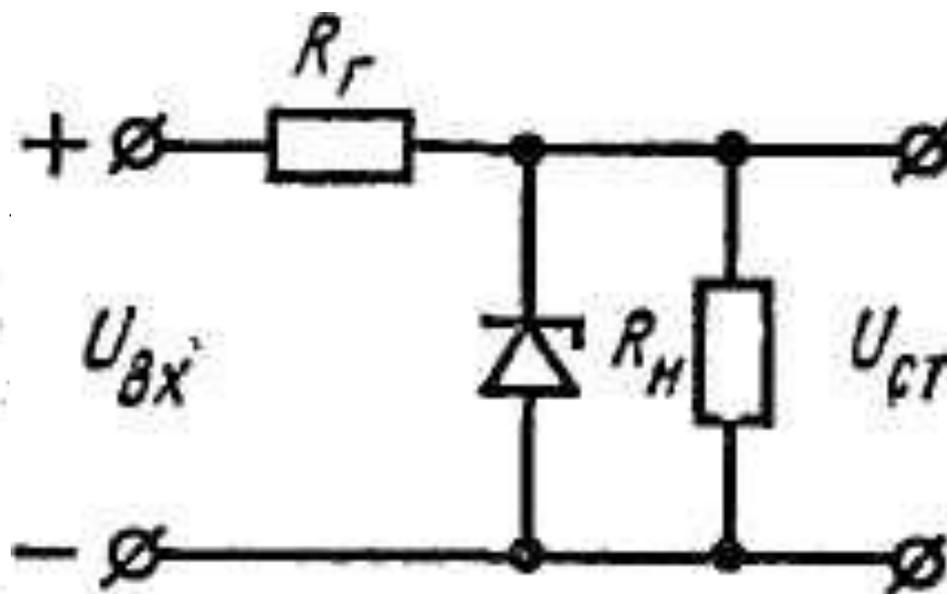
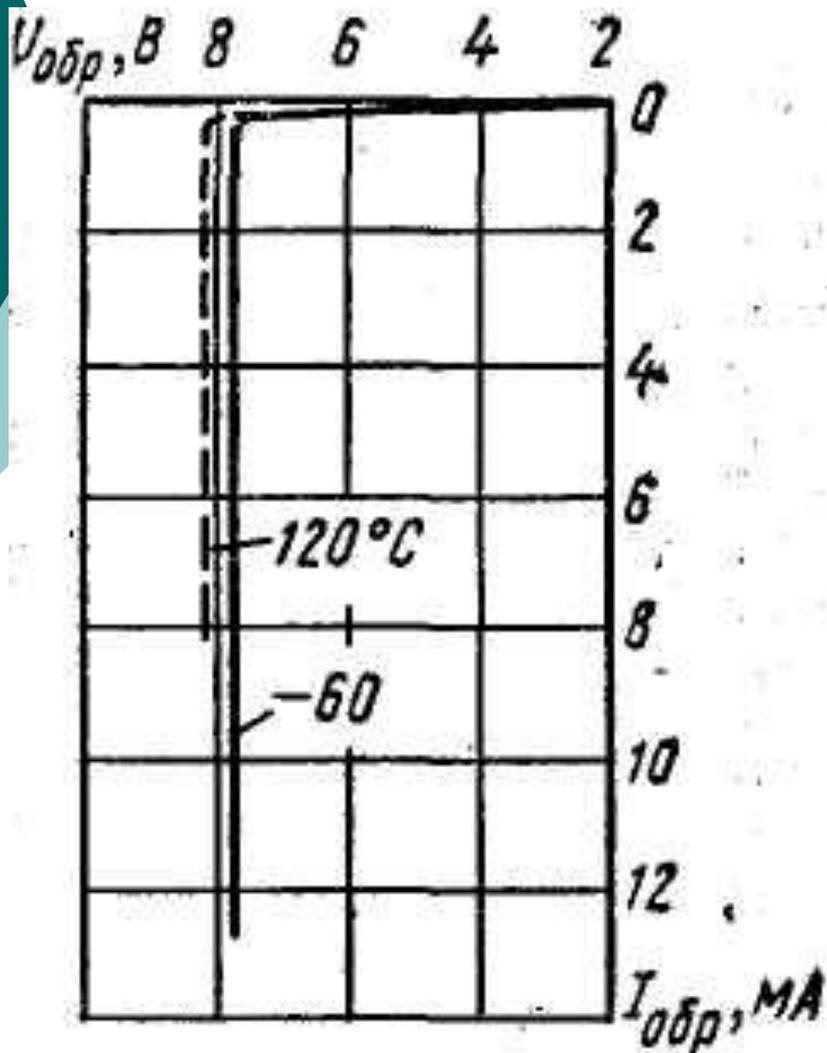
Пример использования
диодов и варикапов

Стабилитроны

При лавинном и туннельном пробое диодов происходит резкое увеличение обратного тока, а обратное напряжение изменяется очень мало. Это свойство использовано для создания стабилизаторов напряжения — полупроводниковых стабилитронов.

- До наступления пробоя через стабилитрон протекают незначительные токи утечки, а его сопротивление весьма высоко. При наступлении пробоя ток через стабилитрон резко возрастает, а его дифференциальное сопротивление падает до величины, составляющей для различных приборов от долей Ом до сотен Ом. Поэтому в режиме пробоя напряжение на стабилитроне поддерживается с заданной точностью в широком диапазоне обратных токов

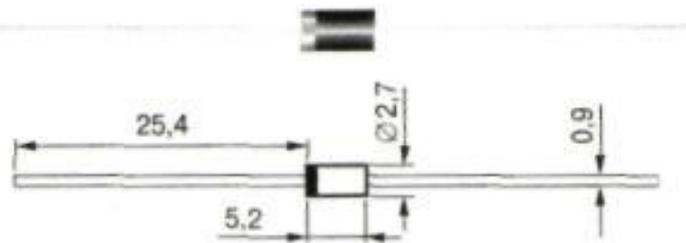
Стабилитроны



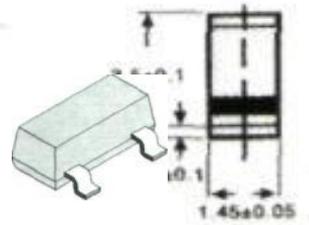
Вольт-амперная характеристика и схема включения стабилитронов

Стабилитроны

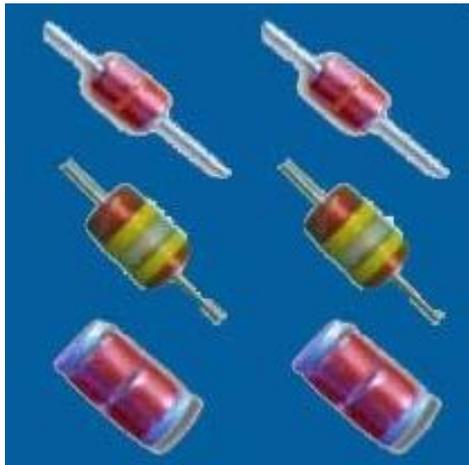
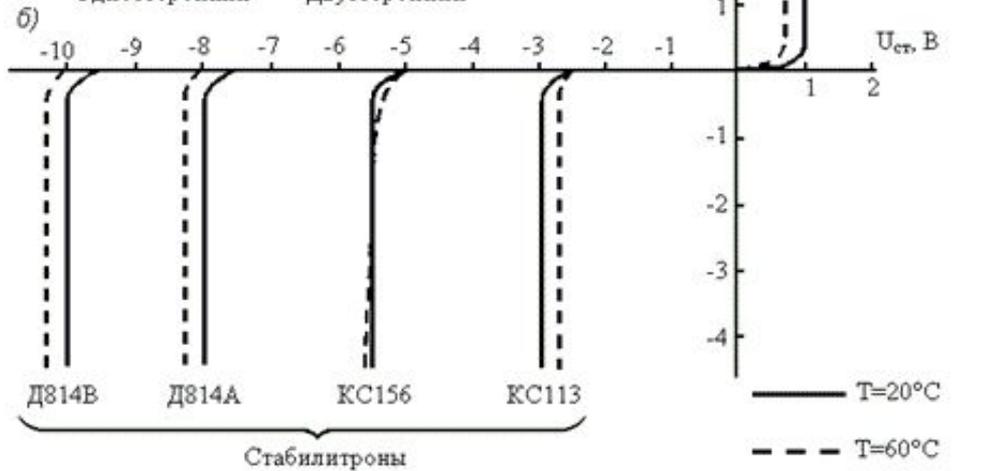
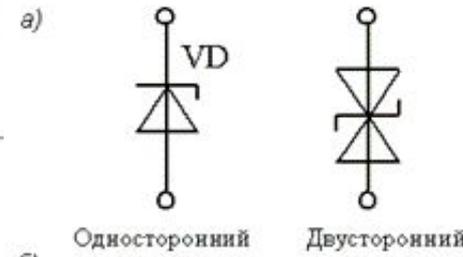
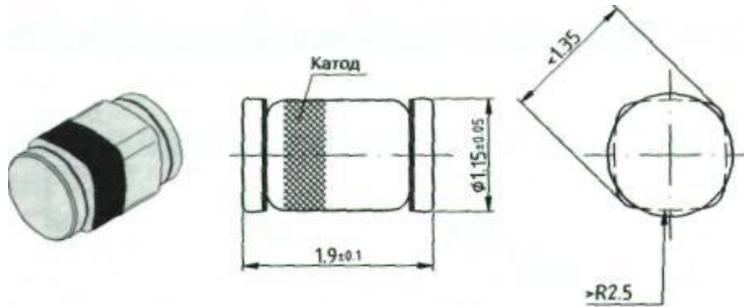
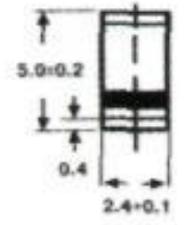
DO-41



DL-35

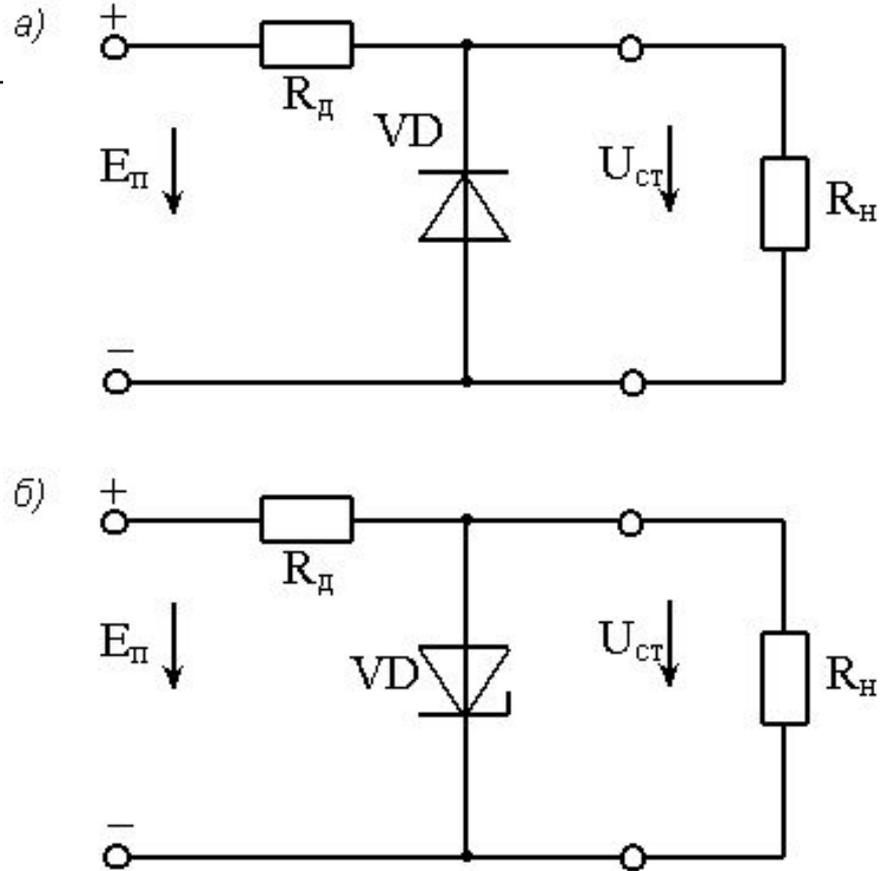


DL-41



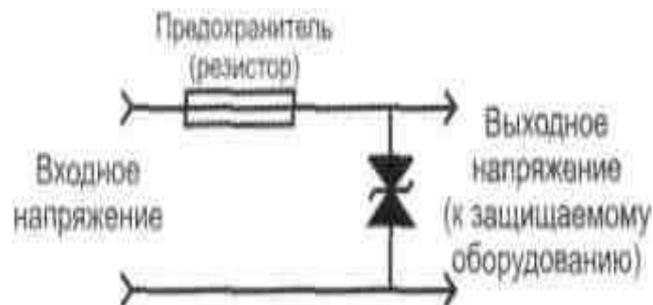
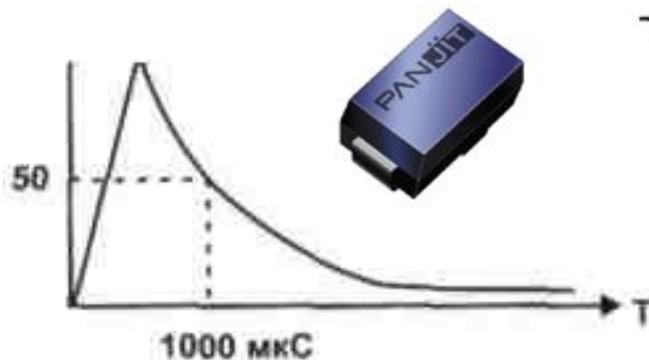
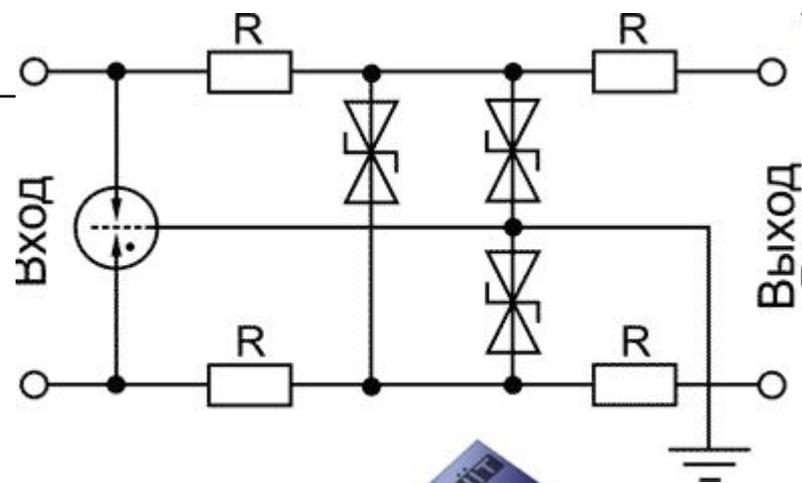
Стабилитроны

Стабилизацию постоянного напряжения можно также получить при использовании диода, включенного в прямом направлении. Диод, в котором для стабилизации напряжения используется прямая ветвь вольт-амперной характеристики, называют стабистором.



Супрессоры

Компоненты с симметричной ВАХ, подобной характеристике стабилитрона. Принцип действия этих приборов следующий (см. рис.). В случае повышения входного напряжения (более напряжения срабатывания прибора), прибор резко уменьшает свое сопротивление (создается короткое замыкание), в результате чего возрастает ток в цепи и либо сгорает предохранитель, либо излишняя мощность выделяется в виде тепла на резисторе. Таким образом оборудование оказывается полностью защищенным от бросков напряжения. Термин «ДВУНАПРАВЛЕННЫЙ» указывает на возможность работы прибора с двуполярными напряжениями, «ОДНОНАПРАВЛЕННЫЙ» - только с напряжениями одной полярности.



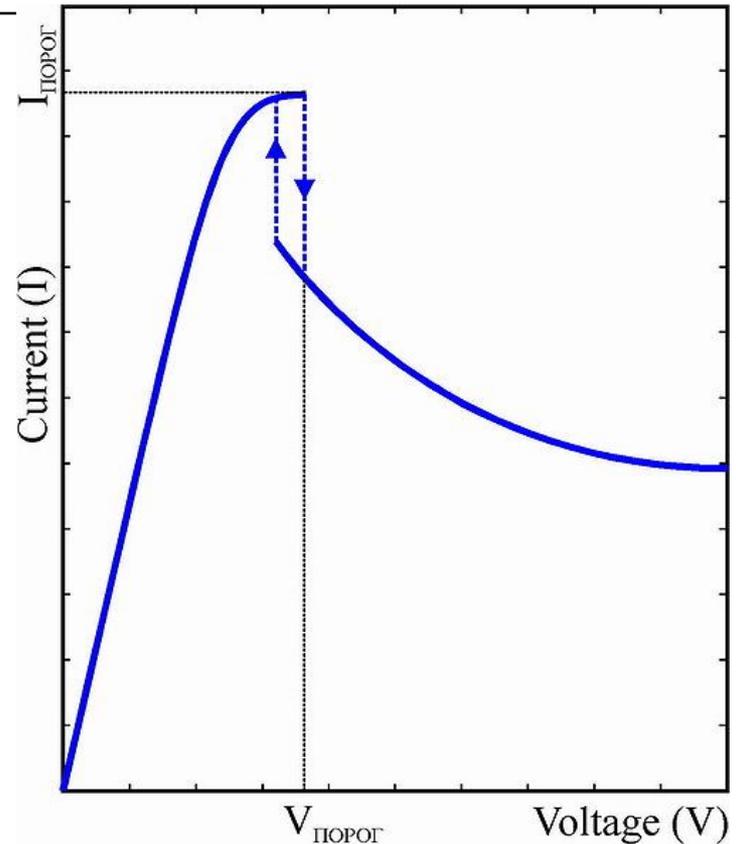
Диоды Гана

Диод Ганна - тип полупроводниковых диодов, использующийся для генерации и преобразования колебаний в диапазоне СВЧ на частотах от 0,1 до 100 ГГц. В отличие от других типов диодов, принцип действия диода Ганна основан не на свойствах p-n-переходов, т.е. все его свойства определяются не эффектами, которые возникают в местах соединения двух различных полупроводников, а собственными свойствами применяемого полупроводникового материала.

Диоды Гана

Эффект Гана проявляется в полупроводниках n-типа проводимости в сильных электрических полях.

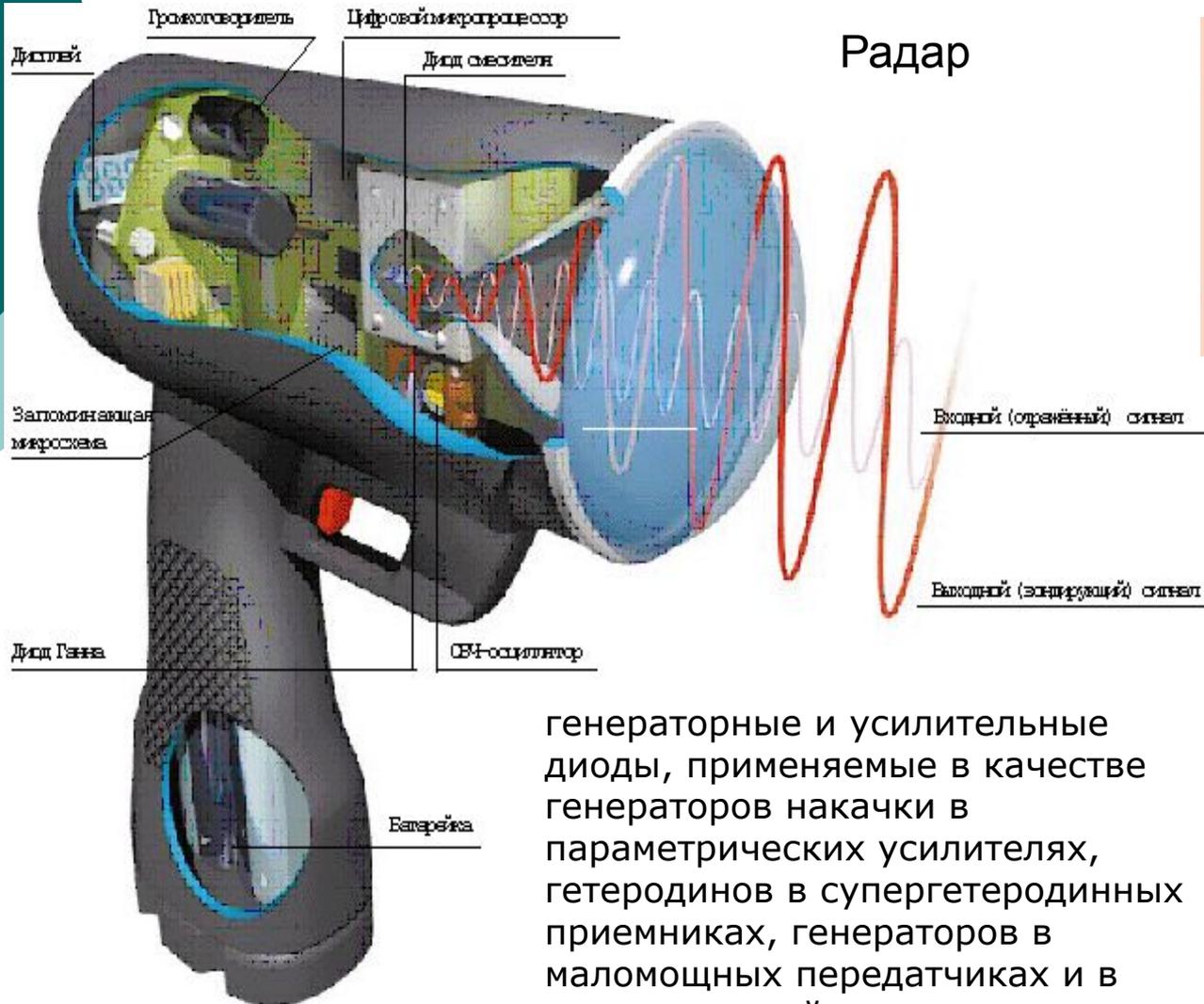
- Сущность эффекта Гана состоит в том, что если в полупроводнике создать напряжённость электрического поля, большую $E_{кр}$, но меньшую $E_{пор}$, на участке характеристики, то в полупроводнике возникнут электрические колебания сверхвысокой частоты (СВЧ) до 3 ТГц. Эффект Гана применяется в диодах Гана, которые используются как маломощные генераторы СВЧ.



Диоды Гана

В иностранной же литературе диоду Ганна соответствует термин ТЭД (Transferred Electron Device).

Диоды Ганна



Электрически управляемые генераторы на диоде Ганна

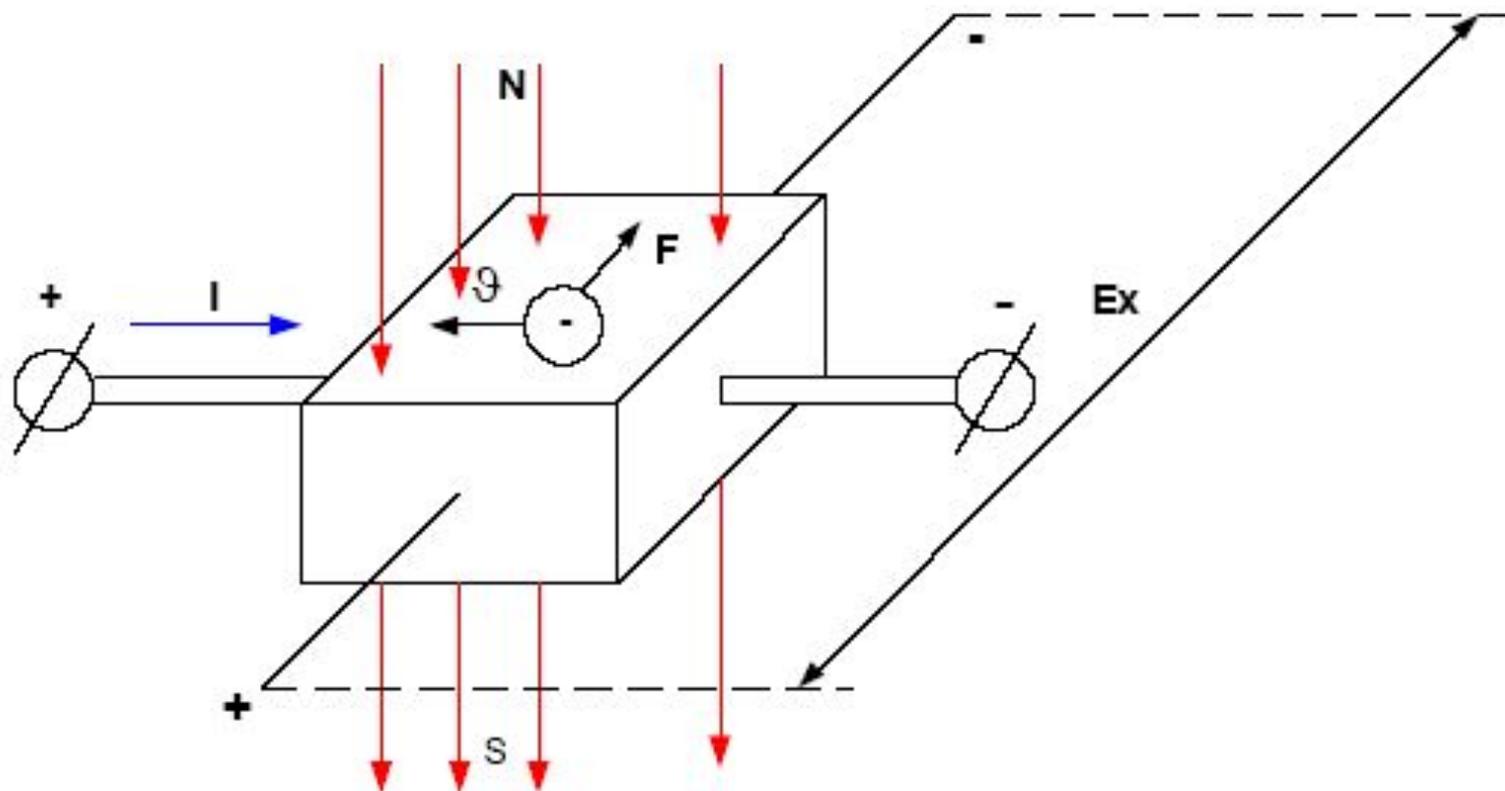


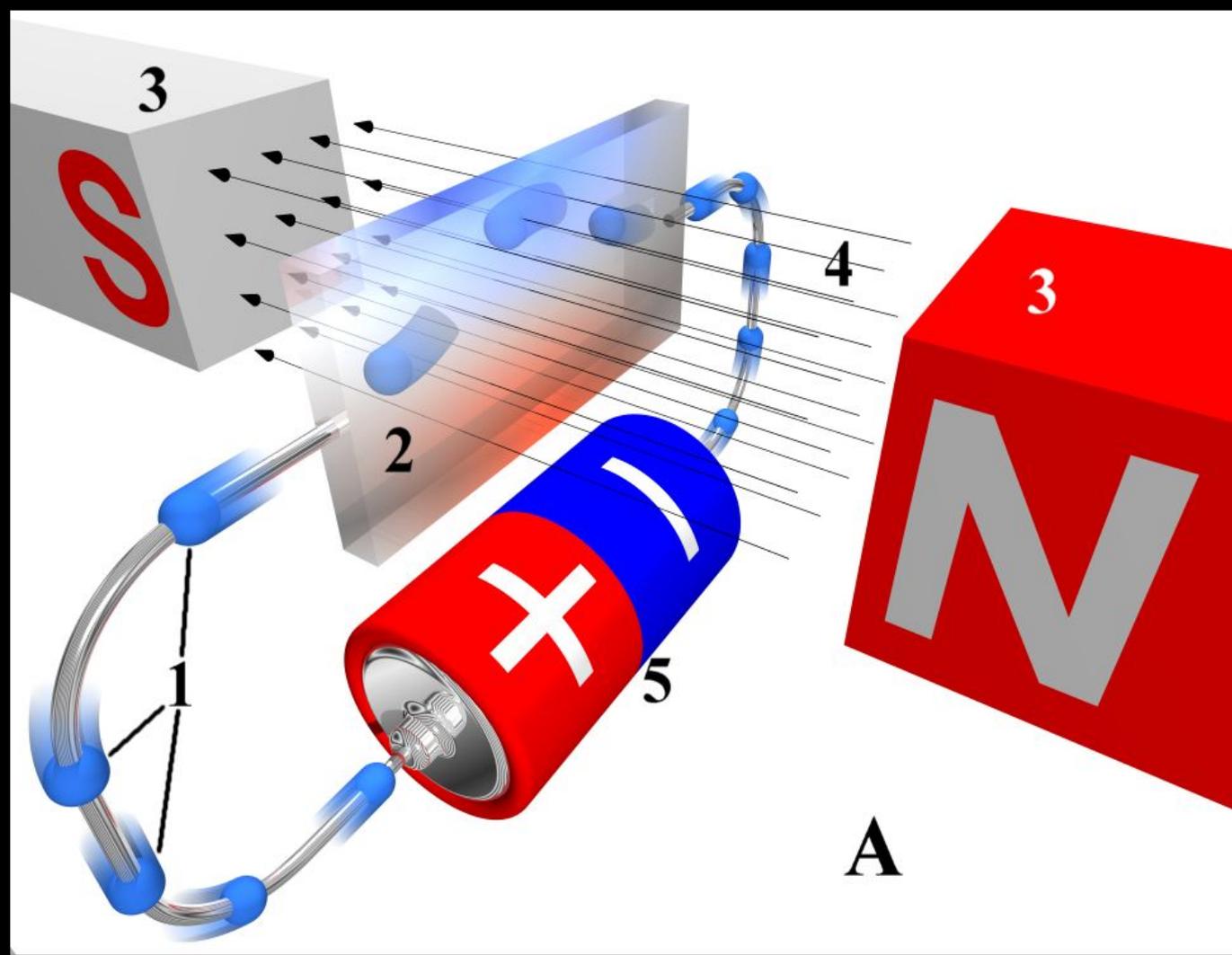
3A703B

генераторные и усилительные диоды, применяемые в качестве генераторов накачки в параметрических усилителях, гетеродинов в супергетеродинных приемниках, генераторов в маломощных передатчиках и в измерительной технике.

Диоды Холла

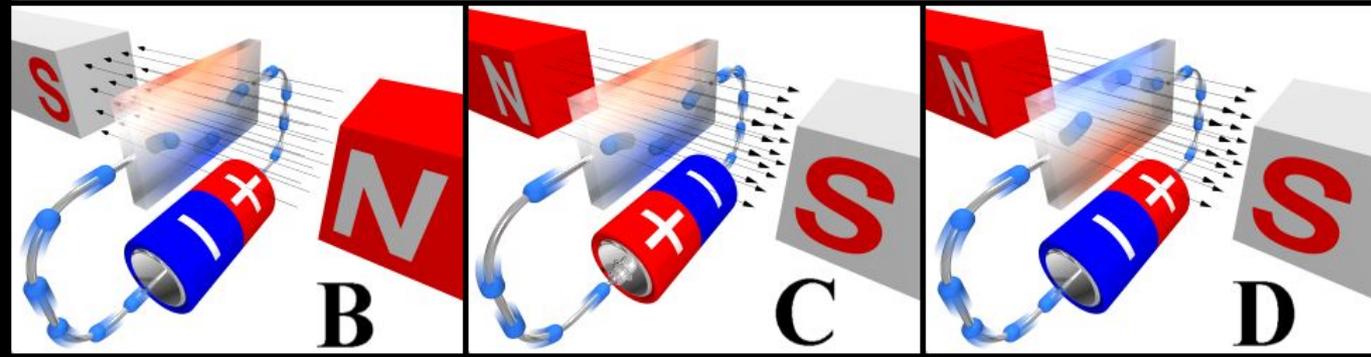
Эффект Холла проявляется в полупроводниках n-типа проводимости с протекающими через них токами и помещёнными в магнитное поле.





Эффект Холла

1. Электроны
2. Зонд
3. Магниты
4. Магнитное поле
5. Источник ток



Датчики Холла

Эффект Холла, в некоторых случаях, позволяет определить тип носителей заряда (электронный или дырочный) в металле или полупроводнике, что делает его достаточно хорошим методом исследования свойств полупроводников.

<http://web.archive.org/web/20080120010611/www.effects.ru/science/72/index.htm>

На основе эффекта Холла работают датчики Холла: приборы, измеряющие напряжённость магнитного поля. Датчики Холла получили очень большое распространение в бесколлекторных, или вентильных, электродвигателях (сервомоторах). Датчики закрепляются непосредственно на статоре двигателя и выступают в роли ДПР (датчика положения ротора). ДПР реализует обратную связь по положению ротора, выполняет ту же функцию, что и коллектор в коллекторном ДПТ.

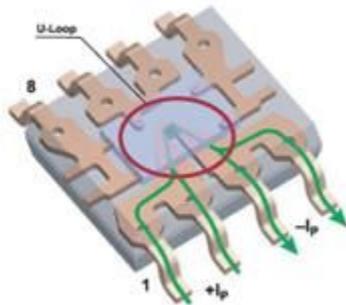
Датчики Холла



Датчик Холла, используемый для измерения силы тока в проводнике. В отличие от трансформатора тока, измеряет также и постоянный ток.



Volkswagen Technical Site
<http://volkswagen.msk.ru>



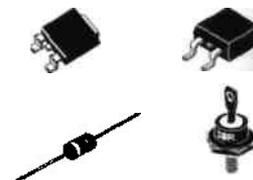
Диоды Шоттки

Диод Шоттки — полупроводниковый диод с малым падением напряжения при прямом включении. Используют переход металл-полупроводник в качестве барьера Шоттки (вместо р-п перехода, как у обычных диодов). На практике большинство диодов Шоттки применяется в низковольтных цепях при обратном напряжении порядка единиц и нескольких десятков вольт.

Диоды Шоттки

Наиболее важными характеристиками диодов Шоттки, определяющими их использование, являются низкое прямое падение напряжения, высокое быстродействие, фактическое отсутствие заряда обратного восстановления. Чаще всего они применяются в мощных выпрямителях на высоких скоростях переключения, могут быть также использованы в импульсных источниках питания, конверторах, устройствах заряда батарей. Температурный диапазон зависит от корпуса и составляет обычно $-55...+150$ °C для пластмассовых и $-65...+150$ °C для металлических корпусов.

- **Диоды Шоттки для поверхностного монтажа**
- **Диоды Шоттки для объемного монтажа**
- **Модули на диодах Шоттки**

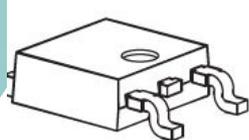


- **Выпрямительные диоды в пластмассовых корпусах**

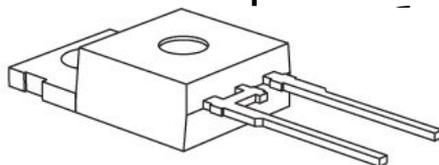


КАРБИДОКРЕМНИЕВЫЕ ДИОДЫ СЕМЕЙСТВА THINQ

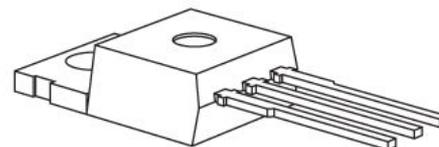
Карбидокремниевые диоды семейства ThinQ с барьером Шоттки обладают всеми достоинствами традиционных диодов Шоттки при значительно более высоком рабочем напряжении. Область применения: корректоры коэффициента мощности и выпрямительные цепи источников электропитания радиопередающего и



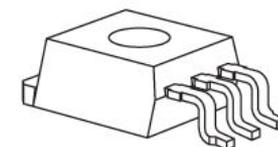
TO-252



TO-220-2



TO-220-3



TO-263

- Ток: до 20 А.
- Напряжение: до 600 В.
- Мощность: до 90 Вт.
- Система обозначений: SD P 06 S 60

- 1) Диод семейства ThinQ
- 2) Тип корпуса: D–TO-252 (D-Pak), B–TO-263, (D2-Pak), P–TO-220-3, T–TO-220-2
- 3) Ток нагрузки, А
- 4) Максимальное рабочее напряжение (x10), В

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ДИОДЫ СЕРИИ EmCon

Область применения:
силовые электроприводы,
источники бесперебойного питания,
сварочные аппараты.

- Ток: 3 - 45 А.
- Напряжение: до 600 – 1200 В.
- Мощность: до 143 Вт.
- Система обозначений: ID P 06 E 60



Диодные сборки

Выпрямительные диодные сборки

Диодные сборки состоят из двух диодов, имеющих общий вывод катодов, и предназначены для работы в выпрямительных схемах.

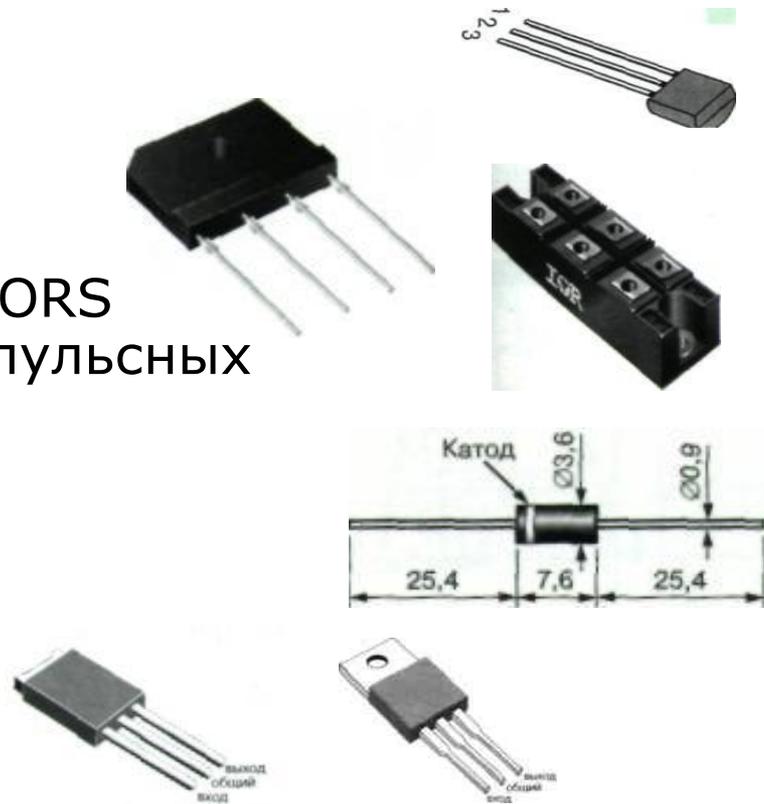
- Однофазные мосты
- Трехфазные диодные мосты
- Защитные диоды

TRANSIENT VOLTAGE SUPPRESSORS

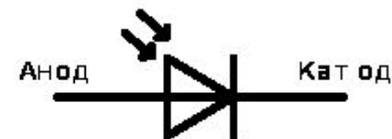
диоды для защиты цепей от импульсных выбросов напряжения

Макс, имп. ток, до 150 А

- Стабилизаторы напряжения

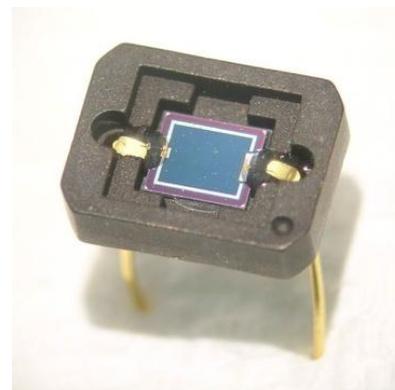
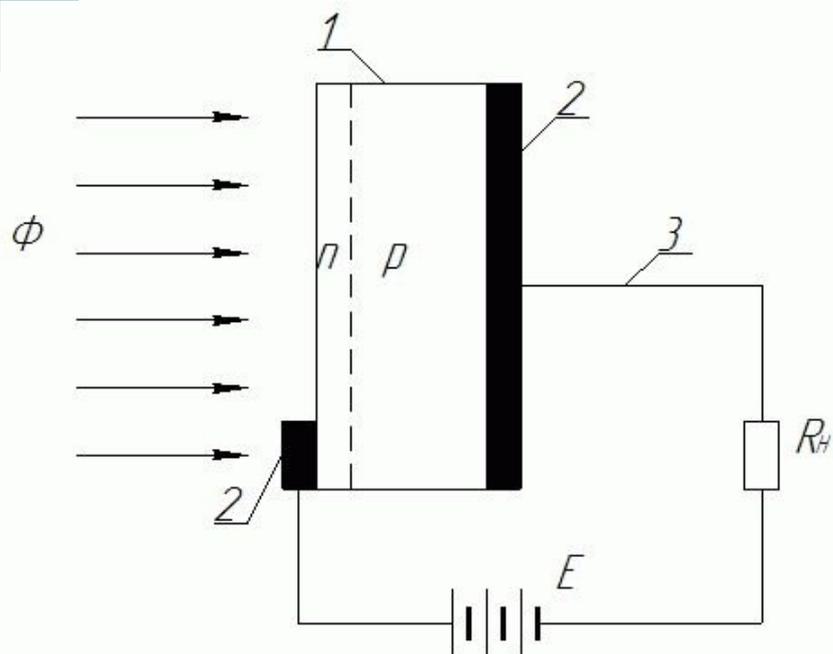


ФОТОДИОДЫ



Фотодиод — приёмник оптического излучения, который преобразует попавший на его фоточувствительную область свет в электрический заряд за счёт процессов в р-п-переходе.

Фотодиод, работа которого основана на фотовольтаическом эффекте (разделение электронов и дырок в р- и п- области, за счёт чего образуется заряд (ЭДС)) называется солнечным элементом.



ФД-10-100 активная
площадь-10x10 мм²

- 1 — кристалл полупроводника;
- 2 — контакты;
- 3 — выводы;
- Φ — поток электромагнитного излучения;
- E — источник постоянного тока;
- R_н — нагрузка.

Солнечные батареи



Плоские
(стандартные батареи)



Сферические
(Повышенный КПД)



Прозрачные
(для покрытия стекол зданий)



Индивидуальная электростанция



Солнечное поле

Стрелочный привод Hydra-Switch 3000LP

Стрелочный привод типа Hydra-Switch 3000LP компании Global Signaling (США) имеет безредукторный переводной механизм, дистанционное управление по радиосвязи или с использованием глобальной коммуникационной сети. Он имеет гидравлический привод, сервомотор которого может получать питание от солнечной батареи.



Солнечный поезд

В Бельгии пущен в эксплуатацию первый в Европе поезд, движимый энергией Солнца. Солнечные панели установлены на крыше туннеля, где проходит состав.

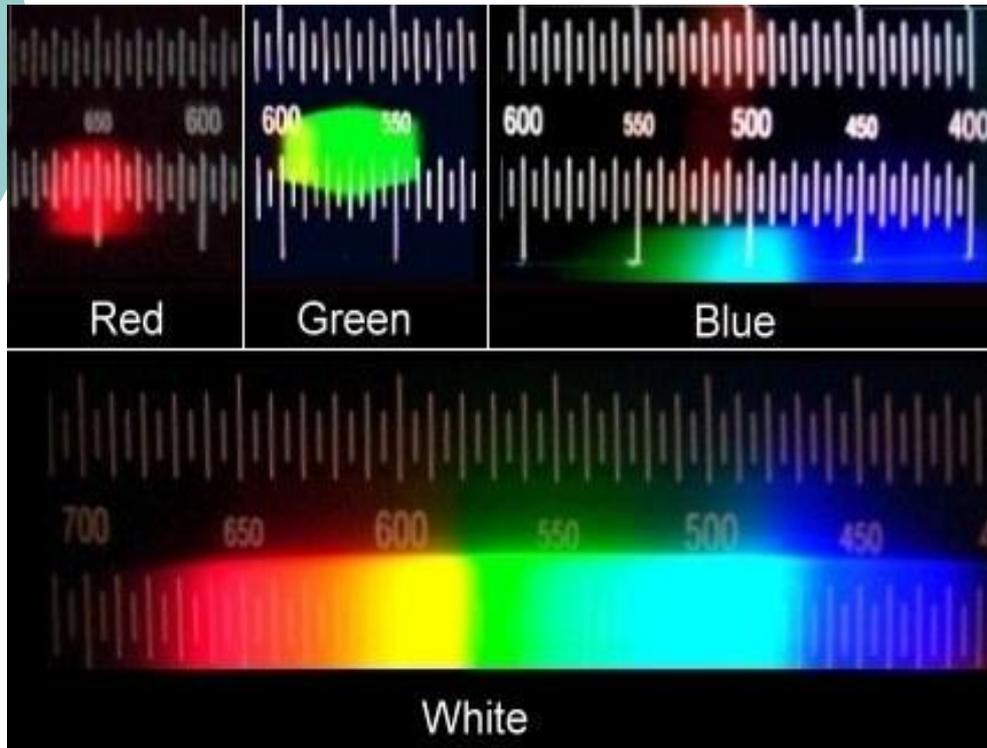
Уникальный транспортный проект, объединяющий два технологических новшества - высокую скорость и использование возобновляемого источника энергии, запущен в Европе. 6 июня 2011г. открыта скоростная железнодорожная линия, использующая для своих нужд энергию солнца. Участок дороги, который обошелся создателям в 15,6 млн евро, находится на линии, связывающей Париж и Амстердам. Отныне поезд, минуя Антверпен (Бельгия), проходит в туннеле, кровля которого покрыта 16 тыс. квадратных солнечных панелей. Длина «эко-туннеля» составляет 3,6 километров, площадь солнечных батарей - 50 тыс. квадратных метров, что примерно равно площади восьми футбольных полей.



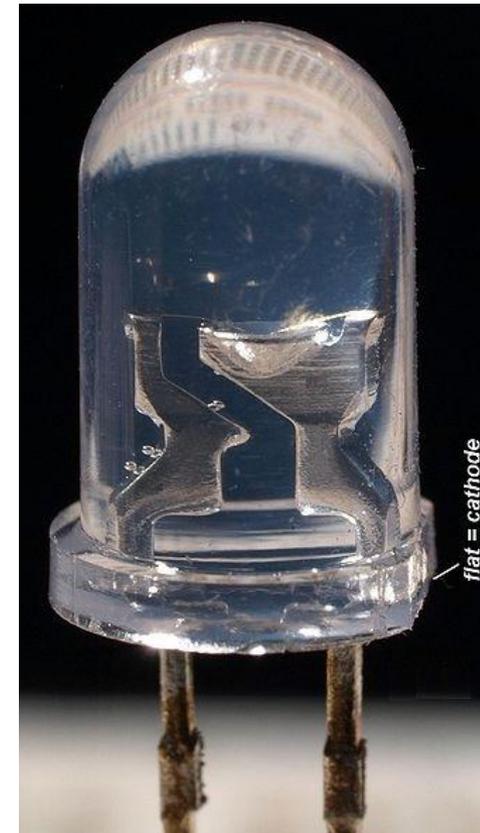
Светодиоды



преобразователи электроэнергии в электромагнитное излучение видимого диапазона



Спектрограмма красного, зелёного, голубого и белого светодиодов



Светодиод в пластиковой оболочке

Светодиоды



Светодиод или светоизлучающий диод (СД, СИД, LED англ. Light-emitting diode) — полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока в прямом направлении. Излучаемый свет лежит в узком диапазоне спектра. Его спектральные характеристики зависят во многом от химического состава использованных в нём полупроводников. Иными словами, кристалл светодиода излучает конкретный цвет (если речь идёт об СД видимого диапазона), в отличие от лампы, излучающей более широкий спектр, и где конкретный цвет отсеивается внешним светофильтром.

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

Светодиоды

Группы

Светоизлучающие диоды общего назначения

7-ми сегментные (цифровые) индикаторы

16-ти сегментные (буквенно-цифровые) индикаторы

Точечные матрицы

Световые линейки

Свойства

1. Различных цветов и яркости :

- Одноцветные: В - синие/голубые (МВ, МВК - 455 нм; РВ, РВ-Е - 465 нм); G -зеленые (VG - 520 нм; VG-Е - 525 нм; PG - 555 нм; G, SG, MG - 568 нм; MGK - 570 нм); Y - желтые (PY - 585 нм; Y, SY - 588 нм; SY-Н - 589 нм; SYK - 590 нм); Or - оранжевые (SE, SEK - 601 нм; N - 610 нм; SE-Е - 621 нм; E - 625 нм); R - красные (I - 625 нм; SUR - 628 нм; SURK, SUR-Е - 630 нм; SR, UR - 640 нм; H - 660 нм).
- Двух- и трехцветные (R/Y, G/Y, R/Y/G).
- Яркость от 0,1 до 3000 мКд при токе от 10 до 20 мА

Светодиоды

2. Различного конструктивного исполнения:

Поверхностного монтажа, прямоугольные, треугольные, цилиндрические, круглые, большого размера, в корпусе, для монтажа в панель

Инфракрасные излучающие диоды

- Кластеры
- ЧИП - светодиоды
- 7-ми и 16-ти сегментные индикаторы для поверхностного монтажа
- Цокольные светодиоды

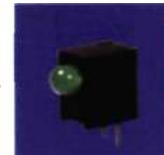
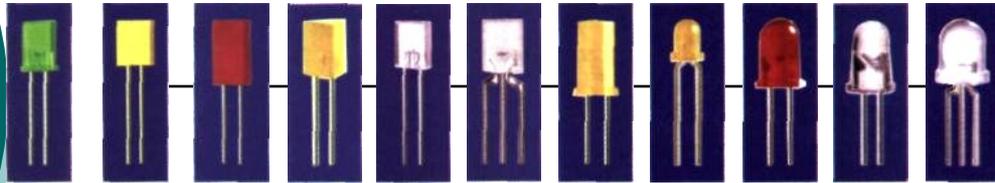
3. С различными типами линзы:

- W (white diffused) - белая матовая; D (color diffused) - цветная матовая; C (water clear) - прозрачная; T (color transparent) - цветная, полупрозрачная.

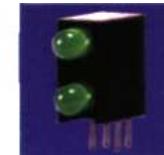
4. Светодиоды с дополнительными характеристиками:

- Мигающие (содержат встроенный генератор), малопотребляющие, с резистором (содержат встроенный ограничительный резистор) У большинства диапазон рабочих температур $-40...+70$ ° C, есть модели с расширенным температурным диапазоном

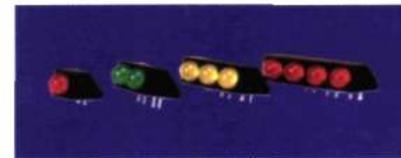
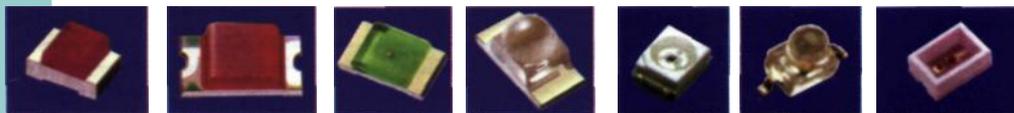
Светодиоды



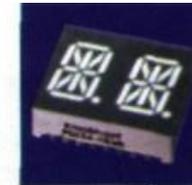
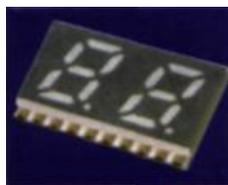
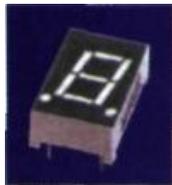
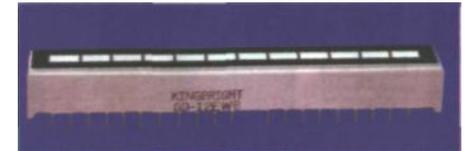
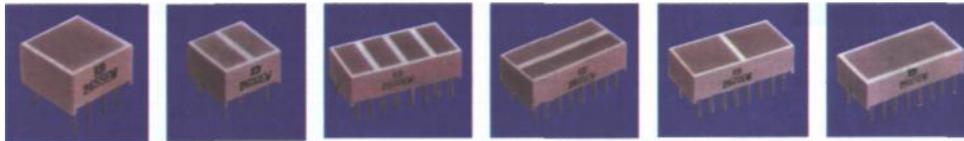
L934EW 1



L934EB 2



SMD-индикаторы



Буквенно-цифровые дисплеи

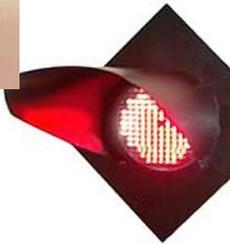


Матричные

Кластеры

Цокольные

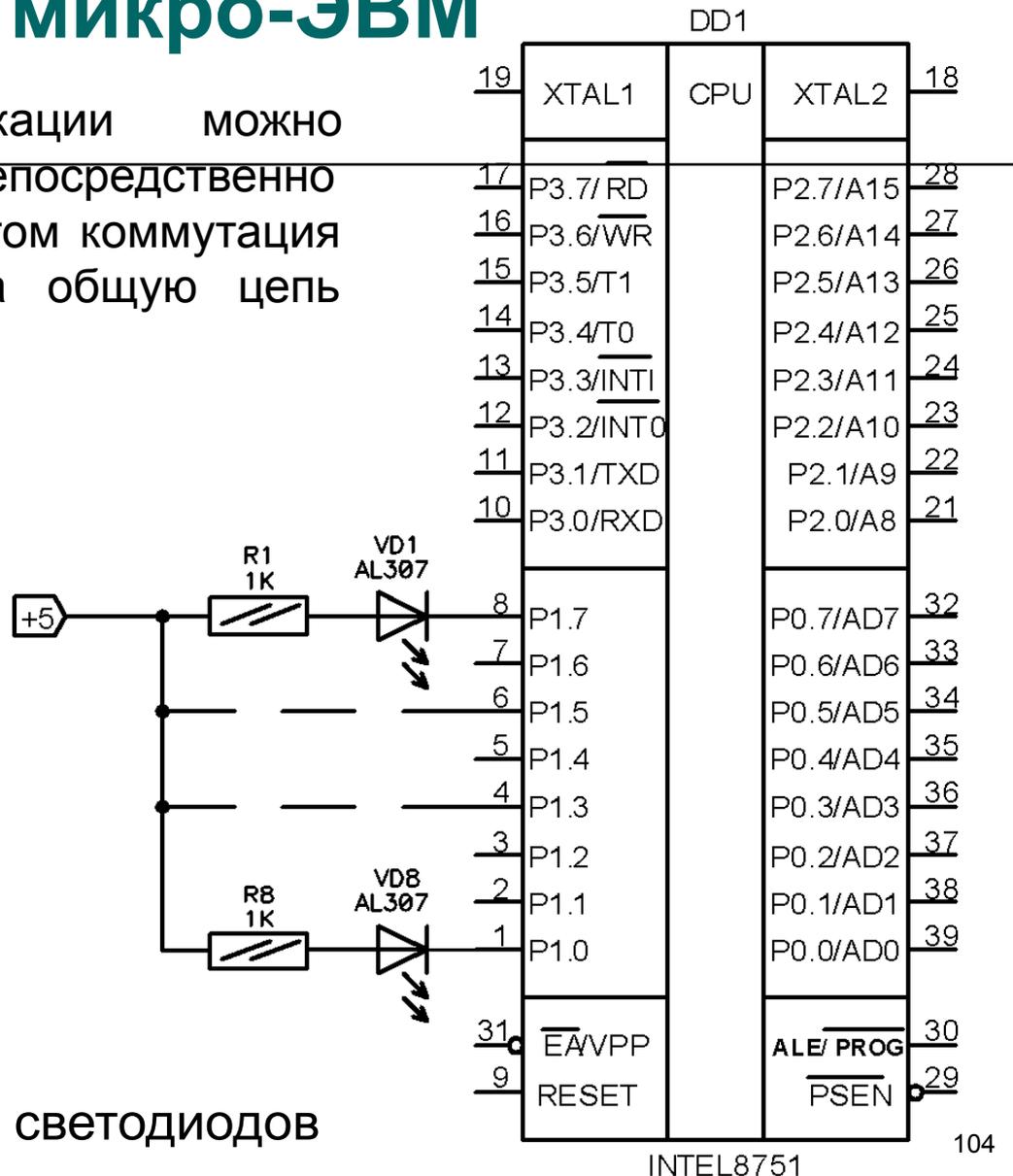
Светодиодные лампы



Подключение светодиодов к микро-ЭВМ

В качестве индикации можно подключить светодиоды непосредственно на порт микро-ЭВМ, при этом коммутация должна производиться на общую цепь питания микросхемы.

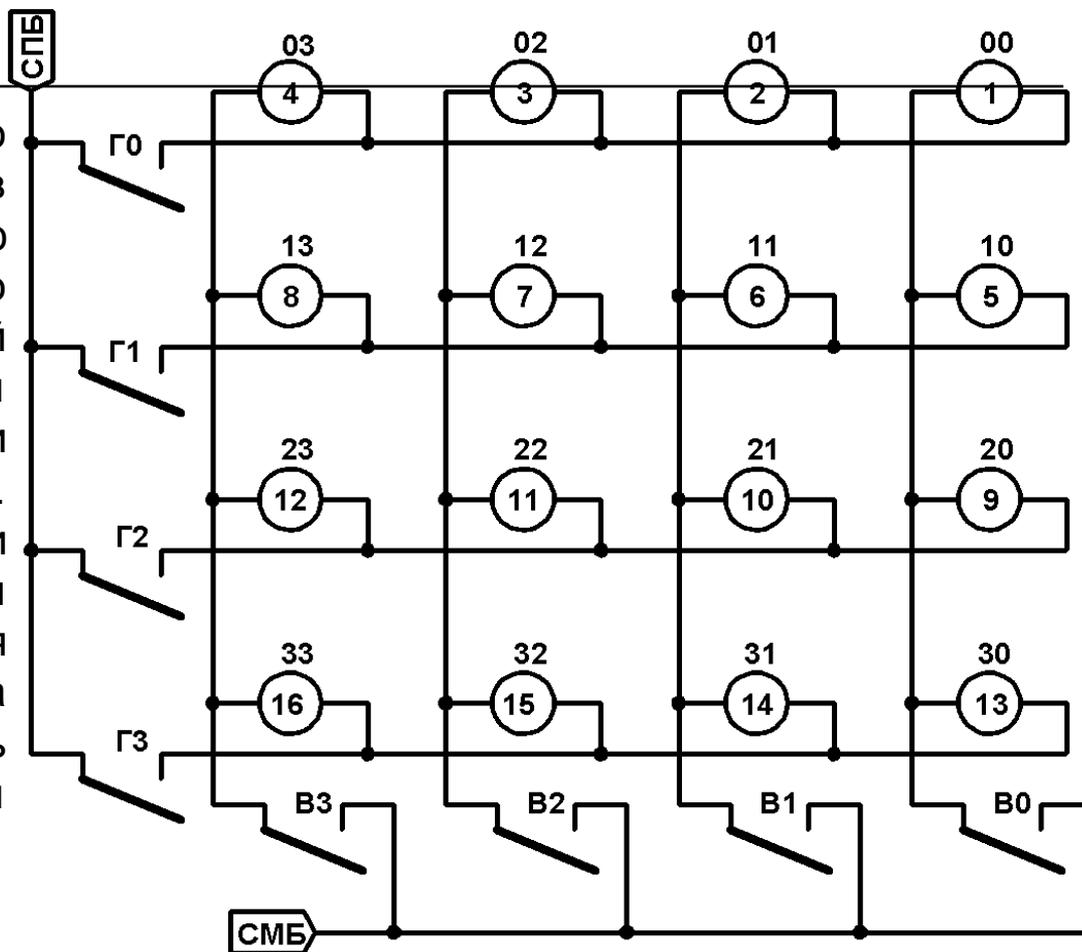
Так как номинальное прямое напряжение светодиода примерно равно 1,6В, а напряжение питания микросхемы +5В, то лишнее напряжение должно падать на сопротивлении.



Подключение светодиодов

Матричное включение светодиодов

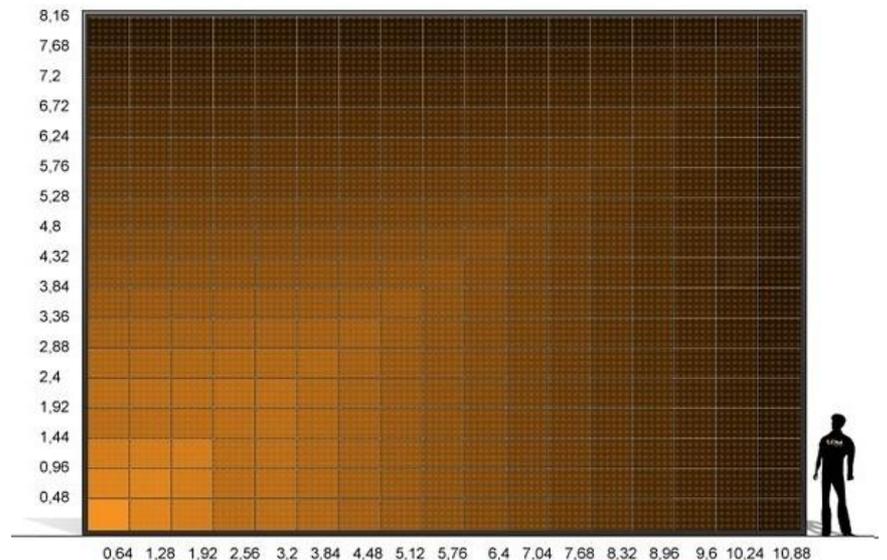
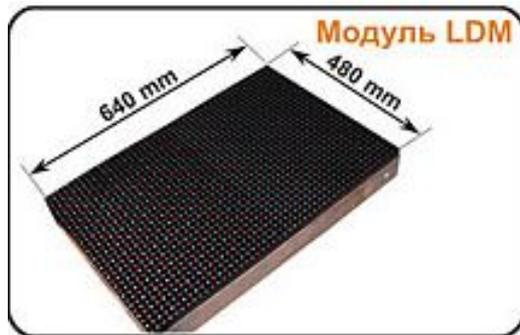
В случае большого количества объектов управления коммутацию можно производить по матричной схеме. Основной недостаток - в невозможности одновременной адресации разных строк и столбцов. Эффективно - при создании матричного изображения. Для исключения мерцания скорость развёртки должна превосходить инерционность ламп. Иногда учитывается стробоскопический эффект.



Подключение нагрузки по матричной схеме

Светодиодные экраны

- по принципу построения делятся на два типа – кластерные и матричные. В кластерных экранах каждый пиксель, содержащий от трех до десятков светодиодов, объединен в отдельном светоизолированном корпусе, который залит герметизирующим компаундом. Такой конструктивный элемент называется кластером. Кластеры, образующие информационное поле экрана, закреплены при помощи винтов на лицевой поверхности экрана. От каждого кластера отходит жгут проводов к соответствующей управляющей плате, к которой они подключаются посредством электрических разъемов. Такой способ построения светодиодных экранов постепенно отмирает, уступая место более технологичному матричному принципу. В этом случае кластеры и управляющая плата объединены в единое целое – матрицу



Лазеры

Лáзер (англ. laser, акроним от light amplification by stimulated emission of radiation «усиление света посредством вынужденного излучения»), или оптіческий квáнтовый генерáтор — это устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.

Полупроводниковый лазер — твердотельный лазер, в котором в качестве рабочего вещества используется полупроводник. В таком лазере, в отличие от лазеров других типов (в том числе и других твердотельных), используются излучательные переходы не между изолированными уровнями энергии атомов, молекул и ионов, а между разрешенными энергетическими зонами или подзонами кристалла.

Лазеры

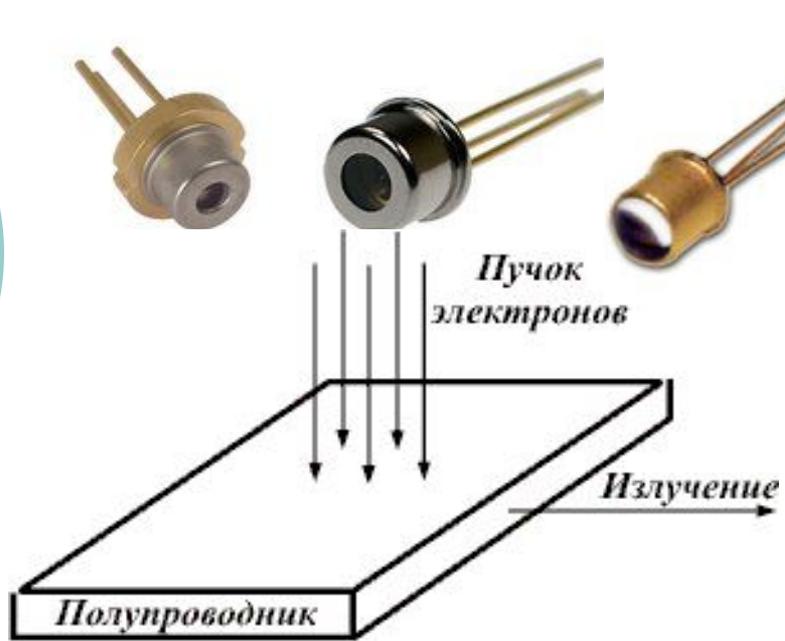
Поскольку в полупроводниковом лазере возбуждаются и излучают коллективно атомы, составляющие кристаллическую решётку, сам лазер может обладать очень малыми размерами.

Другими особенностями полупроводниковых лазеров являются высокий КПД, малая инерционность, простота конструкции.

Типичным представителем полупроводниковых лазеров является лазерный диод — лазер, в котором рабочей областью является полупроводниковый р-п переход. В таком лазере излучение происходит за счет рекомбинации электронов и дырок.



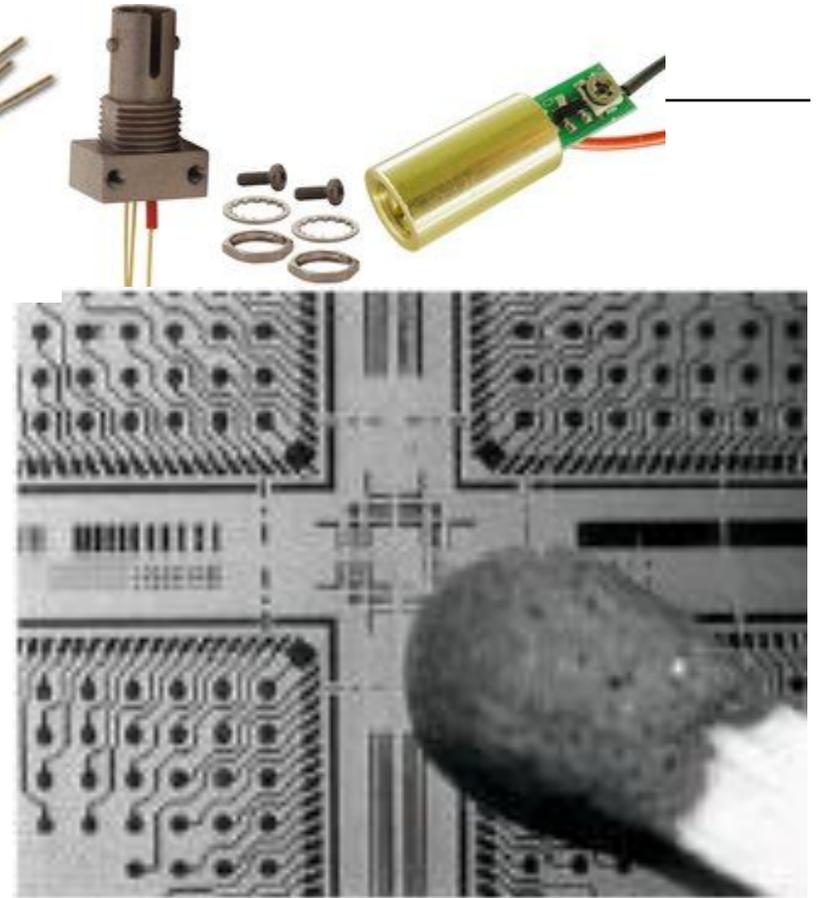
Лазеры



Поперечная накачка электронным пучком



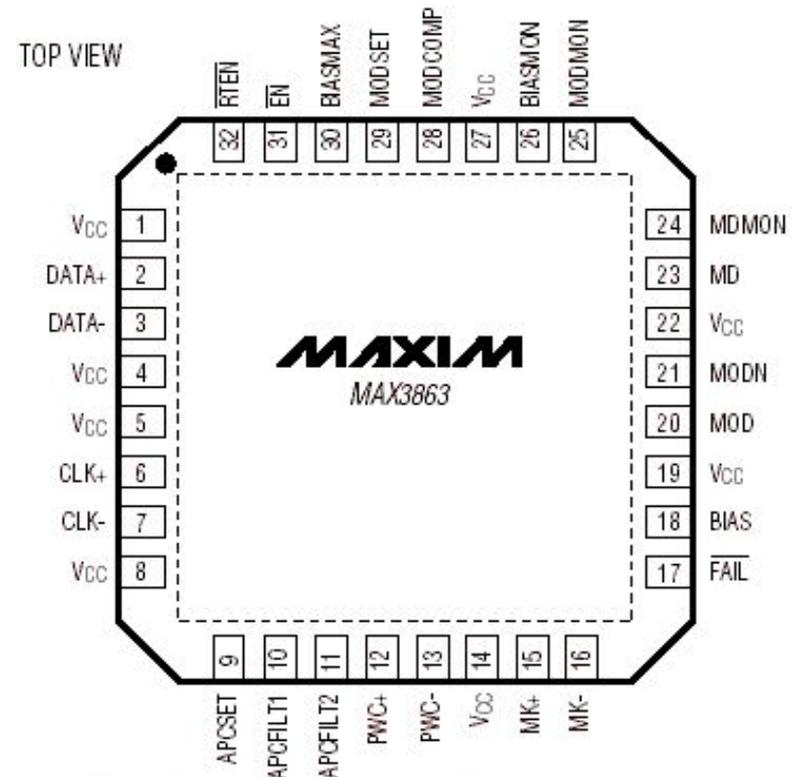
Продольная накачка электронным пучком



Фрагмент печатной платы, изготовленной методом прямого лазерного формирования проводящей структуры

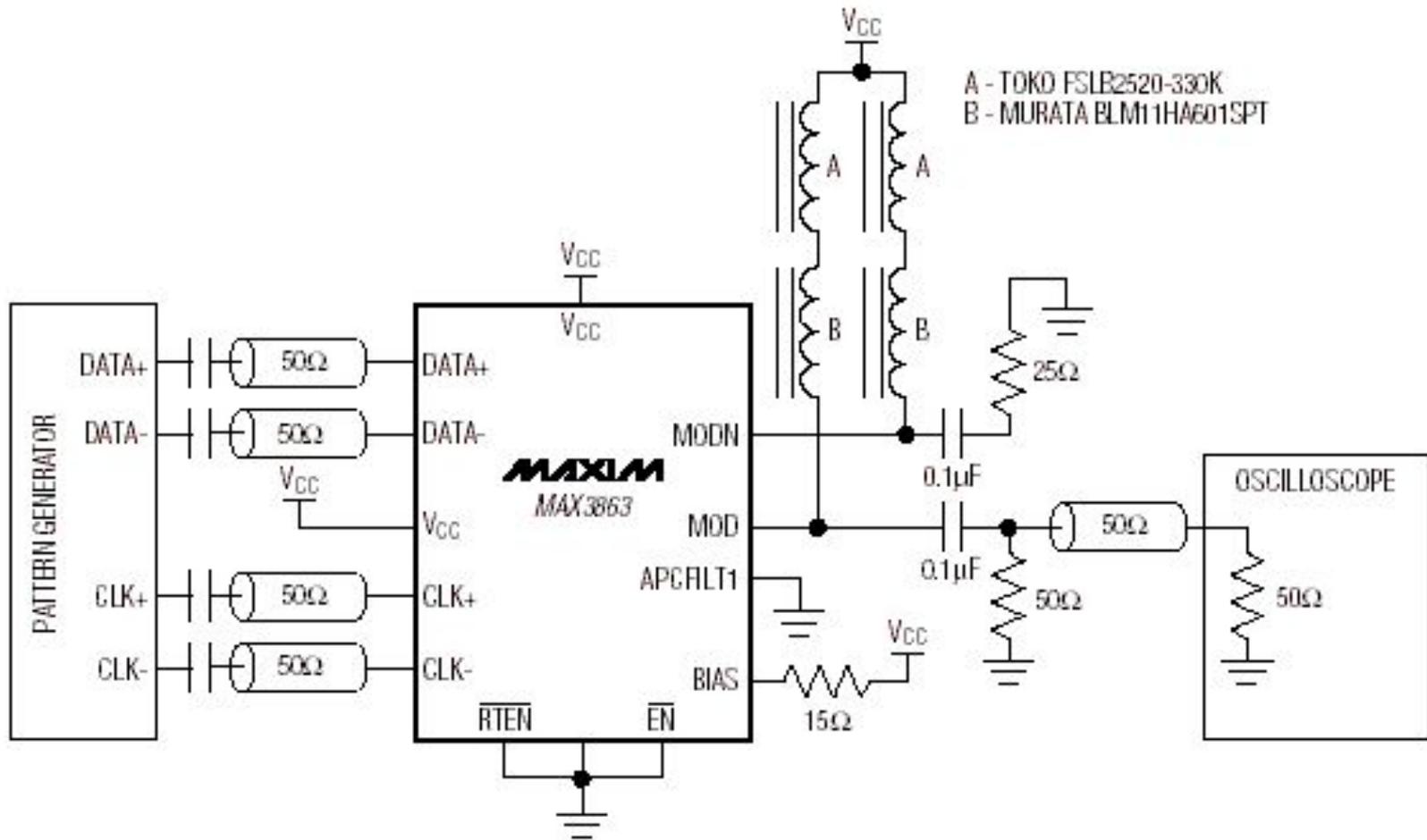
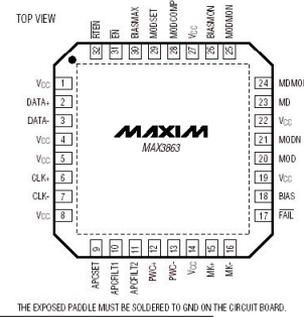
Лазерный драйвер с цепью компенсации уровня модуляции

MAX3863 создан для непосредственной модуляции лазерного диода на скоростях до 2.7 Гбит/с. Цепь автоматического контроля мощности предназначена для постоянного поддержания среднего уровня оптической мощности. Цепь компенсации модулирующего тока предназначена для увеличения модуляционного тока лазера относительно его тока смещения. В результате, удастся поддерживать оптимальный уровень оптического гашения лазера во всем диапазоне рабочих температур и на протяжении всего срока службы.

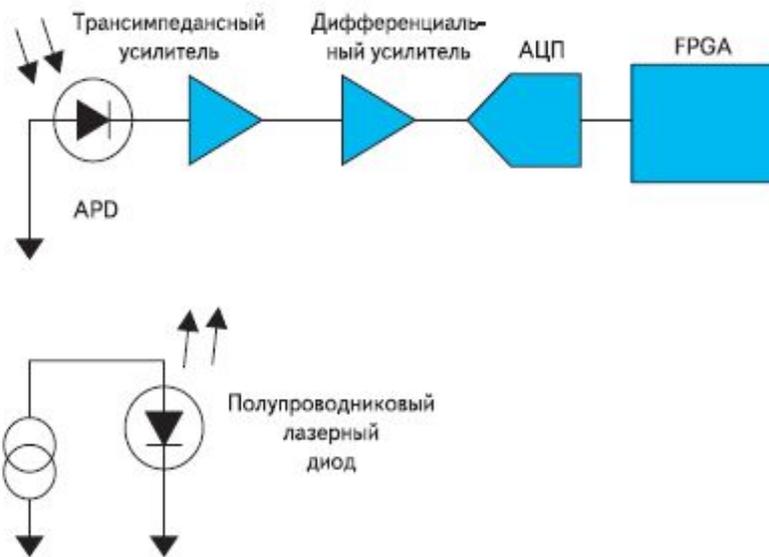
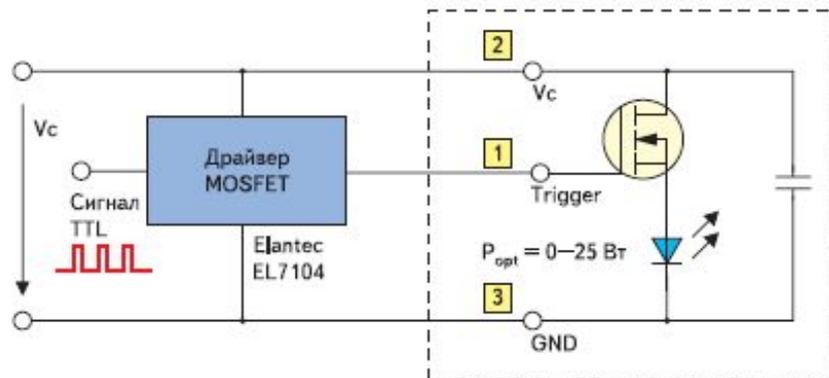


THE EXPOSED PADDLE MUST BE SOLDERED TO GND ON THE CIRCUIT BOARD.

Лазерный драйвер с цепью компенсации уровня модуляции



Техническое зрение на основе лидара



Структурная схема лидара

Лидар (транслитерация LIDAR англ. Light Identification, Detection and Ranging) — технология получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления отражения света и его рассеивания в прозрачных и полупрозрачных средах.

Сканирующие лидары в системах машинного зрения формируют двумерную или трёхмерную картину окружающего пространства.