

Лекция 3

ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

- **Свободные носители заряда в металлах и полупроводниках.** Проводящие свойства металлов, полупроводников и диэлектриков. Свободные носители заряда в полупроводнике. Полупроводники в микроэлектронике. Дрейфовый ток. Диффузионный ток. Закон Ома. Уравнение непрерывности
- **Электронно-дырочные переходы и их характеристики.** Контактные явления на границе двух полупроводников. Электронно-дырочный переход. Расчет поля и потенциала. Ширина запирающего слоя. Высота потенциального барьера. Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда в p-n-переходе. Вольт-амперная характеристика. Полупроводниковые диоды. Дифференциальное сопротивление p-n-переходов. Барьерная емкость p-n-перехода. Диффузионная емкость p-n-перехода.
- **Полупроводниковые диоды.** Быстродействие полупроводниковых диодов. Виды полупроводниковых диодов.
- **Контакт металл - полупроводник.** Диоды Шоттки. Омические контакты.
- **Оптоэлектроника.** Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Простейшие оптоэлектронные устройства

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И МЕТАЛЛАХ

Проводящие свойства металлов, полупроводников и диэлектриков

В полупроводниковых материалах концентрация подвижных носителей заряда значительно ниже концентрации атомов. Однако, концентрация носителей может в широких пределах меняться за счет внедрения примеси, под действием температуры, освещения.

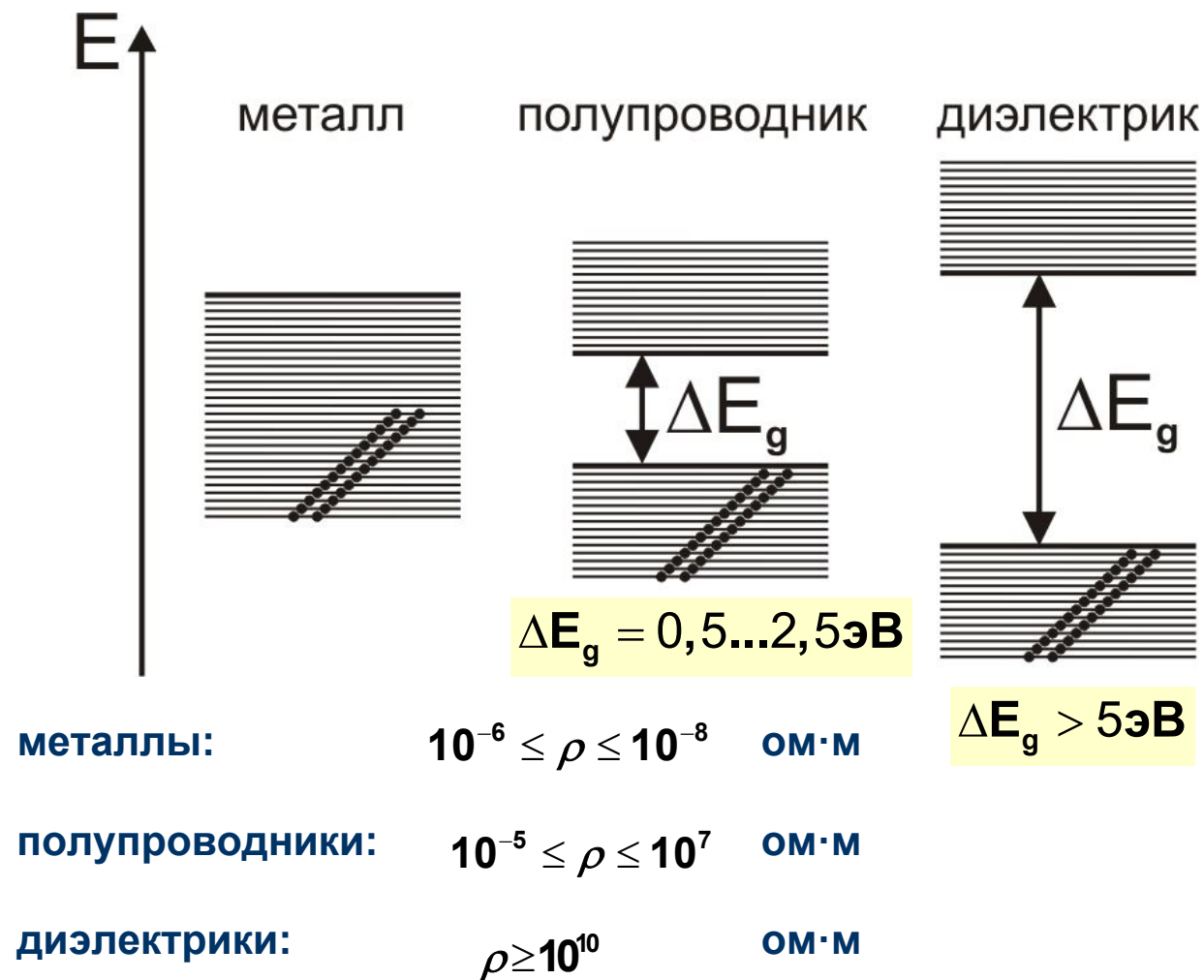
По величине **удельного сопротивления** полупроводники занимают промежуточное положение между металлами и диэлектриками.

металлы:	$10^{-6} \leq \rho \leq 10^{-8}$	ОМ·М
полупроводники:	$10^{-5} \leq \rho \leq 10^7$	ОМ·М
диэлектрики:	$\rho \geq 10^{10}$	ОМ·М

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И МЕТАЛЛАХ

Проводящие свойства металлов, полупроводников и диэлектриков



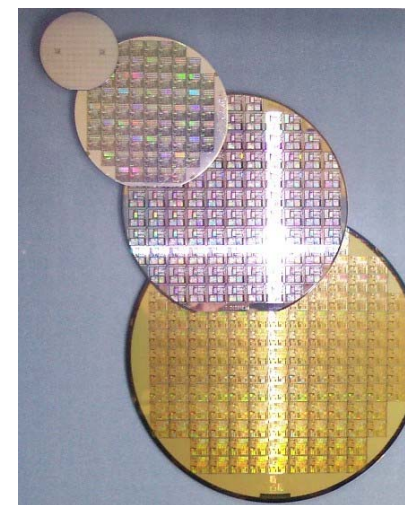
Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И МЕТАЛЛАХ

Полупроводники в микроэлектронике.

В микроэлектронике, главным образом, используются твердотельные кристаллические структуры, состоящие из элементарных полупроводников (**Ge**, **Si**) или полупроводниковых соединений типа **Ge-Si**, **A3-B5 (Ga-As, InSb)** **A2-B6 (CdS)** и др.

- Структура полупроводниковых материалов может изменяться искусственно по требуемому алгоритму. Изменение структуры путем внедрения **примесных атомов** приводит к целенаправленному изменению проводимости полупроводников.
- Целенаправленное локальное изменение типа проводимости полупроводниковой структуры лежит в основе производства **интегральных схем**.



Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И МЕТАЛЛАХ

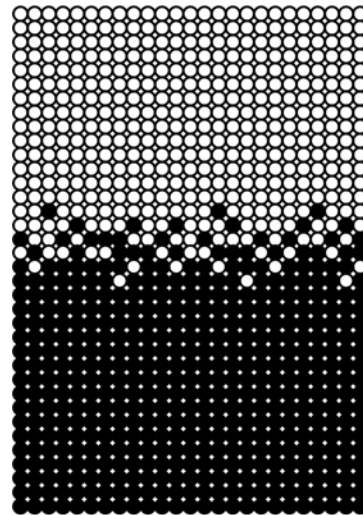
Полупроводники в микроэлектронике.

Периодическая система химических элементов. Современный вид

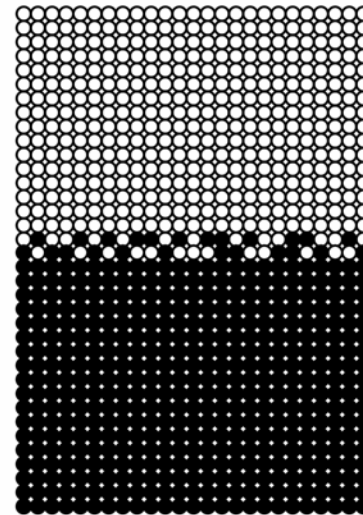
1 1IA 11A	2 IIA 2A											13 IIIA 3A	14 IVA 4A	15 VA 5A	16 VIA 6A	17 VIIA 7A	18 VIIIA 8A	
1 H Hydrogen 1.0079												5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.00674	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.998403	10 Ne Neon 20.1797	
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.01218																	
11 Na Sodium 22.989768	12 Mg Magnesium 24.305	3 IIIB 3B	4 IVB 4B	5 VB 5B	6 VIB 6B	7 VIIB 7B	8 VIII 8	9 VIII 8	10 VIII 8	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 Al Aluminum 26.981539	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973762	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948	
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.95591	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.847	27 Co Cobalt 58.9332	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.732	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.92159	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80	
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98.9072	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.9055	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29	
55 Cs Cesium 132.90543	56 Ba Barium 137.327	57-71	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.9479	74 W Tungsten 183.85	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.9665	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98037	84 Po Polonium [208.9824]	85 At Astatine 208.9871	86 Rn Radon 222.0176	
87 Fr Francium 223.0197	88 Ra Radium 226.0254	89-103	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [268]	110 Ds Darmstadtium [269]	111 Rg Roentgenium [272]	112 Cn Copernicium [277]	113 Uut Ununtrium unknown	114 Uuq Ununquadium [289]	115 Uup Ununpentium unknown	116 Uuh Ununhexium [298]	117 Uus Ununseptium unknown	118 Uuo Ununoctium unknown	
Lanthanide Series		57 La Lanthanum 138.9055	58 Ce Cerium 140.115	59 Pr Praseodymium 140.90765	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium 144.9127	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.9655	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967		
Actinide Series		89 Ac Actinium 227.0278	90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactinium 231.03588	92 U Uranium 238.0289	93 Np Neptunium 237.0462	94 Pu Plutonium 244.0642	95 Am Americium 243.0614	96 Cm Curium 247.0703	97 Bk Berkelium 247.0703	98 Cf Californium 251.0796	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.0951	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.1009	103 Lr Lawrencium [262]		
		Alkali Metal	Alkaline Earth	Transition Metal	Basic Metal	Semimetals	Nonmetals	Halogens	Noble Gas	Lanthanides	Actinides							

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды
**СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В
ПОЛУПРОВОДНИКАХ И МЕТАЛЛАХ**

металл



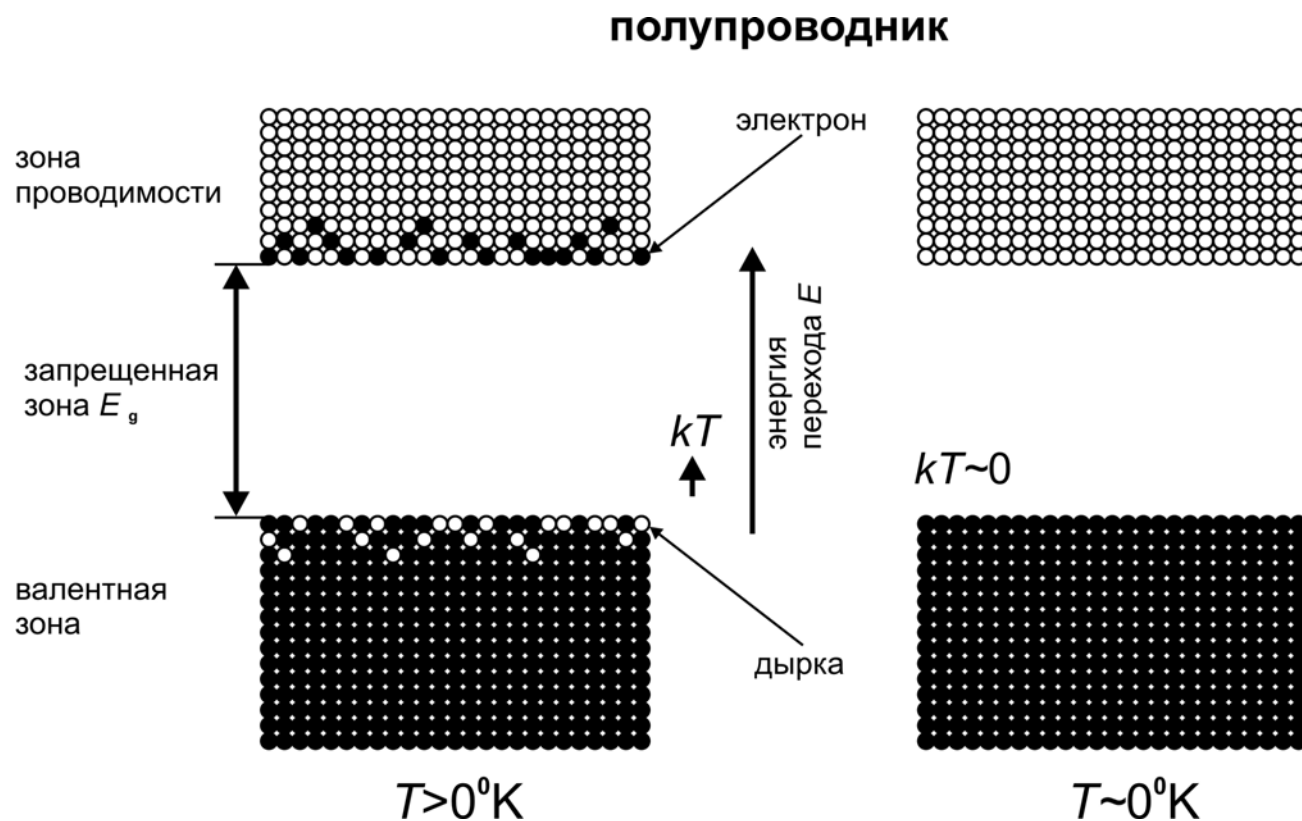
$T > 0^\circ\text{K}$



$T \sim 0^\circ\text{K}$

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И МЕТАЛЛАХ



СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И МЕТАЛЛАХ

- **Собственный полупроводник** - беспримесный и бездефектный полупроводник с идеальной кристаллической решеткой.
- Носителями заряда в полупроводниках являются **электроны проводимости** и **дырки**.
- Дырка представляет собой квазичастицу или незаполненное электронное состояние (вакансию) в валентной зоне полупроводника. Дырке приписывают положительный заряд, по величине равный заряду электрона. Эффективная масса обычно больше, чем масса электрона.

$$m^* = \frac{p_0}{v_0}$$

- Электронно-дырочная пара рождается вследствие **тепловых колебаний решетки** или из-за **поглощения светового кванта**

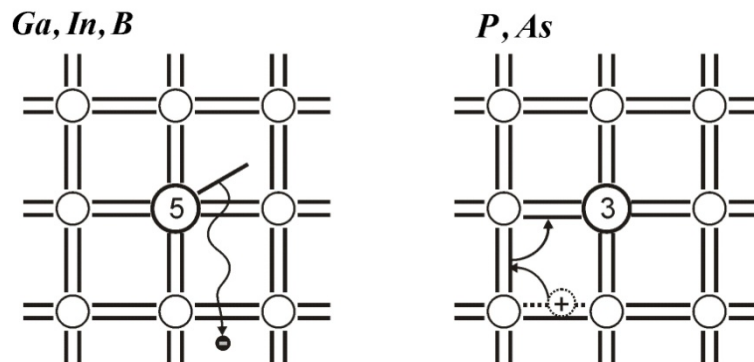
Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И МЕТАЛЛАХ

Донорные и акцепторные примеси

Проводимость полупроводника может значительно изменяться за счет введения примесей, приводящих к изменению типа проводимости.

донорная примесь акцепторная примесь



$$n = n_n = N_D + p_n \approx N_D$$

$$p = p_p = N_A + n_p \approx N_A$$

два основных механизма переноса носителей заряда: **диффузия** свободных носителей при наличии неравномерности их концентрации и **дрейф** под действием внешнего электрического поля.

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И МЕТАЛЛАХ

Дрейфовый ток

Если полупроводник

поме элект поле

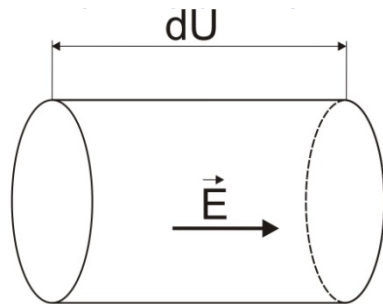
$$I = \frac{U}{R}$$

$$dI = j \cdot dS$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

$$\rho \frac{dl}{dS} = R$$

на , T на двdS СВ НОСИТЕЛИ



$$j \cdot dS = \frac{dU}{\rho \frac{dl}{dS}} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dU}{dl} \cdot dS = \sigma E \cdot dS$$

$$j = \sigma E$$

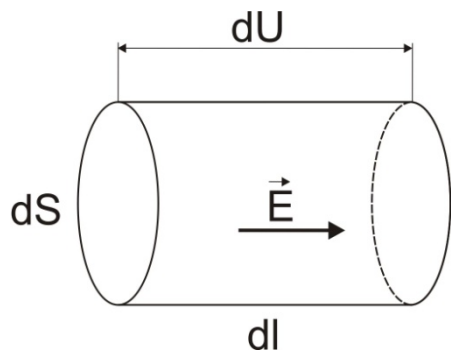
Закон Ома в дифференциальной форме

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И МЕТАЛЛАХ

Дрейфовый ток

Для элемента тока:



$$\mathbf{j} = e \cdot n \cdot \mathbf{v}_{др} = en \cdot \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \tau = en\mu_n E$$

$$\mu_n = \frac{e\tau}{2m} = \frac{v_{др}}{E} \quad \text{подвижность электронов}$$

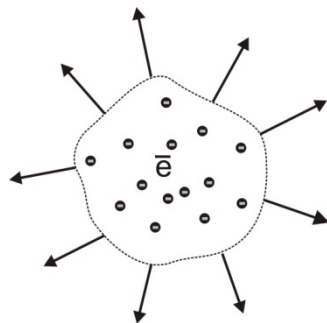
$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p \quad \sigma_n = en\mu_n \quad \sigma_p = ep\mu_p$$

$$\mathbf{j}_{др} = (\mathbf{j}_n + \mathbf{j}_p)_{др} = e(n\mu_n + p\mu_p) E$$

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И МЕТАЛЛАХ

Диффузионный ток

- Направление диффузии – противоположно градиенту концентрации, а величина – пропорциональна величине градиента



$$(j_n)_{\text{диф}} = eD_n \frac{dn}{dx}$$

$$D_n = \frac{kT}{e} \mu_n$$

коэффициент
диффузии

$$(j_p)_{\text{диф}} = -eD_p \frac{dp}{dx}$$

$$D_p = \frac{kT}{e} \mu_p$$

$$\mu_n = \frac{e\tau_n}{m_n}$$

$$\mu_p = \frac{e\tau_p}{m_p}$$

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

СВОБОДНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И МЕТАЛЛАХ

Уравнение непрерывности

Связь между протекающими токами и перераспределением зарядов:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j} = 0$$

С учетом диффузии и дрейфа для электронов и дырок

$$-e \frac{\partial n}{\partial t} = -e \mu_n \frac{d}{dx} (nE) - e D_n \frac{d^2 n}{dx^2} \qquad e \frac{\partial p}{\partial t} = -e \mu_p \frac{d}{dx} (pE) - \left(-e D_p \frac{d^2 p}{dx^2} \right)$$

Концентрация
меняется *за счет*
неосновных
носителей

$$n_n = N_D + p_n$$

$$p_p = N_A + n_p$$

С учетом процессов генерации и рекомбинации:

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \mu_n \frac{d}{dx} (n_p E) + D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} + G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}$$

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\mu_p \frac{d}{dx} (p_n E) + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} + G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$$

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Контактные явления на границе двух полупроводников. Электронно-дырочный переход.

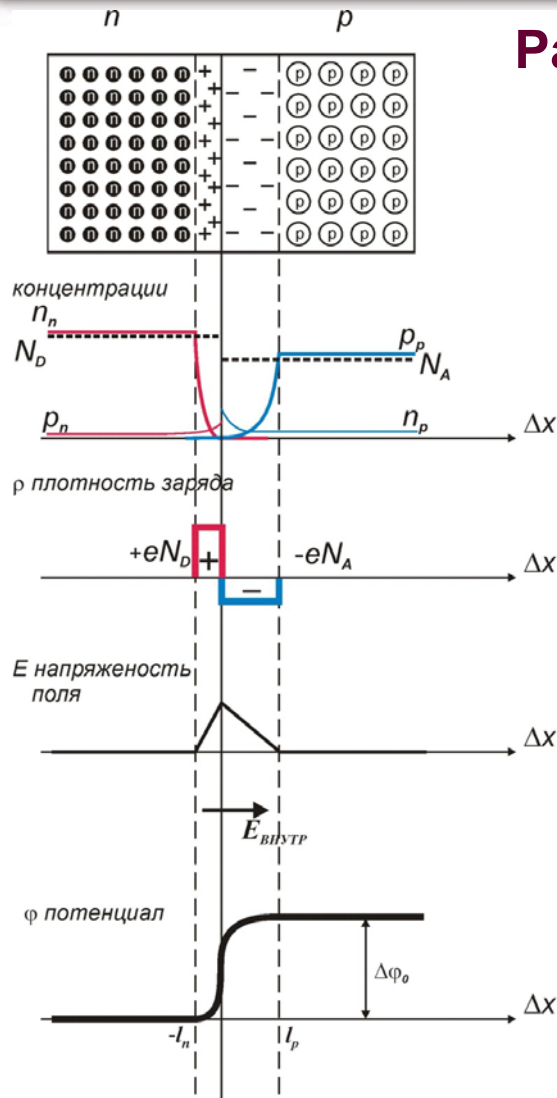
- Электронно-дырочный переход – контакт между полупроводниками p и n типа или p - n -переход
- Пусть концентрации доноров и акцепторов изменяются на границе скачком (резкий n - p -переход)

$$n_{n0} \approx N_D \gg n_{p0} \quad p_{p0} \approx N_A \gg p_{n0}$$

- Неравновесное распределение концентраций приводит к диффузии электронов из n -области в p -область и дырок из p -области в n -область.

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Расчет поля и потенциала. Ширина запирающего слоя

Уравнение Пуассона

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0\epsilon}$$

Граничные условия: $E(-l_n) = 0$ $E(l_p) = 0$
 $\phi(-l_n) = 0$ $\phi(l_p) = \Delta\phi_0$

$$E = -\frac{d\phi}{dx} \Rightarrow \frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_0\epsilon}$$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_0\epsilon}$$

$$\rho_n = eN_D$$

$$\rho_p = -eN_A$$

Интегрируя,

n-область ($x \leq 0$):

p-область ($x \geq 0$):

$$E = -\frac{\rho_n}{\epsilon_0\epsilon}x + C_1 = \frac{eN_Dx}{\epsilon_0\epsilon} + C_1$$

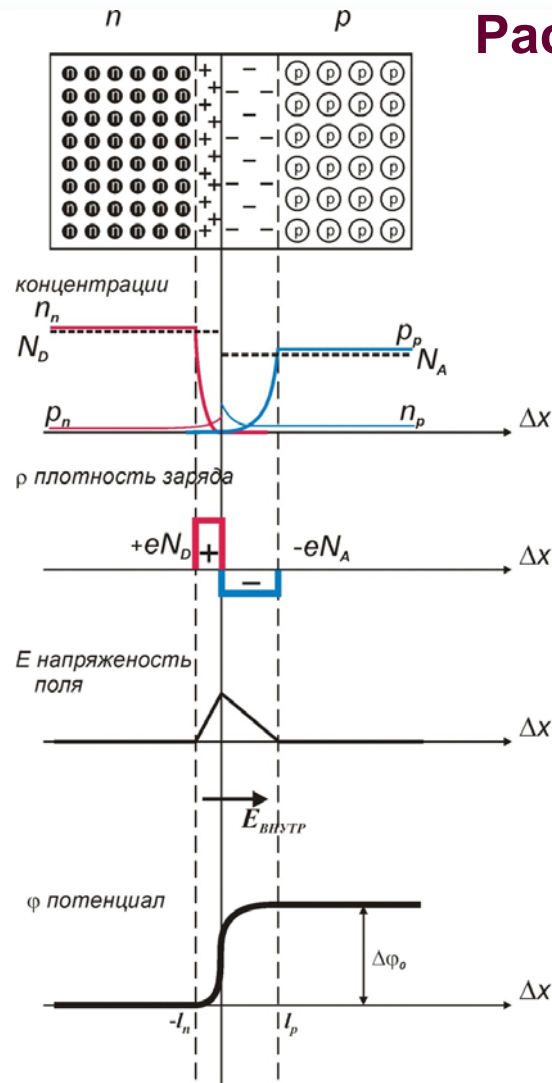
$$E = \frac{\rho_p x}{\epsilon_0\epsilon} + C_2 = -\frac{eN_Ax}{\epsilon_0\epsilon} + C_2$$

Из гран. усл.: $C_1 = \frac{eN_D l_n}{\epsilon_0\epsilon}$ $C_2 = \frac{eN_A l_p}{\epsilon_0\epsilon}$

$$E = \frac{eN_D}{\epsilon_0\epsilon}(x + l_n)$$

$$E = -\frac{eN_A}{\epsilon_0\epsilon}(x - l_p)$$

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Расчет поля и потенциала. Ширина запирающего слоя

Уравнение Пуассона

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon}$$

Интегрируя вторично,

n-область (x ≤ 0): **p-область (x ≥ 0):**

$$\varphi = \varphi_n + \frac{eN_D}{2\epsilon_0\epsilon} (x + l_n)^2 \qquad \varphi = \varphi_p - \frac{eN_A}{2\epsilon_0\epsilon} (x - l_p)^2$$

Пусть $\varphi_n = 0$ При $x = 0$ $\varphi_1 = \varphi_2$

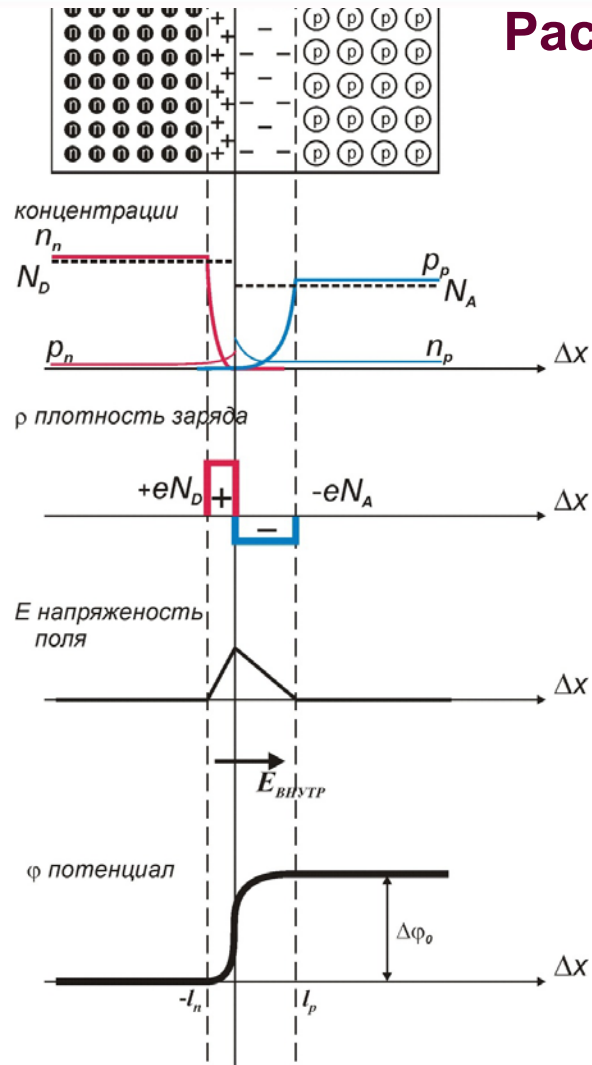
$$\varphi_1(0) = -\frac{eN_D}{2\epsilon_0\epsilon} l_n^2 \qquad \varphi_2(0) = \varphi_p + \frac{eN_A}{2\epsilon_0\epsilon} l_p^2$$

$$\Delta\varphi_0 = \varphi_p = \frac{eN_D}{2\epsilon_0\epsilon} l_n^2 + \frac{eN_A}{2\epsilon_0\epsilon} l_p^2 = \frac{e}{2\epsilon_0\epsilon} (N_D l_n^2 + N_A l_p^2) =$$

$$= \frac{e}{2\epsilon_0\epsilon} \frac{N_A (N_A + N_D)}{N_D} l_p^2 = \frac{e}{2\epsilon_0\epsilon} \frac{N_D (N_A + N_D)}{N_A} l_n^2$$

$$\left[l_n N_D = l_p N_A \right]$$

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Расчет поля и потенциала. Ширина запирающего слоя

Уравнение Пуассона

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0\epsilon}$$

n-область ($x \leq 0$):

$$l_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon}{e} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)} \cdot \Delta\phi_0}$$

p-область ($x \geq 0$):

$$l_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon}{e} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)} \cdot \Delta\phi_0}$$

$$l = l_p + l_n = \left[l_n N_D = l_p N_A \right] = l_p \frac{N_A + N_D}{N_D}$$

$$l = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \cdot \Delta\phi_0}$$

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Высота потенциального барьера

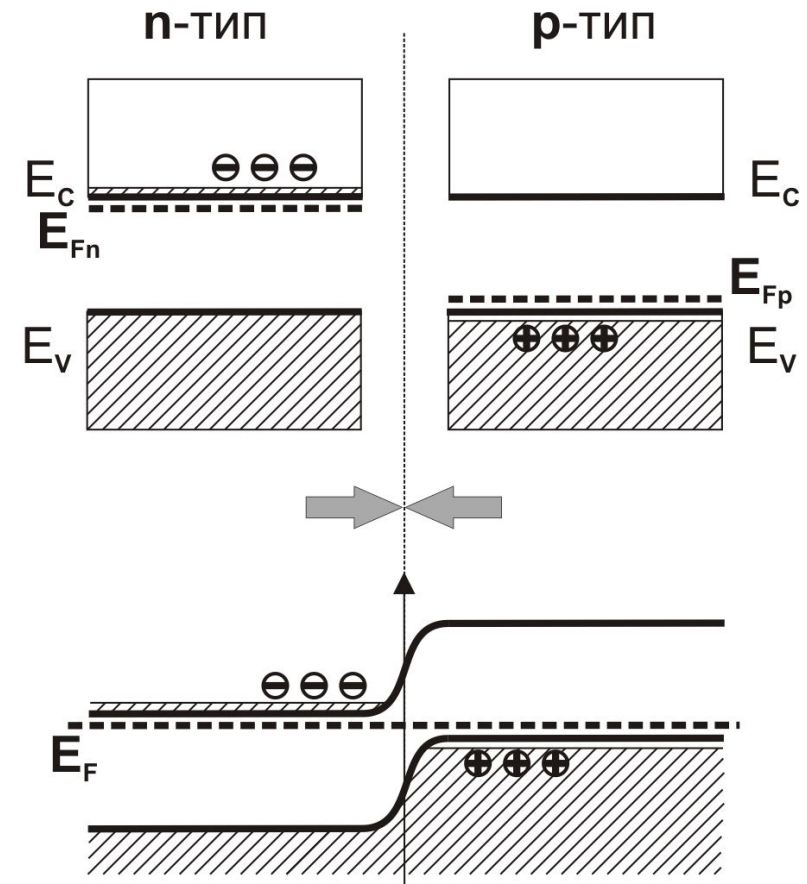
- В системе двух и более твердых тел, находящихся в термодинамическом равновесии **уровень Ферми всегда будет общим**

В *p*-области:
$$E_{Fp} = E_{Vp} + \frac{E_g}{2} - k_B T \ln \frac{N_A}{n_i}$$

В *n*-области:
$$E_{Fn} = E_{Vn} + \frac{E_g}{2} + k_B T \ln \frac{N_D}{n_i}$$

$$\Delta E_0 = E_{Vp} - E_{Vn} = k_B T \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

$$\Delta \phi_0 = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

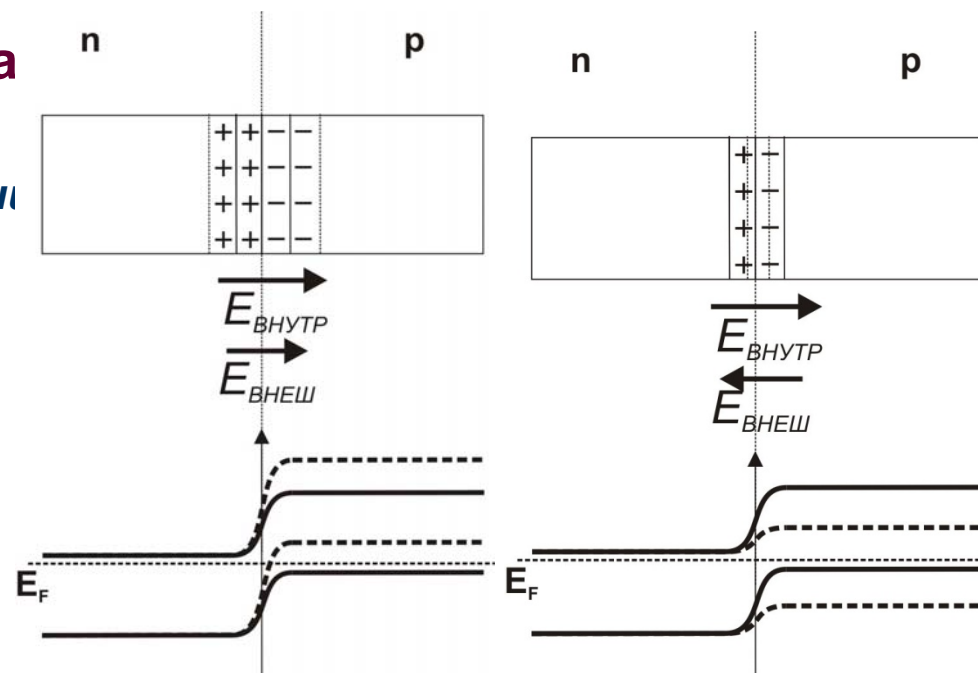


Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды
**ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ
ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Высота потенциального барьера

Внешнее напряжение (поле),
прикладываемое в **обратном направлении**
увеличивает потенциальный барьер

Внешнее напряжение (поле),
прикладываемое в **прямом направлении**,
уменьшает потенциальный барьер



Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда в p - n -переходе

$$\Delta\varphi_0 = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

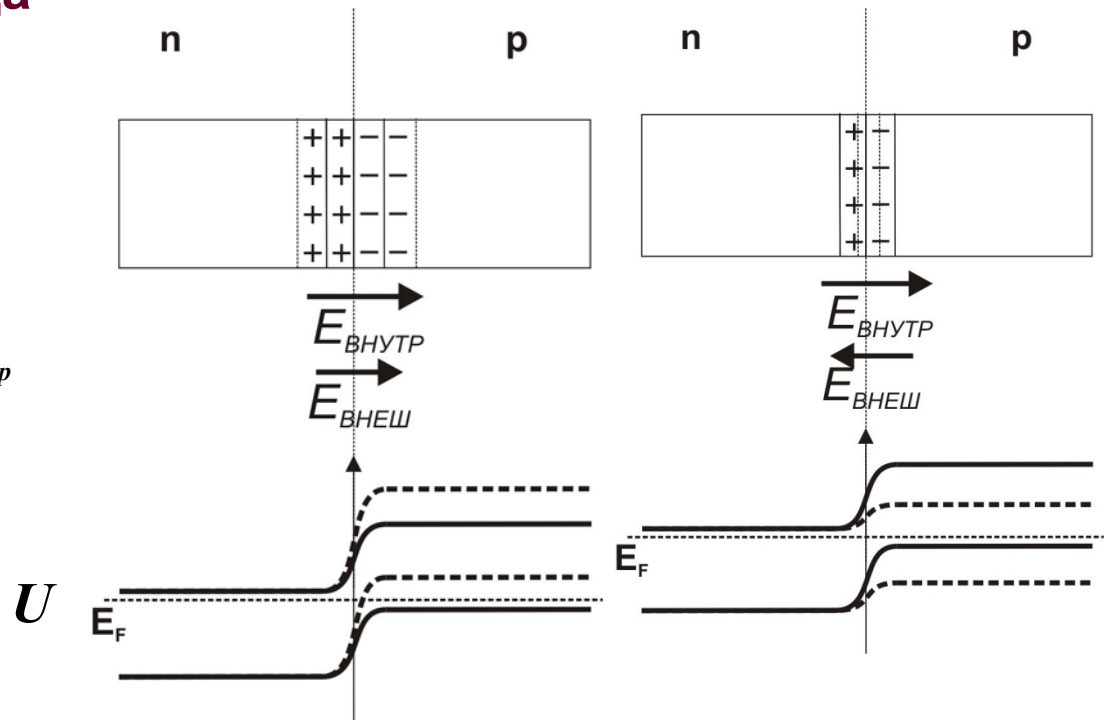
$$n_i^2 = n_n n_p = p_p p_n \quad N_D \approx n_n \quad N_A \approx p_p$$

$$\Delta\varphi_0 = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} \quad \Delta\varphi_0 = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{p_p}{p_n}$$

При небольшом внешнем напряжении

$$\Delta\varphi = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} \quad \text{или} \quad \Delta\varphi = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{p_p}{p_n}$$

где $\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 - U$, то есть, величина потенциального барьера изменится



Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда в p - n -переходе

Приложенное напряжение не повлияет на концентрацию основных носителей, поскольку

$$n_n \approx N_D \quad p_p \approx N_A$$

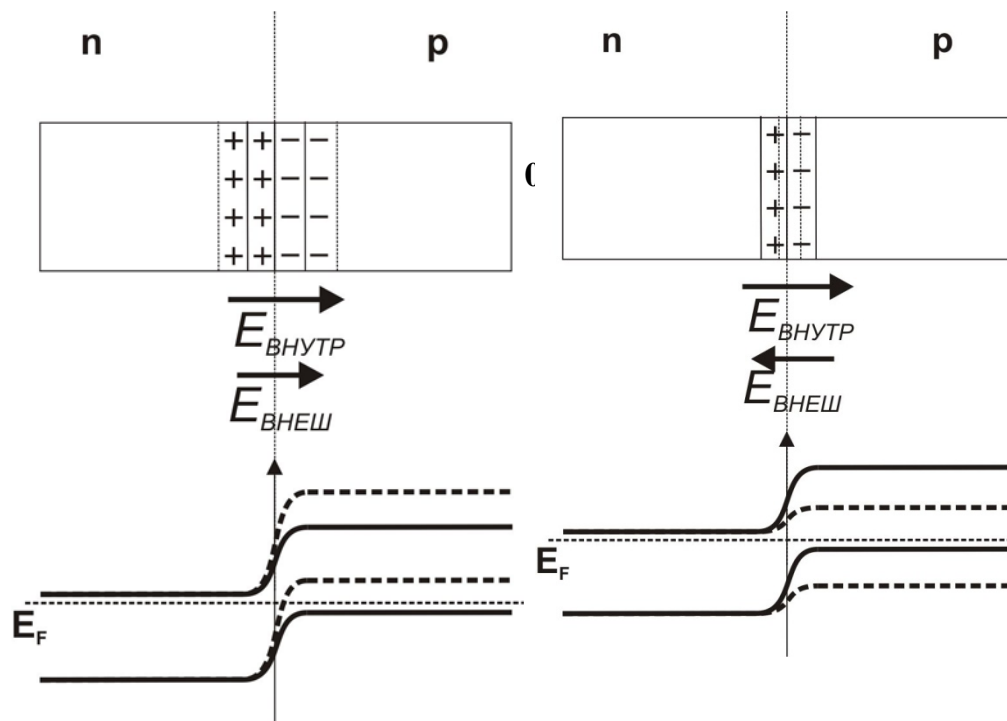
$$U = \Delta\varphi_0 - \Delta\varphi = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{n_p}{n_{p0}}$$

$$n_p = n_{p0} e^{\frac{eU}{k_B T}} \quad \text{аналогично} \quad p_n = p_{n0} e^{\frac{eU}{k_B T}}$$

$U > 0$ - инжекция

$U < 0$ - экстракция

$$\Delta n_p = n_p - n_{p0} = n_{p0} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) \quad \Delta p_n = p_n - p_{n0} = p_{n0} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$$



Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Инжекция и экстракция неосновных носителей заряда в p - n -переходе

Приложенное напряжение не повлияет на концентрацию основных носителей, поскольку

$$n_n \approx N_D \quad p_p \approx N_A$$

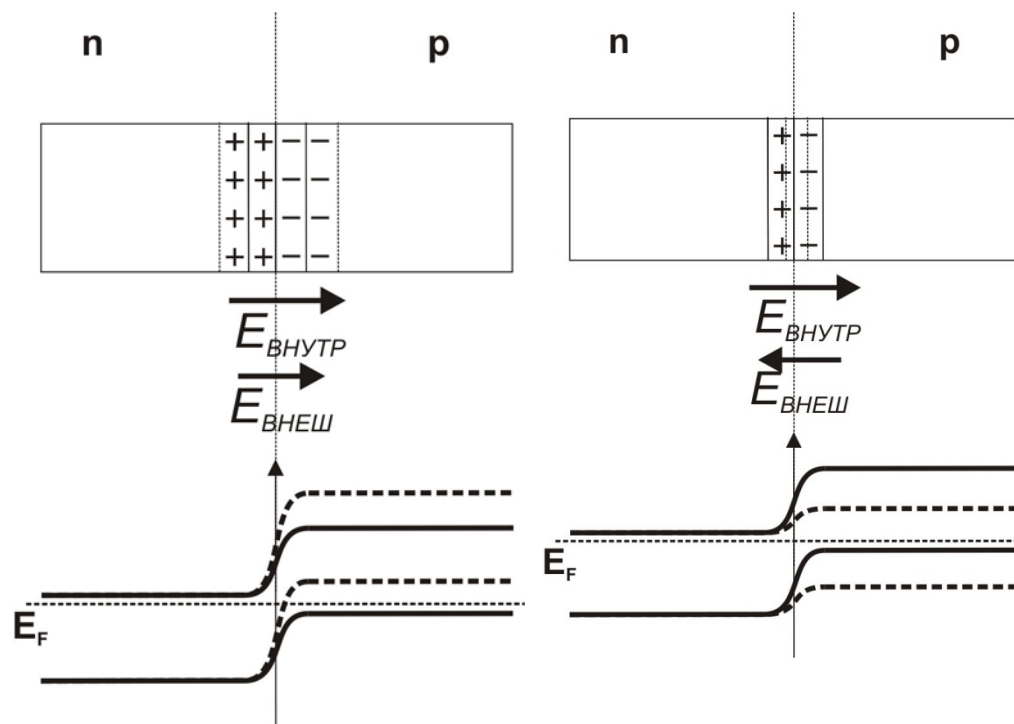
$$U = \Delta\varphi_0 - \Delta\varphi = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{n_p}{n_{p0}}$$

$$n_p = n_{p0} e^{\frac{eU}{k_B T}} \quad \text{аналогично} \quad p_n = p_{n0} e^{\frac{eU}{k_B T}}$$

$U > 0$ - инжекция

$U < 0$ - экстракция

$$\Delta n_p = n_p - n_{p0} = n_{p0} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) \quad \Delta p_n = p_n - p_{n0} = p_{n0} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$$



Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Вольт-амперная характеристика p-n-перехода

Избыточная концентрация неосновных носителей приведет к их диффузии

$$(j_{\text{диф}})_n = eD_n \frac{dn}{dx} \quad \frac{dn}{dx} \rightarrow -\frac{\Delta n}{L_n} \Rightarrow (j_{\text{диф}})_n = \frac{eD_n}{L_n} n_{p0} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$$

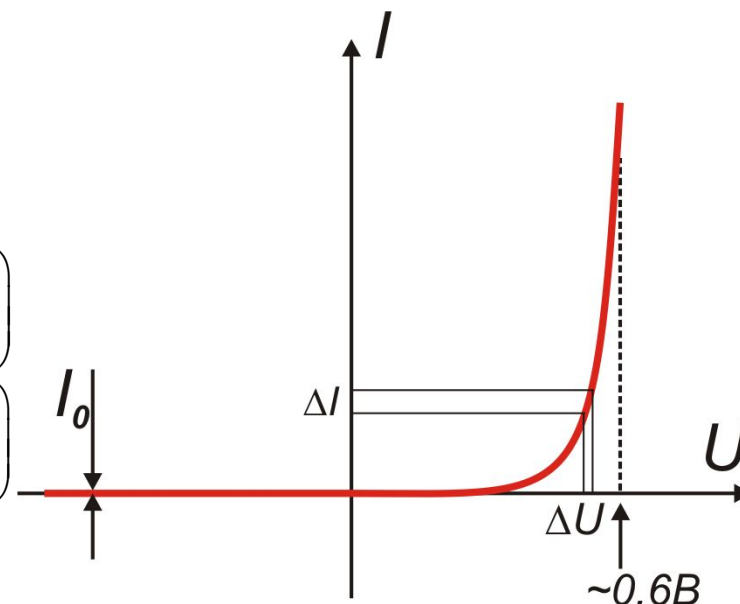
$$(j_{\text{диф}})_p = -eD_p \frac{dp}{dx} \quad \frac{dp}{dx} \rightarrow \frac{\Delta p}{L_p} \Rightarrow (j_{\text{диф}})_p = \frac{eD_p}{L_p} p_{n0} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$$

Полный ток

$$I = \left[(j_{\text{диф}})_n + (j_{\text{диф}})_p \right] \cdot S = \left(\frac{eD_n}{L_n} n_{p0} + \frac{eD_p}{L_p} p_{n0} \right) \cdot S \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$$

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$$

Ток насыщения $I_0 \sim 10^{-10} \dots 10^{-11} \text{ А}$



Полупроводниковый диод



На практике $I_0 \sim 10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ А}$

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Дифференциальное сопротивление *p-n*-перехода

Ток через *p-n*-переход сильно зависит от приложенного напряжения. Вводится понятие **дифференциального сопротивления**

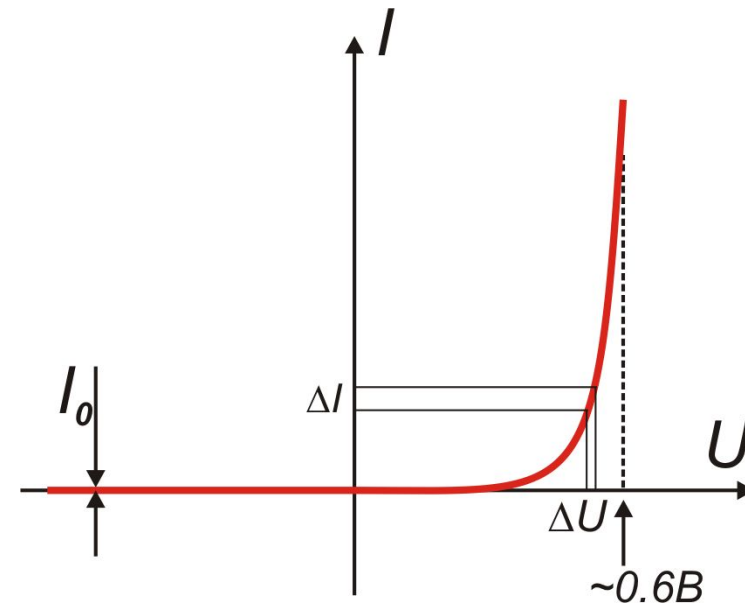
На прямой ветви ВАХ

$$U = \frac{kT}{e} \ln \frac{I}{I_0} \Rightarrow r_{pn} = \frac{dU}{dI} = \frac{k_B T}{e} \frac{1}{I_0} \frac{I_0}{I}$$

$$r_{pn} = \frac{k_B T}{e} \frac{1}{I} \quad \frac{k_B T}{e} \approx 0.026 \text{ В}$$

При токе $I = 10^{-3} \text{ А}$ $r_{pn} = 250 \text{ м}$

При токе $I = 10^{-6} \text{ А}$ $r_{pn} = 25 \text{ кОм}$

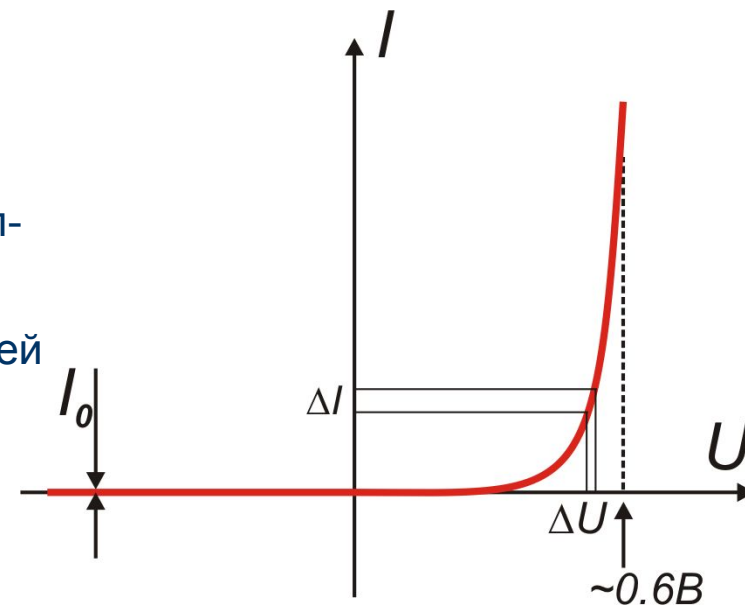
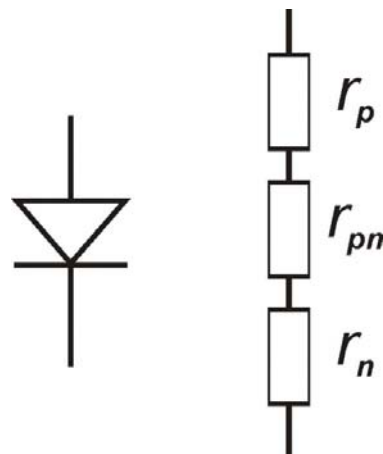


$$r_{pn} = I_0 \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$$

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Причины отличия реальной ВАХ от идеальной

- На прямой ветви: сопротивление слоев полупроводника; сопротивление контактов металл-полупроводник.
- На обратной ветви: термогенерация носителей в области p-n-перехода; поверхностные утечки (генерация и рекомбинация на поверхностных энергетических уровнях, молекулярные и ионные пленки, шунтирующие p-n-переход)



$$I = I_0 \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$$

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Барьерная и диффузионная емкость p - n -перехода

- Если на p - n -переход подать небольшое по сравнению с величиной потенциального барьера напряжение, это приведет к изменению ширины и соответствующему изменению заряда, накопленного в обедненном слое (обратное включение) или в инжектированном слое неосновных носителей (прямое включение).
- Емкость отражает наличие зависимости между зарядом и приложенным напряжением
- При обратном включении p - n -перехода возникает **барьерная** емкость, а при прямом – **диффузионная** емкость.

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Барьерная емкость p - n -перехода

Толщина обедненного слоя при обратном смещении

$$l_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon}{e} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)} \cdot (\Delta\varphi_0 - U)} \quad Q = el_pSN_A \quad l_p = l \frac{N_D}{N_A + N_D}$$

$$Q = el_pSN_A = eSl \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} = \sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon e \frac{N_A N_D}{N_A(N_A + N_D)} \cdot (\Delta\varphi_0 - U)}$$

Барьерная емкость актуальна при обратном смещении

$$C_{\text{Бар}} = \frac{dQ}{dU} = S \left(2\varepsilon_0\varepsilon e \frac{N_A N_D}{N_A(N_A + N_D)} \right) \frac{1}{2(\Delta\varphi - U)^{1/2}}$$

$$C_{\text{Бар}} = S \sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon e}{2(\Delta\varphi_0 - U)} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}}$$

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Диффузионная емкость р-п-перехода

При прямом включении в базе (слой с меньшей концентрацией примеси) имеется избыточный заряд неосновных носителей, зависящий от приложенного напряжения

$$\Delta Q = SL_n e \cdot \Delta n_p = SL_n e \cdot n_{p0} \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$$

$$C_{\text{Диф}} = \frac{dQ}{dU} = \frac{SL_n e^2 n_{p0}}{k_B T} e^{\frac{eU}{k_B T}} = \frac{e}{k_B T} SL_n n_p = \frac{e}{k_B T} I \tau$$

τ - время жизни неосновных носителей в базе.

Диффузионная емкость актуальна при прямом смещении

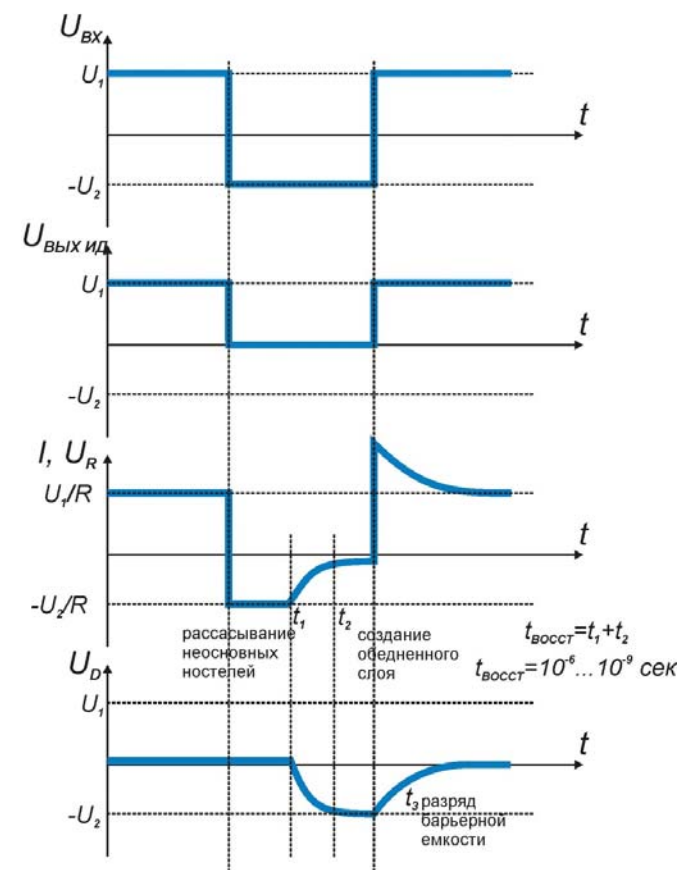
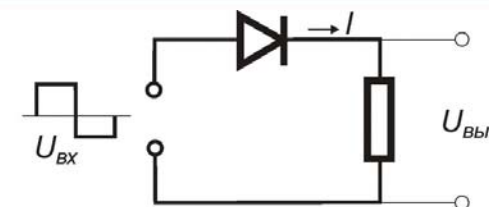
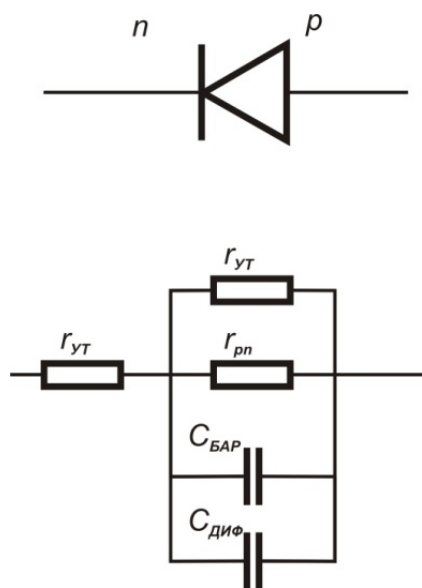
Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Быстродействие полупроводниковых диодов

Протекание токов через $p-n$ -переход связано с перезарядом барьерной и диффузионной емкостей

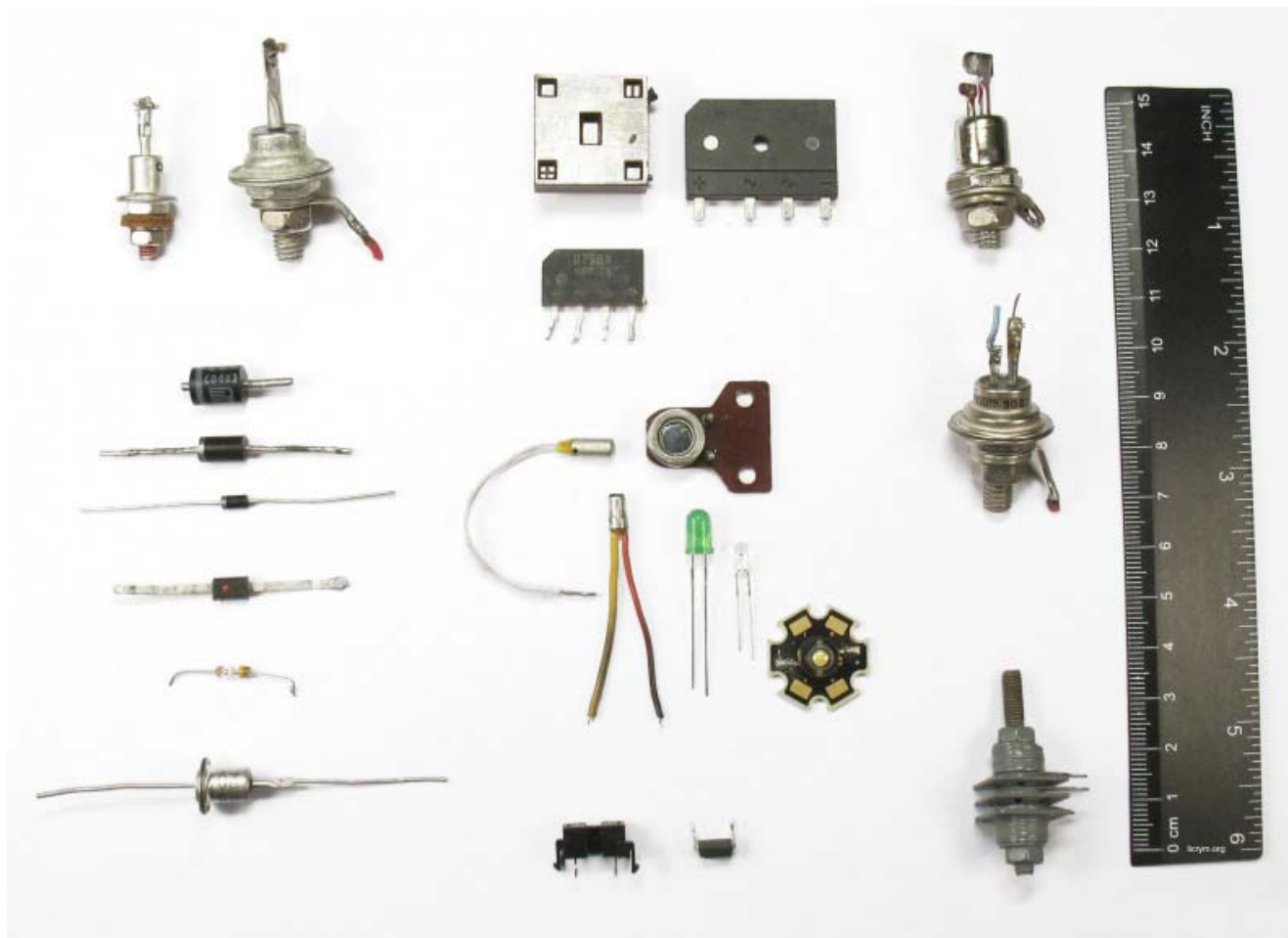
Эквивалентная схема диода



Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Виды полупроводниковых диодов

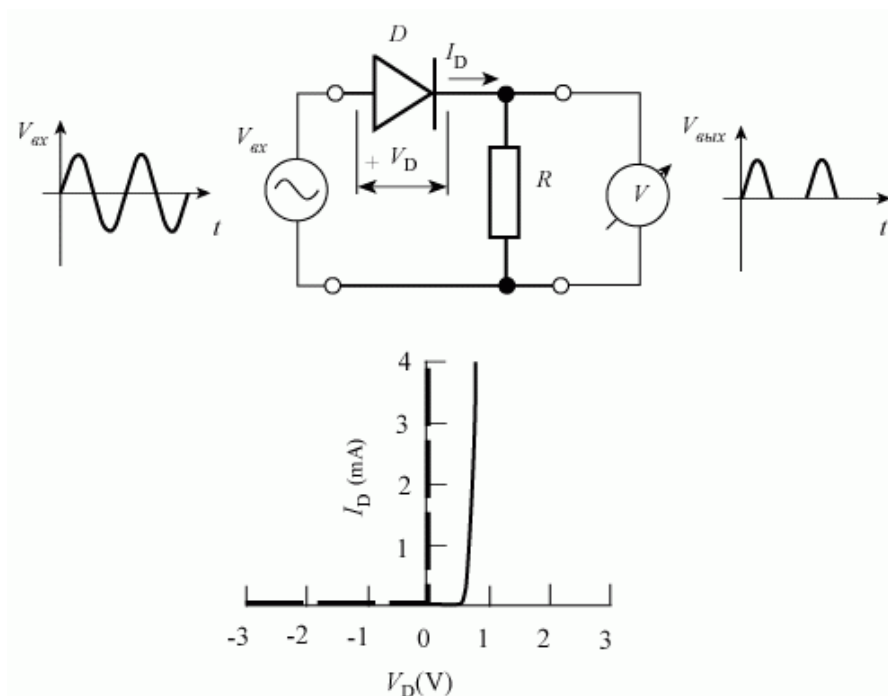


Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Виды полупроводниковых диодов

- **Силовые (выпрямительные) диоды** – для преобразования переменного напряжения источников питания в постоянное. Основой силового диода является обычный **p-n-переход**, вентиляные свойства которого в данном случае находят свое основное применение.

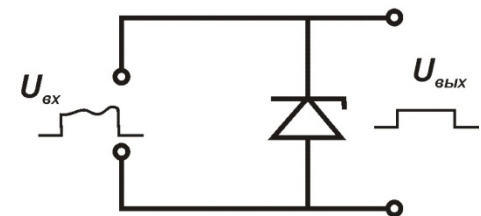
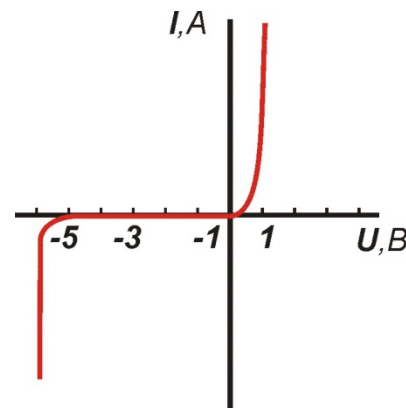
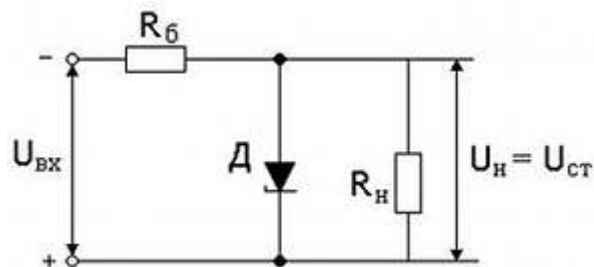


Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Виды полупроводниковых диодов

- **Стабилитроны (опорные диоды)** – полупроводниковые диоды, на обратной ветви вольтамперной характеристике которых имеется участок слабой зависимости напряжения от протекающего тока. Рабочий участок ВАХ опорного диода находится в области электрического (полевого или лавинного) пробоя.

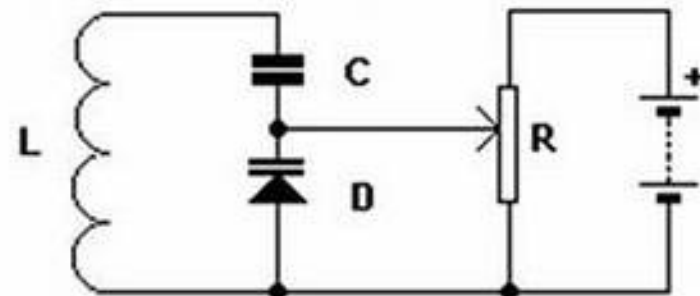


Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Виды полупроводниковых диодов

- **Варикапы.** Полупроводниковые нелинейные управляемые конденсаторы. В варикапах используется свойство *p-n*-перехода изменять свою барьерную емкость под действием внешнего напряжения. Основное применение варикапов – электронная перестройка частоты колебательных контуров.



Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Виды полупроводниковых диодов

- **Диоды ВЧ и СВЧ.** Имеют минимальные емкость и индуктивность.
Уменьшить диффузионную емкость можно:
 - за счет уменьшения времени жизни, для чего используется легирование материалами, образующими большое число ловушек, например, золотом. Также емкость уменьшается при уменьшении ширины базы и площади **p-n**-перехода;
 - за счет использования гетеропереходов;
 - за счет использования барьеров Шоттки.

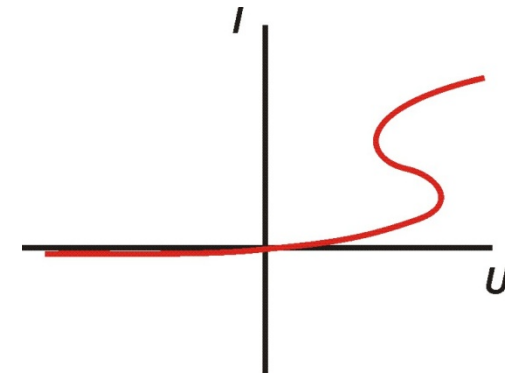
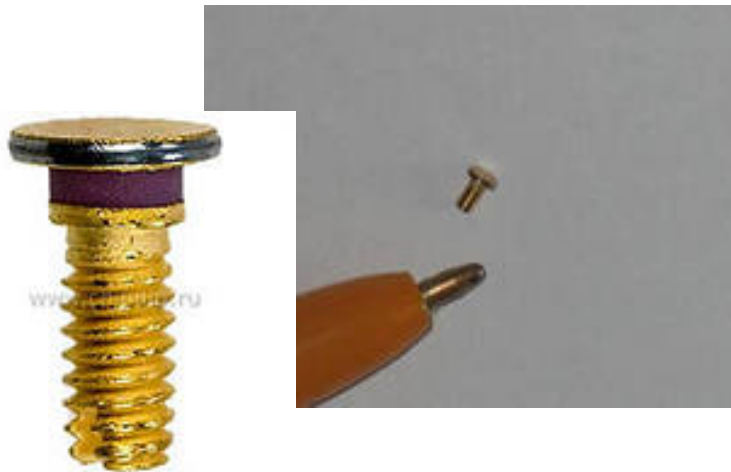


Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Виды полупроводниковых диодов

- **Генераторные диоды (диоды Ганна)** – для генерации СВЧ-колебаний. В отличие от туннельных диодов, участок ВАХ с отрицательным сопротивлением проявляется только на высоких частотах, но не в статическом режиме.

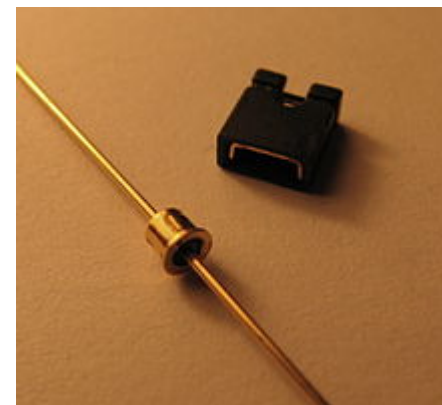
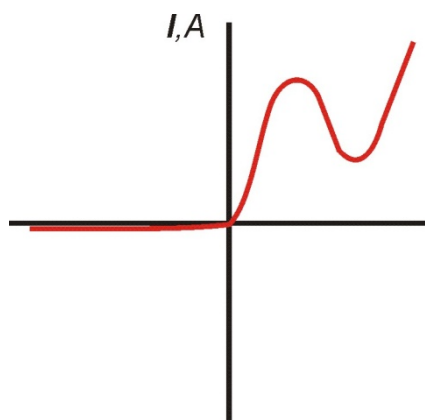
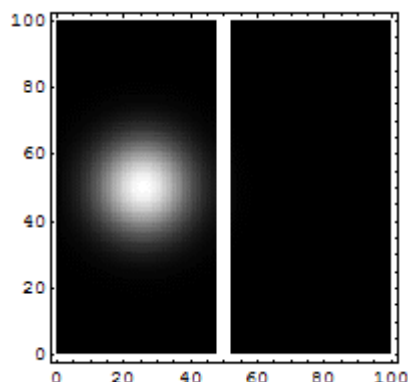


Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Виды полупроводниковых диодов

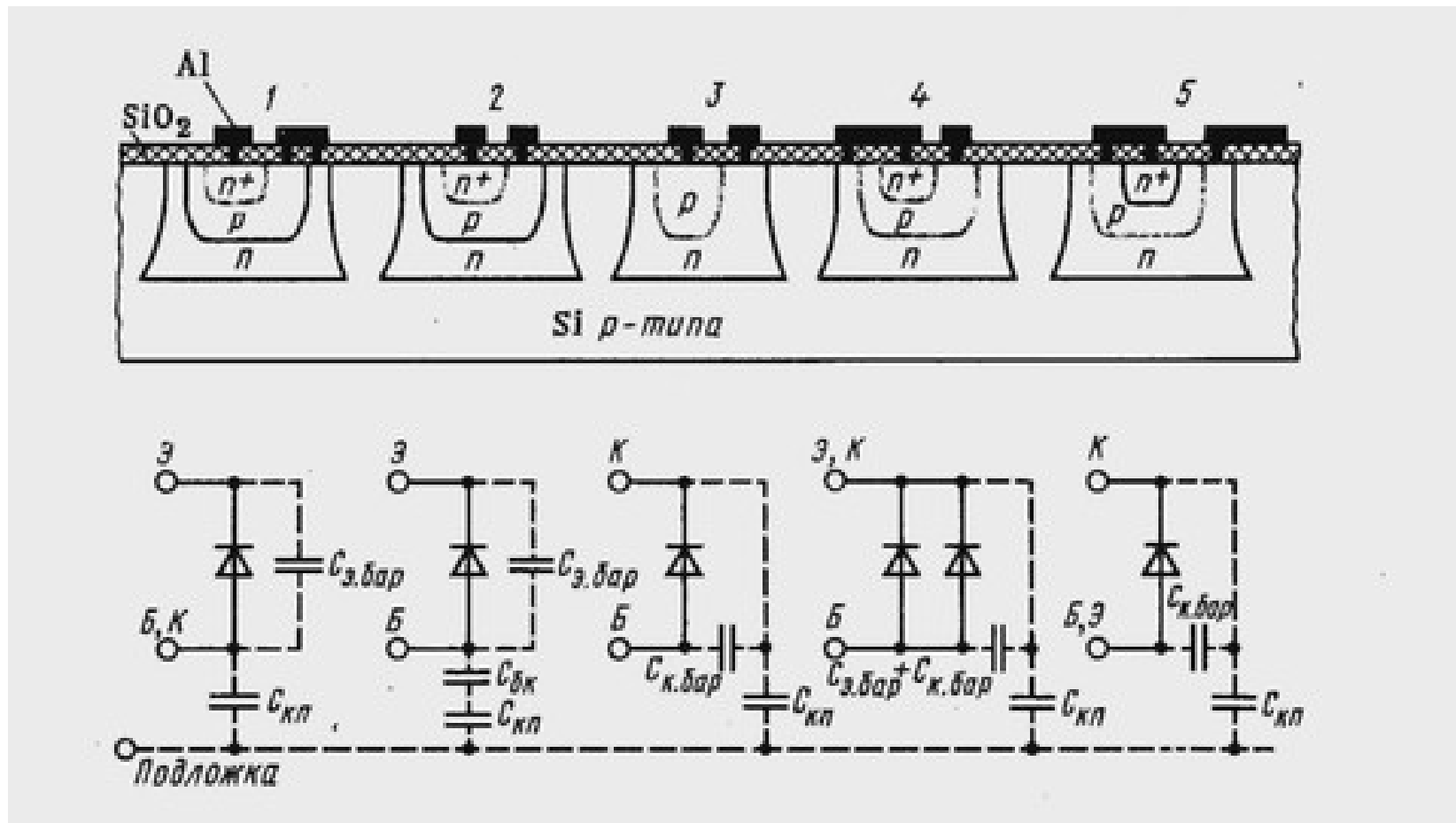
- **Туннельные диоды** – характеризуются наличием на их ВАХ участка с отрицательным сопротивлением. Могут усиливать сигналы будучи двухполюсниками. Полупроводники *p*- и *n*-областей вырожденные (большая концентрация примесей), поэтому очень малые сопротивления *p*- и *n*-областей и очень малая ширина обедненного слоя.



Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Виды полупроводниковых диодов

Полупроводниковые диоды в интегральном исполнении

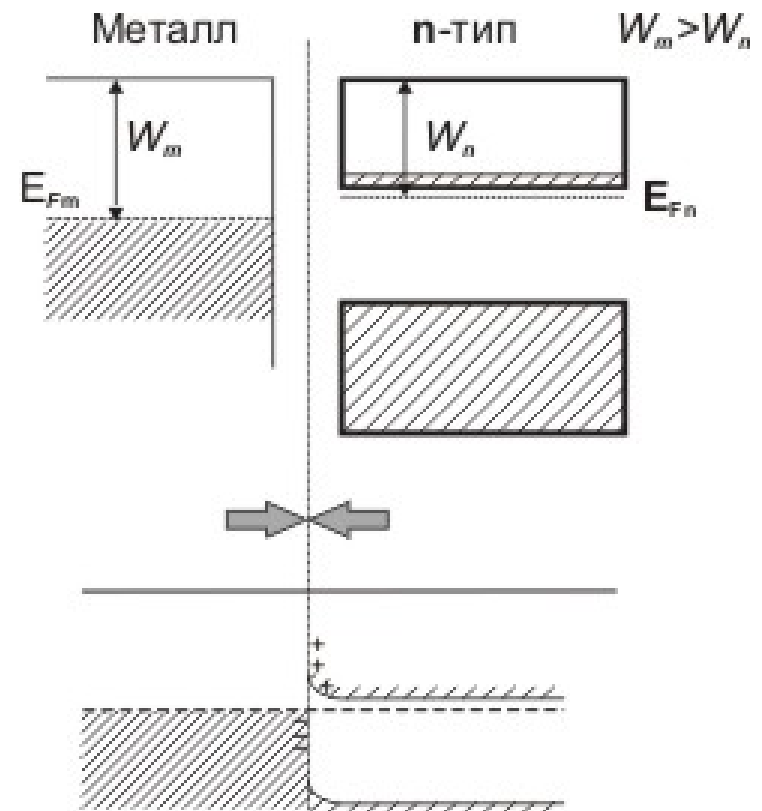
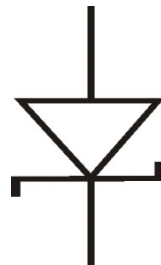


Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды КОНТАКТЫ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК

Диоды Шоттки. Омические контакты

Диоды Шоттки

В диодах с барьером Шоттки, процессы прямой проводимости формируются за счет только основных носителей заряда. Таким образом, отсутствует диффузионная емкость, связанная с накоплением и рассасыванием неосновных носителей заряда в базе, что и определяет их хорошие высокочастотные свойства.

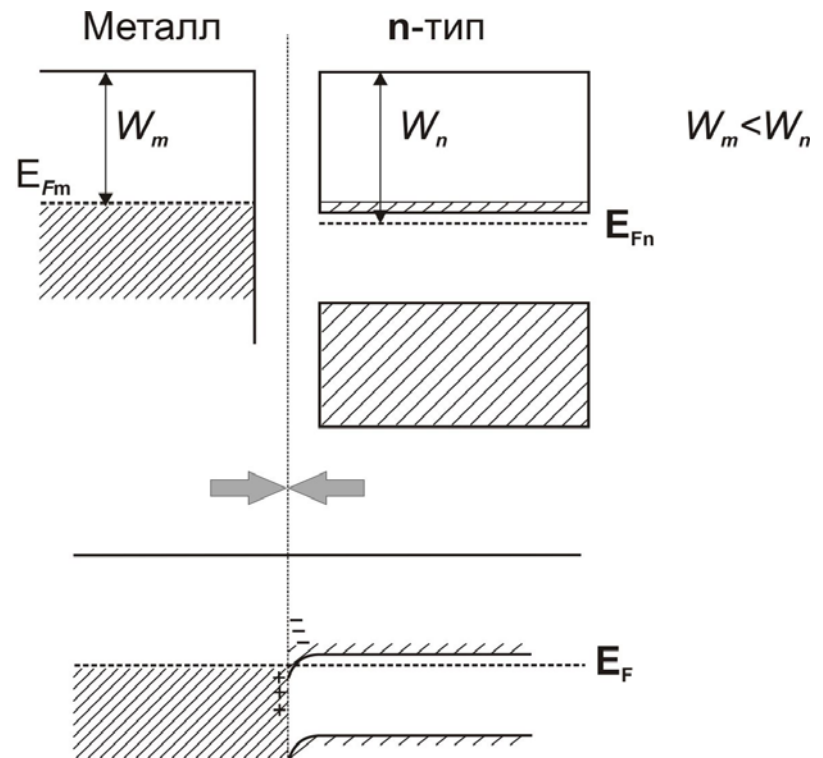


Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды КОНТАКТЫ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК

Диоды Шоттки. Омические контакты

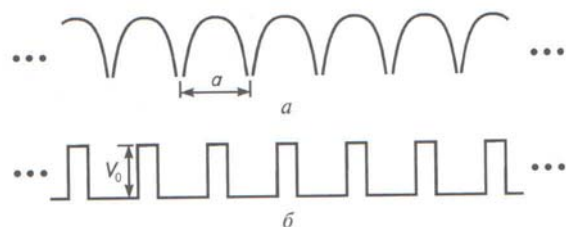
Омические контакты

При контакте металла с полупроводником потенциальный барьер отсутствует



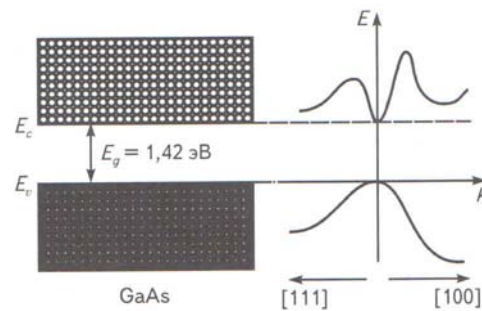
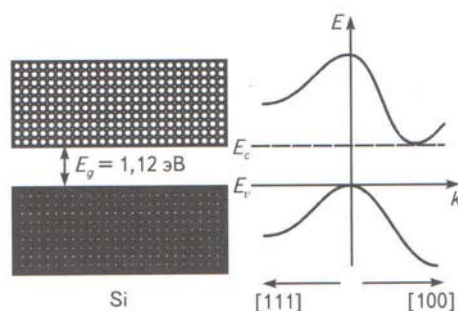
Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

Оптоэлектронные устройства на основе *p-n*-перехода Прямозонные и непрямозонные полупроводники

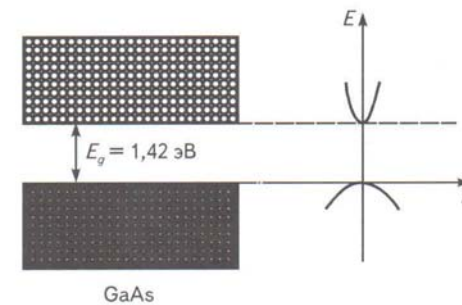
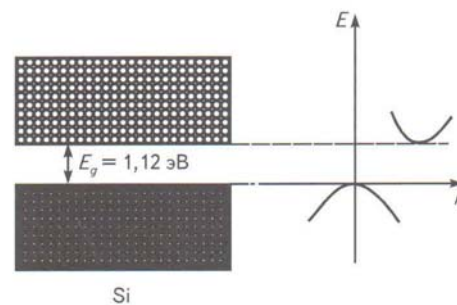


$$E_n = \frac{P_n^2}{2m} = k_n^2 \hbar$$

Из-за взаимодействия с решеткой **связь энергии с импульсом** имеет сложный характер

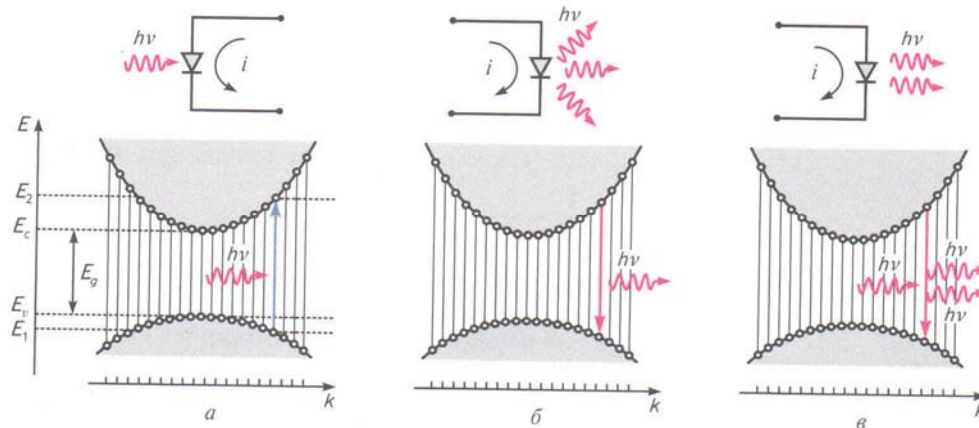


Волновая функция электрона в полупроводнике вычисляется для периодического потенциала (задача **Кронига-Пенни**)



Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

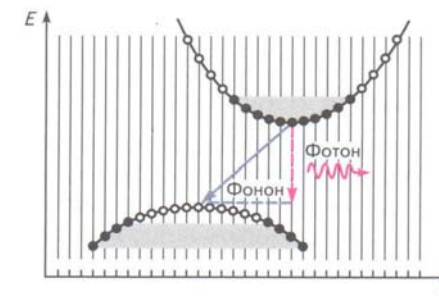
Оптоэлектронные устройства на основе *p-n*-перехода



$A^{III}B^V$: **GaAs, GaN**
Светодиоды,
полупроводниковые лазеры

Прямозонные полупроводники

Si
Используется для
фотодиодов и солнечных
батареи, но не может быть
источником излучения

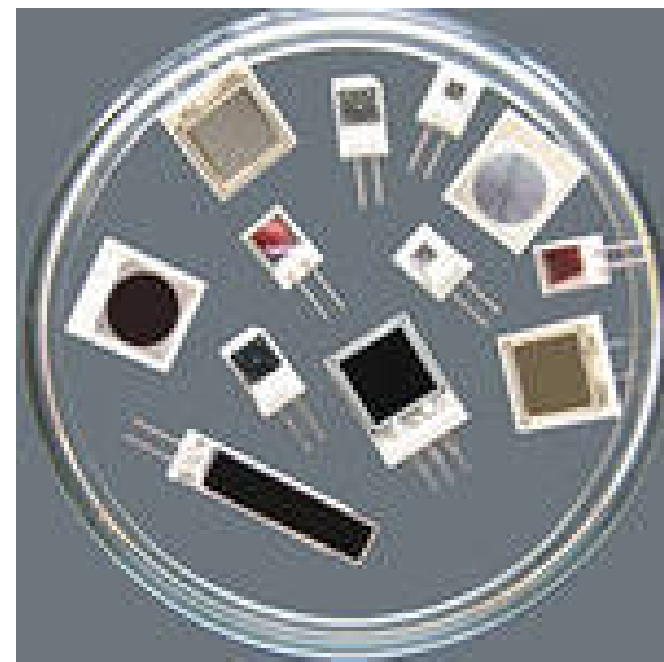
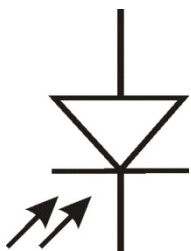


Непрямозонные полупроводники

Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

Оптоэлектронные устройства на основе *p-n*-перехода

Фотодиоды – оптоэлектронные устройства с одним *p-n*-переходом. Используется явление внутреннего фотоэффекта, то есть, процесса ионизации атомов кристаллической решетки основного полупроводника или примеси квантами света, сопровождающийся образованием подвижных носителей заряда.



Лекция 3. Элементы физики полупроводников. Полупроводниковые диоды

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

Оптоэлектронные устройства на основе *p-n*-перехода

- **Светодиоды** – излучают свет при подаче прямого смещения.

