

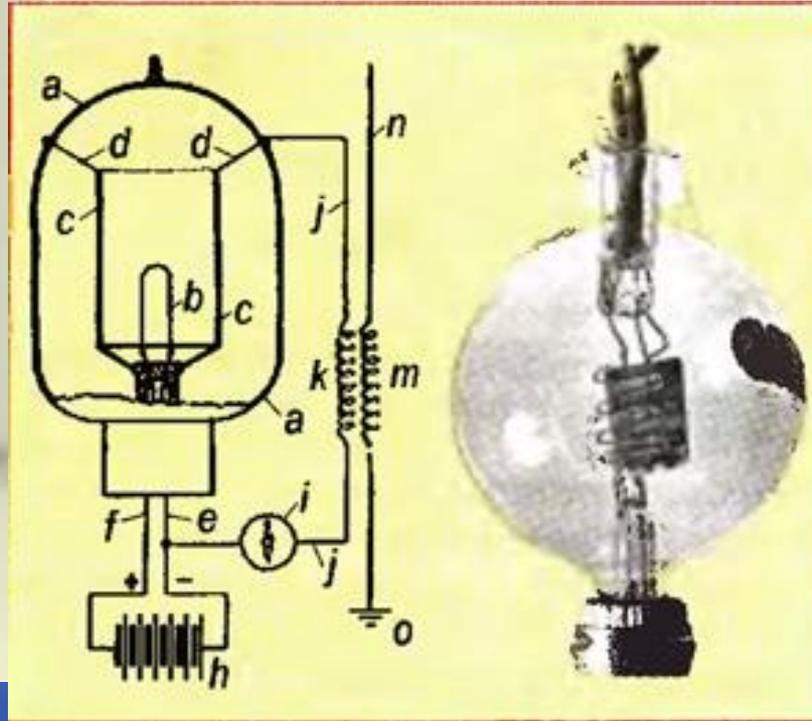
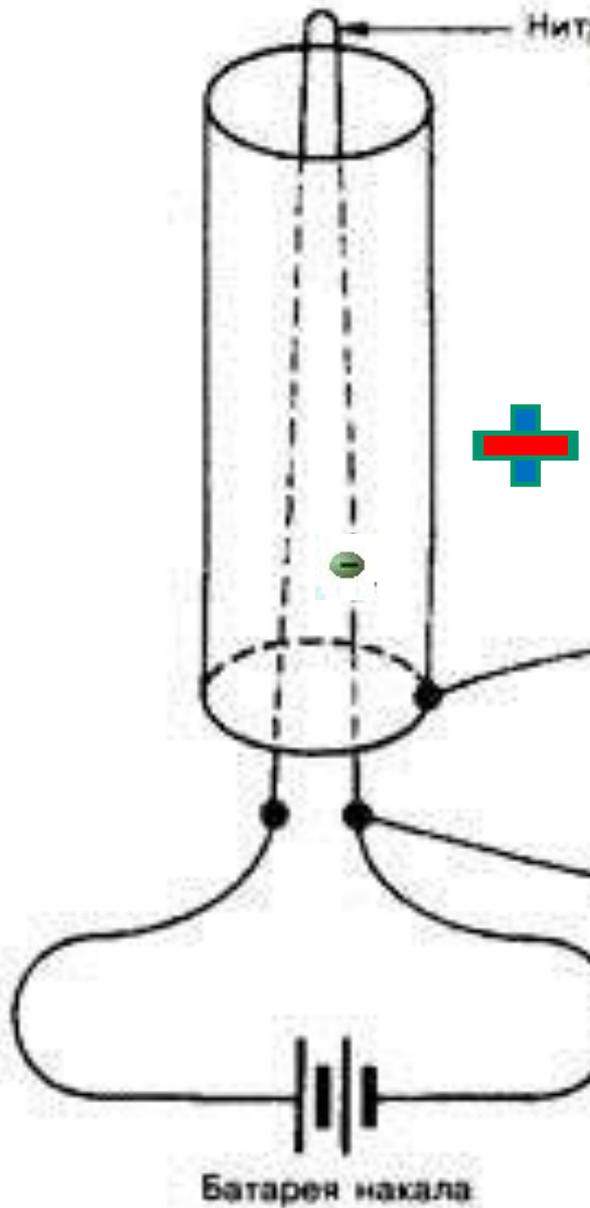
Тема лекции: Физика наноструктур и элементы электроники.

1. Свободный электрон и потенциальная яма.

2. Основы зонной теории полупроводников.

3. Диоды и транзисторы.

Наноинженерия – междисциплинарная область фундаментальной и прикладной науки и техники, предметом которой являются исследования, проектирование и совершенствование методов производства и применения интегрированных систем, основанных на законах и принципах нанотехнологий и микросистемной техники.

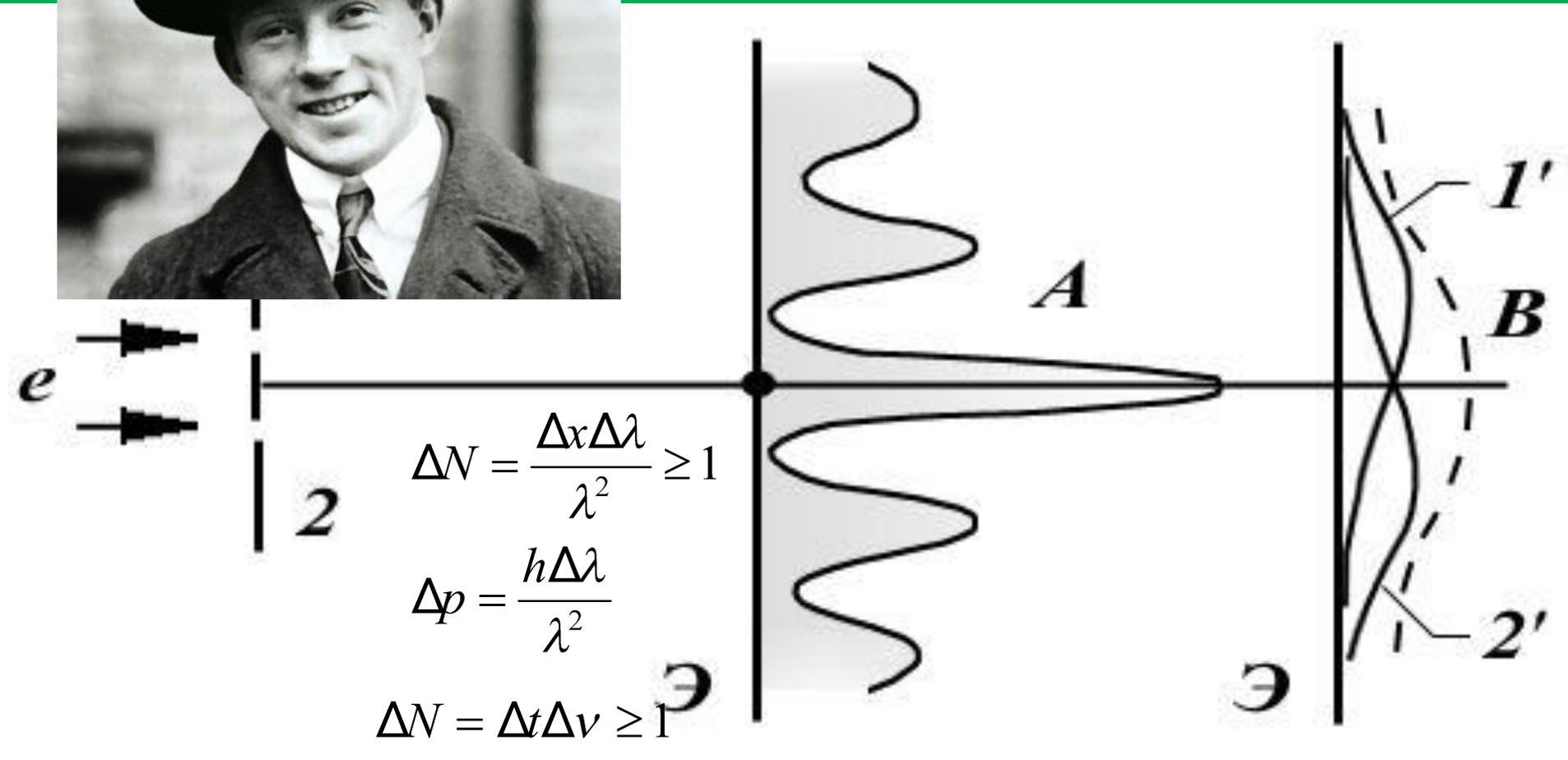


Джон А. Флеминг

физик Джозеф
одну из первых
тома.



$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\mathbf{r}) + U(\mathbf{r}) \Psi(\mathbf{r}) = \varepsilon \Psi(\mathbf{r})$$

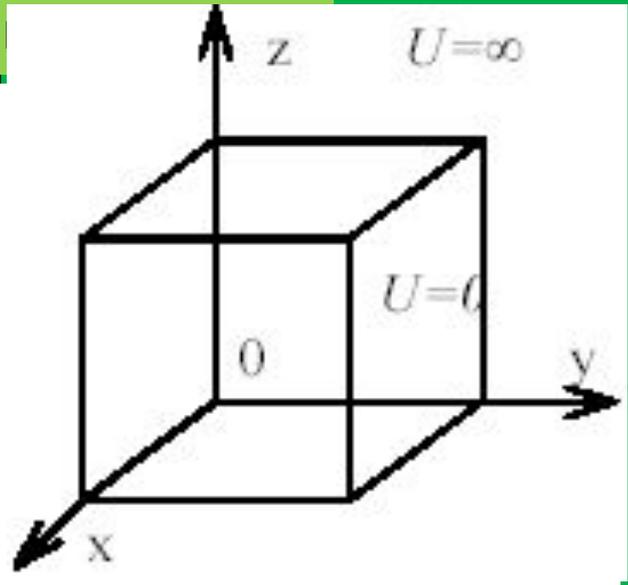


$$\Delta \nu = \frac{\Delta \varepsilon}{h} \quad \lambda_D = \frac{h}{p} \quad \lambda_D = \frac{h}{\sqrt{2m\varepsilon}}$$

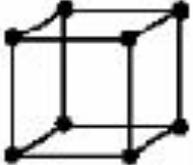
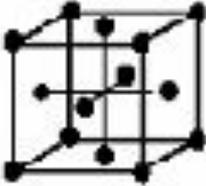
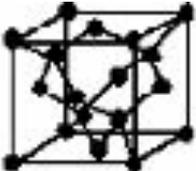
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\mathbf{r}) + U(\mathbf{r}) \Psi(\mathbf{r}) = \varepsilon \Psi(\mathbf{r})$$

$$\Psi(\mathbf{r}) = A \sin(kr) + B \cos(kr)$$

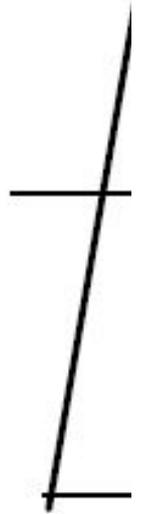
Квантовая точка – наноструктура, в которой движение носителей ограничено по всем пространственным степеням свободы.

Система	Потенциал	Уравнение Шредингера Волновая функция	Связь энергии с волновым вектором.
Частица в одномерной бесконечно	$U(x) = 0,$	$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \Psi(x) = \varepsilon \Psi(x)$	$\varepsilon = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2ml^2}$
		$\varepsilon = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2 \pi^2 (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)}{2ml^2}$ $\Psi(\mathbf{r}) = \begin{cases} 0, & x < 0, x > l \\ \sqrt{2/l} \sin(\pi n_x x/l), & 0 < x < l \end{cases}$	
		$\Psi(\mathbf{r}) = (\sqrt{2/l})^3 \sin(\pi n_x x/l) \sin(\pi n_y y/l) \sin(\pi n_z z/l)$	

Решеткой или системой трансляций Браве называется набор элементарных трансляций или *трансляционная группа*, которыми может быть получена вся бесконечная кристаллическая решётка.

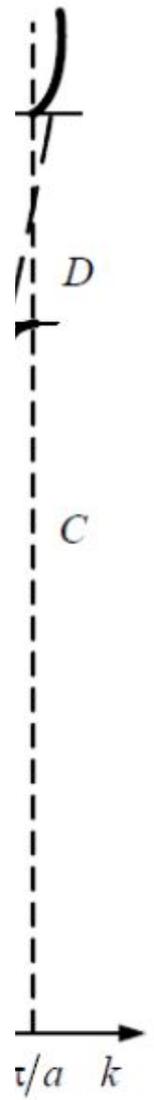
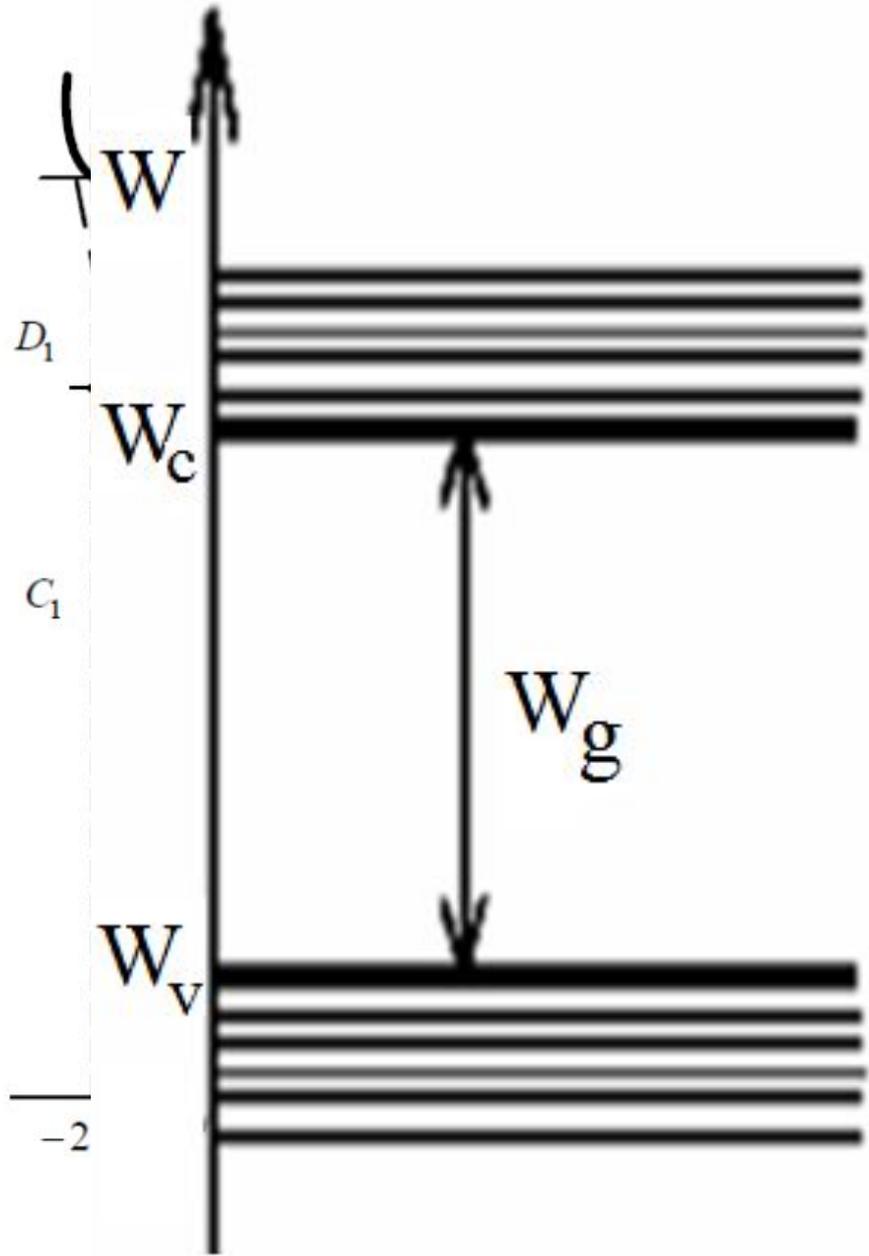
Вид решетки Браве	Название	Материал
	Простая кубическая	Полоний
	Гранецентрированная	Алюминий (Al)
	Объемно-центрированная	Молибден, вольфрам
	Типа алмаза	Германий, кремний

$U(x)$



l

$2\alpha\beta$



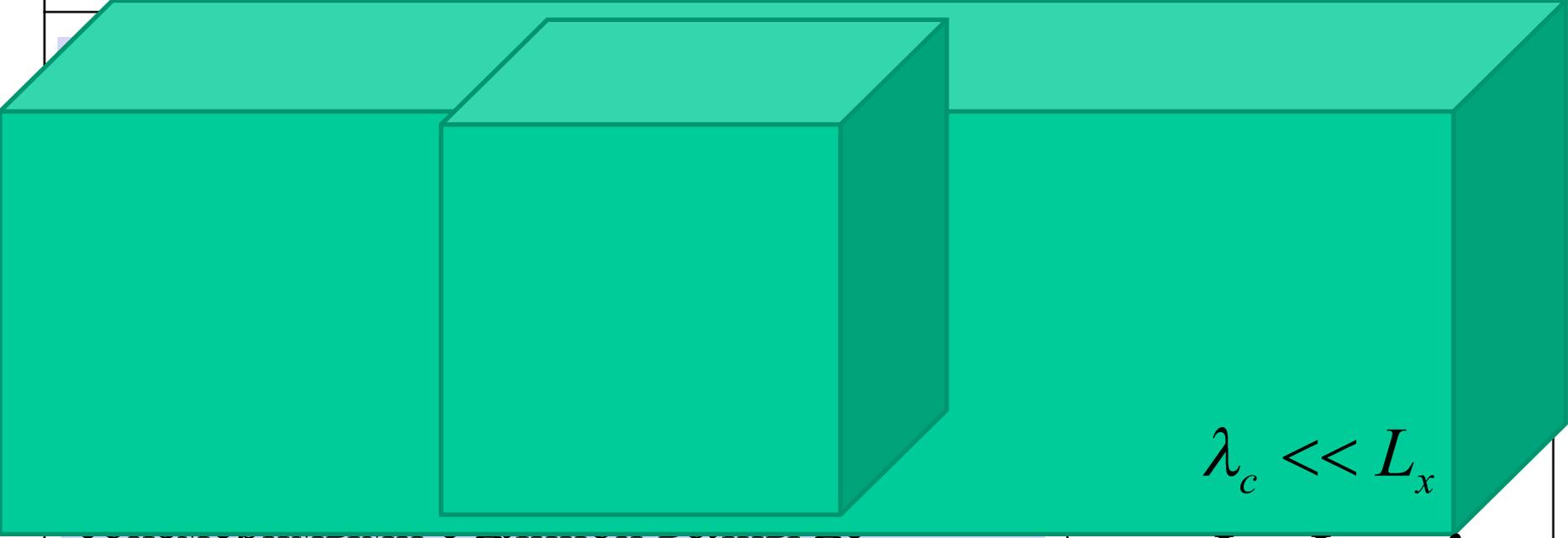
$\psi = 0$

$$k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$$



$+b)$

Основные квантовые структуры.

Наименование структуры	Условие возникновения
 <p data-bbox="48 951 1267 1100">Бройля</p>	$\lambda_c \ll L_x$ $L_y, L_z < \lambda_D$

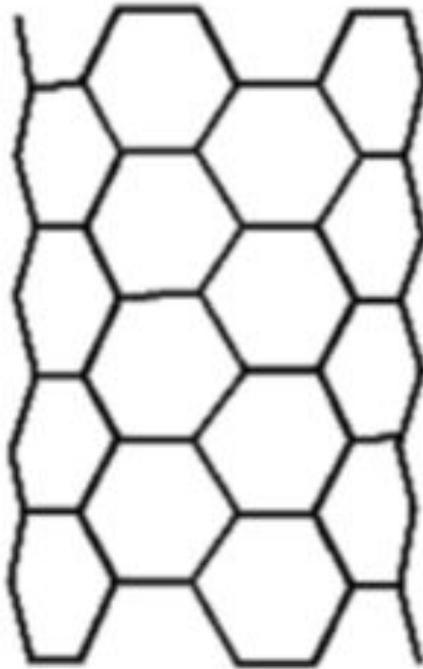
Длина свободного пробега – среднее расстояние, проходимое носителем заряда между последовательными актами рассеяния на дефектах.

Искусственные образования из типичных квантовых структур.

«Зигзаг»



«Кресло»



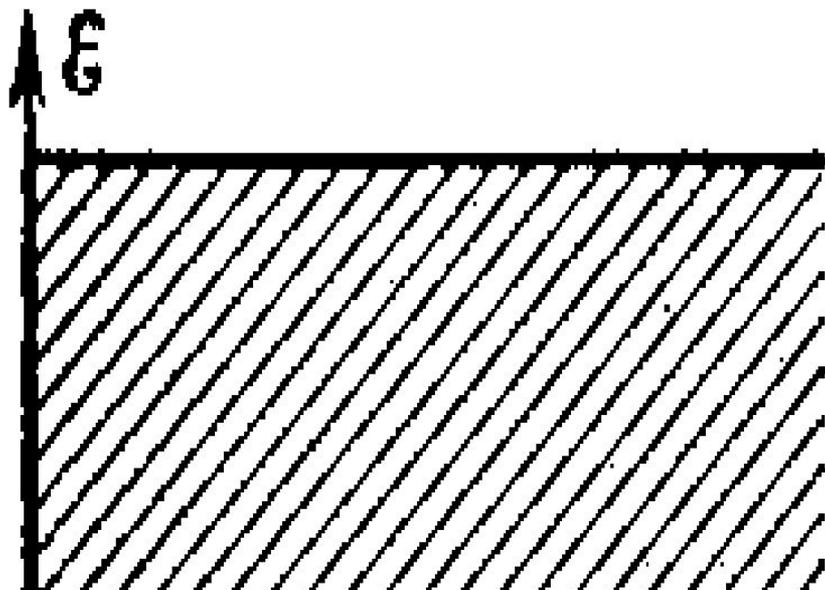
$$C = na_1 + ma_2,$$

$$D = \frac{|C|}{\pi} = \frac{a\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{n^2 + nm + m^2},$$

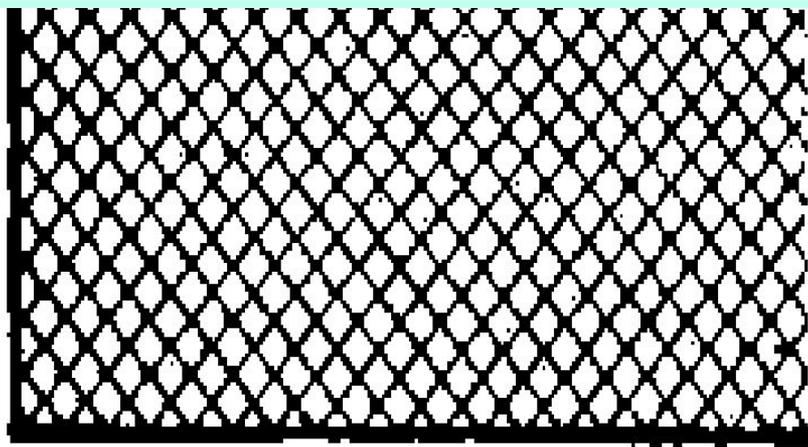
$$a = 0,142 \text{ нм}$$

Направление сворачивания листа графена задается вектором C ,

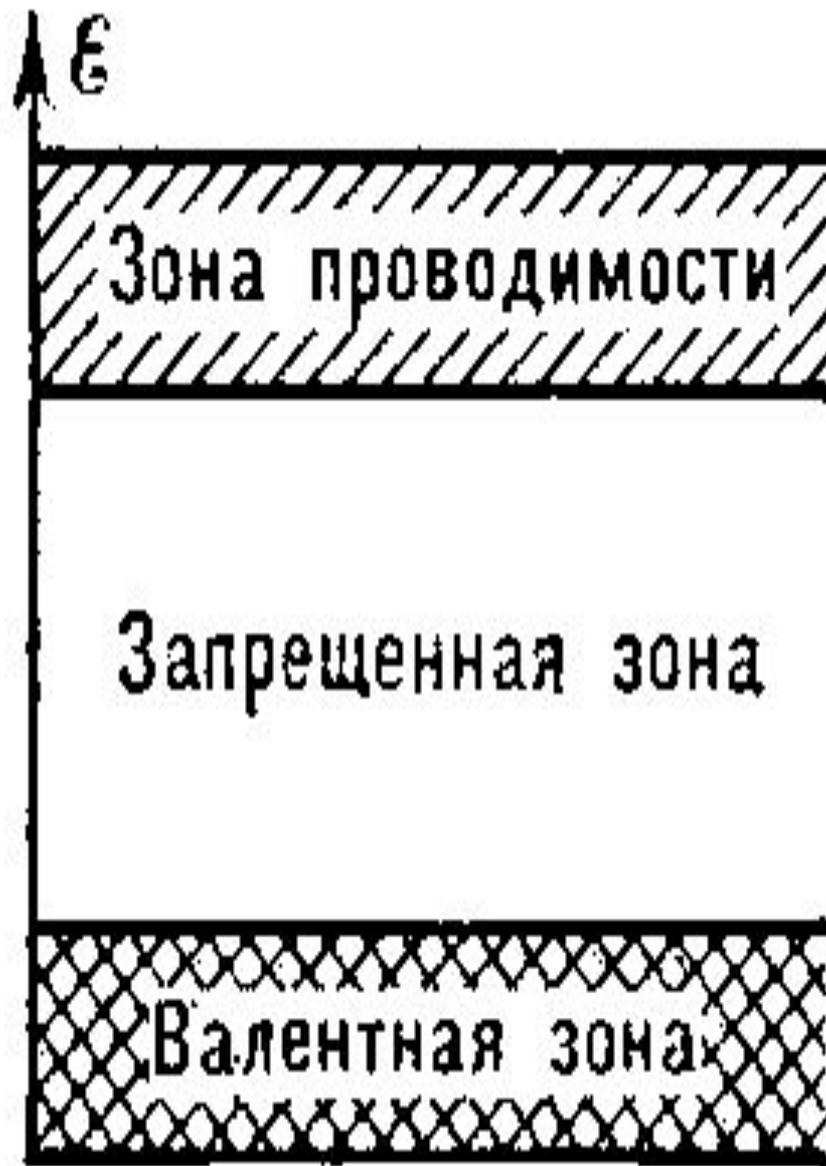
$$\theta = \arctg\left(\frac{m\sqrt{3}}{2n+m}\right) = \arccos\left(\frac{2n+m}{2\sqrt{n^2+nm+m^2}}\right)$$



Полупроводники:
 $0.3\text{эВ} < \Delta\epsilon < 3\text{эВ}$



Проводники: $\Delta\epsilon < 0.3\text{эВ}$



Диэлектрики: $\Delta\epsilon > 3\text{эВ}$

Задача:

Рассматривая только положительные триплеты (n_x, n_y, n_z) , найдем полное число волновых функций для кубического ящика, отвечающих возможным значениям энергии (вплоть до заданной величины W).

$$r^2 = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$$

Каждая волновая функция связана с двумя состояниями, отличающимся по спину.

$$N_s = \frac{1}{3} \pi \left(\frac{2mW}{\pi h^2} \right)^{3/2} L^3 = \frac{1}{3} \pi \left(\frac{2m}{h^2} \right)^{3/2} V W^{3/2}$$

Число электронных состояний dN_s для интервала энергий от W до $W+dW$

$$dN_s = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \left(\frac{2m}{h^2} \right)^{3/2} V W^{1/2} dW$$

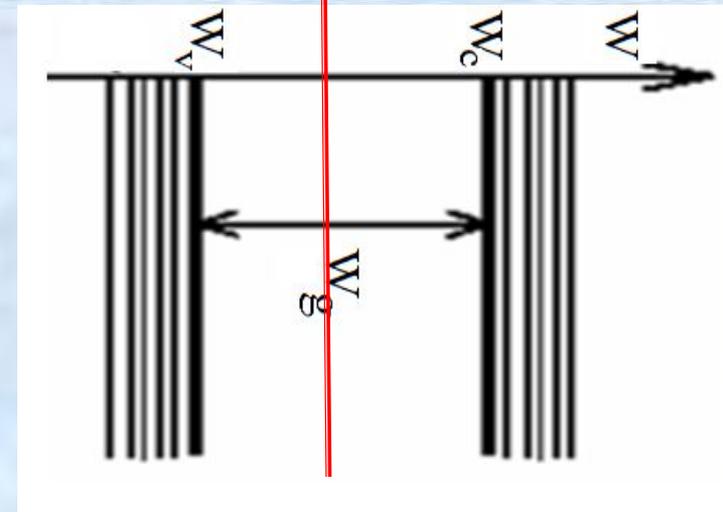
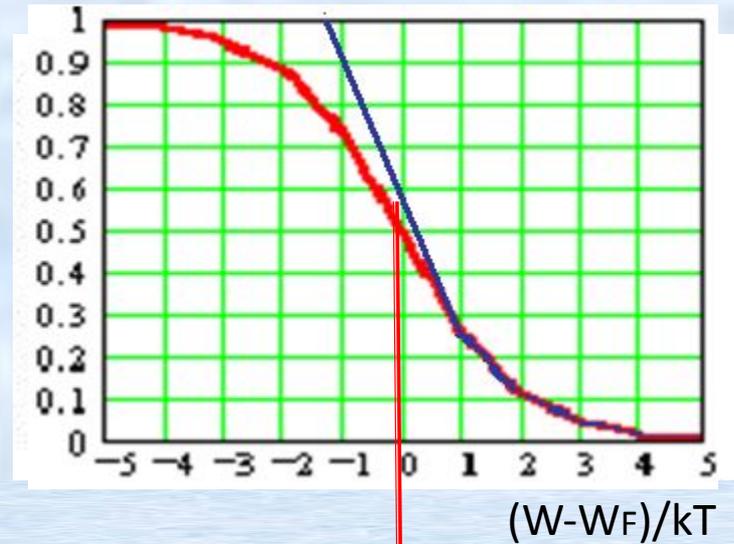
$$n_s(W) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{m}{h^2} \right)^{3/2} V W^{1/2}$$

С уровнем Ферми совпадает энергетический уровень, вероятность заполнения которого в точности равна 0,5.

$$F(W, T) = \frac{1}{1 + \exp((W - W_F)/kT)}$$

Условием равновесия двух электронных проводников (безразлично, металлов или полупроводников) является равенство их уровней Ферми.

Уровень Ферми определяется из условия, что, независимо от распределения по уровням, полное число электронов в кристалле должно оставаться неизменным.



Задача: Определить концентрацию электронов в зоне проводимости.

Концентрация разрешенных уровней в полосе значений энергии от W до $W+dW$ в зоне проводимости

$$n(W) = A(W - W_c)^{1/2} dW$$

$$n = A \int_{E_c}^{\infty} \int_{W_c}^{\infty} (W - W_c)^{1/2} \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right)} dW$$

В зоне проводимости

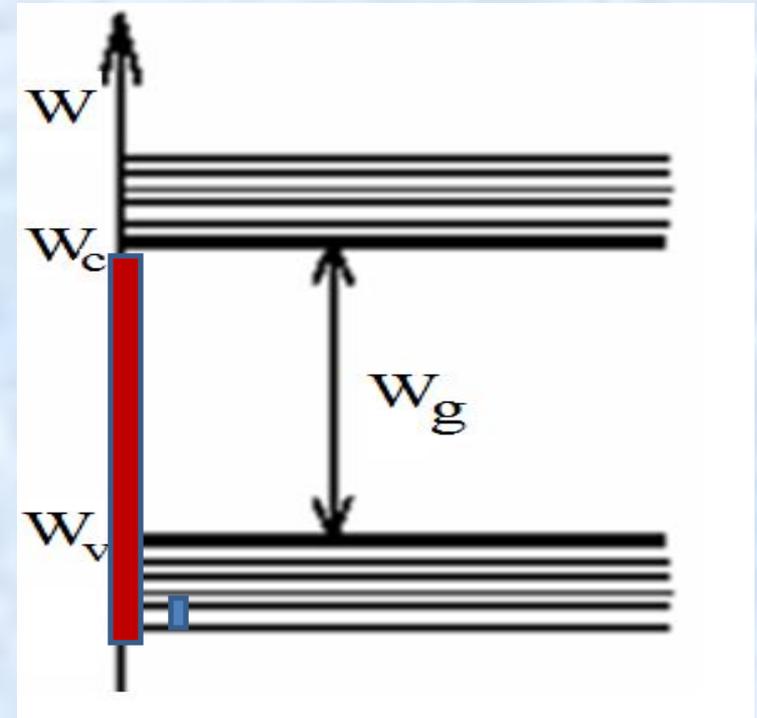
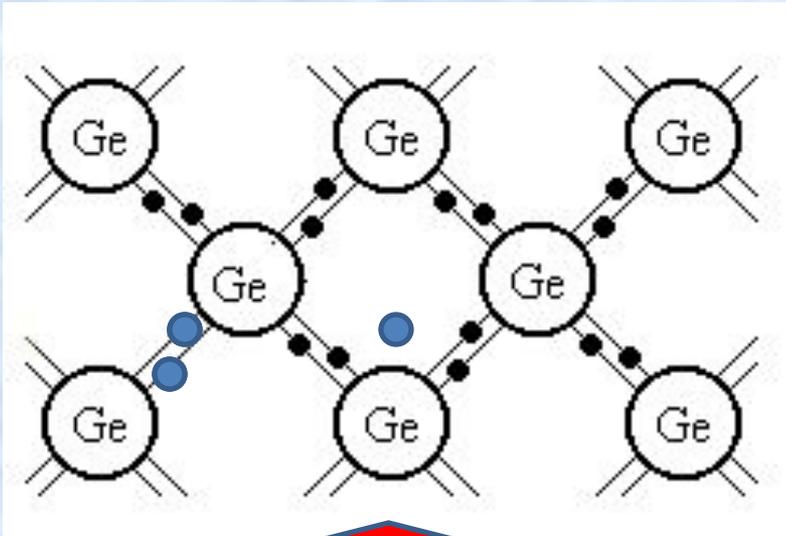
Интеграл преобразиться

$$n = A(kT)^{3/2} \exp\left(\frac{W_c - W_F}{kT}\right) \int_{W_c}^{\infty} z^{1/2} e^{-z} dz$$

Окончательно

$$n = N_c e^{-\frac{W_c - W_F}{kT}}$$

Собственные свойства полупроводника



Положение уровня Ферми в собственном п/п

Концентрации носителей зарядов.

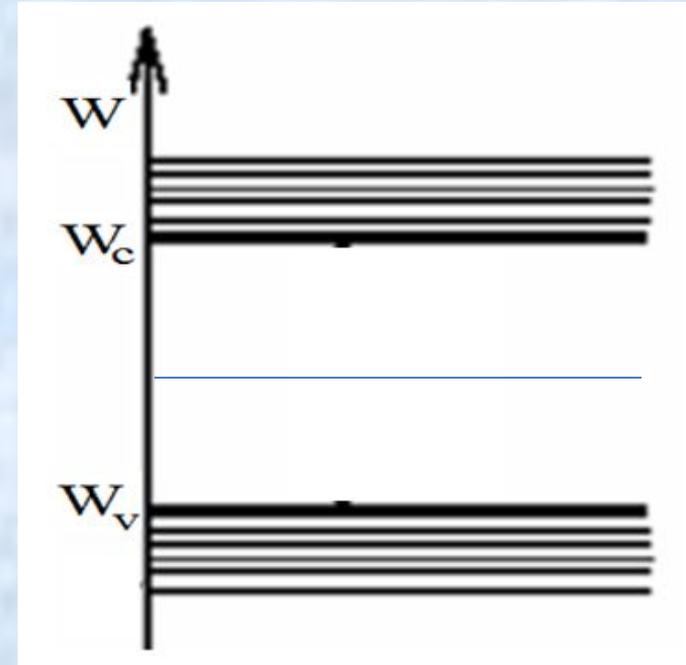
$$n = N_c e^{-\frac{W_c - W_F}{kT}} \quad p = N_v e^{-\frac{W_v - W_F}{kT}}$$

Заряды образуются парами

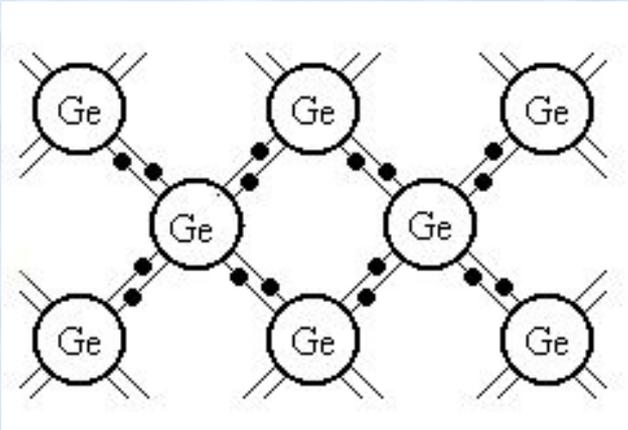
$$n = p$$

Окончательно

$$W_F = \frac{W_c + W_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right)$$



Собственные свойства полупроводника

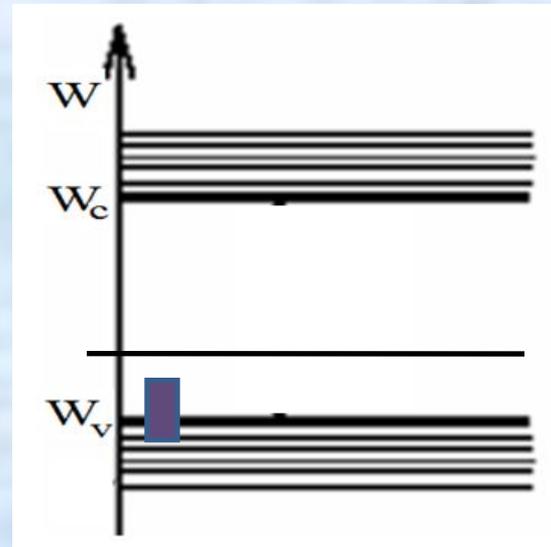
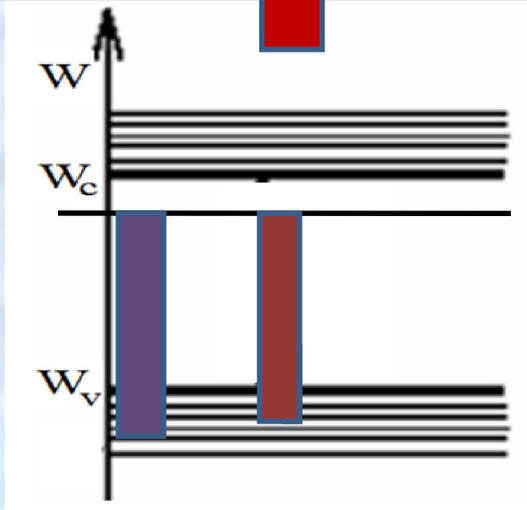
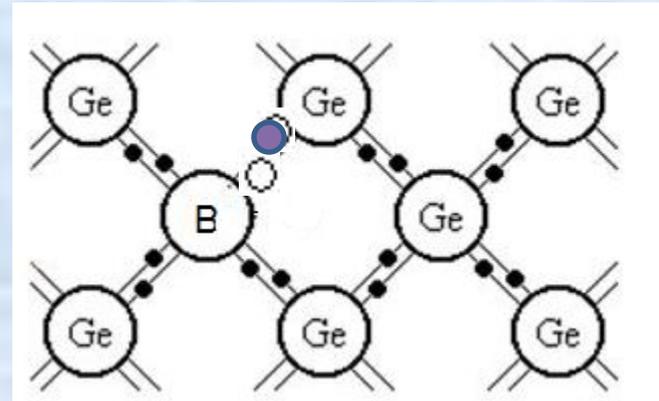
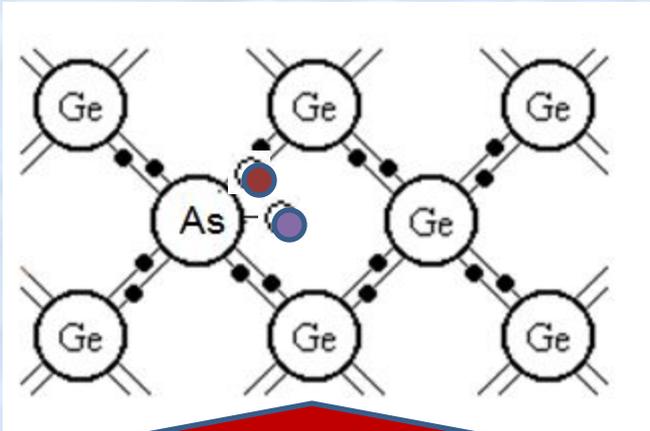


Германий	$W_g = 0,665eV$	$1:10^{10}$
Кремний	$W_g = 1,12eV$	$1:10^{13}$

Примесные полупроводники

Донорная примесь

Акцепторная примесь.



Положение уровня Ферми в примесном полупроводнике.

Концентрация носителей

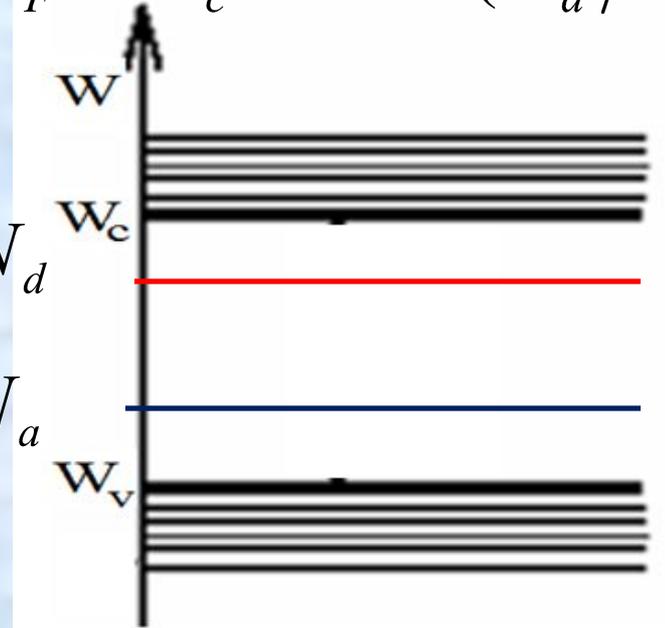
$$n = N_d = N_c \exp\left(\frac{W_F - W_c}{kT}\right)$$

$$\varphi_{F_n} = \varphi_E + \varphi_T \ln \frac{n}{N_c}$$

$$p = N_a = N_v \exp\left(\frac{W_V - W_F}{kT}\right)$$

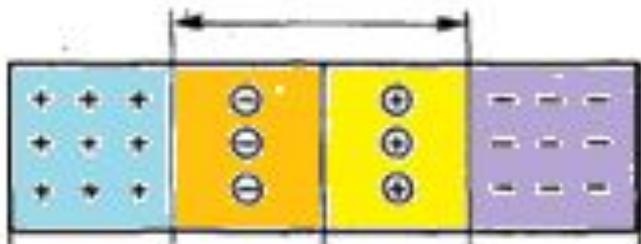
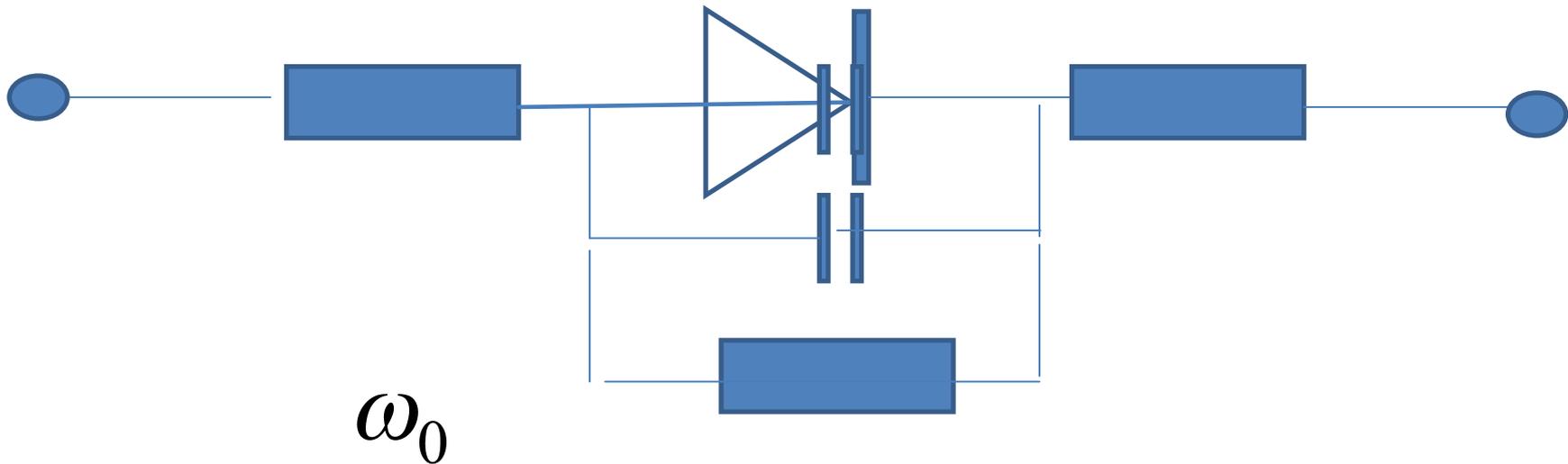
$$\varphi_{F_p} = \varphi_E - \varphi_T \ln \frac{p}{N_v}$$

$$W_F = W_c + kT \ln(N_d / N_c)$$



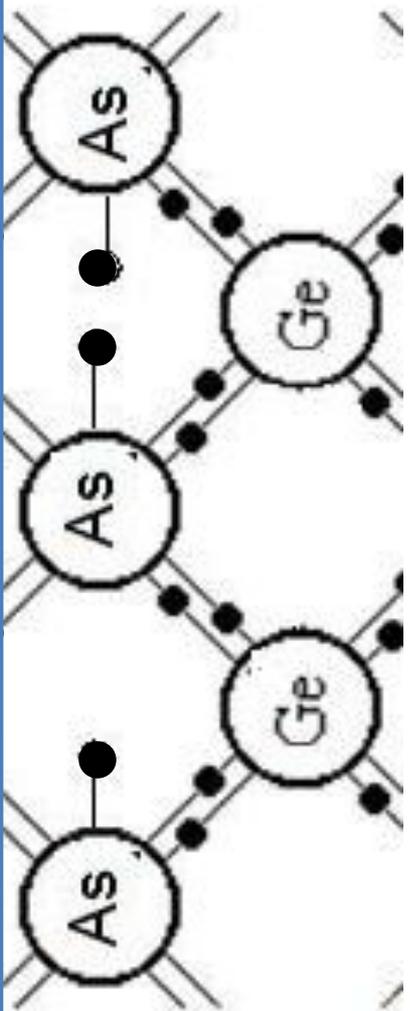
$$W_F = W_v - kT \ln(N_a / N_v)$$

Эквивалентная схема диода

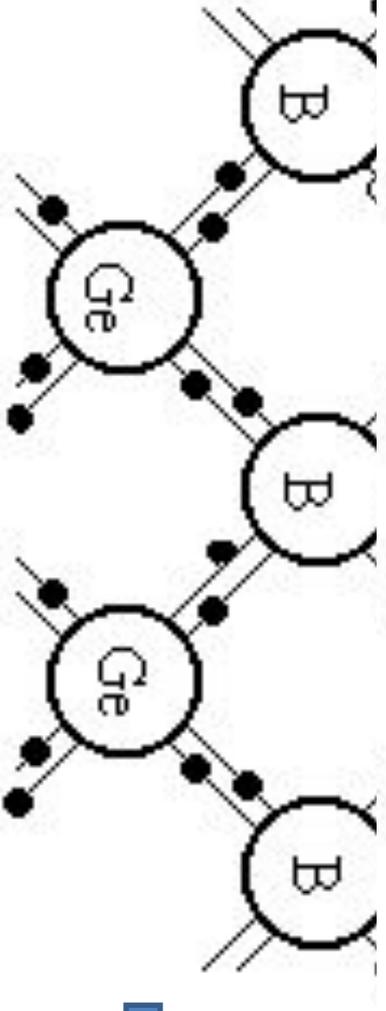
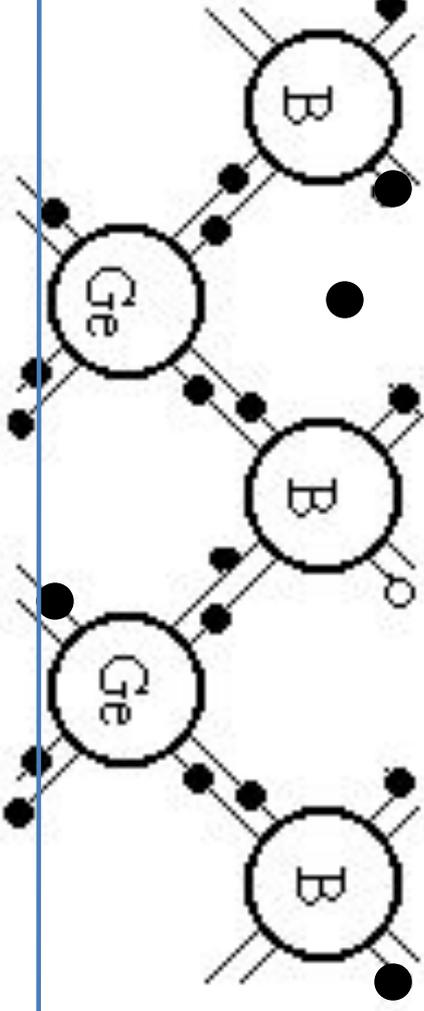
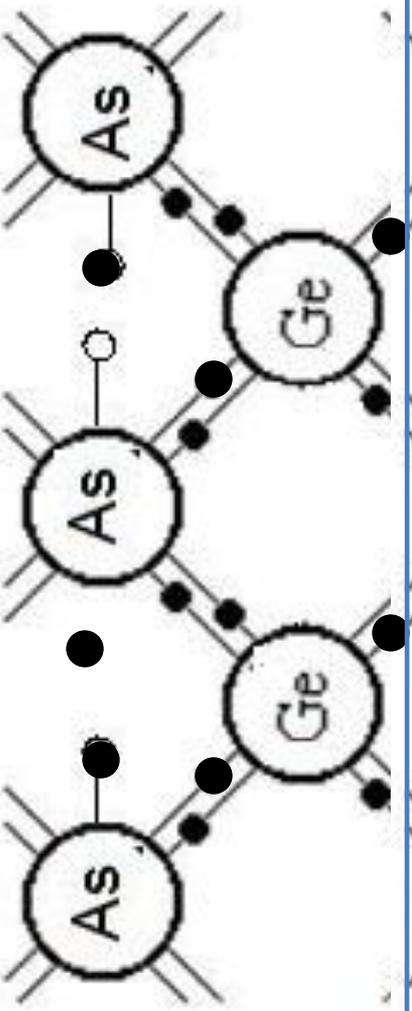


$$w_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_a \Delta\varphi}{e} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)}$$

$$C = C_{бар} + C_{диф}$$

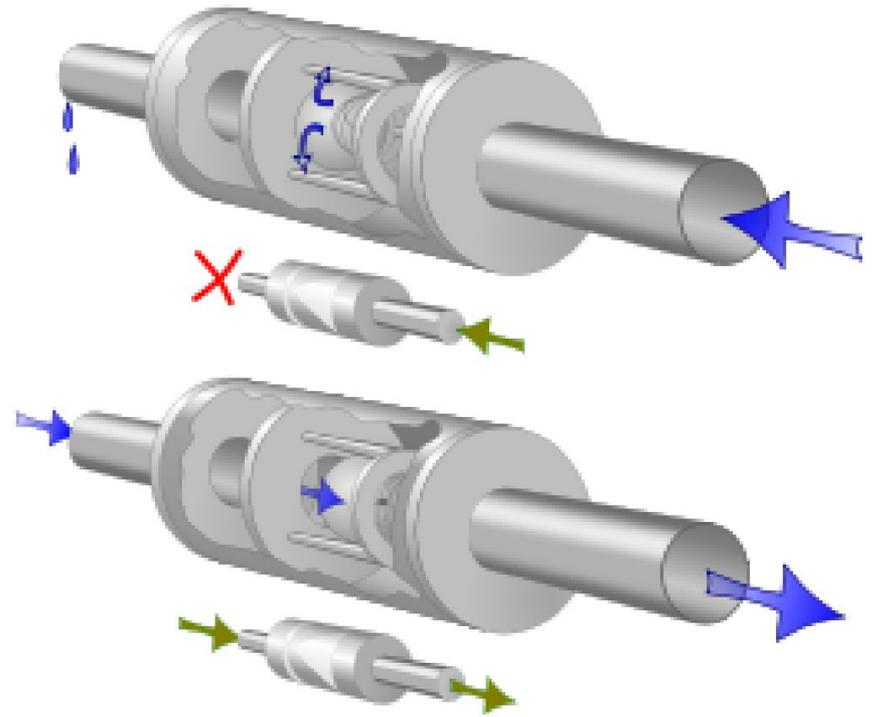
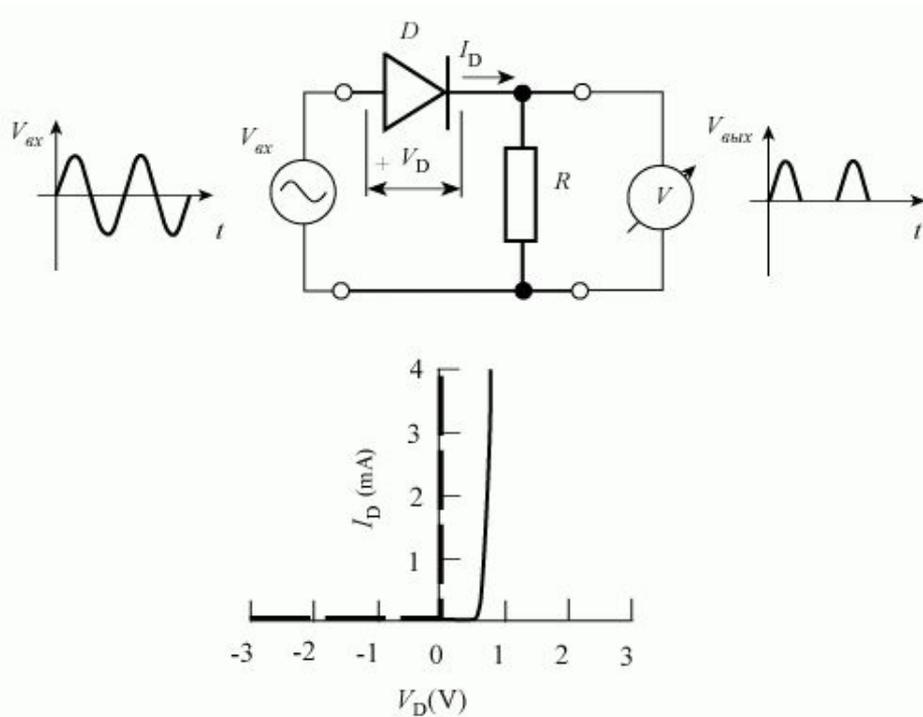


|



+

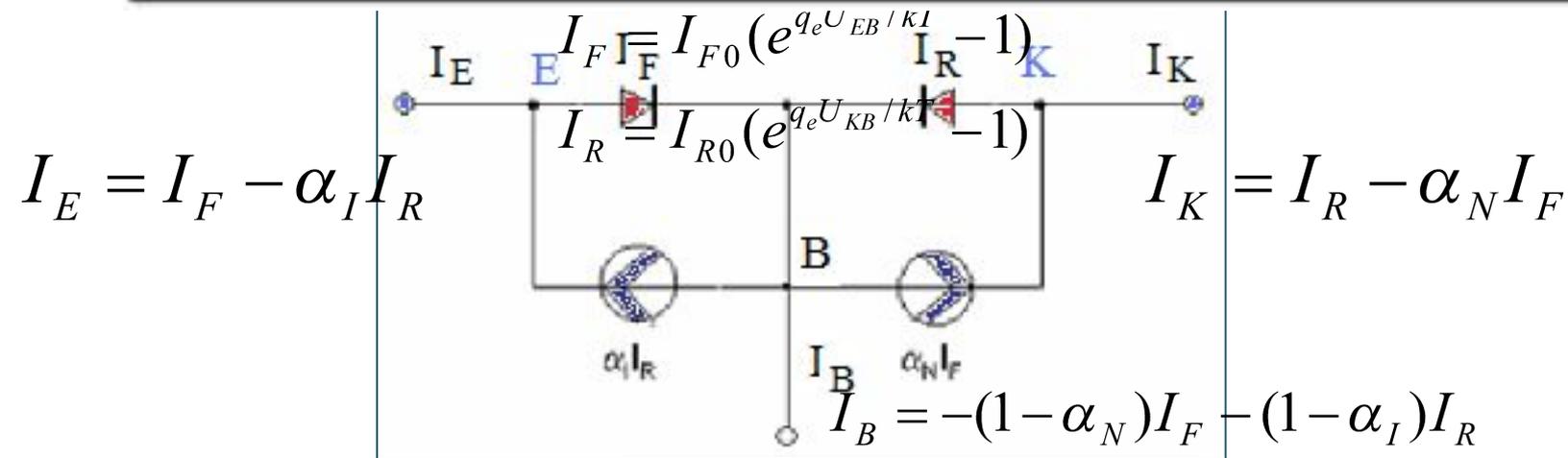
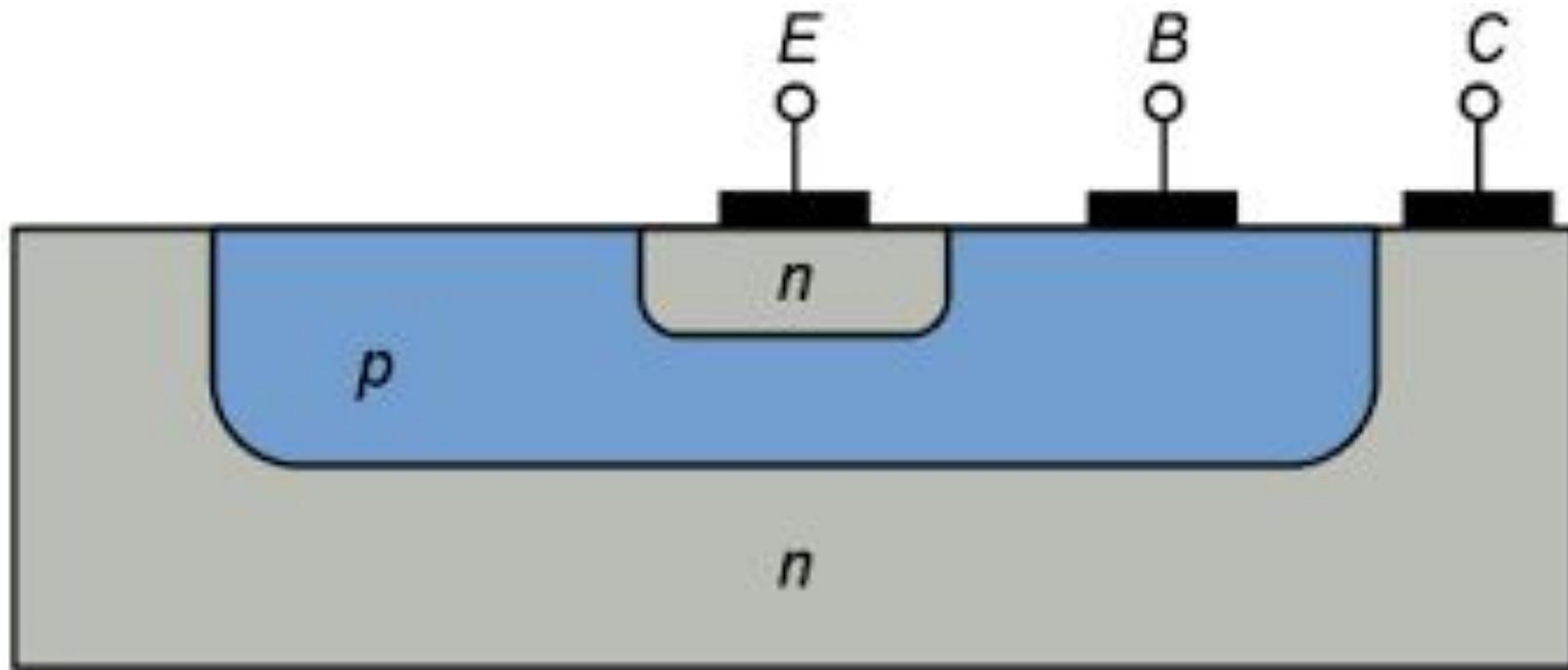
Вольтамперная характеристика p-n перехода.



$$J = J_S \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right) e^{-\frac{\Delta x}{\lambda}}$$

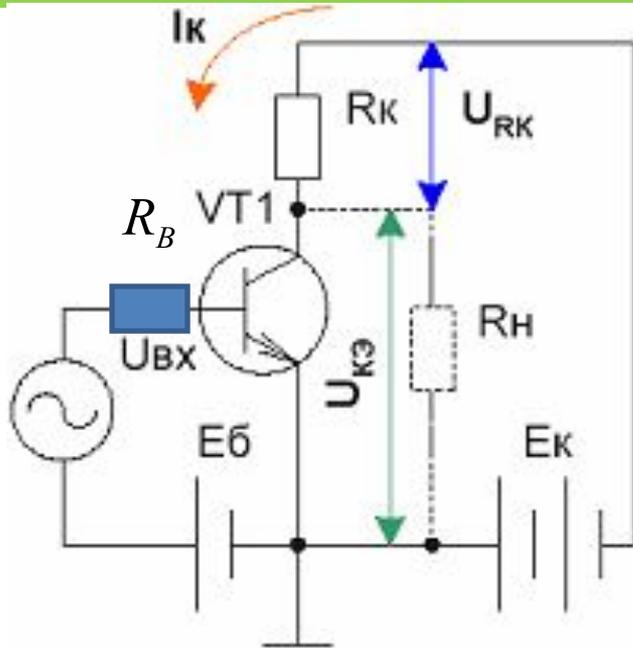
$$J_S = \frac{e}{\lambda} (D_n n_0 + D_p p_0)$$

Процессы в двух р-п-переходах.



Динамический режим работы транзистора.

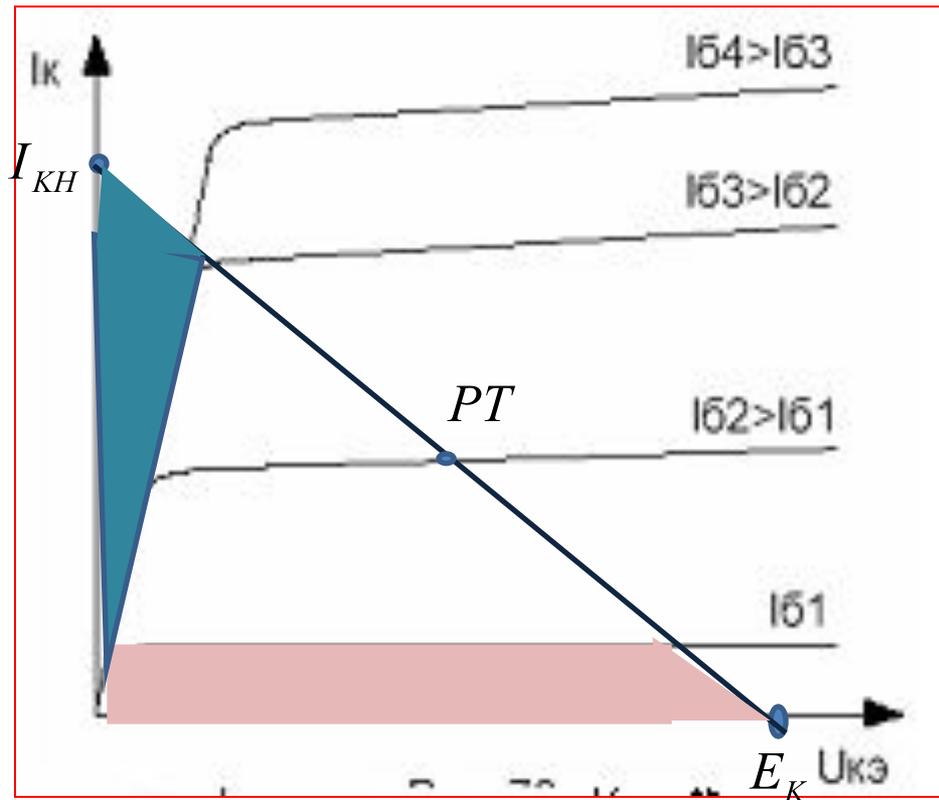
Транзистор работает в режиме ключа, если в зависимости от входного сигнала переходит от режима отсечки в режим насыщения.



$$E_K = U_{R_K} + U_{KЭ}$$

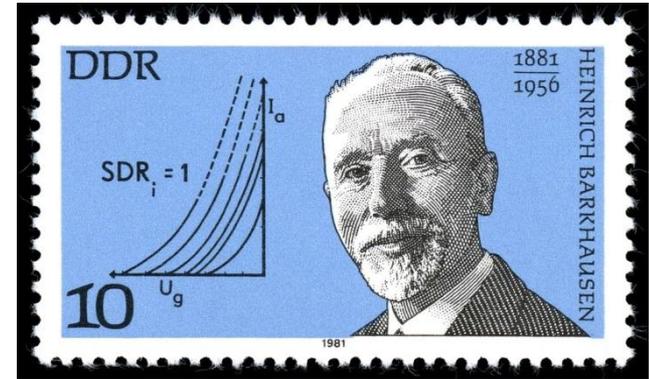
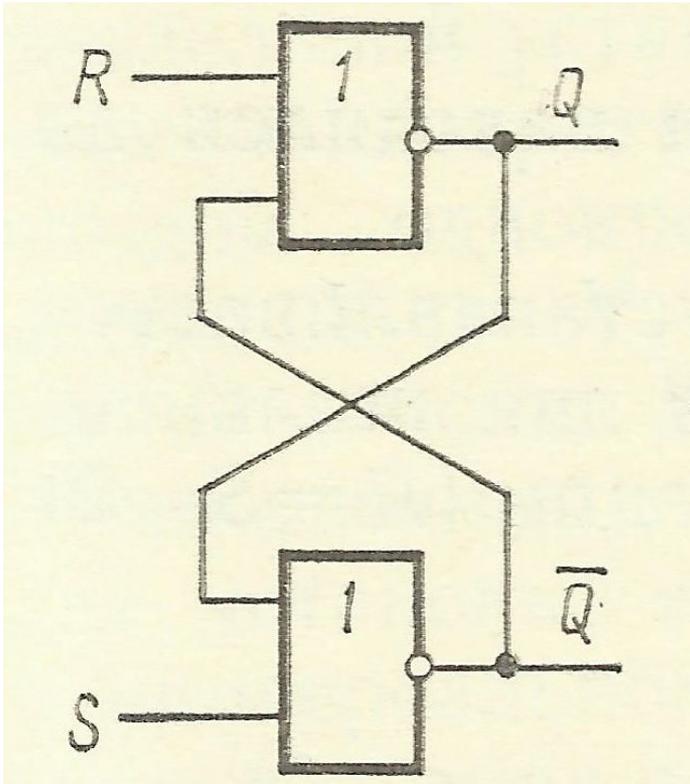
$$U_{R_K} = I_K \cdot R_K$$

$$E_K = U_{KЭ} + I_K \cdot R_K$$



ТС-схемы.

Триггерные схемы (ТС)- схемы в которых значения выходных сигналов однозначно определяются значениями входных сигналов в текущий и предыдущие моменты времени .



Уильям Икклз,
Франк Джордан

Триггер имеет два устойчивых состояния и на базовом уровне является двумя усилителями постоянного тока на базе ИЛИ или И.

