

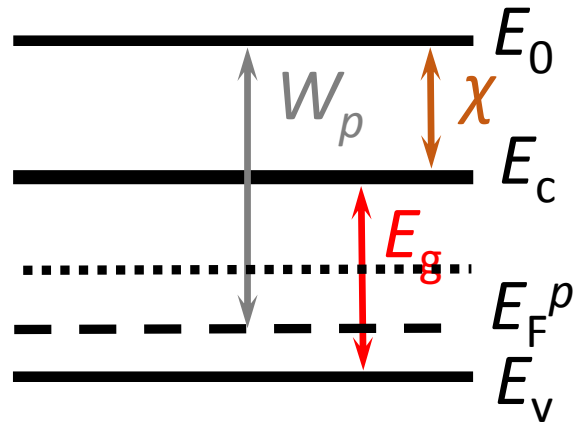
# ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

*p-n* переход

# $p$ - $n$ переход

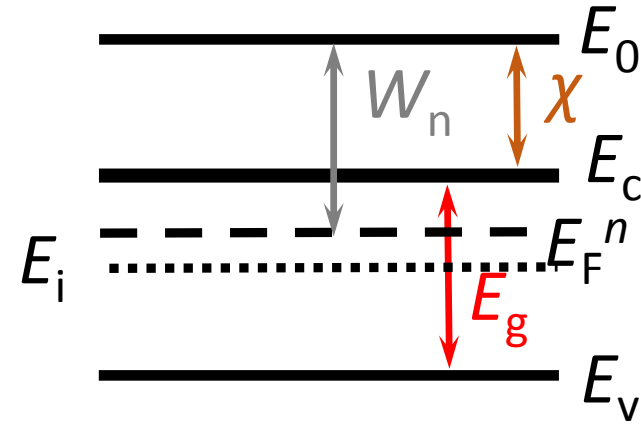
$$E_F^p - E_i = \Phi_p$$

$p$ -Si



$$E_i = \frac{E_c - E_v}{2}$$

$n$ -Si



$$E_F^n - E_i = \Phi_n$$



# $p$ - $n$ переход

$$E_F^n - E_i = \Phi_n$$

$$E_F^p - E_i = \Phi_p$$

$$E_i = \frac{E_c - E_v}{2}$$

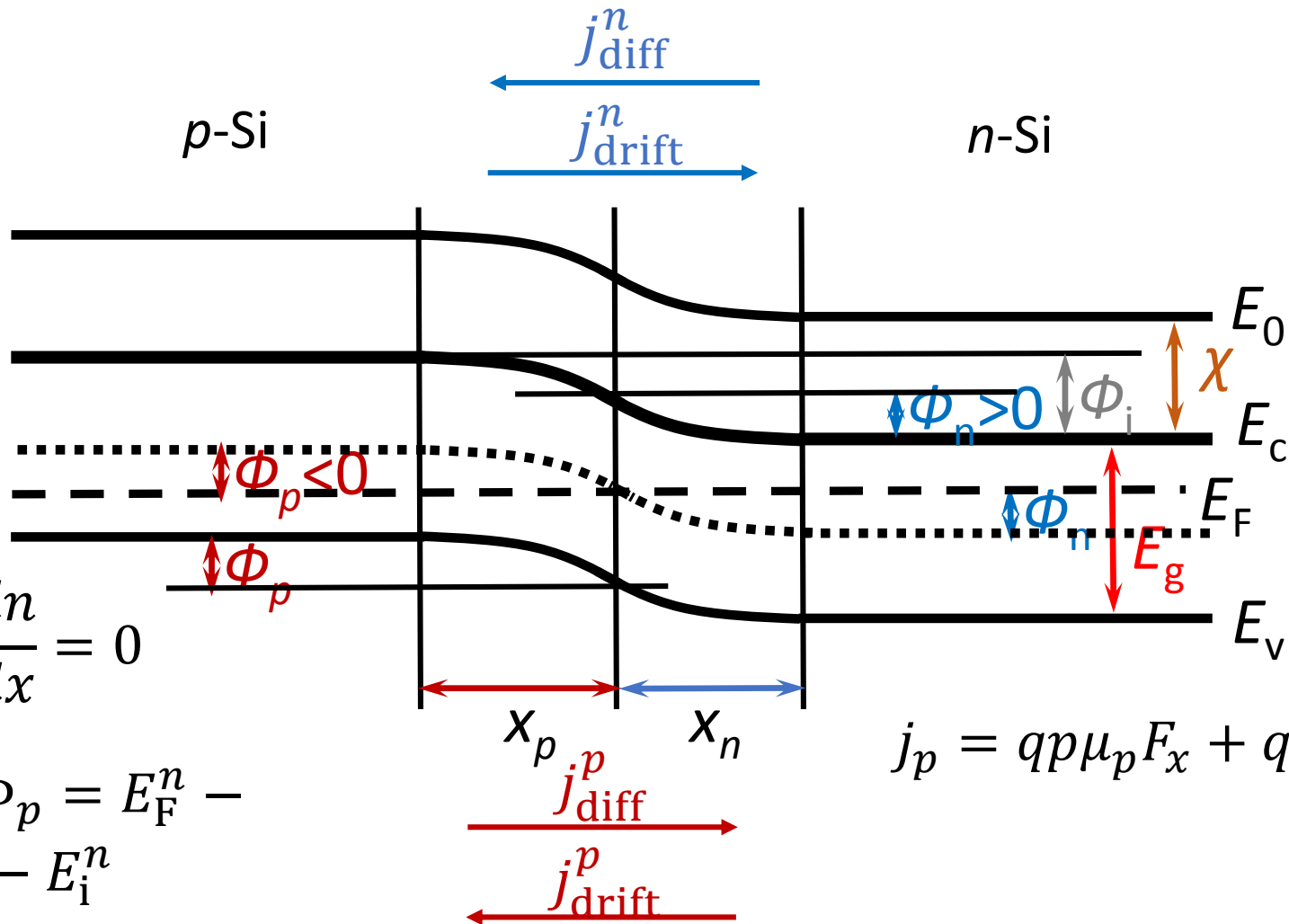
диффузионные токи = дрейфовые токи

$$\frac{d\varphi}{dx} = -F_x$$

$$-j_n = qn\mu_n F_x + qD_n \frac{dn}{dx} = 0$$

$$\Phi_i^n = \Phi_i^p = \Phi_n - \Phi_p = E_F^n - E_i^n$$

$$E_i^n - E_F^n + E_i^p = E_i^p - E_i^n$$



$$j_p = qp\mu_p F_x + qD_p \frac{dp}{dx} = 0$$

# $p$ - $n$ переход

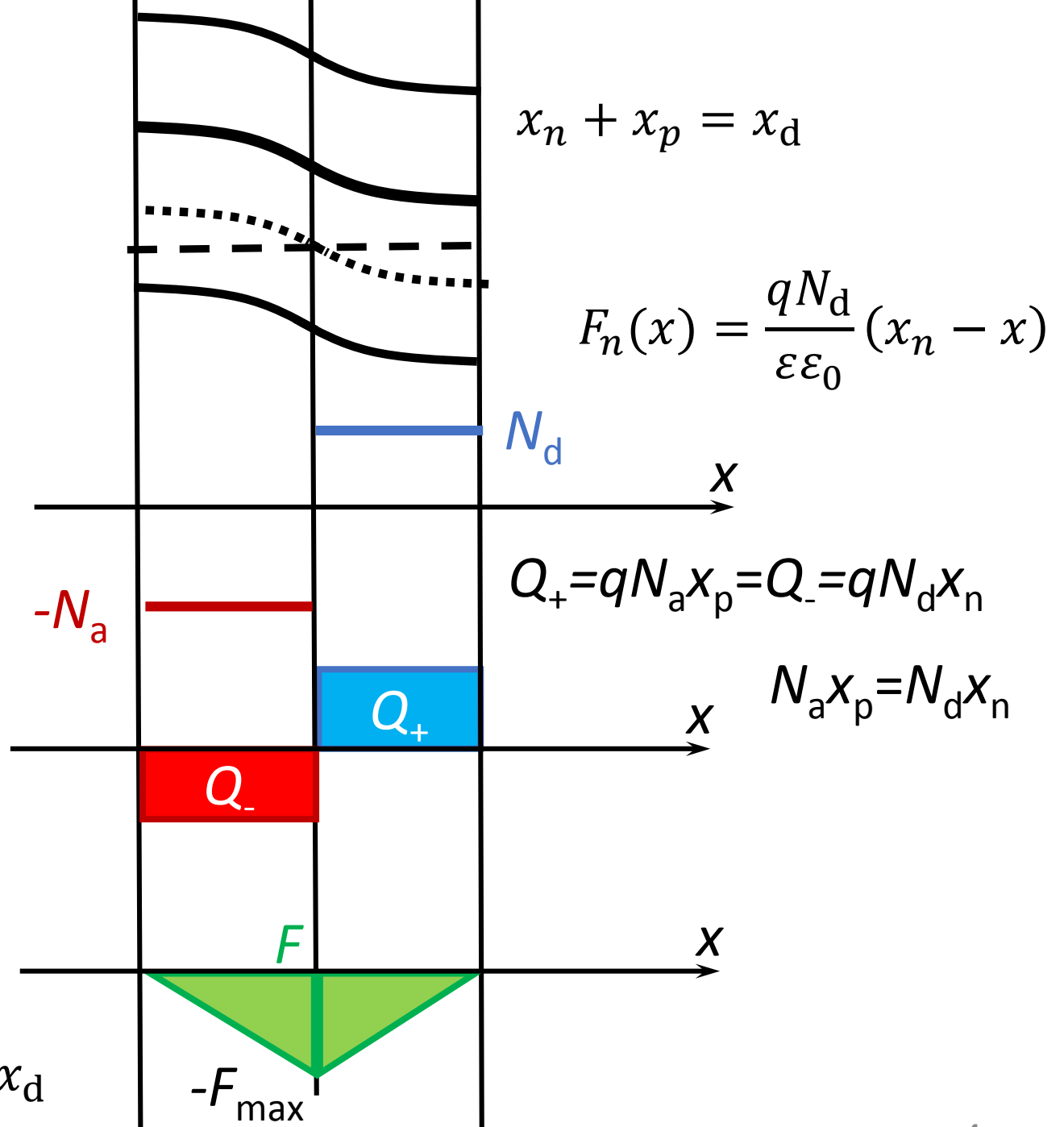
$$p + N_d^+ = n + N_a^-$$

$$\Delta\varphi = -\frac{dF}{dx} = -\frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{qN_{d(a)}}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

$$F_p(x) = \frac{qN_a}{\varepsilon\varepsilon_0}(x - x_p)$$

$$F_p(0) = F_n(0) = F_{\max} = \frac{qN_d}{\varepsilon\varepsilon_0}x_n$$

$$\Phi_i = \frac{1}{2}qF_{\max}x_d$$



# $p$ - $n$ переход

$$x_n + x_p = x_d$$

$$x_p = \frac{N_d}{N_a} x_n$$

$$x_n + \frac{N_d}{N_a} x_n = x_d$$

$$x_n = \frac{x_d}{1 + \frac{N_d}{N_a}}$$

$$\Phi_i = \frac{1}{2} \frac{q^2 N_d x_n}{\varepsilon \varepsilon_0} x_d = \frac{q^2 N_d x_n^2}{2 \varepsilon \varepsilon_0} \left( 1 + \frac{N_d}{N_a} \right) = \frac{q^2 N_d x_d^2}{2 \varepsilon \varepsilon_0} \frac{1}{1 + \frac{N_d}{N_a}}$$

$$x_d = \sqrt{\frac{2 \varepsilon \varepsilon_0 \Phi_i}{q^2} \left( \frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)}$$

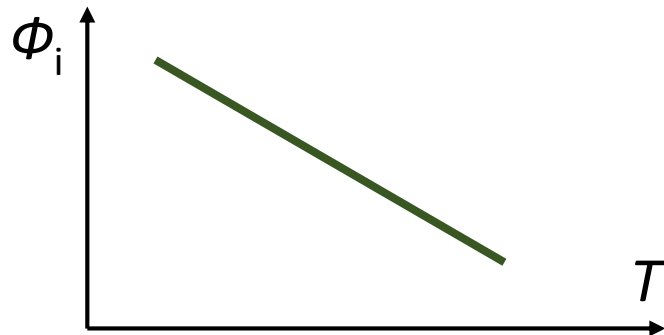
# $p$ - $n$ переход – полное обеднение

$$n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

$$\Phi_i = kT \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) = kT \ln\left(\frac{N_d N_a}{N_c N_v} \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right)\right) = kT \left(\ln\left(\frac{N_d N_a}{N_c N_v}\right) + \frac{E_g}{kT}\right) = E_g + kT \ln\left(\frac{N_d N_a}{N_c N_v}\right)$$

$$\Phi_i < E_g$$

$$\Phi_i = E_g + kT \ln\left(\frac{N_d N_a}{N_c N_v}\right) = E_g + kT \ln\left(\frac{N_d N_a}{\widetilde{N_c} \widetilde{N_v} T^3}\right) = \boxed{E_g + kT \ln\left(\frac{N_d N_a}{\widetilde{N_c} \widetilde{N_v}}\right)} + 3kT \ln T$$



$p$ - $n$  переход – полное обеднение  $n = N_d^+ = N_d$   
 $p = N_a^- = N_a$

$$n_i = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_i}{kT}\right)$$

$$p_i = N_v \exp\left(-\frac{E_i - E_v}{kT}\right)$$

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$$

$$\frac{n}{n_i} = \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

$$N_d = n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{\Phi_n}{kT}\right)$$

$$N_a = p = p_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) = p_i \exp\left(\frac{\Phi_p}{kT}\right)$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_n &= kT \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \\ \Phi_p &= -kT \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \end{aligned} \right\} \Phi_i = \Phi_n - \Phi_p = kT \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right)$$

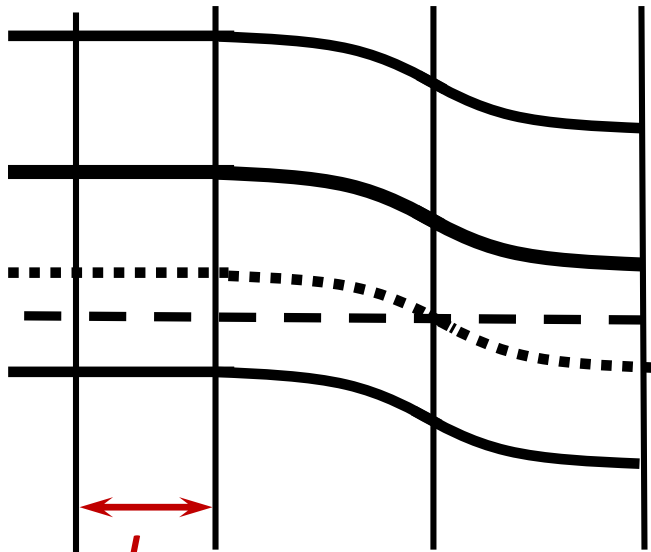
$$x_d = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\Phi_n}{q^2 N_d}} + \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0|\Phi_p|}{q^2 N_a}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\Phi_i}{q^2} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a}\right)}$$

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{x_d}$$

# Токи в $p$ - $n$ переходе

горячие носители

← дрейф →



$L_n$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

$$n \sim \exp\left(\frac{\Phi_n}{kT}\right) \quad \tau_n - \text{время жизни электрона}$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \frac{n_p}{\tau_n} = n^* - \text{частота рождения электронов}$$

$n_p$  – концентрация неосновных носителей в p-Si

$$j_{\text{diff}}^n = \frac{1}{4} q L_n \frac{n_p}{\tau_n}$$

Если электрон родился в области  $L_n$ , то он однозначно даёт вклад в диффузию.

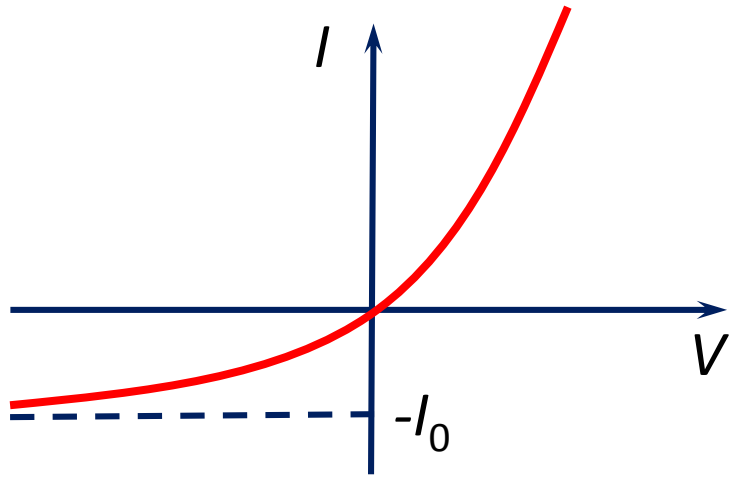
$$j_{\text{diff}} = q n_i^2 \left( \frac{D_n}{N_a L_n} + \frac{D_p}{N_d L_p} \right) - \text{диффузионный ток}$$

Равновесие:

$$j_{\Sigma} = (j_{\text{diff}}^n - j_{\text{diff}}^p) + (j_{\text{drift}}^n - j_{\text{drift}}^p) + j_{\text{gen}} + j_{\text{rec}} = 0$$



# Смещение $p$ - $n$ перехода



$$\Phi_i \rightarrow \Phi_i - qV$$

$$j = j_0 \left( \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right)$$

$$j_0 = j_{\text{diff}} = qn_i^2 \left( \frac{D_n}{N_a L_n} + \frac{D_p}{N_d L_p} \right)$$

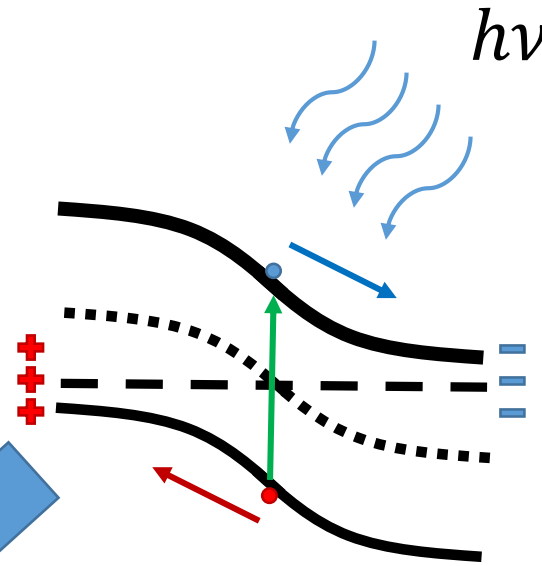
С учётом сопротивления  $p/p$

$$I = I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V - IR_s)}{\alpha kT} \right) - 1 \right)$$

# Фотогенерация

$$\begin{matrix} E_d \ll E_g \\ E_a \ll E_g \end{matrix}$$

$$V_{\max} = \Phi_{\max} \simeq E_g$$

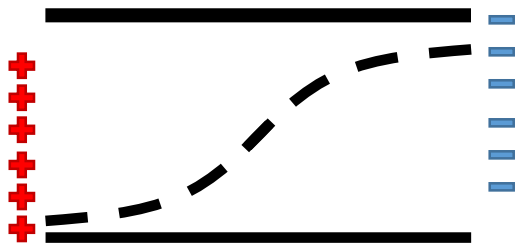


Si

$$E_d(\text{P}) = 0,044 \text{ эВ}$$

$$E_a(\text{B}) = 0,043 \text{ эВ}$$

$$E_g(\text{Si}) = 1,12 \text{ эВ}$$



$$V_{\max} \approx E_g$$

# Задачи: симметричный и асимметричный $p$ - $n$ переход

$$N_a = N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$$

**Задача!**

$$\Phi_i = 0,8125 \text{ эВ}$$

$$x_d = 145 \text{ нм}$$

$$F_{\max} = 1,25 \cdot 10^5 \text{ В/см}$$

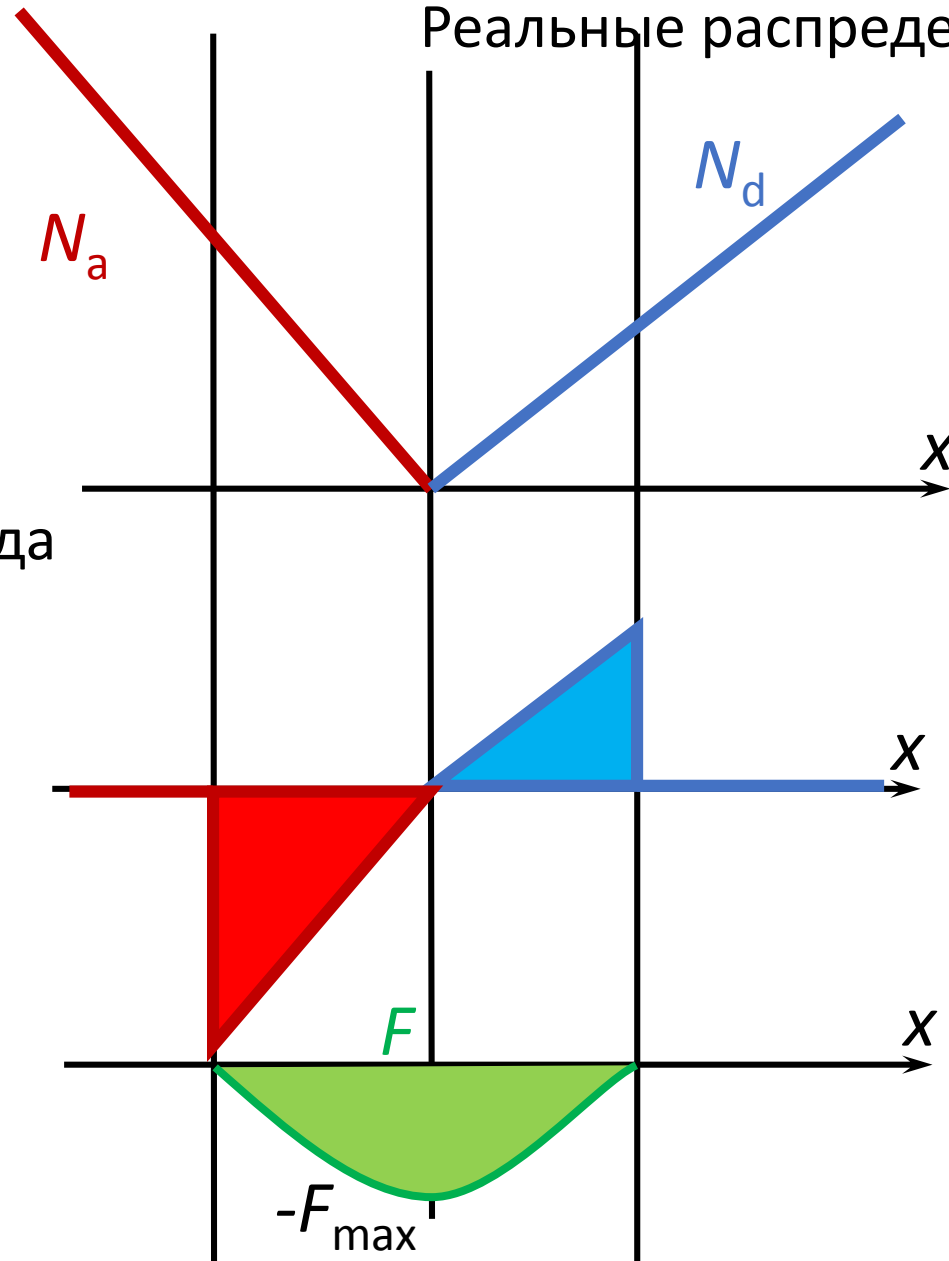
$$N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3} \gg N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

**Задача!**

# $p$ - $n$ переход с непрерывным $N(x)$

Реальные распределения  $N(x)$  – непрерывные

Предположение (1):  
кривизна  $N(x)$   
мала, переход узок  $\rightarrow$   
 $N(x)$  – линейна вблизи перехода



# $p$ - $n$ переход с непрерывным $N(x)$

Предположение (2): симметрия ( $x_n = x_p = x_d/2$ )  $\rightarrow N_d(x_n) = N_a(-x_p) = N'(x_d/2)$

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

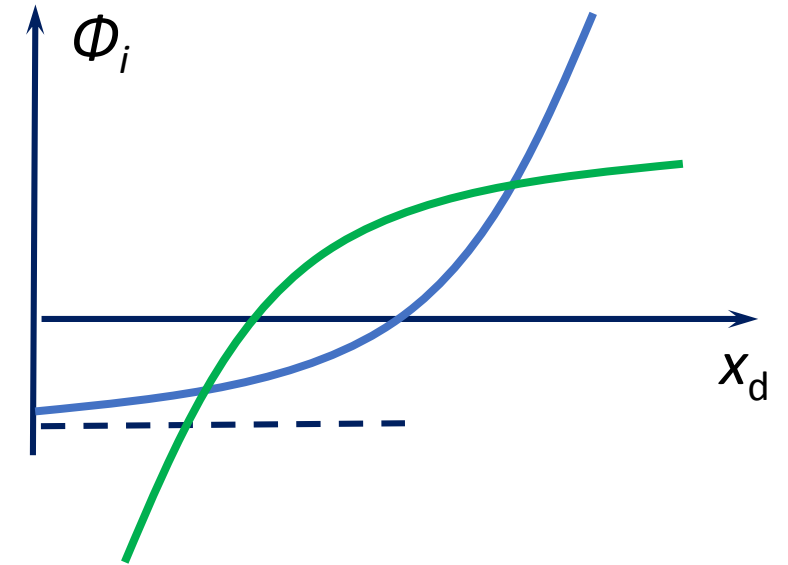
$$\Phi_i = \frac{q^2 N' x_d^3}{12\varepsilon\varepsilon_0} \Rightarrow x_d = \sqrt[3]{\frac{12\varepsilon\varepsilon_0 \Phi_i}{q^2 N'}}$$

$$\begin{cases} x_d = \sqrt[3]{\frac{12\varepsilon\varepsilon_0 \Phi_i}{q^2 N'}} \\ \Phi_i = 2kT \ln\left(\frac{N' x_d}{2n_i}\right) \end{cases}$$

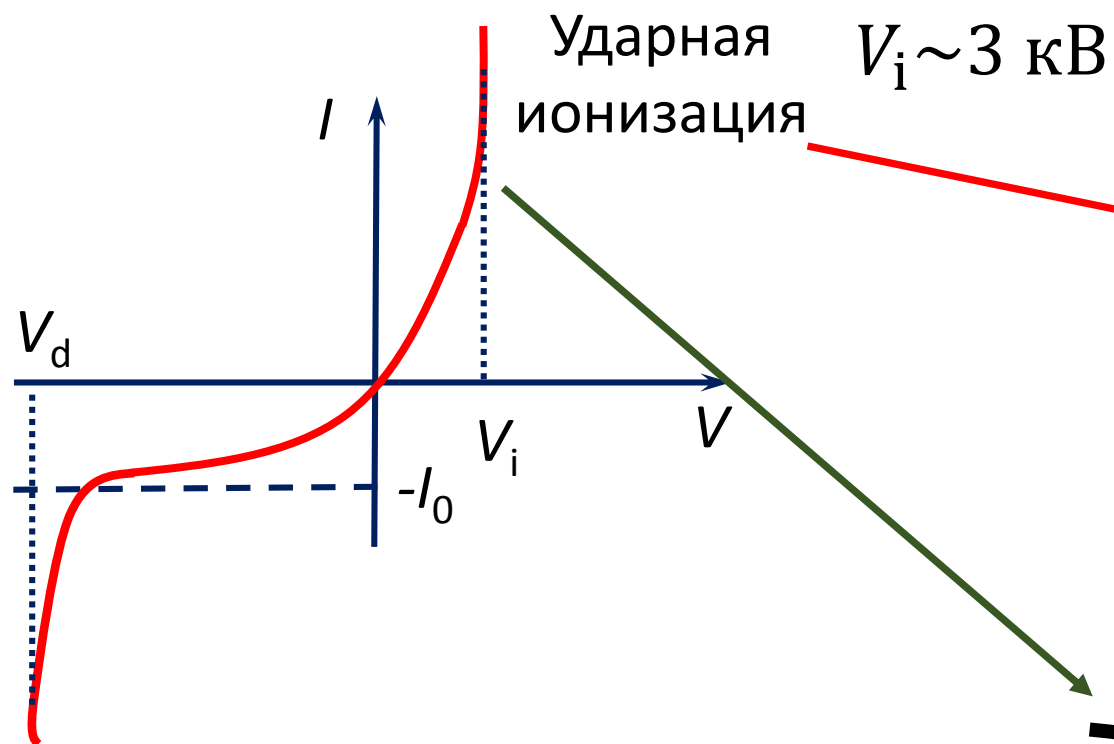
# Численный счёт

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_i = \frac{q^2 N' x_d^3}{12 \epsilon \epsilon_0} - \text{быстрая функция} \\ \Phi_i = 2kT \ln \left( \frac{N' x_d}{2n_i} \right) - \text{медленная функция} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_i^{(0)} = \frac{2E_g}{3} - \text{нулевое приближение} \\ \text{точность уже во 2м приближении} \end{array} \right.$$



# Пробой $p$ - $n$ перехода ( $V \gg 0$ )



$$N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$$

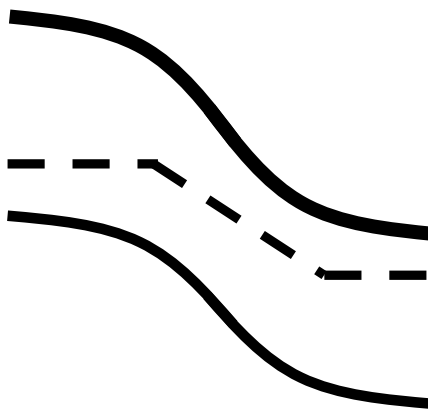
$$F_{\text{max}} \sim 10^5 \text{ В/см}$$

$$\mu \sim 10^3 \text{ см/Вс}$$

$$V_d = \mu F \sim 10^8 \frac{\text{см}}{\text{с}} \gg V_T \sim 10^7 \frac{\text{см}}{\text{с}}$$

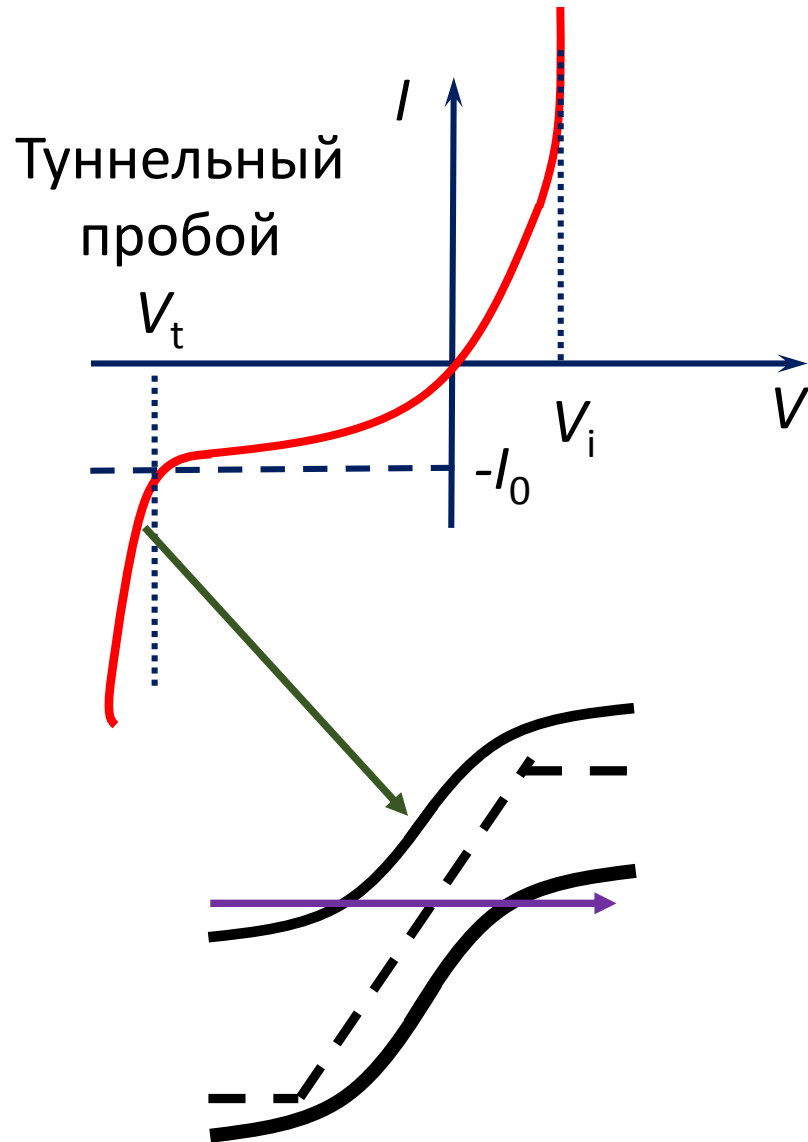
$$F_i = F_{\text{max}} - \text{поле пробоя}$$

$$V_i \approx \frac{\epsilon \epsilon_0 F_i}{2qN_d}$$



# Туннельный пробой $p^+-n^+$ перехода ( $V \ll 0$ )

$$N_d = N_a = 10^{20} \text{ см}^{-3}$$



$$\Phi_i = 1,56 \text{ эВ} > E_g \Rightarrow \Phi_i = E_g$$

$$x_d = 5,4 \text{ нм}$$

Туннельная толщина!

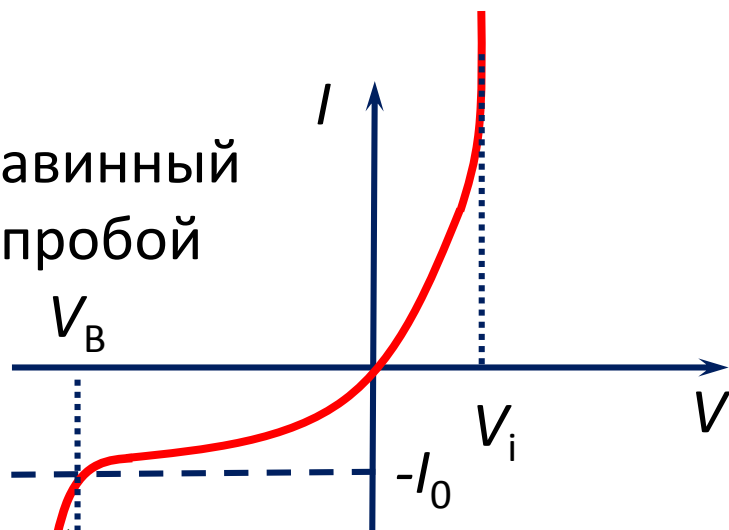
$$V_t < 4E_g/q$$



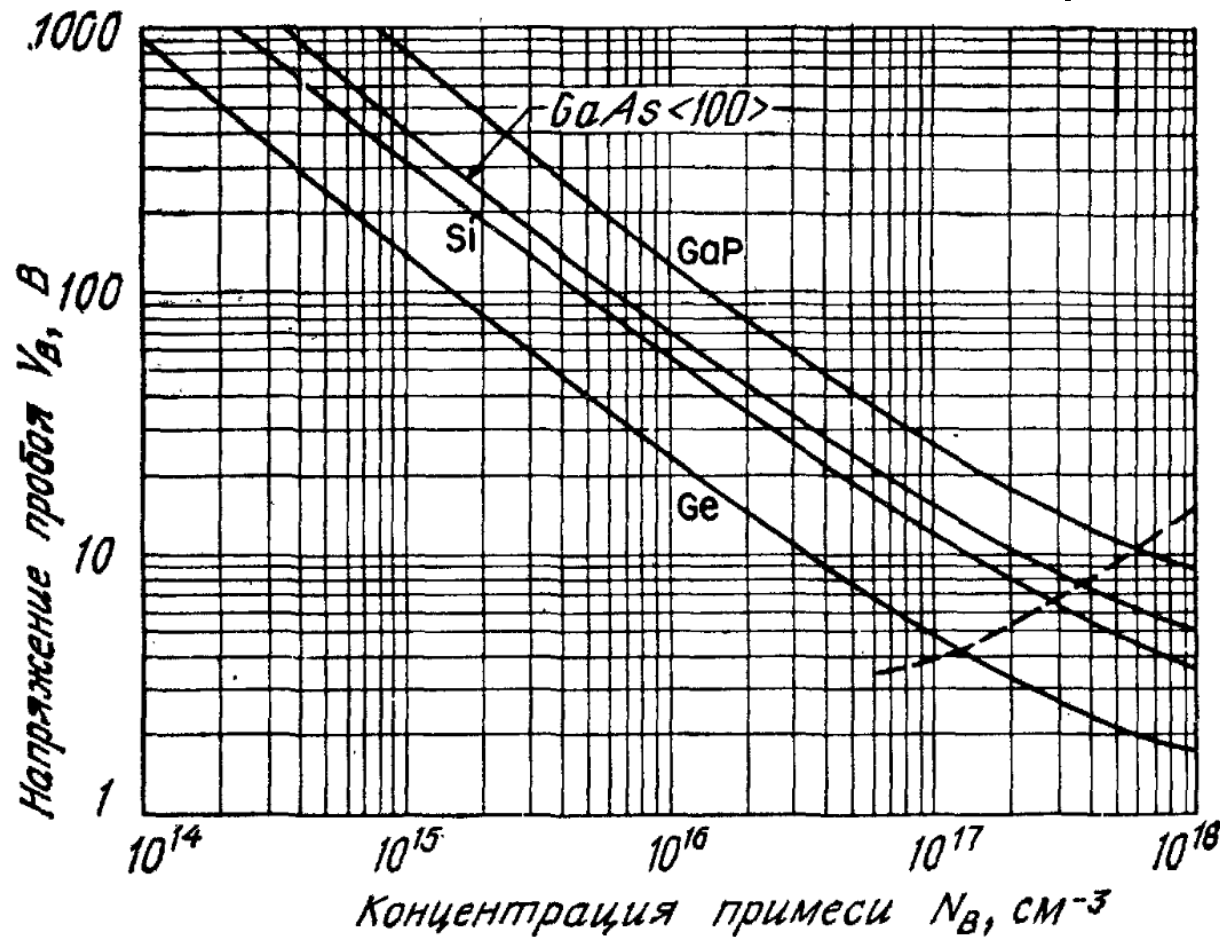
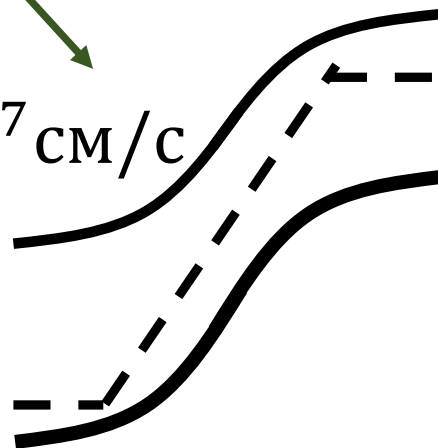
# Лавинный пробой $p$ - $n$ перехода ( $V \ll 0$ )

$$N_b = N_d \ll N_a \quad V_B = \frac{F_{\max} x_d}{2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 F_{\max}^2}{2q} (N_B)^{-1}$$

Лавинный  
пробой



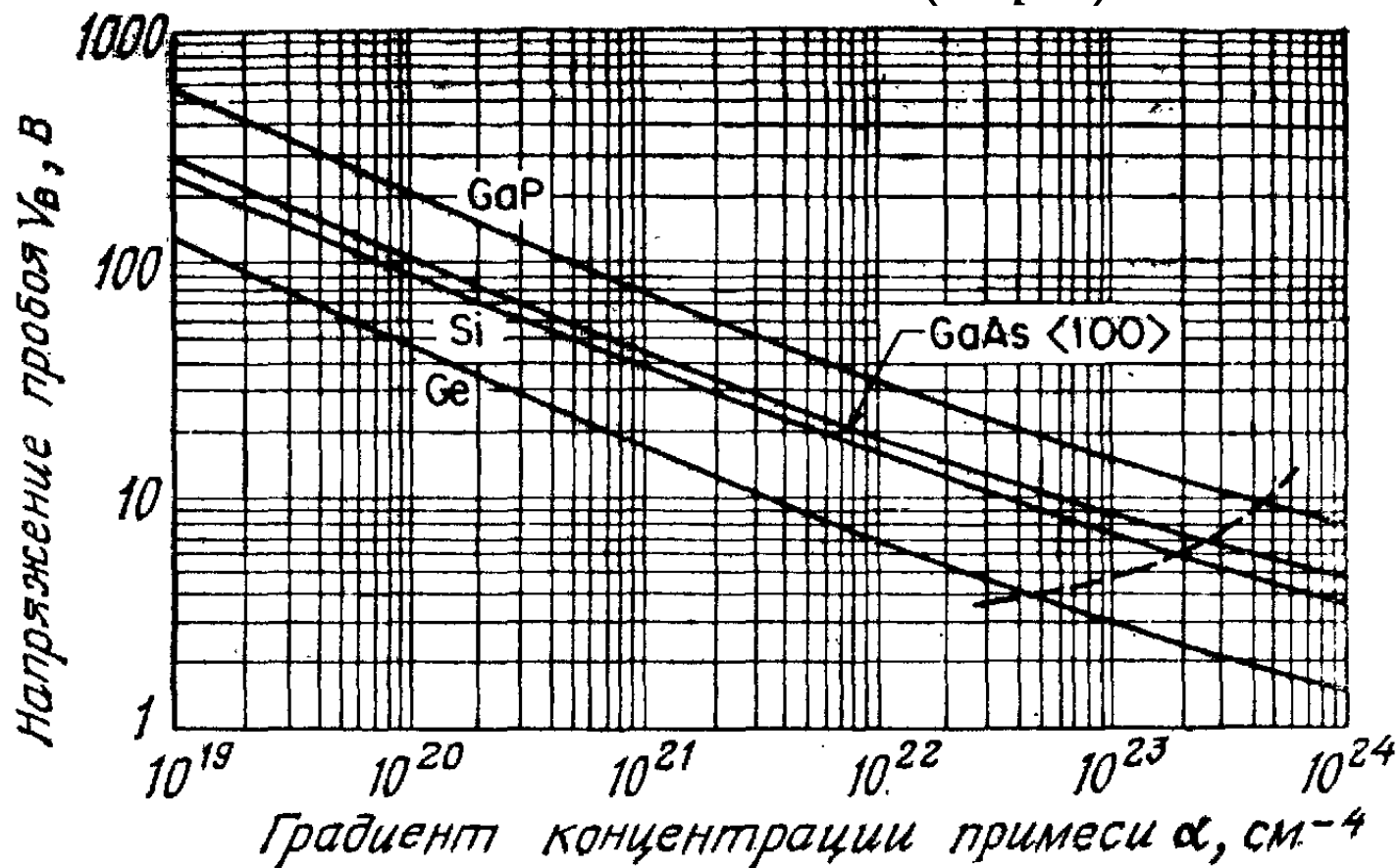
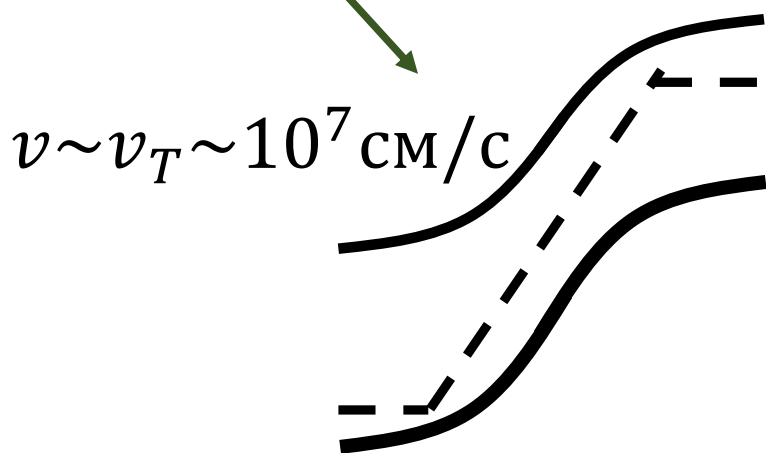
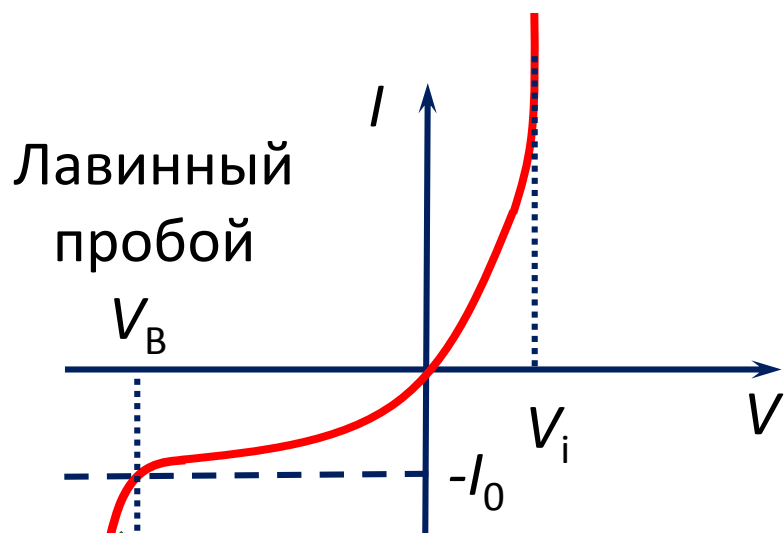
$$v \sim v_T \sim 10^7 \text{ см/с}$$



$V_B$  —vs—  $N_B$  для ступенчатых несимметричных переходов  
Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1.]

# Лавинный пробой $p$ - $n$ перехода ( $V \ll 0$ )

$$N = N'x \quad V_B = \frac{2F_{\max}x_d}{3} = \frac{4F_{\max}^{3/2}}{3} \left( \frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q} \right)^{1/2} (N')^{-1/2}$$

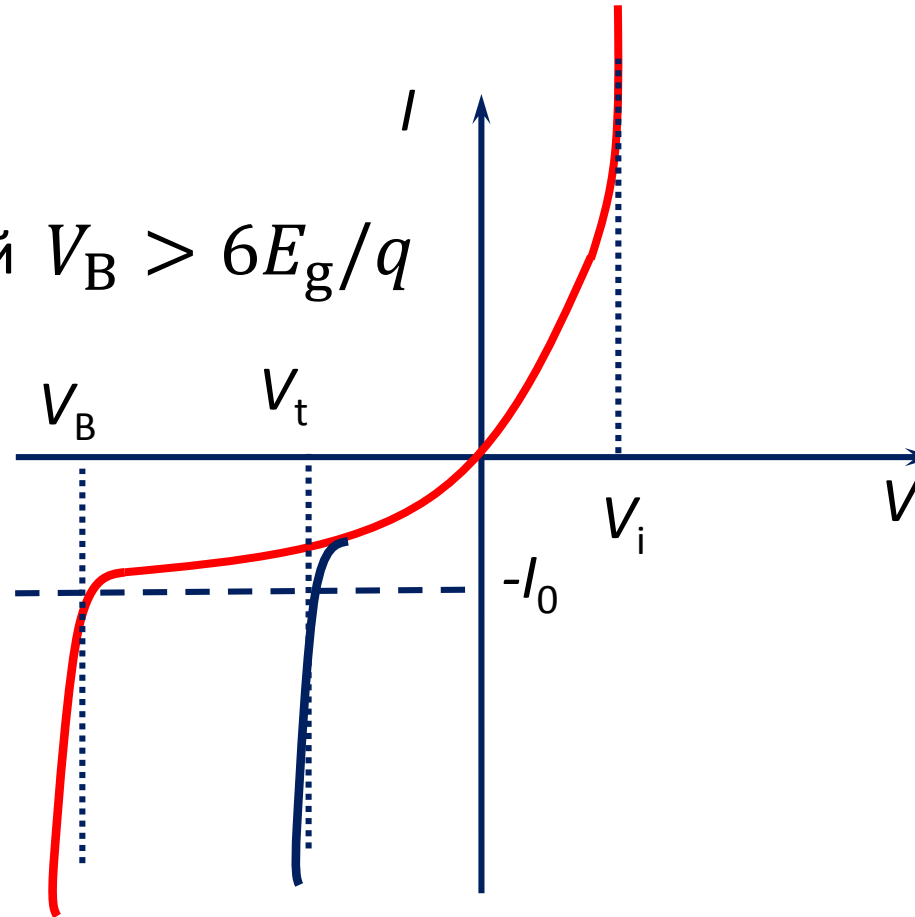


$V_B$  — vs —  $N'$  для плавных линейных переходов  
 Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1.]

# Пробой $p$ - $n$ перехода ( $V \ll 0$ )

Принцип действия  
стабилитрона

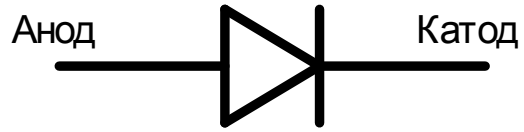
Лавинный пробой  $V_B > 6E_g/q$



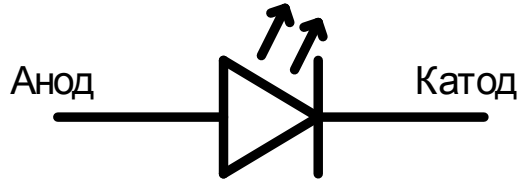
Туннельный пробой

$$V_t < 4E_g/q$$

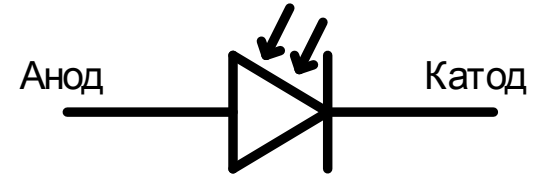
# Схемы. Схемные функции



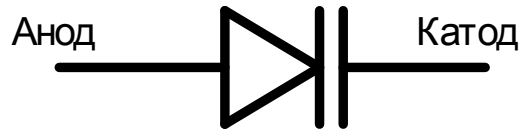
Диод



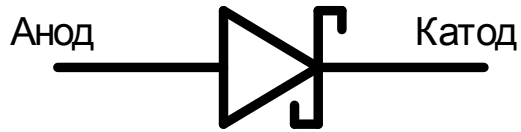
Светодиод



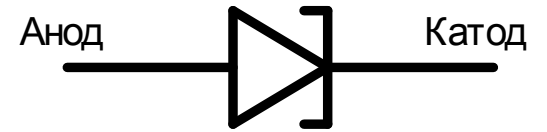
Фотодиод



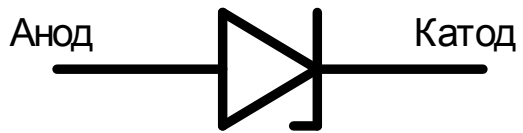
Варикап



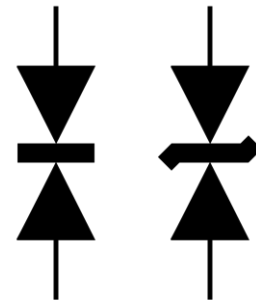
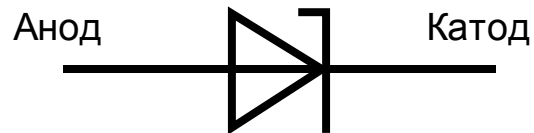
Диод Шоттки



Туннельный диод

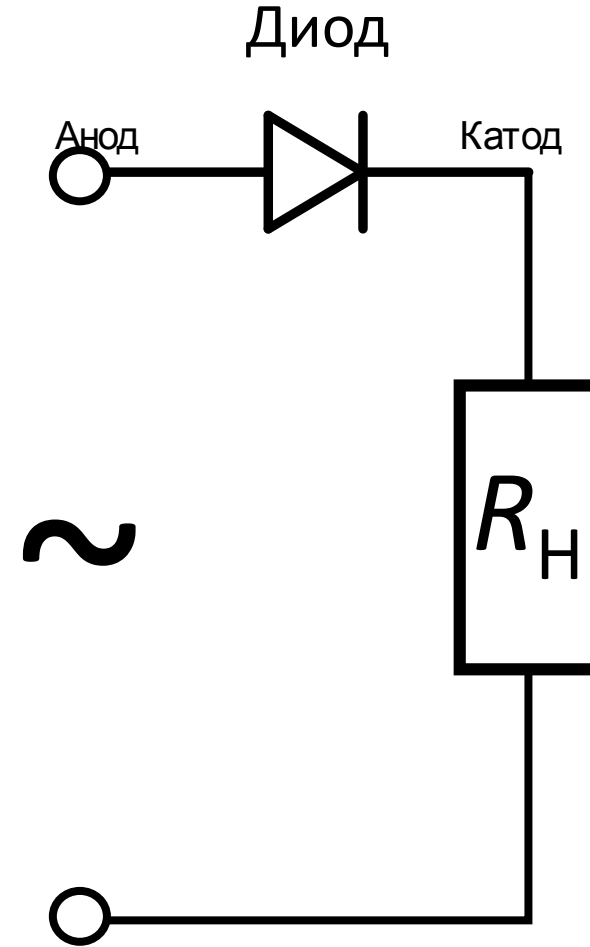
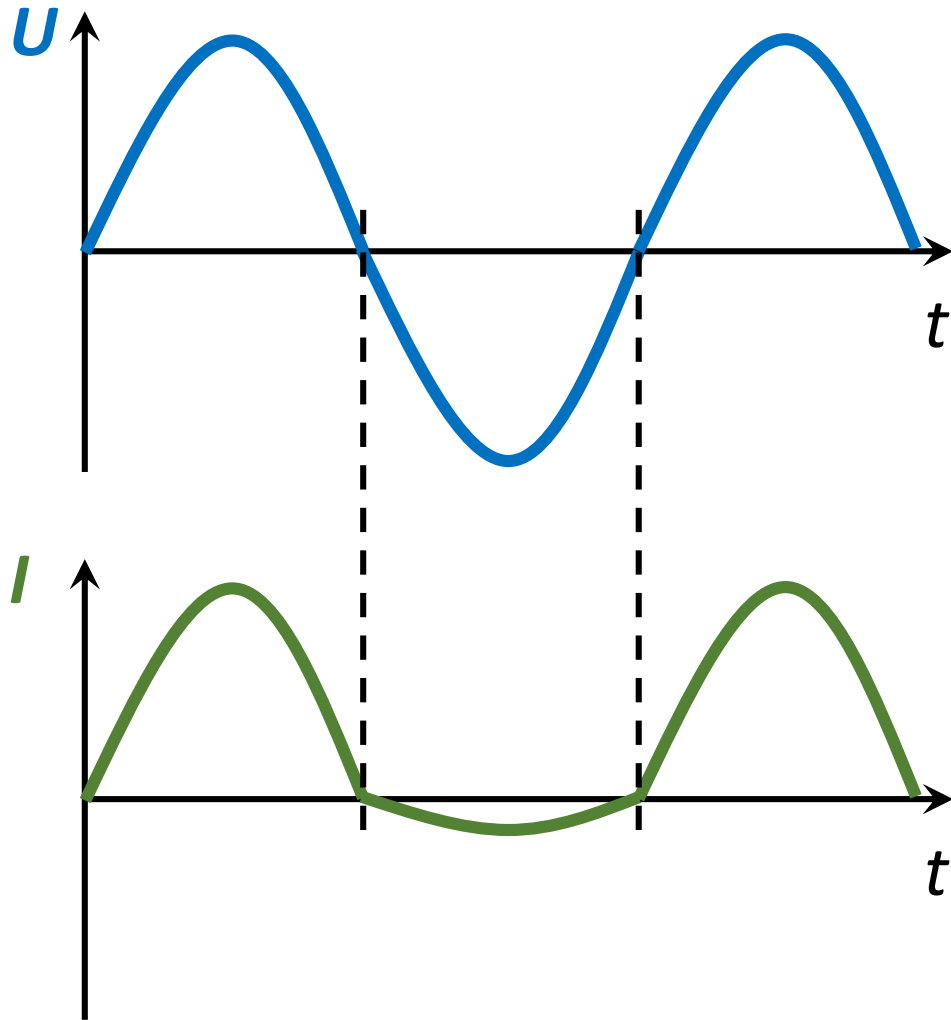


Стабилитрон

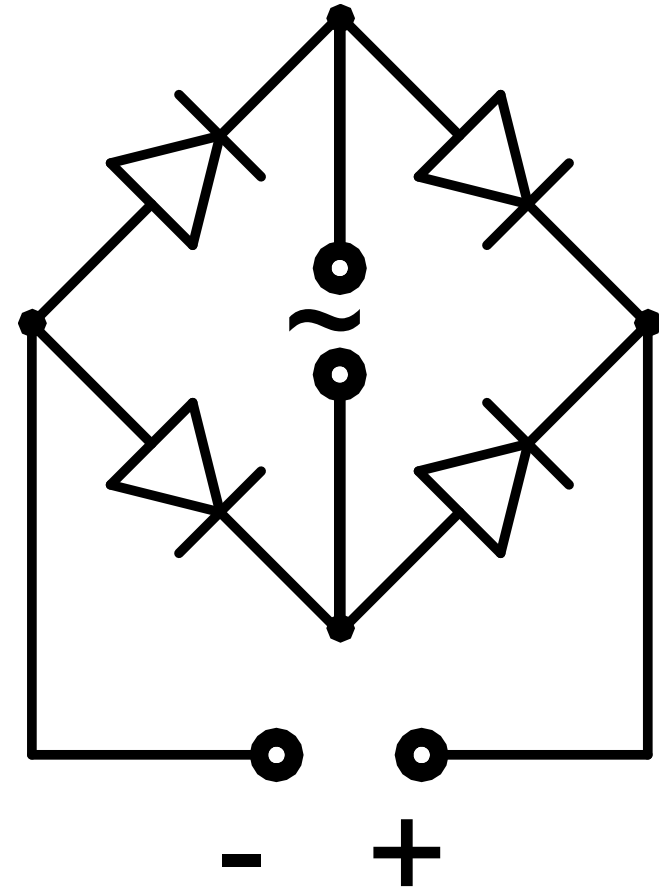
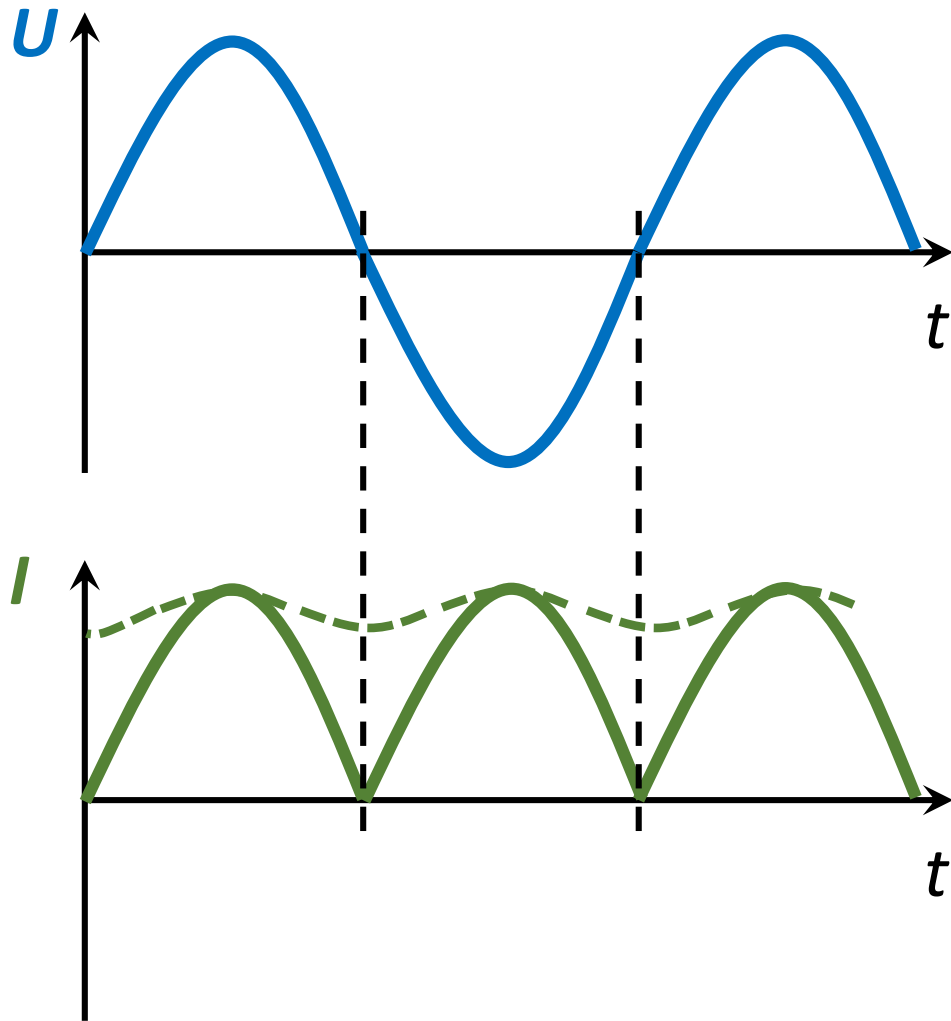


высоковольтный лавинный диод  
(«подавитель переходных  
импульсных помех», «супрессор»,  
«TVS-диод»)

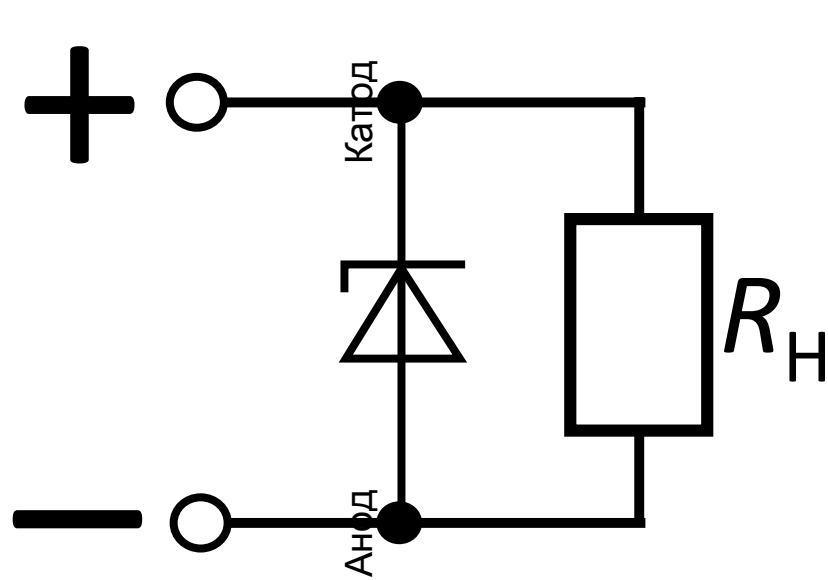
# Схемы. Схемные функции. Выпрямитель



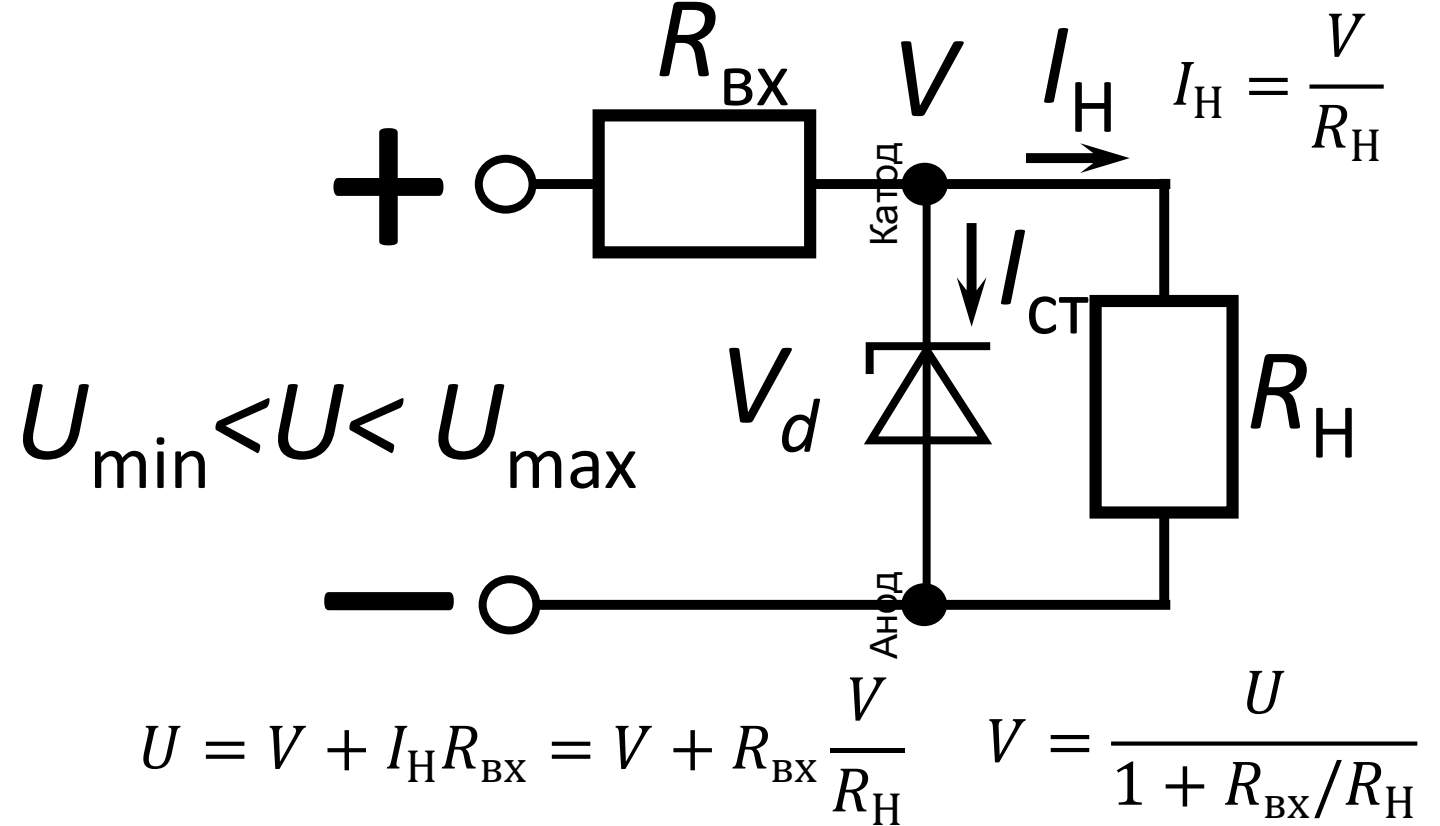
# Схемы. Схемные функции. Мост



# Схемы. Схемные функции. Стабилизатор

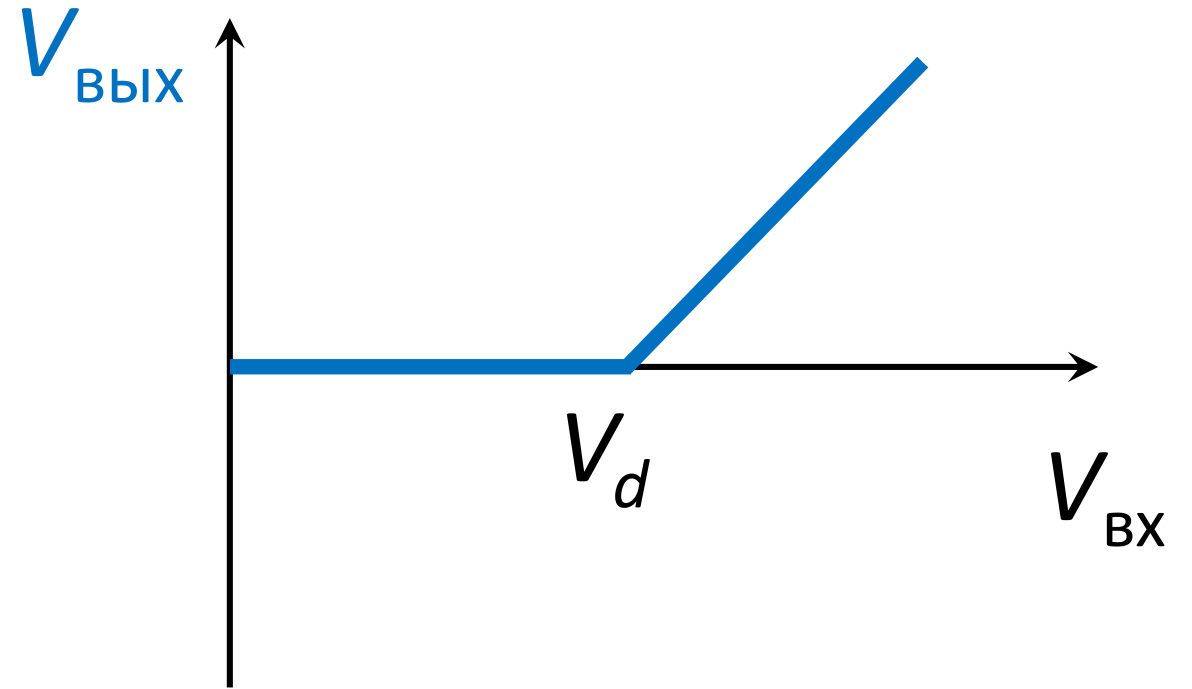
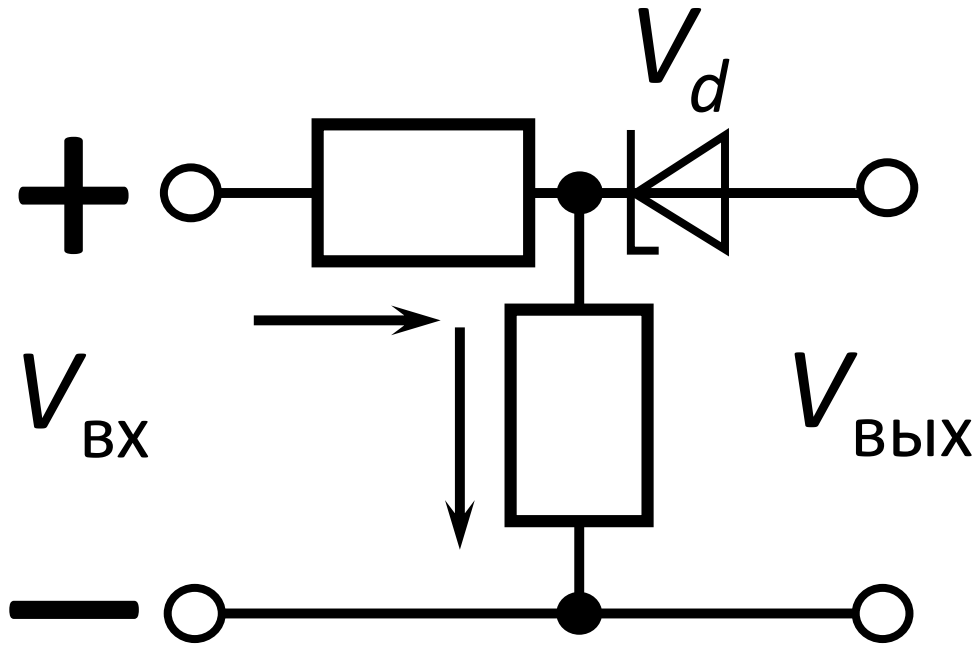


Обратное  
включение



1. КЗ:  $R_H = 0$ ,  $I_{кз} = U_{\max}/R_{BX}$
2. Обрыв нагрузки:  $R_H = \infty$ ,  $I = (U_{\max} - V_d)/R_{BX}$
3. Срыв стабилизации:  $U < V_d$ ,  $V = ? \Rightarrow V > V_d$ ,  $U > V_d$ ,  $U_{\min} = V_d(1 + R_{BX}/R_H)$

# Схемы. Схемные функции. Компаратор

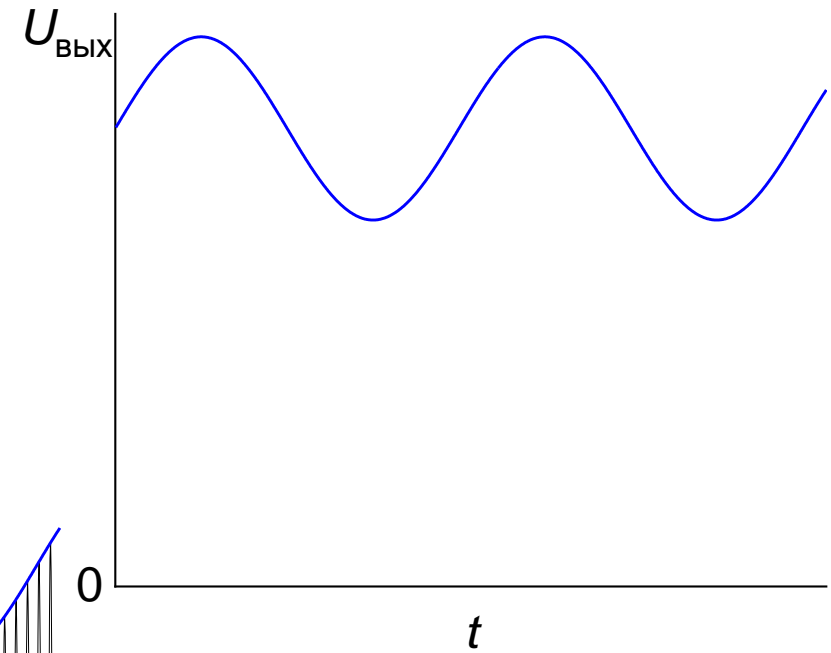
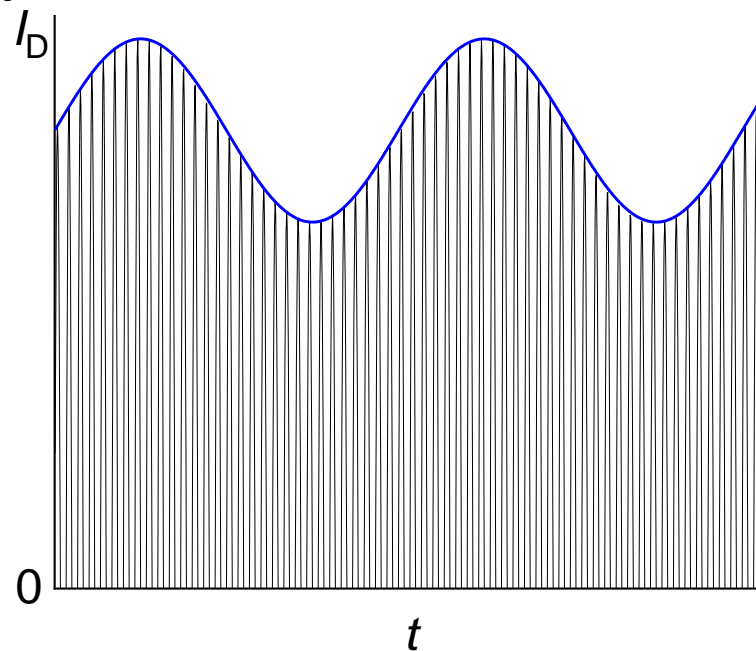
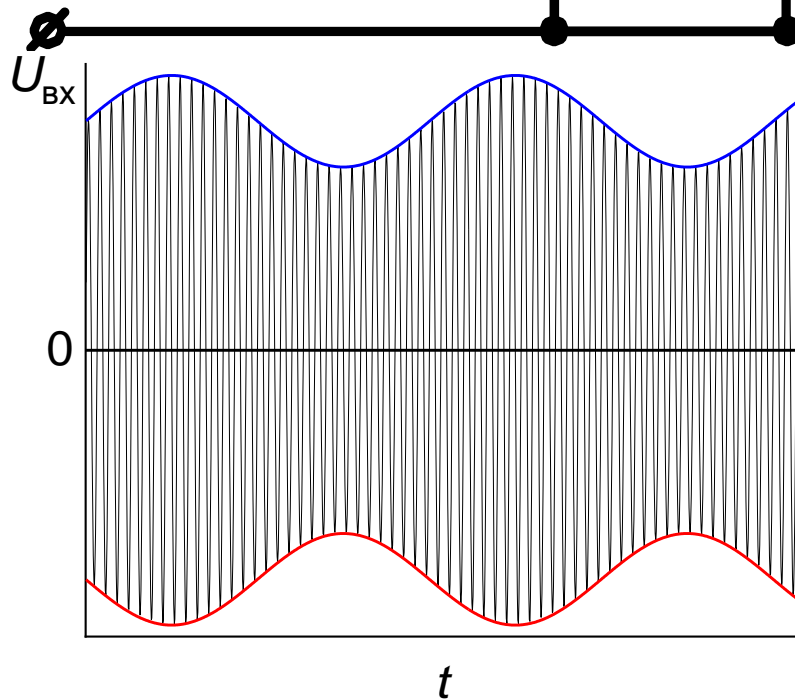
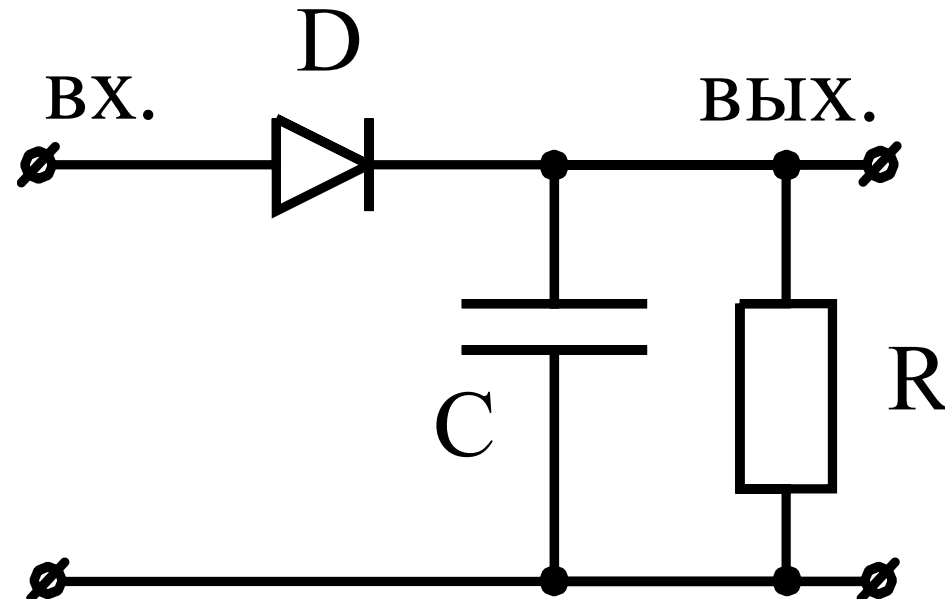




# Схемы. Детектор/демодулятор

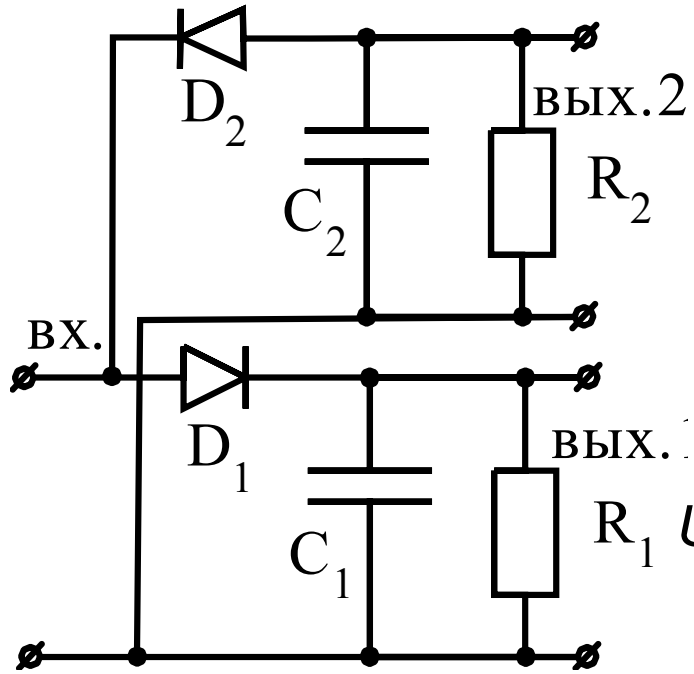
$$\omega_{3B} \ll \omega_{\text{Нес}}$$

$$U_{\text{BX}} = V \sin(\omega_{3B} t) \sin(\omega_{\text{Нес}} t)$$

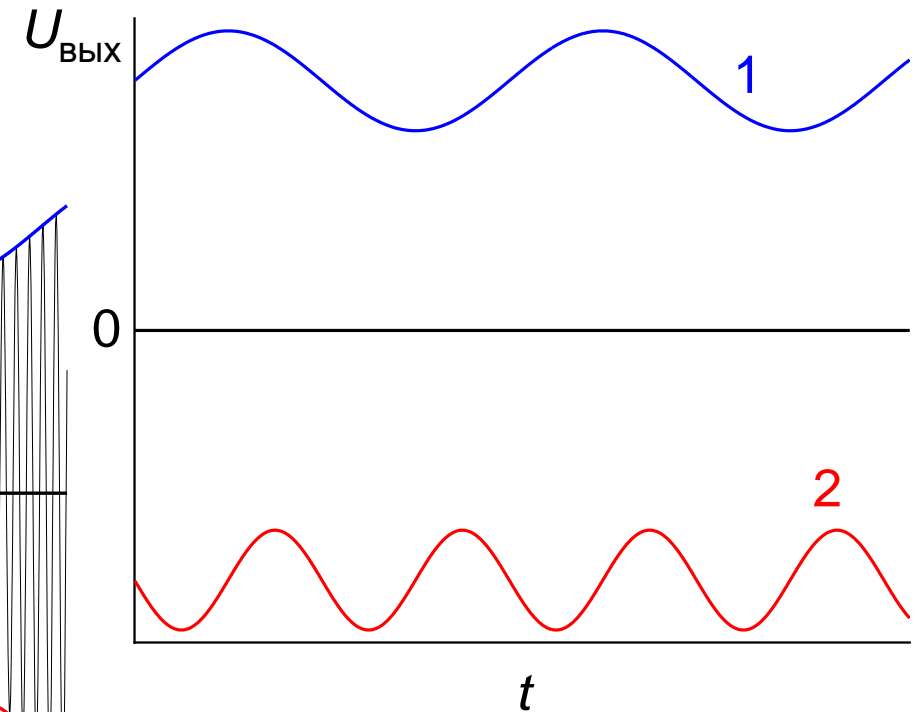
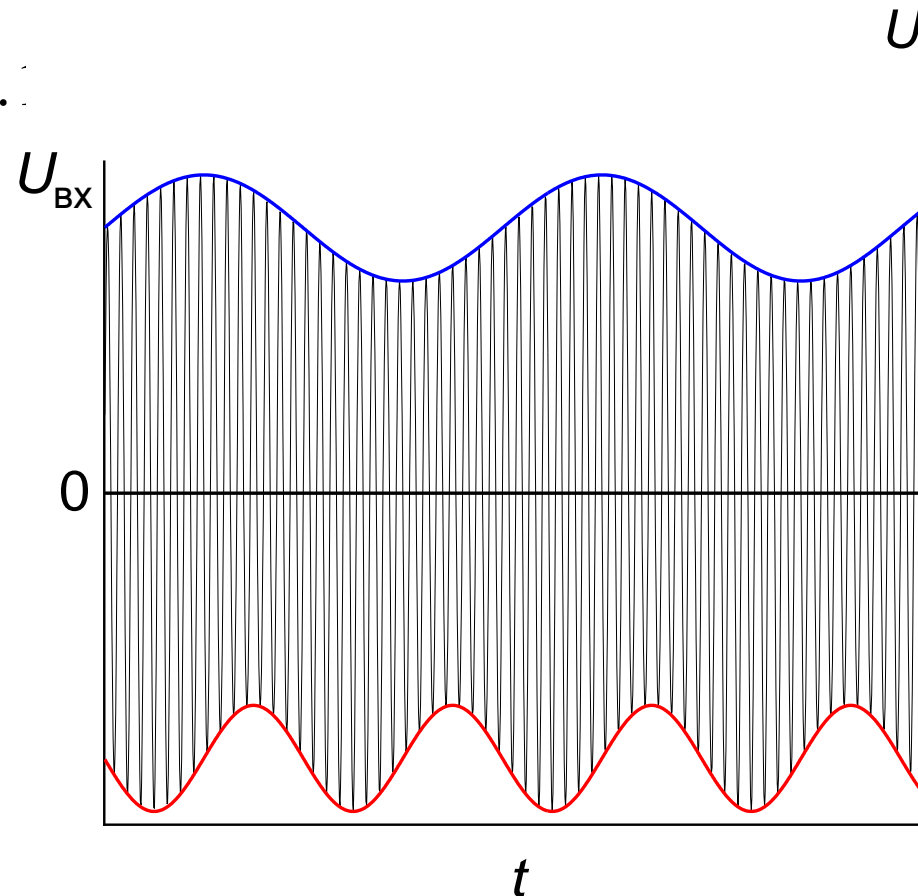


# Схемы. Детектор/демодулятор

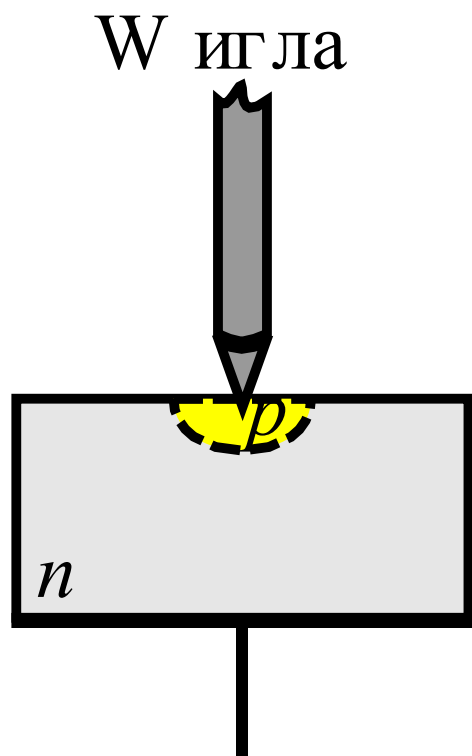
$$\omega_{3B} \ll \omega_{\text{Нес}}$$



$$U_{\text{ВХ}} = V_1 \sin(\omega_1 t) \max(\sin(\omega_{\text{Нес}} t), 0) + V_2 \sin(\omega_2 t) \min(\sin(\omega_{\text{Нес}} t), 0)$$



# Технологии. Точечный диод



В **точечном диоде** с пластинкой кремния или германия (например, *n*-типа) соприкасается заострённая металлическая проволочка, образующая выпрямляющий переход в месте контакта. Для создания стабильного выпрямляющего контакта заострённая металлическая игла имеет на конце примесь *индия* или *алюминия*. В результате формовки – термодиффузии и подачи сильных импульсов тока – в кристалле *n/p* образуется слой *p*- типа.

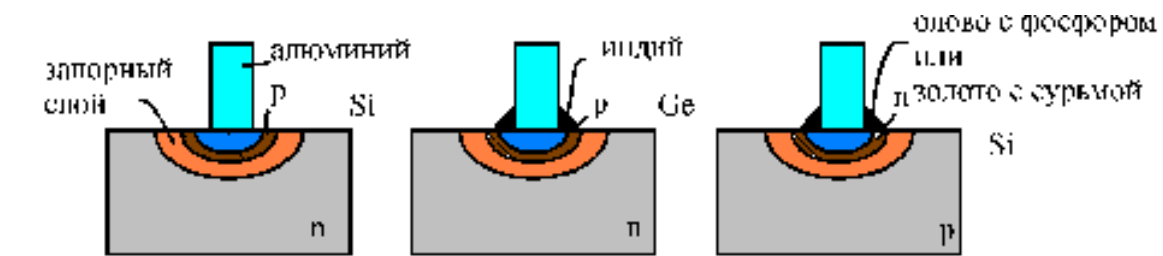
Точечный диод был запатентован в 1906 г. Гринлифом Пиккардом как кристаллический детектор для радиосвязи.

Первые точечные диоды стали широко применять с 1920-х годов в детекторных радиоприёмниках в качестве амплитудного детектора, они имели открытую конструкцию и оператор радиоприемника должен был при помощи специального держателя найти иглой «активную точку» на поверхности кристалла чтобы радиоприёмник заработал.

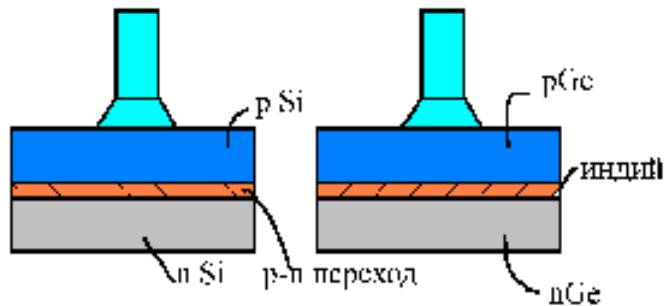
Недостатки:

большой разброс параметров, невысокая механическая прочность, невысокий максимальный ток и чувствительность к перегрузкам, конструктивная невозможность микроминиатюризации.

# Технологии. Сплавные диоды



Диоды сплавные малой мощности. Аналогично - методом диффузии



Диоды сплавные средней мощности

$$N_a \gg N_d$$

**Сплавной диод** занимают промежуточное положение между плоскостными и точечными. Микросплавные диоды, имеющие также малую площадь перехода.

При изготовлении микросплавного диода *p-n* переход формируется, например, путём микровсплавления в кристалл (например Ge) тонкой золотой проволоочки с присадкой галлия на конце.

Диоды с микросплавными переходами выгодно отличаются от точечных лучшей стабильностью параметров, но ёмкость перехода у них больше и предельные частоты ниже, чем у точечных диодов.

# Технологии

## Диффузные диоды

