

НЕРАВНОВЕСНЫЕ НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Факторы, создающие неравновесное состояние

- ❖ Неоднородный нагрев
- ❖ Освещение
- ❖ Механические напряжения
- ❖ Корпускулярные потоки
- ❖ Электрические поля большой напряженности
- ❖ Инжекция носителей тока

Оптическая генерация носителей тока

$$n' = (n + \Delta n)$$

$$p' = (p + \Delta p)$$

Скорость фотогенерации γ - число носителей тока, возбуждаемых в единице объёма полупроводника в единицу времени.

$$\gamma = i \cdot \alpha \cdot \beta$$

i - интенсивность светового потока ;

α - коэффициент поглощения ;

β - квантовый выход - число электронов или дырок или электронно-дырочных пар, генерируемое одним поглощённым фотоном .

Скорость рекомбинации неравновесных носителей δ

Время жизни неравновесных носителей тока τ

$$\tau = 1/\delta$$

τ_e, τ_h - время, в течение которого неравновесная концентрация соответствующих носителей тока уменьшается в e раз.

Стационарная неравновесная концентрация:

$$\Delta n = \gamma_e \tau_e = i \alpha \beta_e \tau_e$$
$$\Delta p = \gamma_h \tau_h = i \alpha \beta_h \tau_h$$

Полная концентрация свободных электронов

$$n' = n + \Delta n = \int_{Wc}^{\infty} P_w N_w dw$$

P_w – неравновесная функция распределения (отличная от равновесной функции Ферми-Дирака, но стремящаяся к ней по мере приближения системы к равновесному состоянию)

$$n' = N_C \cdot e^{\frac{-(W_c - W_e)}{kT}}$$

$$p' = N_V \cdot e^{\frac{W_V - W_h}{kT}}$$

W_e и W_h - квазиуровни Ферми для электронов и дырок

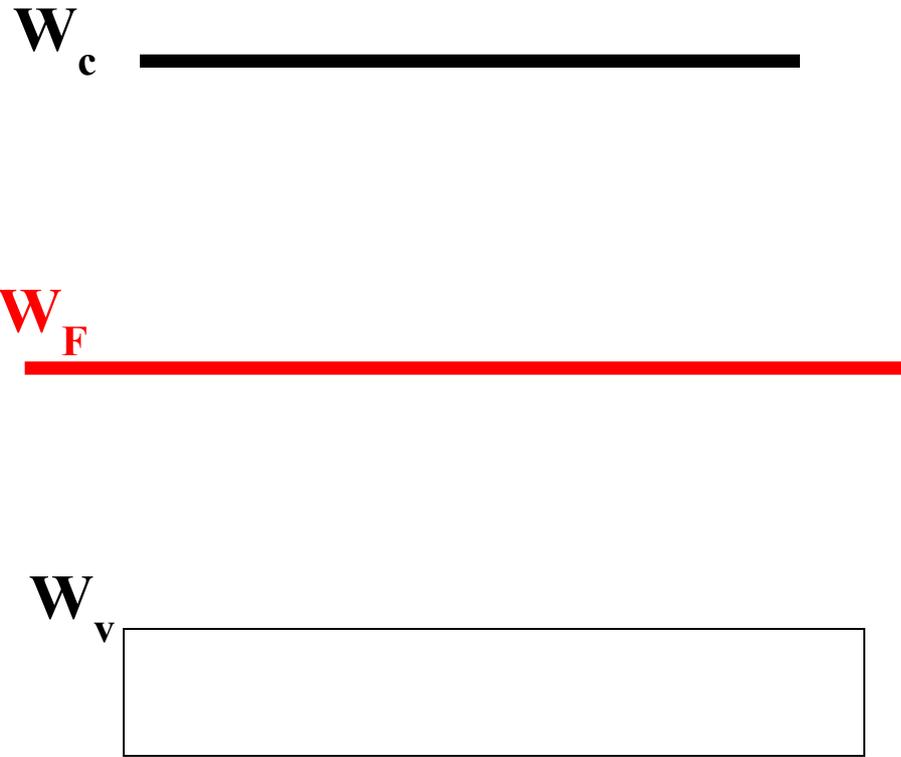
$$n' \cdot p' = N_C \cdot N_V \cdot e^{\frac{-(W_C - W_V)}{kT}} \cdot e^{\frac{W_e - W_h}{kT}}$$

$$N_C \cdot N_V \cdot e^{\frac{-(W_C - W_V)}{kT}} = n_i^2$$

$$n' \cdot p' = n_i^2 \cdot e^{\frac{W_e - W_h}{kT}}$$

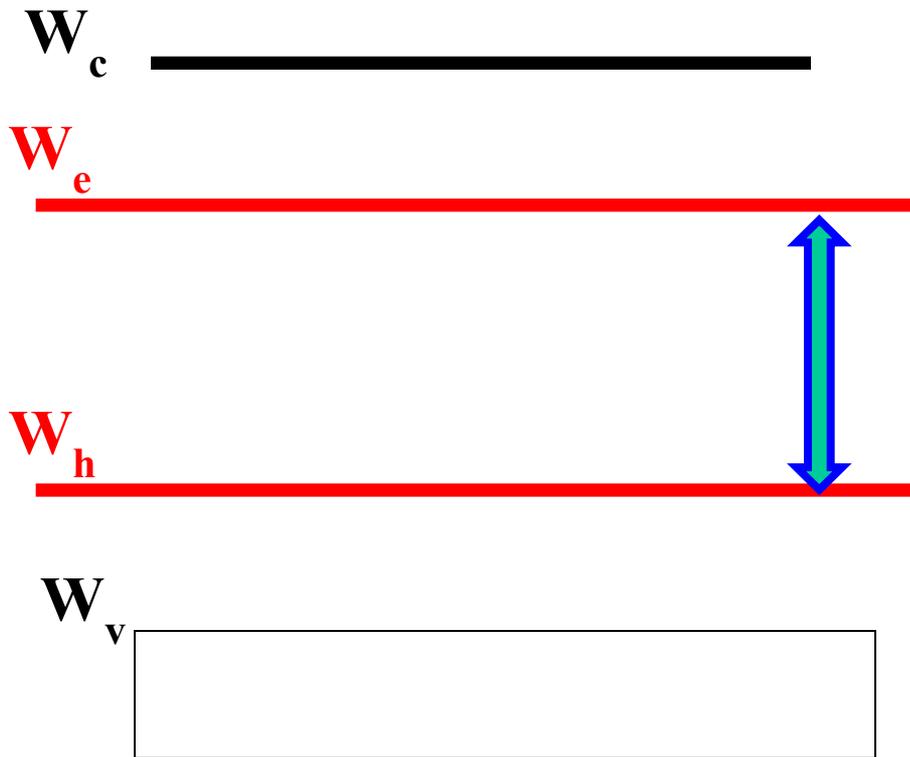
$$W_e - W_h = kT \cdot \ln \frac{n' p'}{n_i^2}$$

Уровень Ферми в собственном полупроводнике



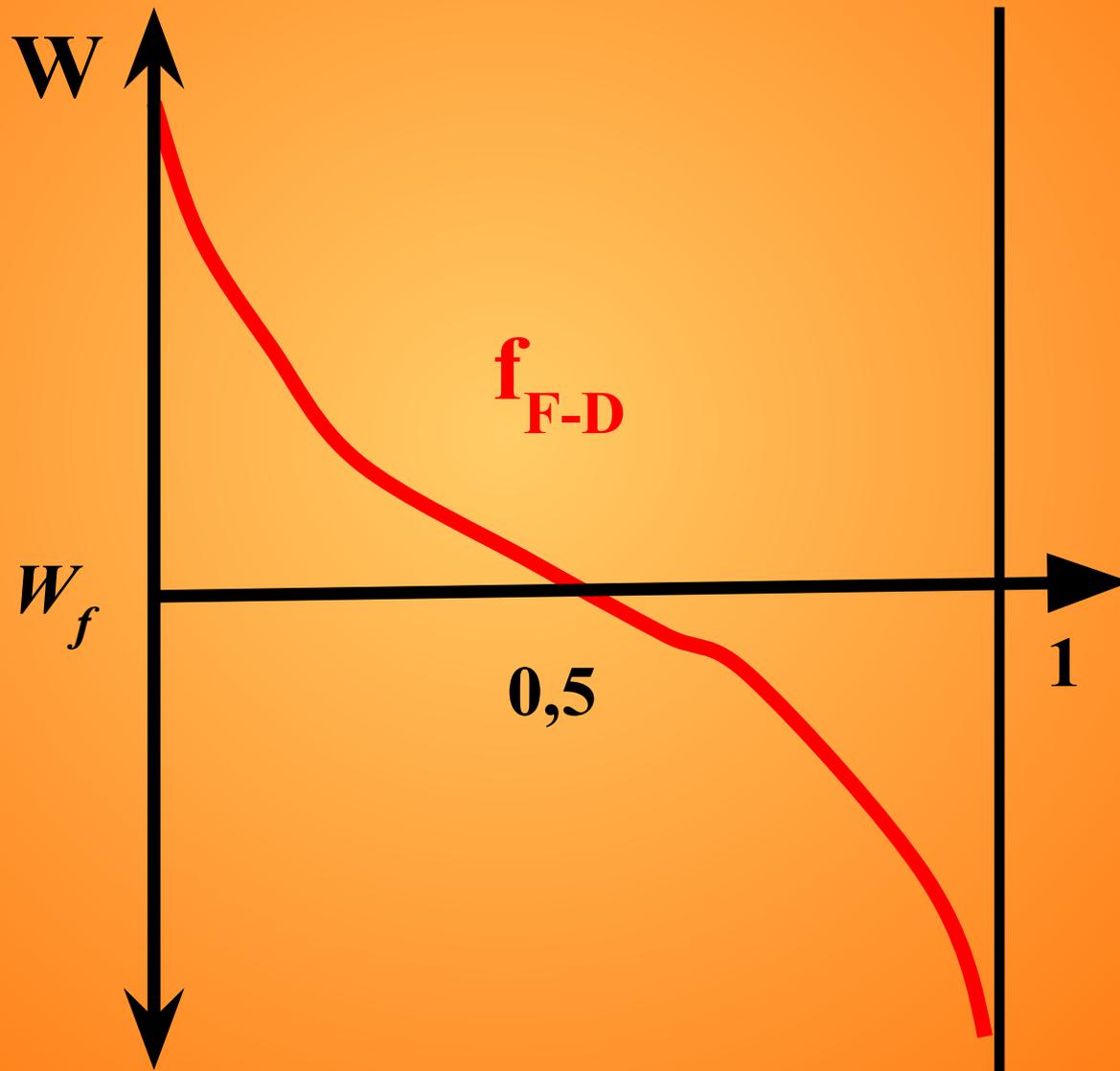
$$W_F \approx \frac{W_g}{2}$$

Уровень Ферми в собственном полупроводнике в неравновесных условиях

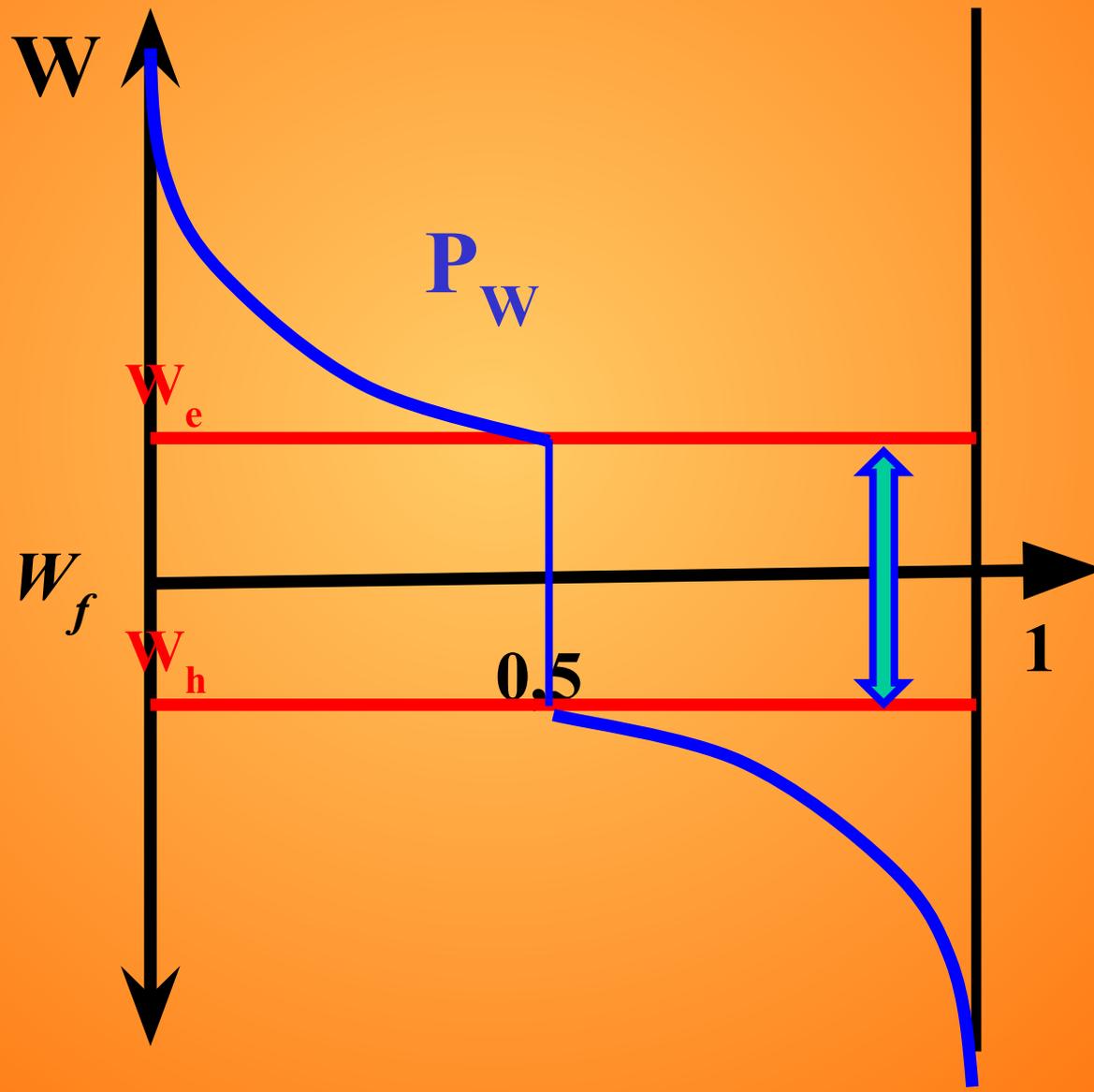


$$kT \cdot \ln \frac{n' p'}{n_i^2}$$

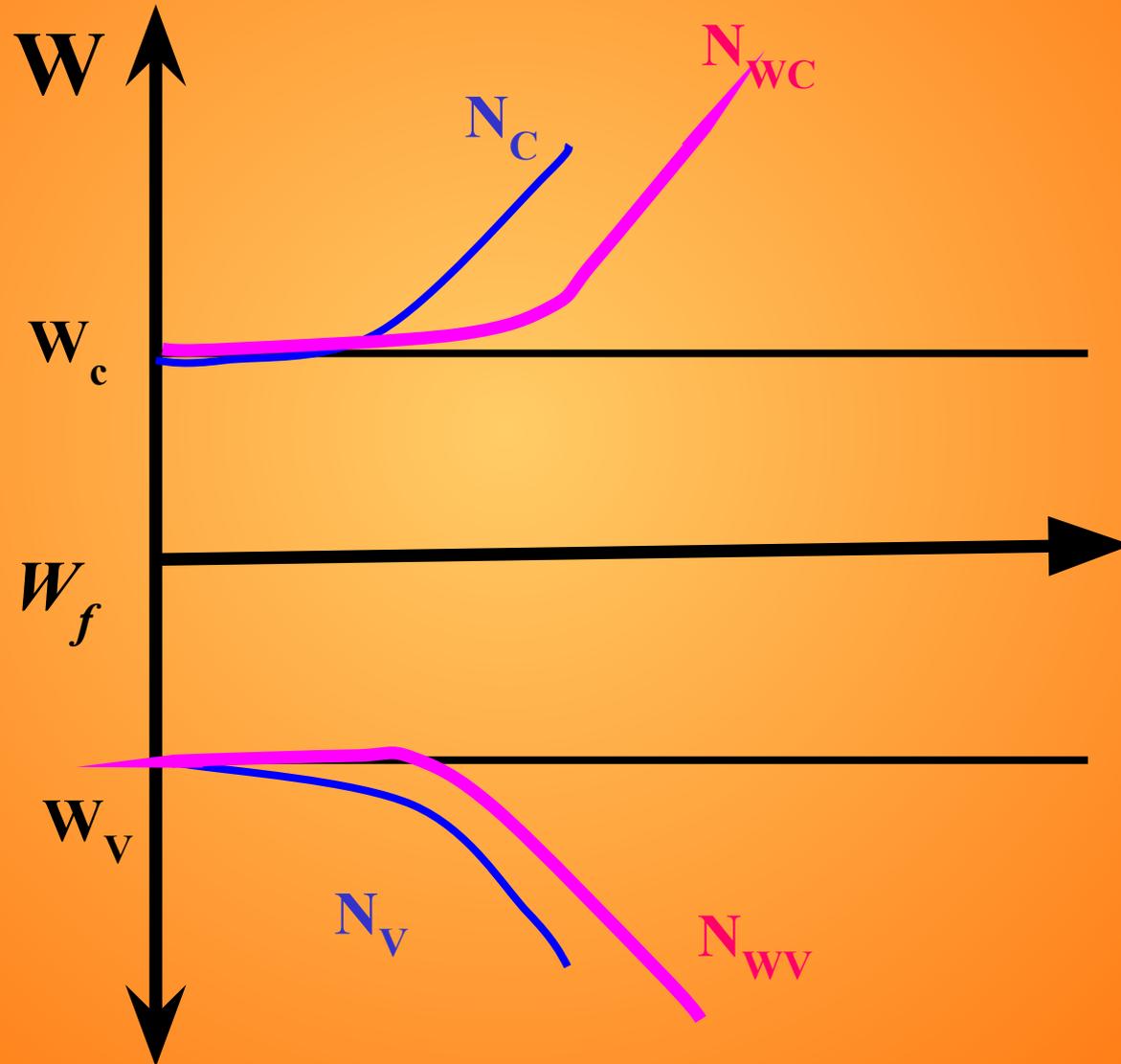
Вид функции распределения



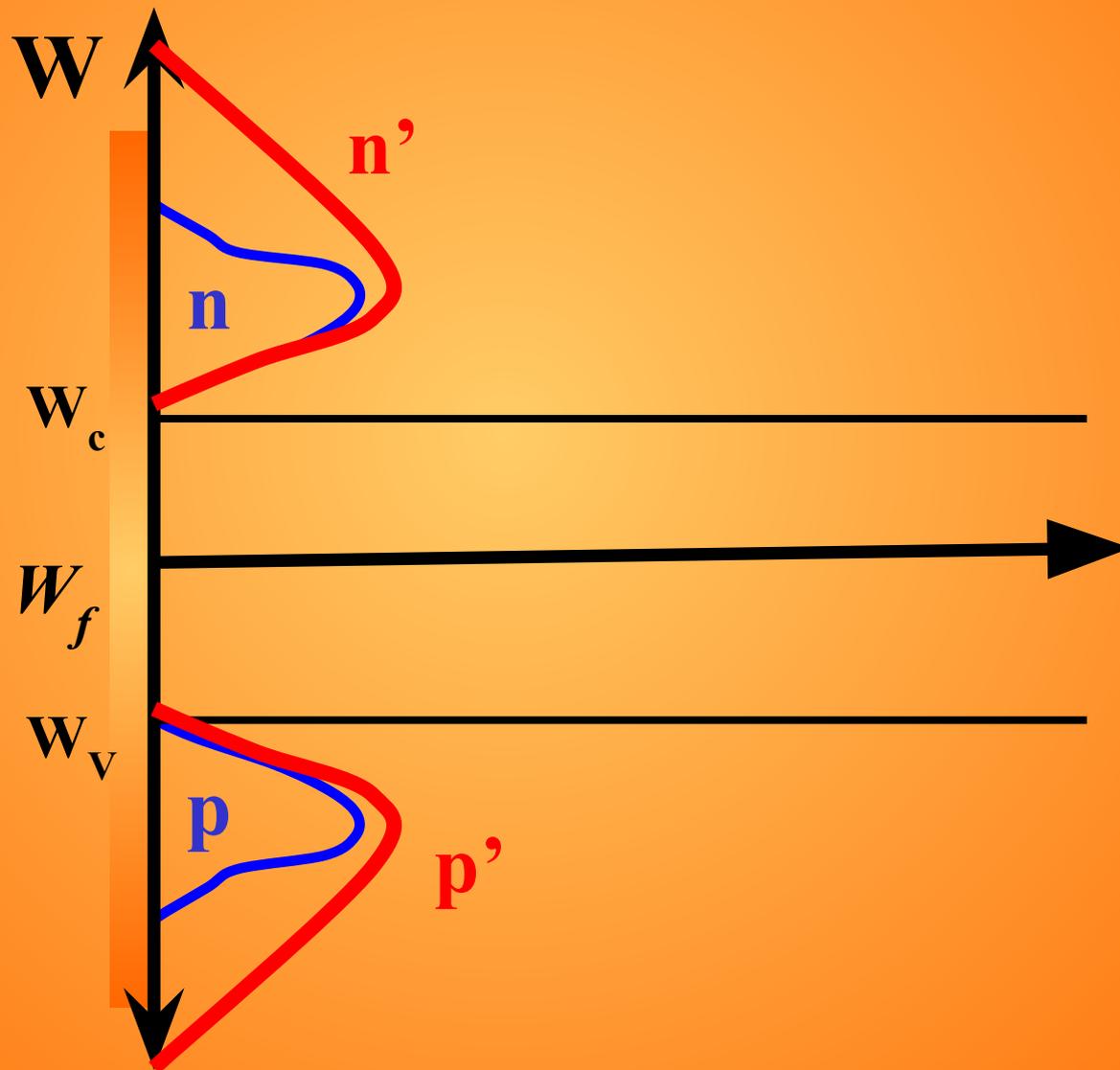
Вид функции распределения



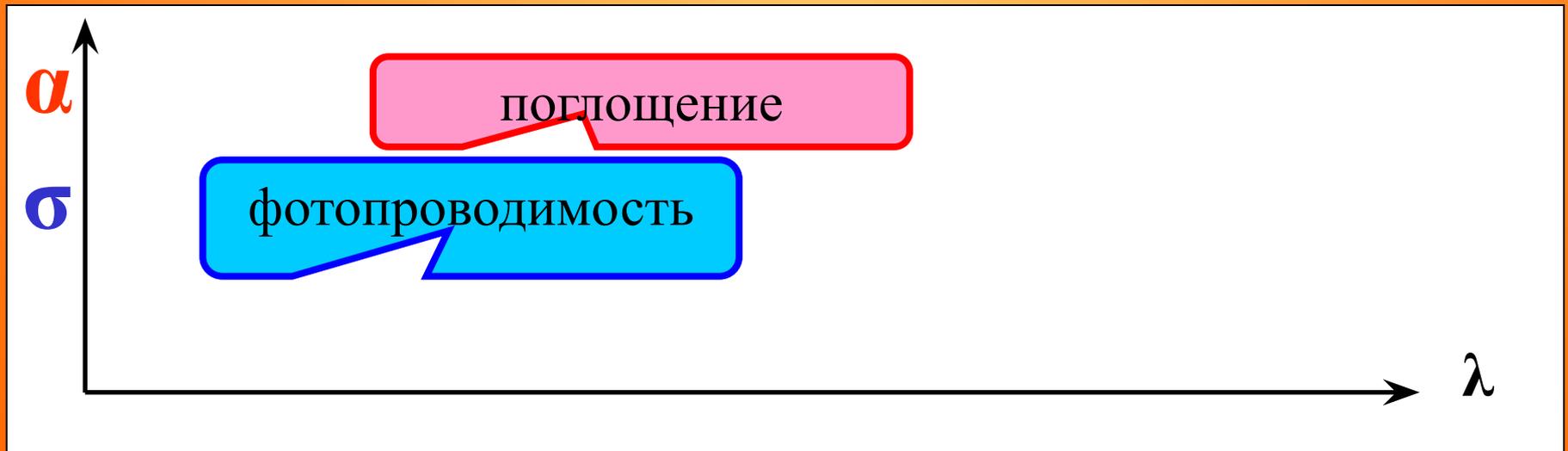
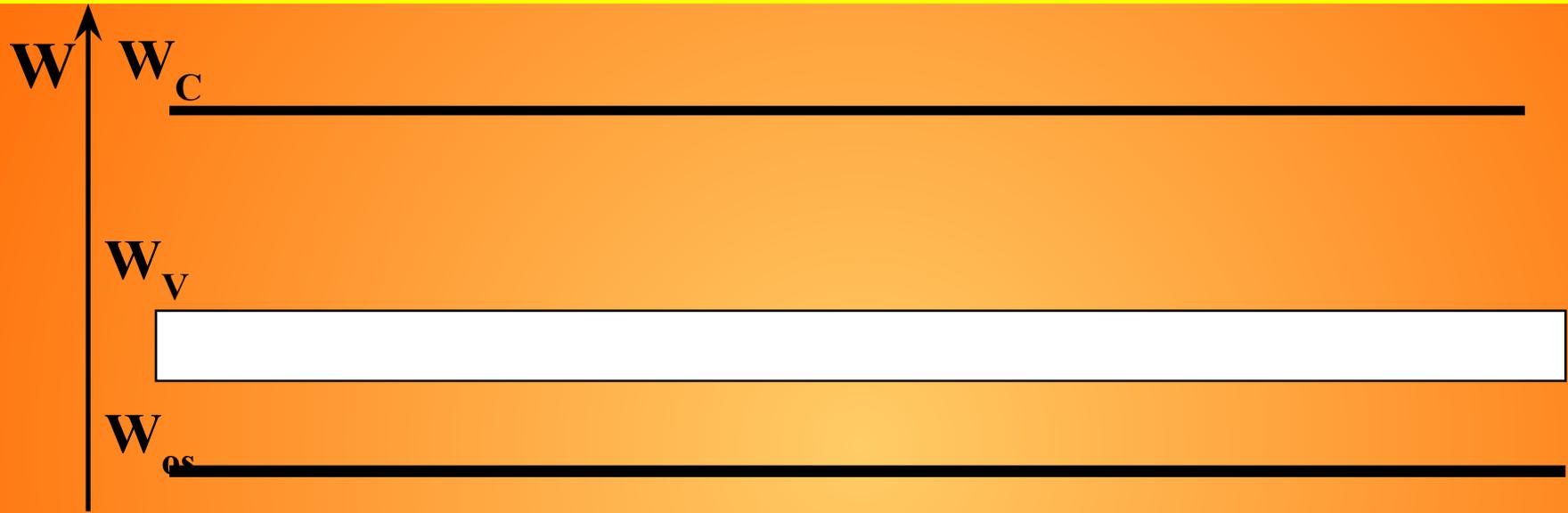
Вид функции плотности состояний



Распределение электронов и дырок



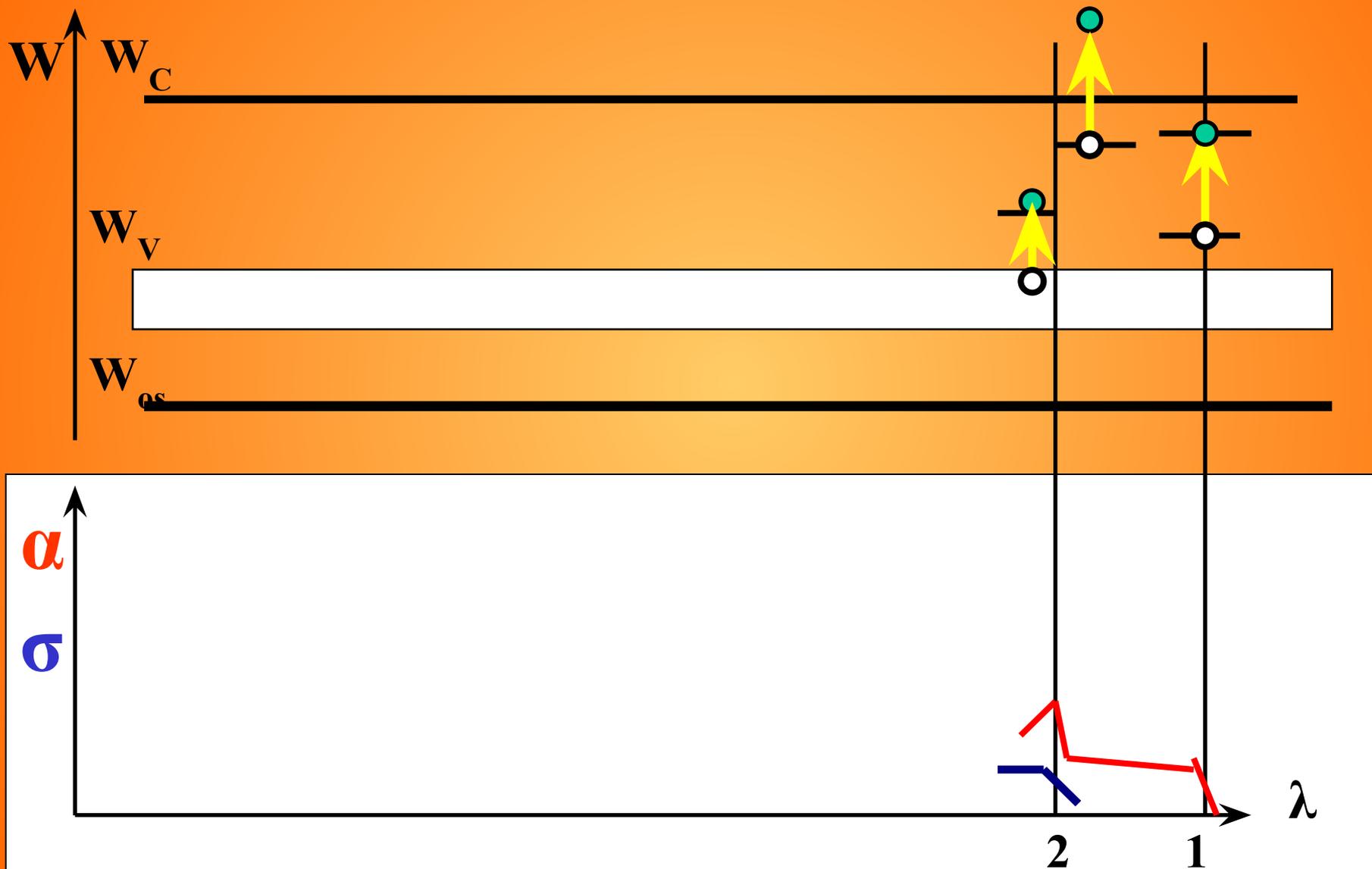
Спектры поглощения и фотопроводимости



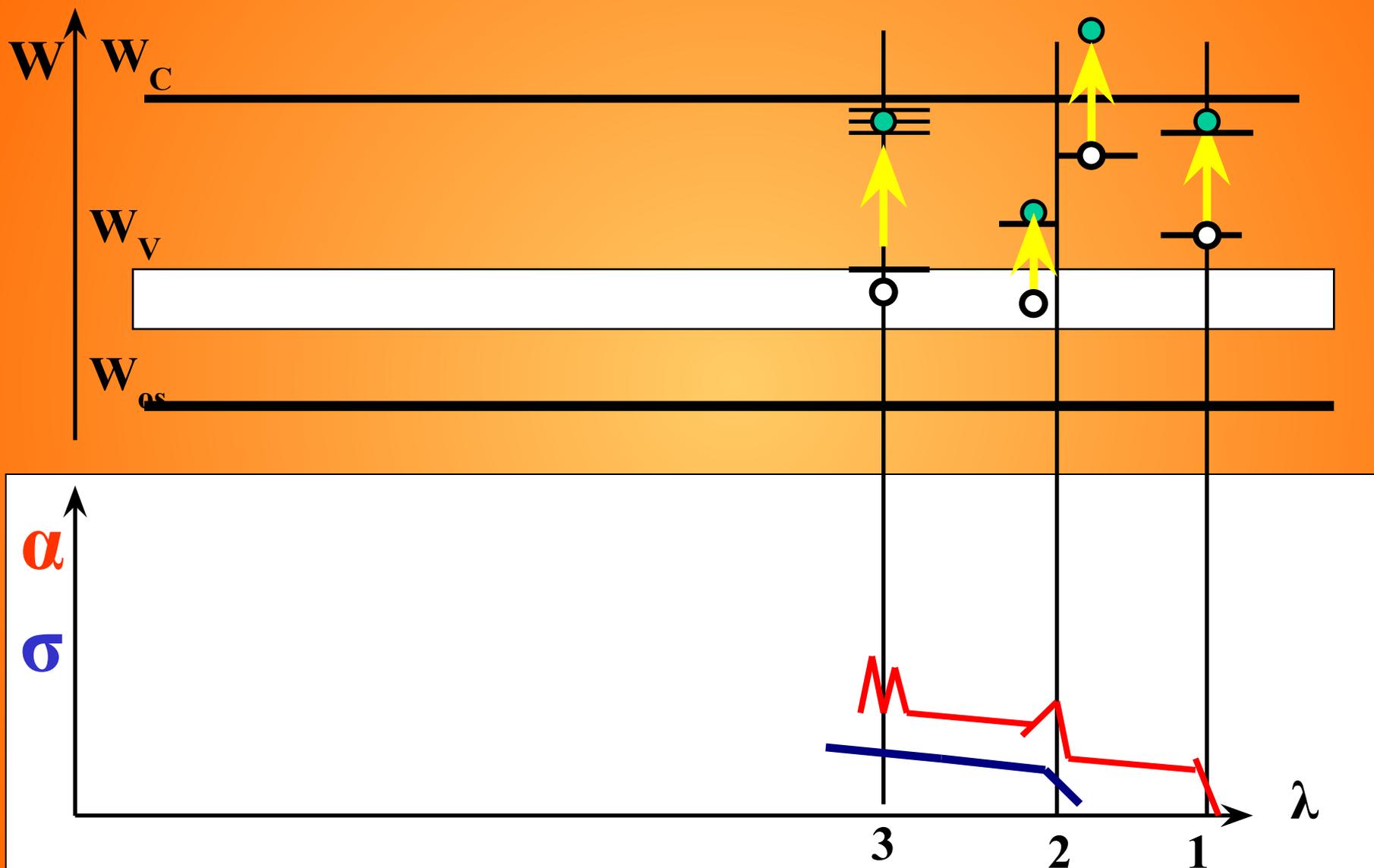
Спектры поглощения и фотопроводимости



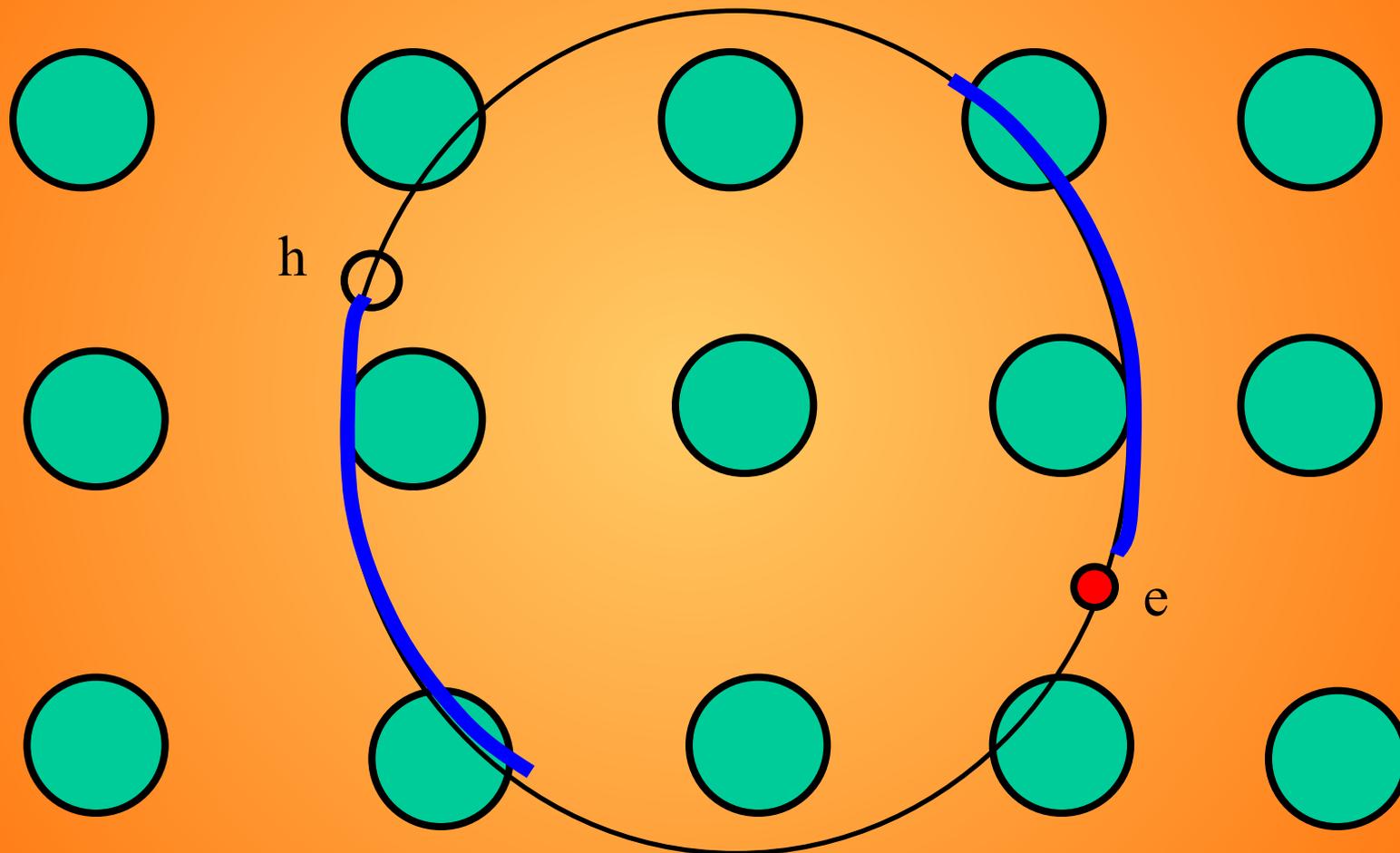
Спектры поглощения и фотопроводимости



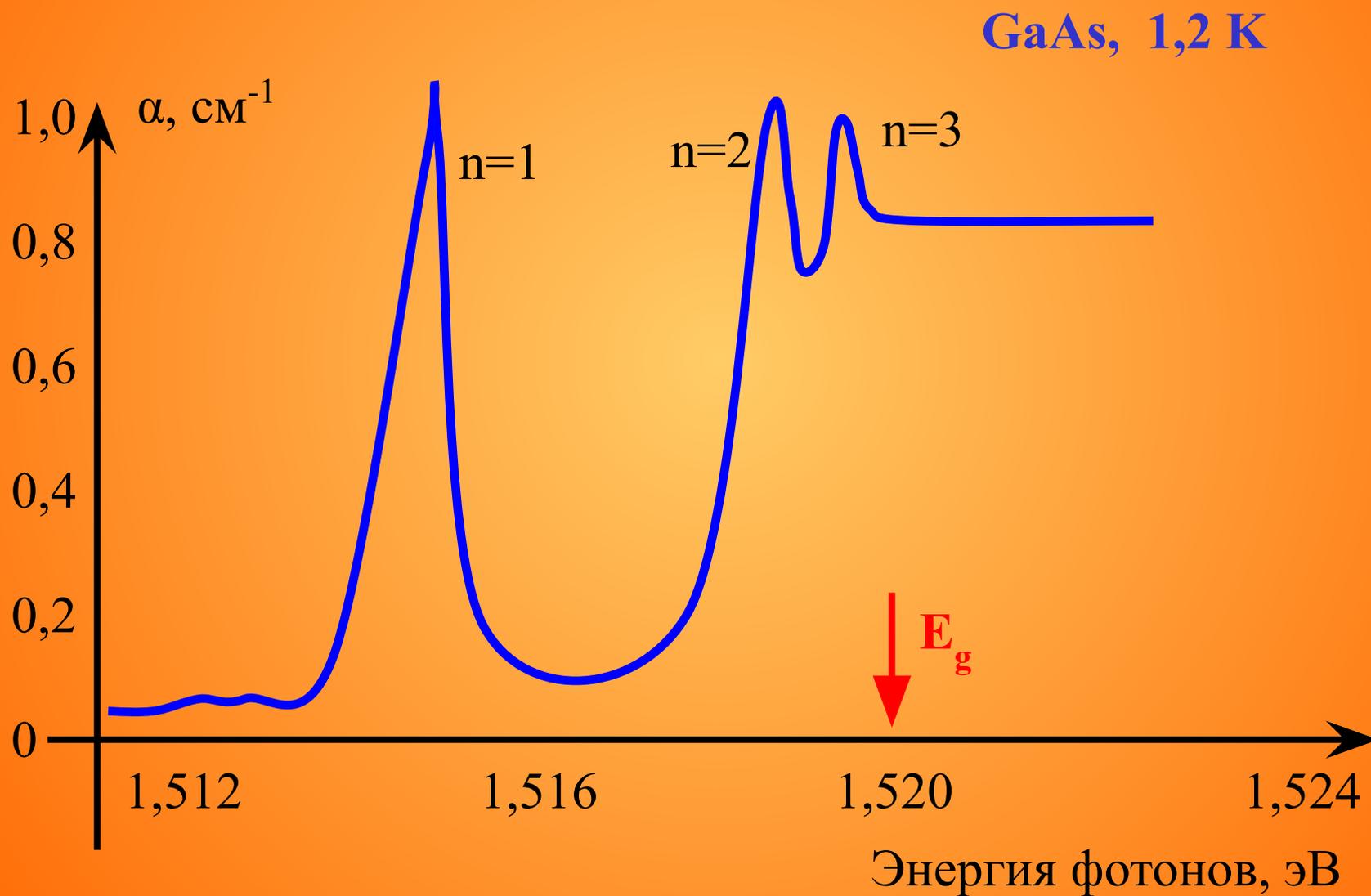
Спектры поглощения и фотопроводимости



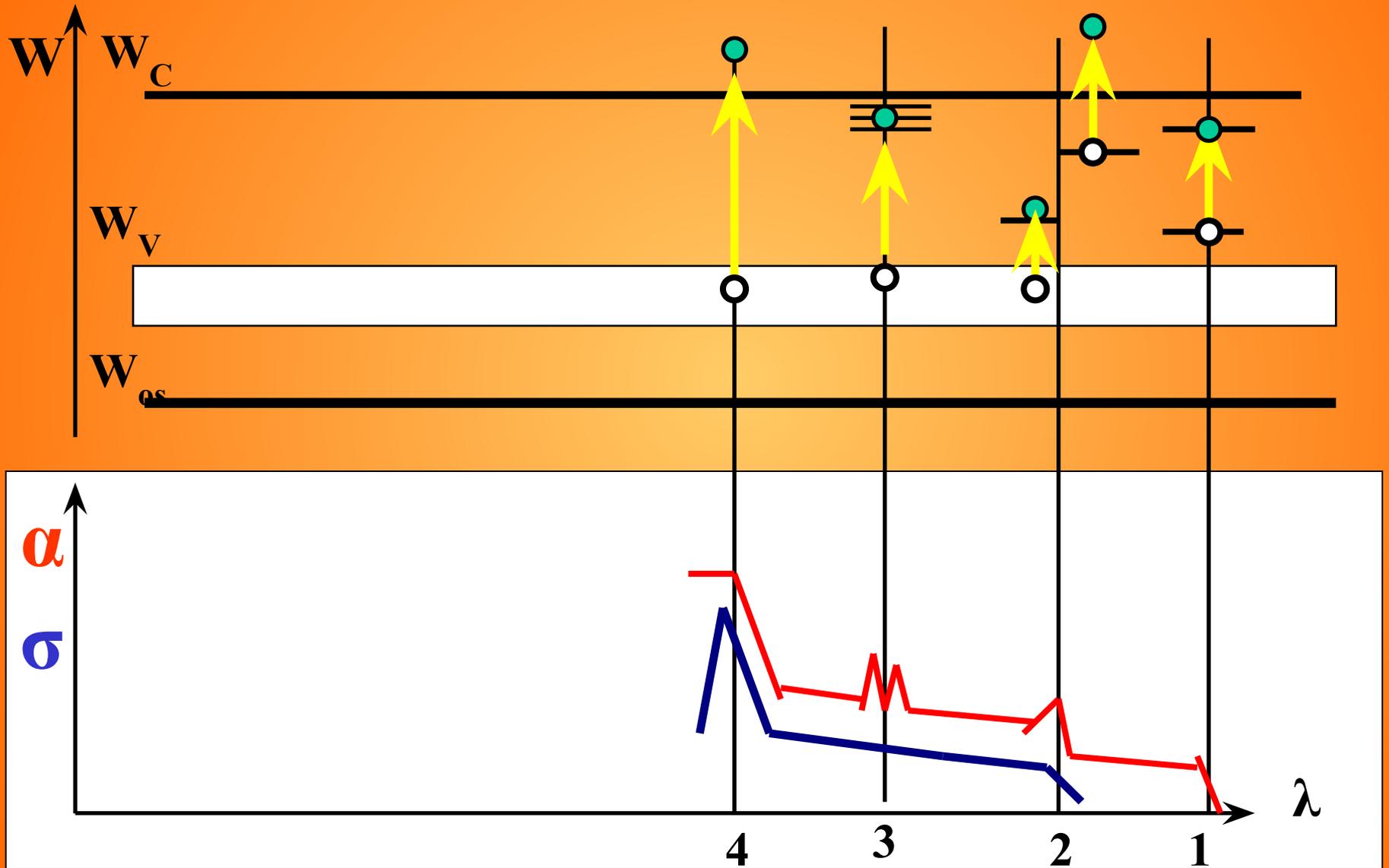
Представление об экситоне

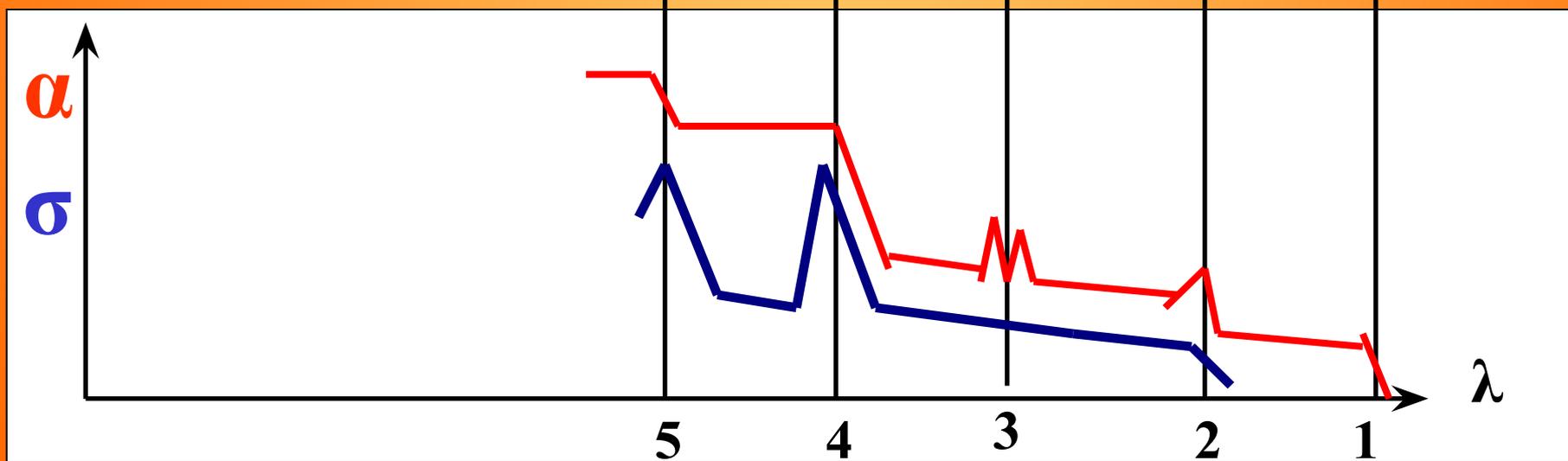
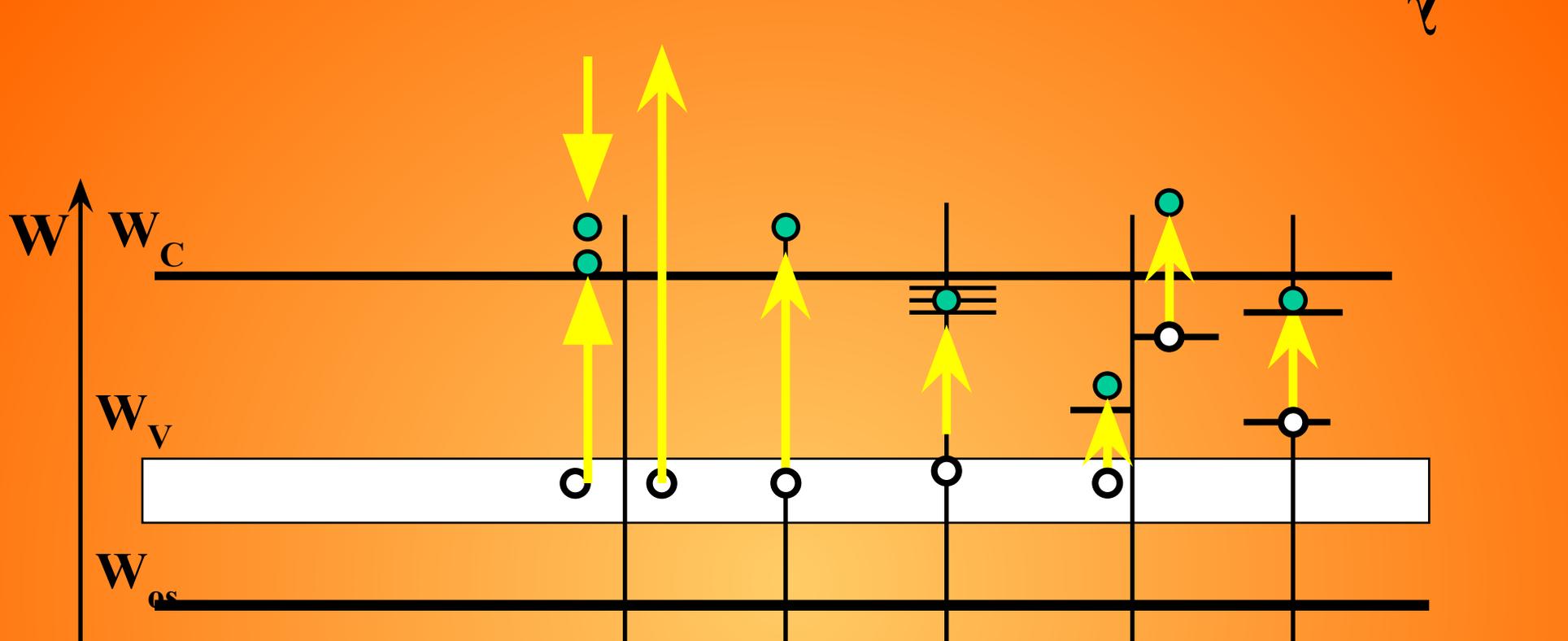


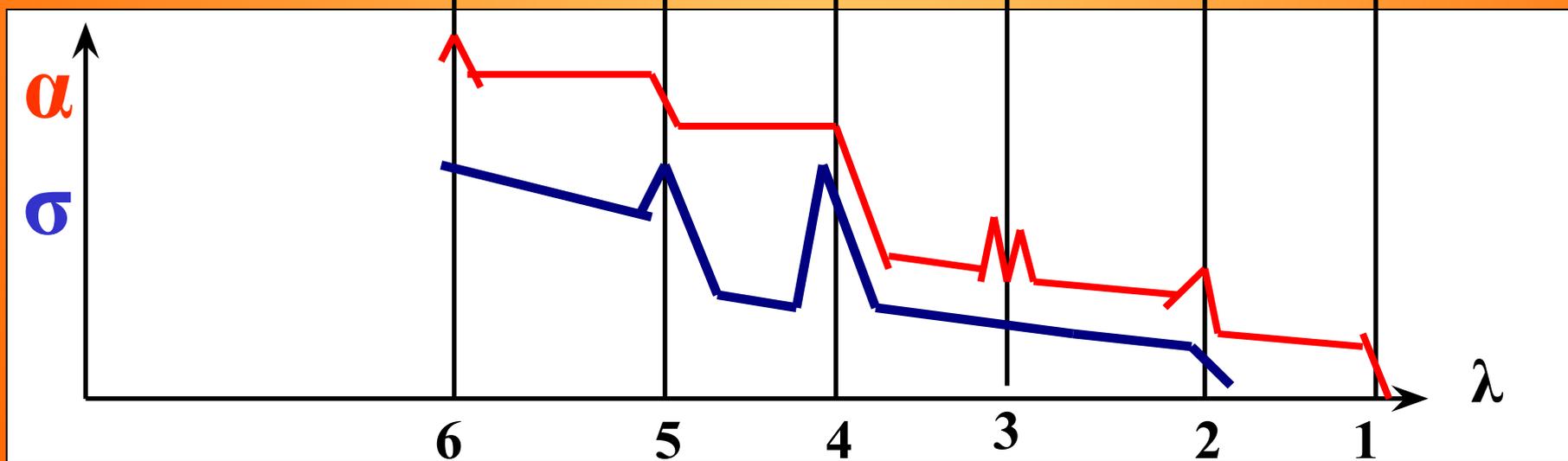
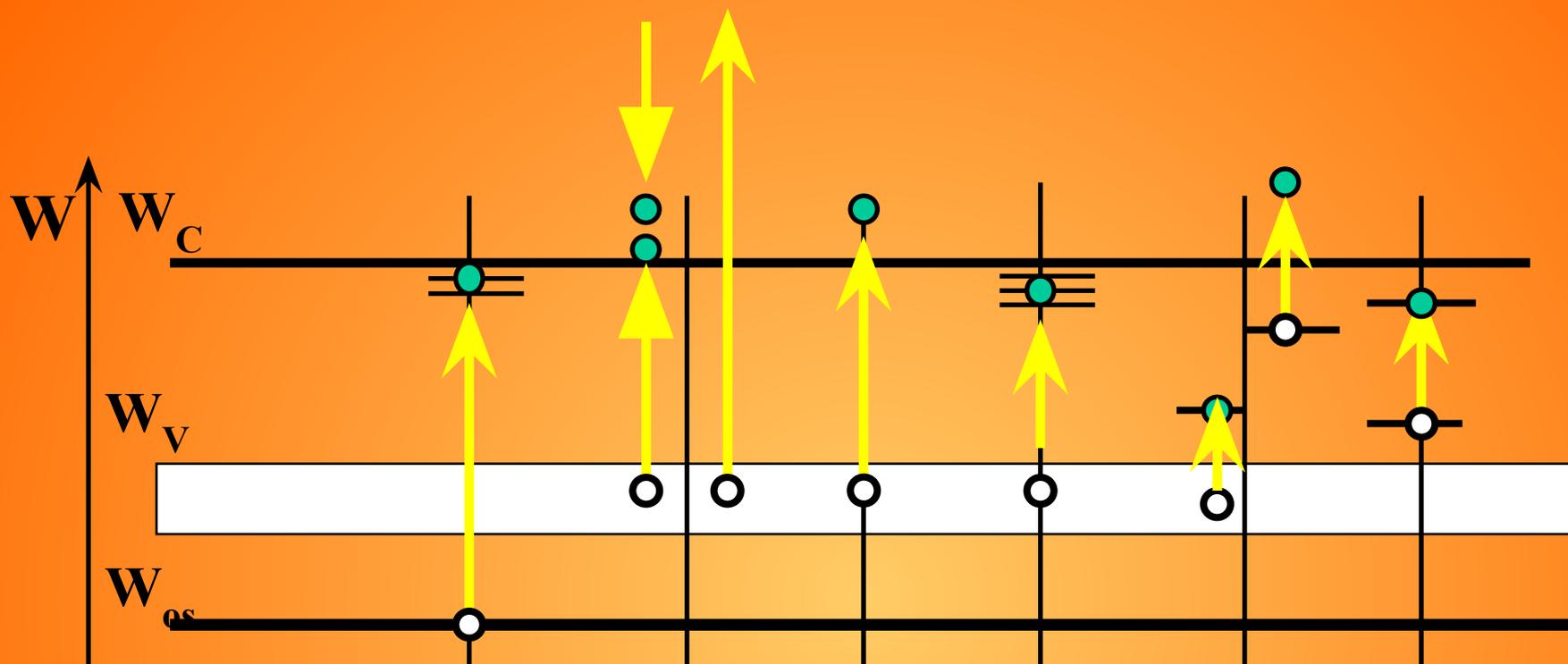
Спектр поглощения экситона

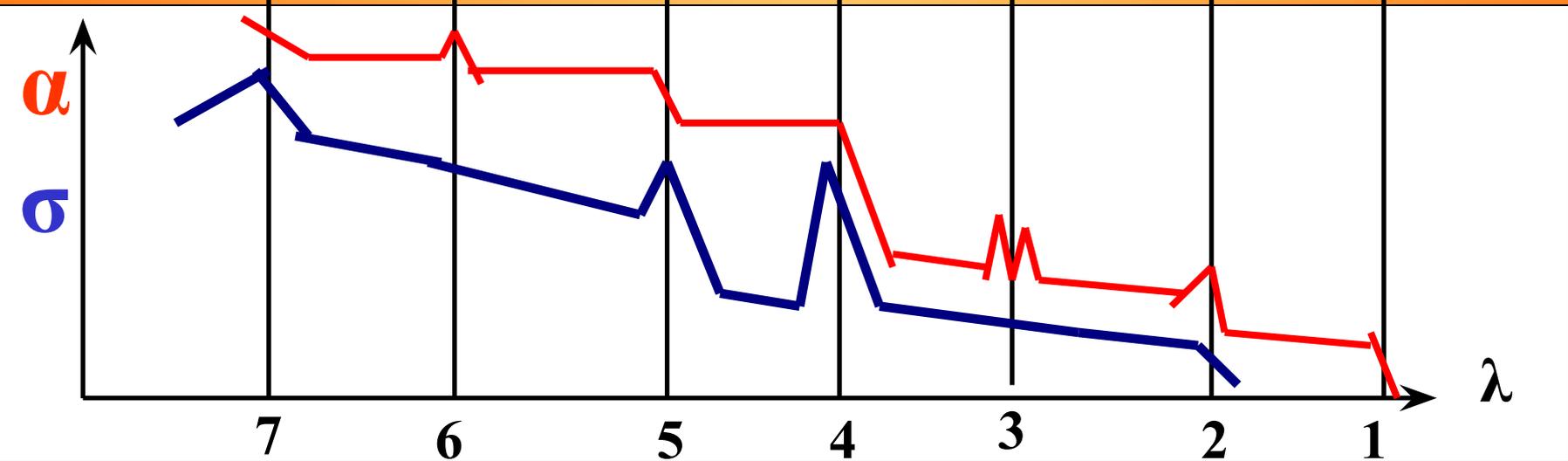
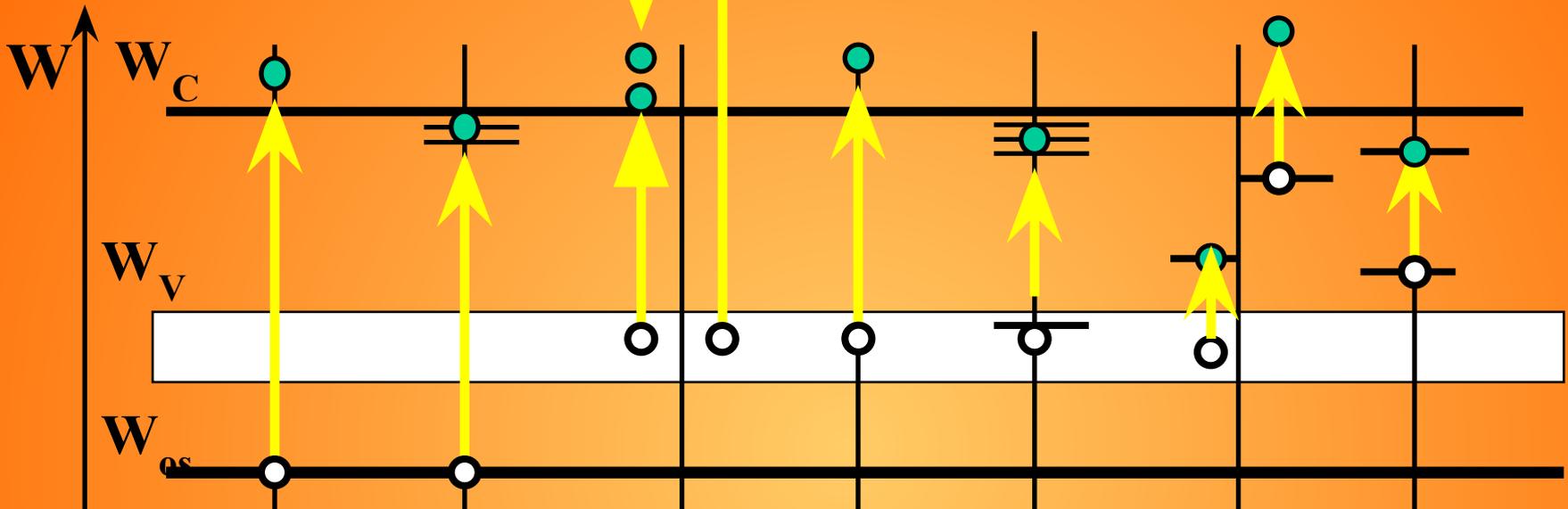


Спектры поглощения и фотопроводимости









Движение носителей тока

Диффузия – движение носителей тока, являющееся следствием разности концентраций.

Дрейф – движение носителей тока под воздействием силы электрического поля.

УРАВНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОСТИ

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g - \frac{\partial I_e}{\partial x} - \frac{\Delta n}{\tau_e}$$

g – скорость генерации электронов,

I_e - поток электронов, протекающий через единичную поверхность, перпендикулярную оси x за единицу времени,

Δn - концентрация неравновесных носителей тока /электронов/,

τ_e - время жизни неравновесных электронов.

Первое и второе уравнения Фика:

$$I_e = -D_e \frac{\partial n}{\partial x}$$

D – коэффициент диффузии ($\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$)

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

Соотношение Эйнштейна:

$$\frac{D_e}{\mu_e} = \frac{kT}{e}$$

e – заряд электрона

$$\mu_e$$

L_D - диффузионная
длина ,

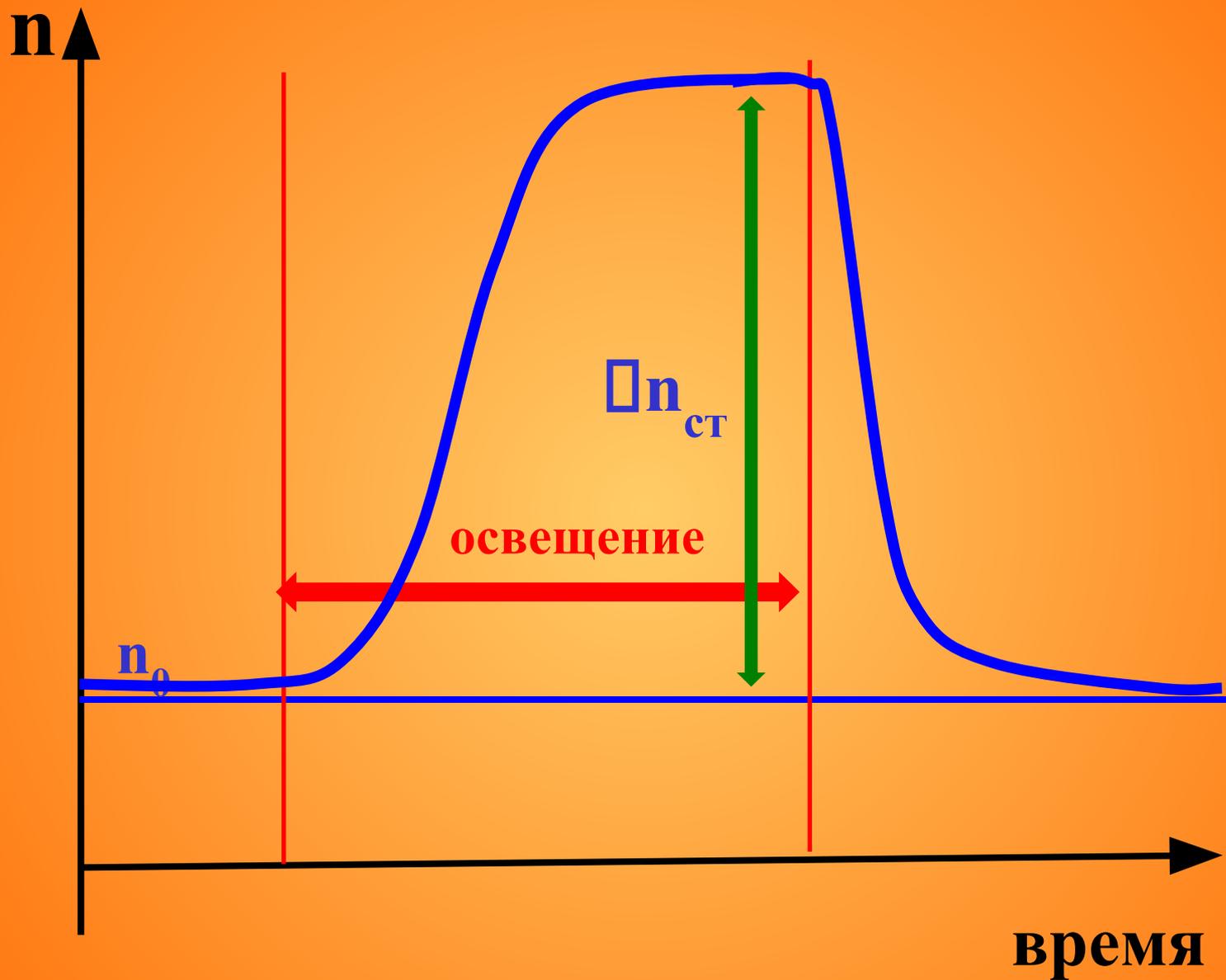
$$L_{D_e} = \sqrt{D_e \tau_e}$$

D - коэффициент
диффузии

τ - время жизни
неравновесных
носителей тока

При диффузии с коэффициентом D_e носители тока (электроны) за время жизни τ_e проходят путь, равный диффузионной длине L_{De} .

При этом их концентрация уменьшается в e раз.



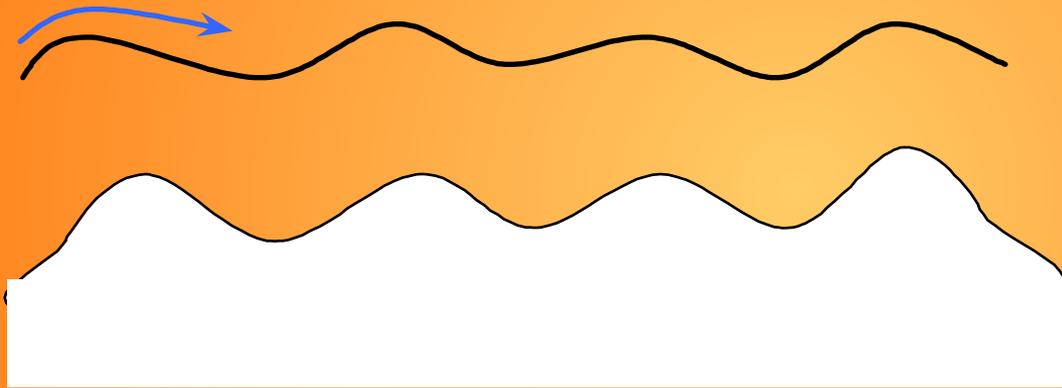
ПОДВИЖНОСТЬ

$$\mu = V / E;$$

μ – подвижность см²/ В·с.

Рассеяние энергии носителей тока

1. Рассеяние на тепловых колебаниях решётки



$$\mu_T = C_T \cdot T^{-3/2}$$

E_{II}^2 – квадрат смещения дна зоны проводимости при единичной деформации,

C_{II} - упругая постоянная для продольных волн $\frac{3}{2}$

$$\mu_T = \frac{2\sqrt{2\pi} k^4}{3} \frac{C_{\text{II}}}{E_{\text{II}}^2 (m^*)^{\frac{5}{2}} k^{\frac{3}{2}}} T$$

E_{II}^2 – квадрат смещения дна зоны проводимости при единичной деформации,

C_{II} - упругая постоянная для продольных волн

2. Рассеяние на заряженных примесях (дефектах)

$$\sigma = \frac{e^4}{\left(2\varepsilon \cdot m^* v^2\right)^2} \cdot \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\Theta}{2}\right)}$$

σ - эффективное сечение рассеяния
 θ - угол рассеяния

$$\mu_{\Pi} \cong C_{\Pi} \cdot T^{\frac{3}{2}}$$

$$\mu_{\Pi} = \frac{8}{\pi} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\left(\frac{\chi^2 (kT)^{\frac{3}{2}}}{N_{\Pi} \cdot e^3 (m^*)^{\frac{1}{2}}} \right)}{\ln \left[\left(1 + \frac{3\chi \cdot kT}{e^2 N_{\Pi}^{\frac{1}{3}}} \right) \right]}$$

N_{Π} – концентрация рассеивающей примеси

Для вырожденных полупроводников

$$\rho_{\Pi} = \frac{6270}{N_{\Pi}^{1/3}} \quad (\text{Ом} \cdot \text{см})$$

Правило аддитивности

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_T} + \frac{1}{\mu_{II}}$$

3. Рассеяние на нейтральных примесях и структурных дефектах кристалла

Для нейтральных примесных атомов

$$\mu_H = \frac{10^{22}}{7.6 \cdot N_H \cdot T^{1/2}} \quad \Delta\rho_H = \frac{20\varepsilon \cdot N_H h^3}{8\pi^3 n \cdot m^* e^4}$$

$\Delta\rho_H$ - повышение удельного сопротивления материала за счёт этого вида рассеяния:

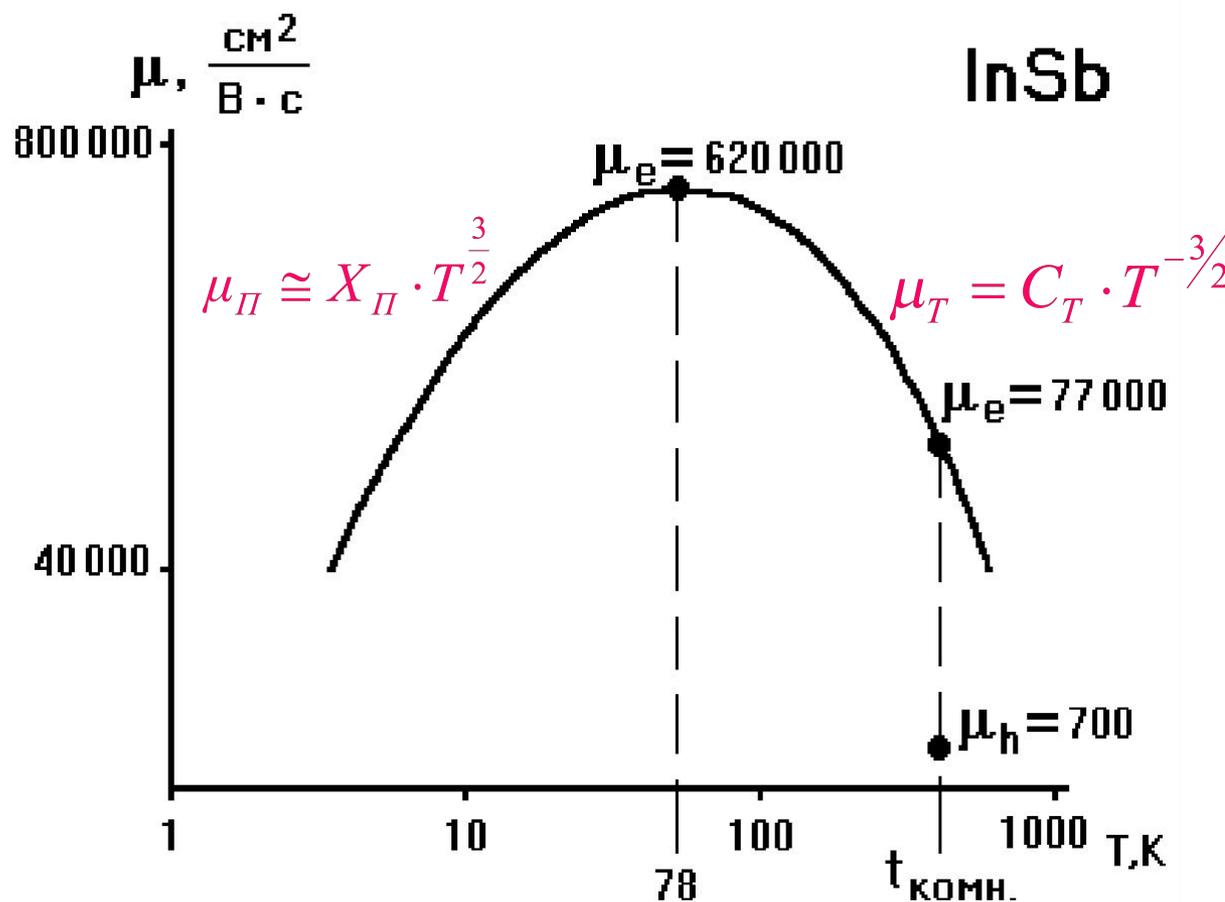
ε – диэлектрическая проницаемость,

N_H - концентрация нейтральной примеси,

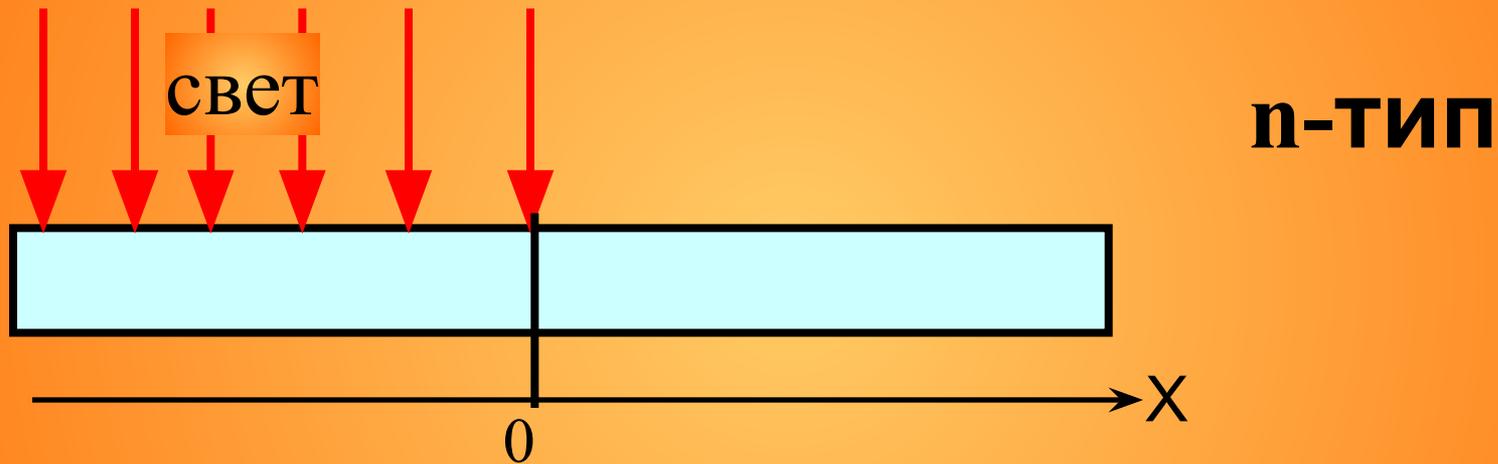
n - концентрация носителей тока.

Зависимость подвижности электронов от температуры в InSb

узкозонный полупроводник ($W_g = 0,18$ эВ)
аномально высокая подвижность электронов

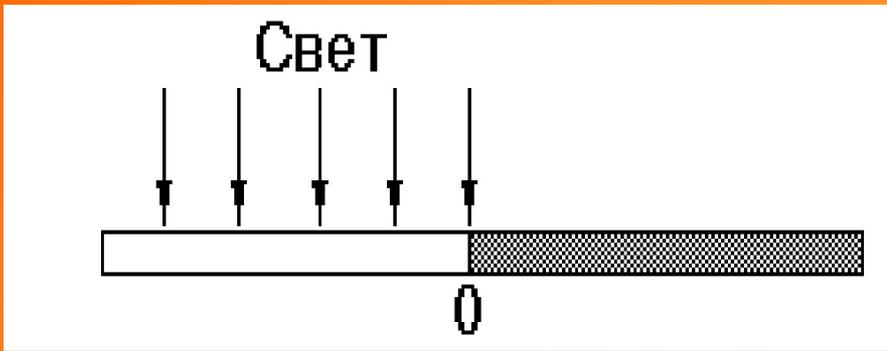


Диффузия и дрейф неравновесных основных носителей в случае монополярной проводимости

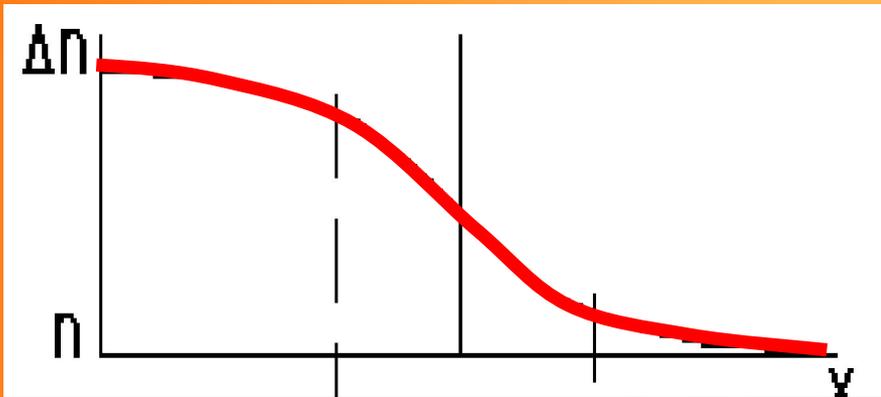


$$\Delta n = \Delta N_d^+$$

Δn – концентрация фотогенерированных электронов
 ΔN_d^+ – концентрация положительных ионов (ионизованных доноров)



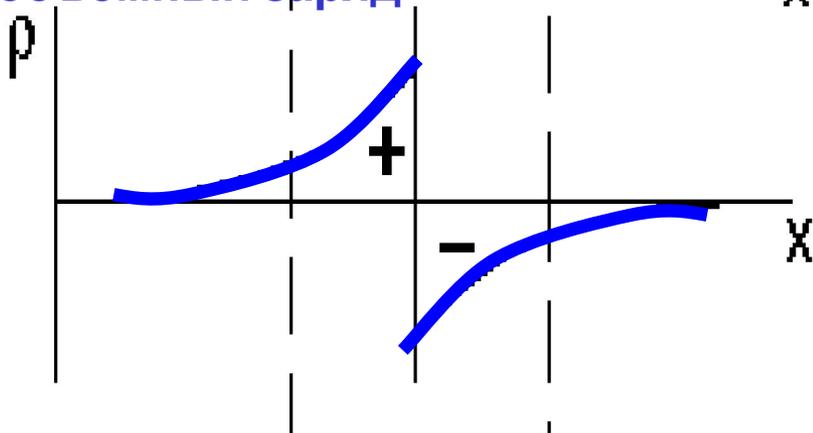
$$I_{\text{ДИФ}} = eD_e \frac{dn}{dx}$$



$$I_{\text{ДР}} = en\mu_e E_{\text{СТ}}$$

$$en\mu_e E_{\text{СТ}} + eD_e \frac{dn}{dx} = 0$$

объёмный заряд



$$n\mu_e E_{CT} = -D_e \frac{dn}{dx}$$

$$\frac{D_e}{\mu_e} = \frac{kT}{e}$$

$$D_e = \frac{\mu_e kT}{e}$$

$$E_{CT} = \sqrt{\frac{n_0 kT}{\epsilon\epsilon_0}}$$

$$n = -\frac{\sqrt{kT\epsilon\epsilon_0}}{e\sqrt{n_0}} \frac{dn}{dx}$$

$$n = - \frac{\sqrt{kT\epsilon\epsilon_0} \, dn}{e \sqrt{n_0} \, dx}$$

$$\frac{dn}{n} = - \sqrt{\frac{e^2 n_0}{kT\epsilon\epsilon_0}} dx$$

$$\ln n \Big|_{\Delta n_0}^n = - \sqrt{\frac{n_0 e^2}{kT\epsilon\epsilon_0}} \cdot x \Big|_x^0$$

$$\ln n \Big|_{\Delta n_0}^n = \sqrt{\frac{n_0 e^2}{kT \epsilon \epsilon_0}} \cdot x \Big|_0^x$$

$$\ln n_0 - \ln n = x \sqrt{\frac{e^2 n_0}{kT \epsilon \epsilon_0}}$$

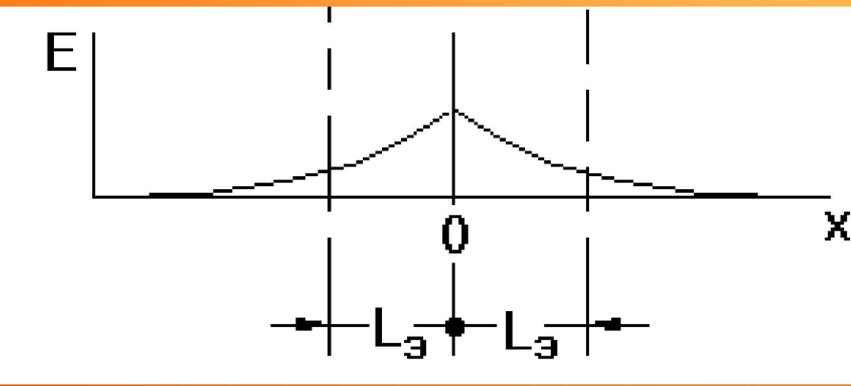
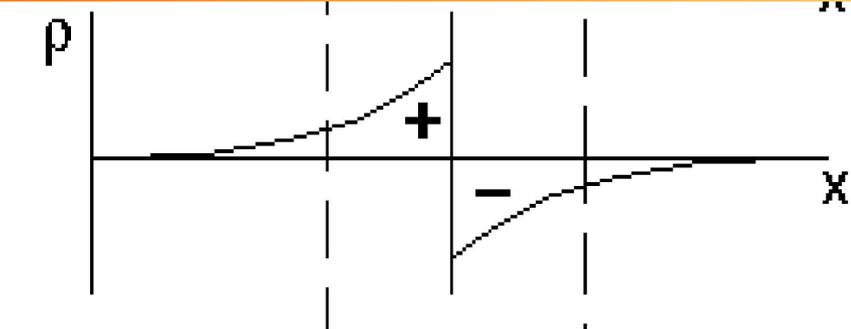
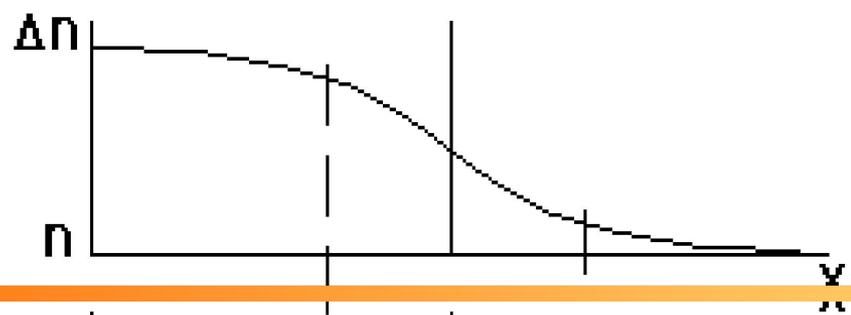
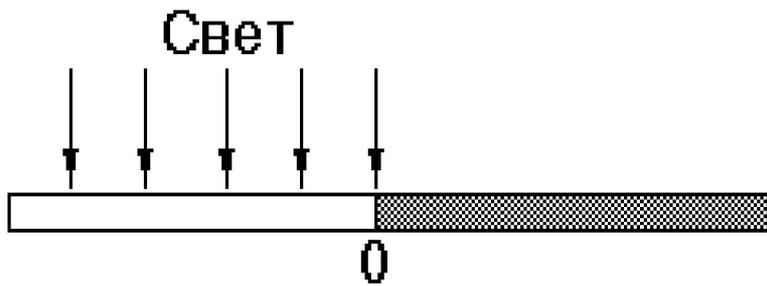
$$\ln n = \ln n_0 - x \sqrt{\frac{e^2 n_0}{kT \epsilon \epsilon_0}}$$

$$\varphi = n_0 \cdot$$

$$-x \cdot \sqrt{\frac{e^2 n_0}{kT \epsilon \epsilon_0}}$$

$$L_{\varnothing} = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 kT}{e^2 n_0}}$$

$$n = n_0 e^{-\frac{x}{L_{\varnothing}}}$$



$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-\frac{x}{L_э}}$$

$L_э$
 длина экранирования
 или
 толщина дебаевского
 слоя

$$\Delta n = \Delta n_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\mu}}}$$

τ_{μ} – максвелловское время релаксации, $\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\sigma}$

ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника

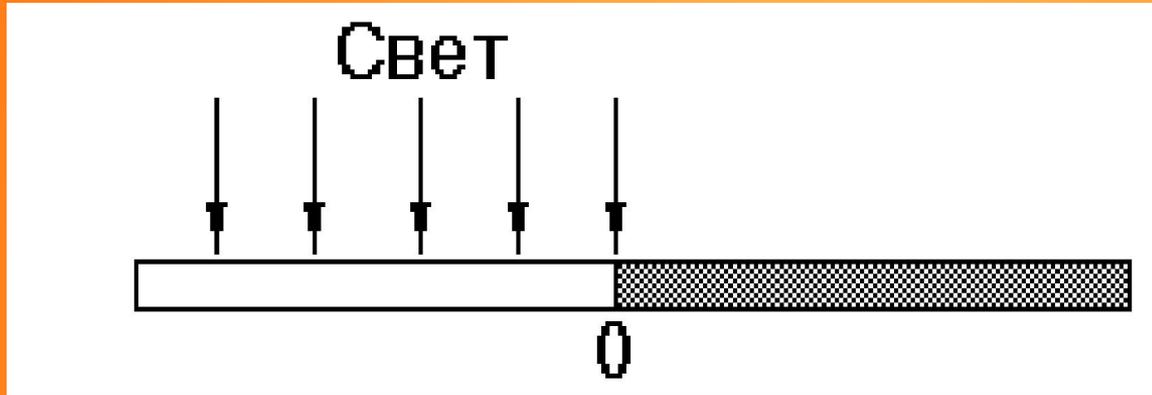
ε_0 – диэлектрическая постоянная ($8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$)

σ – удельная проводимость полупроводника ($\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$)

Перемещение носителей на L_{ε} происходит за τ_{μ} ,
 эффективное время установления **диффузионно-дрейфового**

равновесия

Диффузия и дрейф неосновных носителей тока



p-тип
 $\Delta n < p_0$

$$\Delta n = \Delta n_0 \cdot e^{-\frac{x}{L_D}}$$

L_D - диффузионная длина.

Диффузионная длина L_D -
расстояние, на которое диффузионно
перемещаются неосновные носители
тока к тому моменту, когда их
неравновесная концентрация
уменьшится в e раз. Диффузионная
длина преодолевается за время
ЖИЗНИ τ .

диффузионная скорость

$$v_{\text{ДИФ}} = \frac{L_D}{\tau_e} = \frac{L_D^2}{\tau_e L_D} = \frac{D_e}{L_D}$$

При наложении эл.поля
E

$$v_{др} = \mu E$$

Если $v_{др} \gg v_{диф}$, то спад концентрации Δn вглубь полупроводника остаётся экспоненциальным, но с иной постоянной спада $L_{др}$, называемой **дрейфовой длиной**:

$$L_{др} = E\mu\tau$$

Если $v_{др}$ и $v_{диф}$ соизмеримы, то аналогичную величину называют **длиной затягивания**.

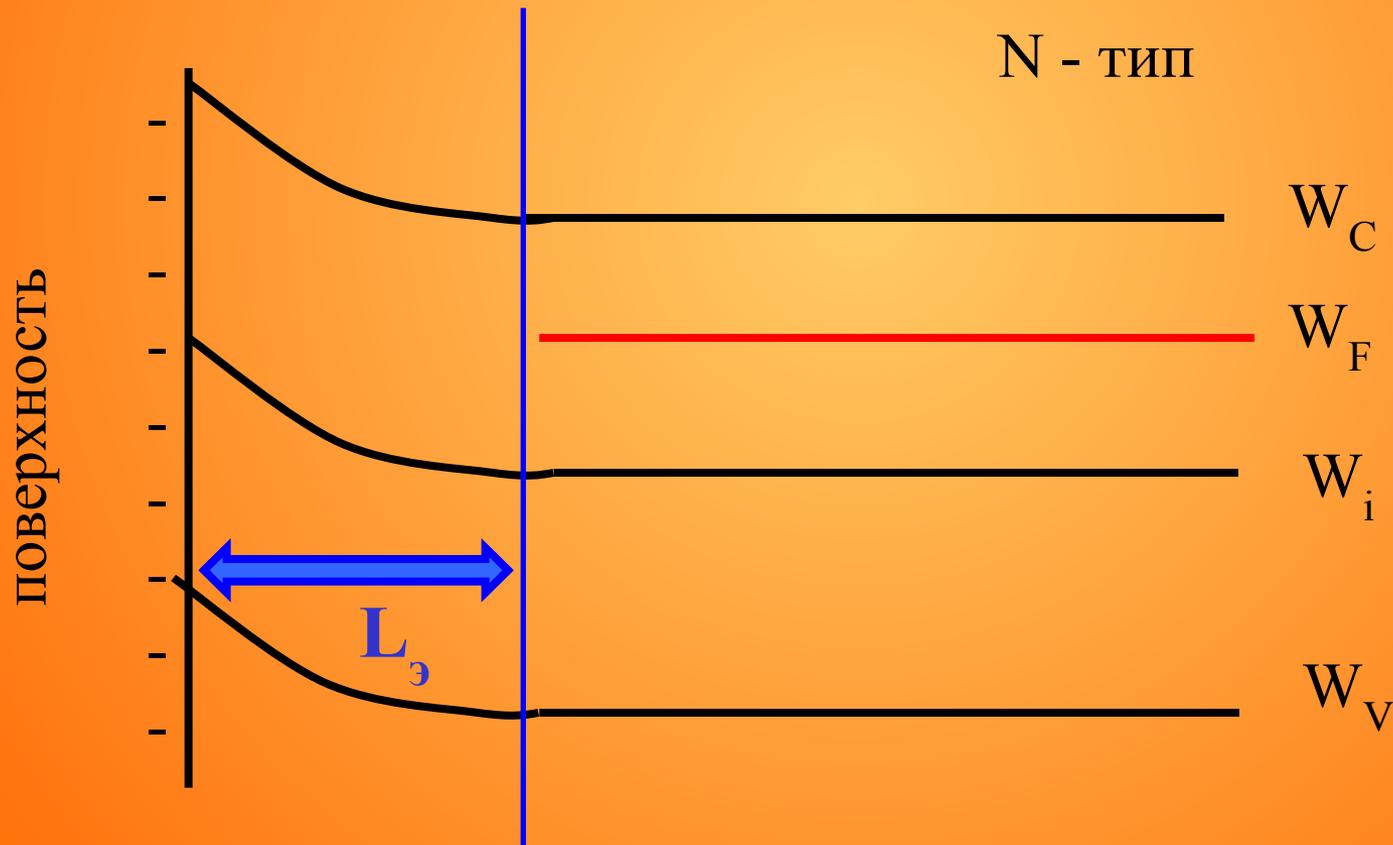
При совпадении векторов $\mathbf{v}_{ДР}$ и $\mathbf{v}_{ДИФ}$ диффузионное движение носителей ускоряется полем $L_3 > L_D$

$$L_3 = \frac{2L_D}{\sqrt{L_{ДР}^2 + 4L_D^2} - L_{ДР}}$$

если скорости диффузии и дрейфа противоположно направлены, то длина затягивания оказывается меньше L_D или вообще – направленной в противоположную сторону.

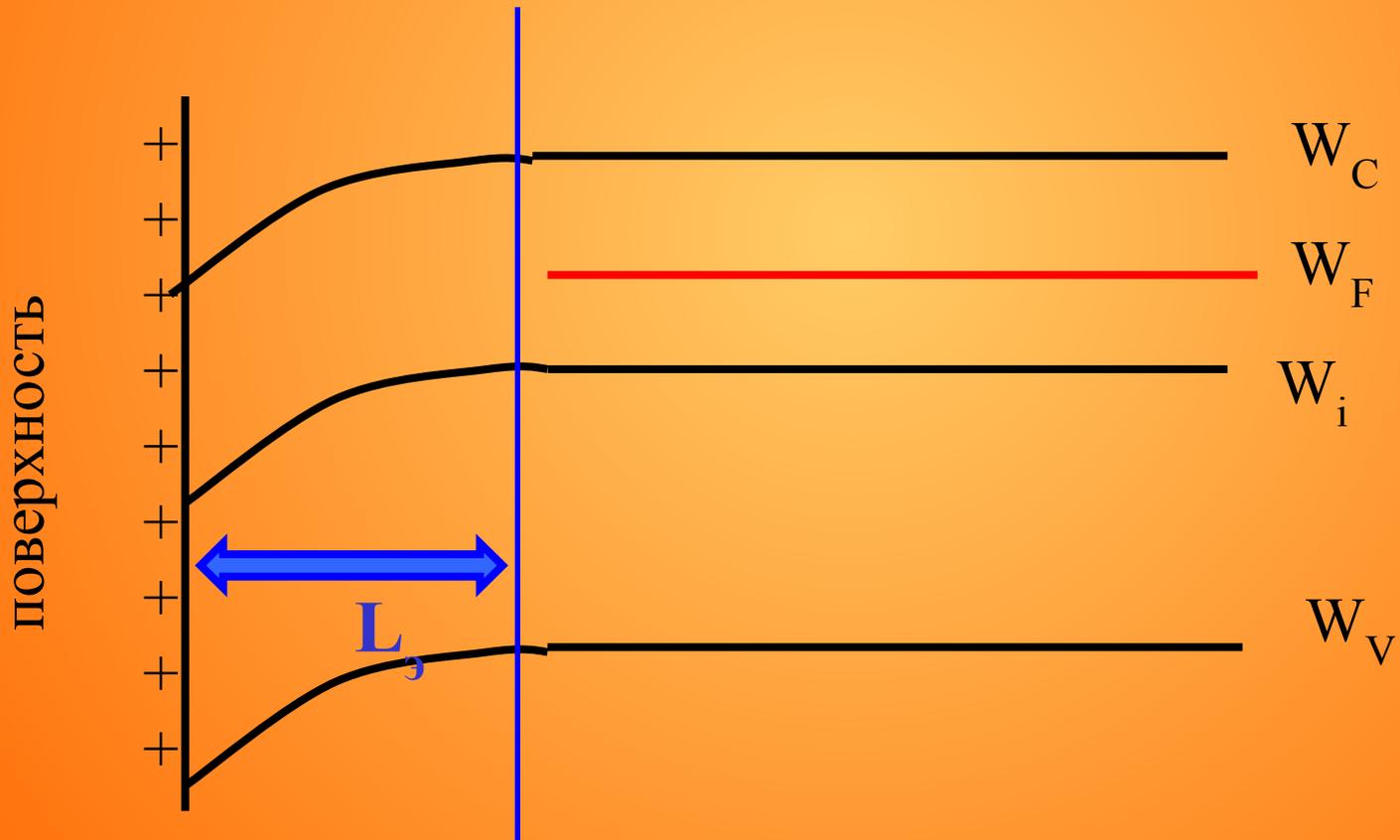
Поверхностные явления

Обрыв решетки – новые разрешенные уровни (поверхностные, уровни Тамма)



Поверхностные явления

N - тип



Поверхностные явления

$$n = n_0 e^{\frac{W_F - W_i}{kT}}$$

$$p = p_0 e^{\frac{W_i - W_F}{kT}}$$

W_i - энергия середины запрещенной зоны

Поверхностные явления

1. Обеднение. На поверхности заряд совпадающий с основными носителями, но W_i и W_F не пересекаются

2. Инверсия. На поверхности высокая плотность заряда, совпадающего с основными носителями, W_i и W_F пересекаются. Т.е около поверхности концентрация неосновных носителей больше, чем основных.

3. Обогащение. На поверхности заряд, противоположный основными носителями.

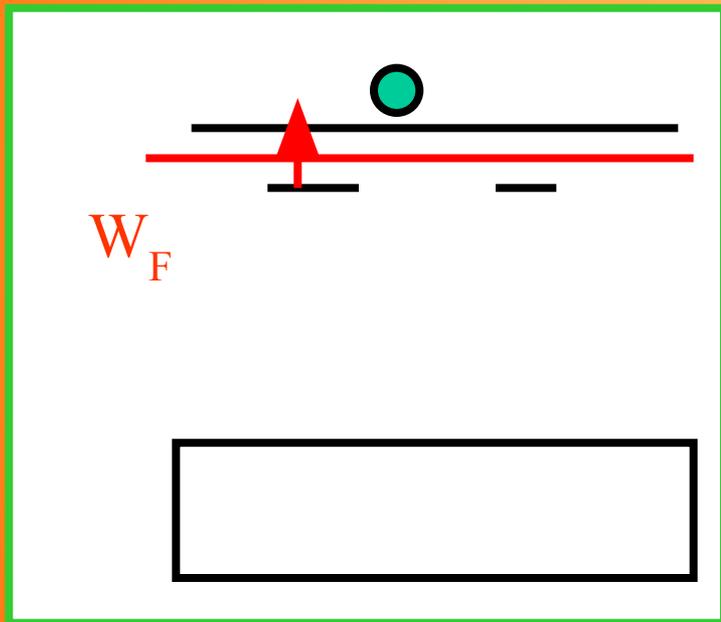
Электрические переходы

Электрические переходы

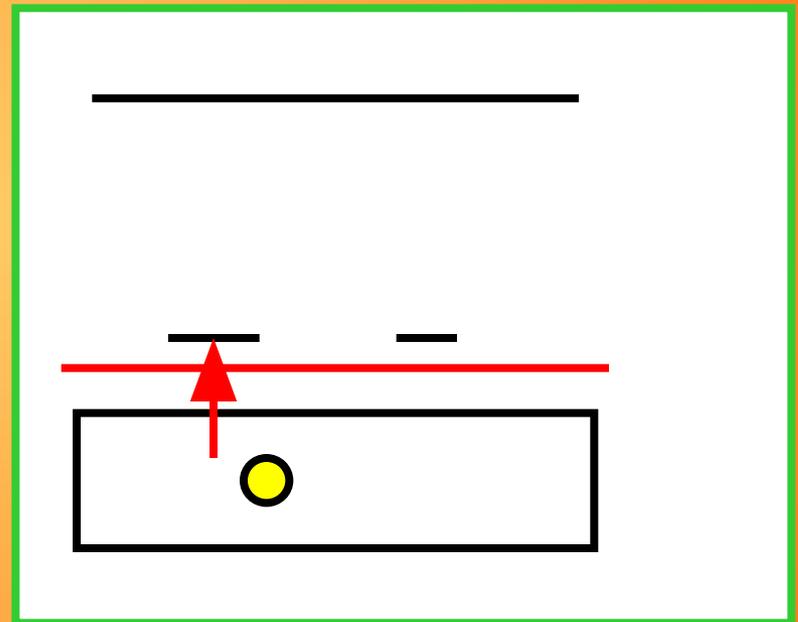
- Два полупроводника, одинаковой природы, но с разными типами проводимости (p-n переход)
- $n^+ - n$, но с различными уровнями легирования ($n^+ - n$ и $p^+ - p$ переходы)
- Металл - полупроводник
- Полупроводники различной химической природы (гетеропереходы)
- Металл - диэлектрик – полупроводник

Образование р-п перехода

n-тип



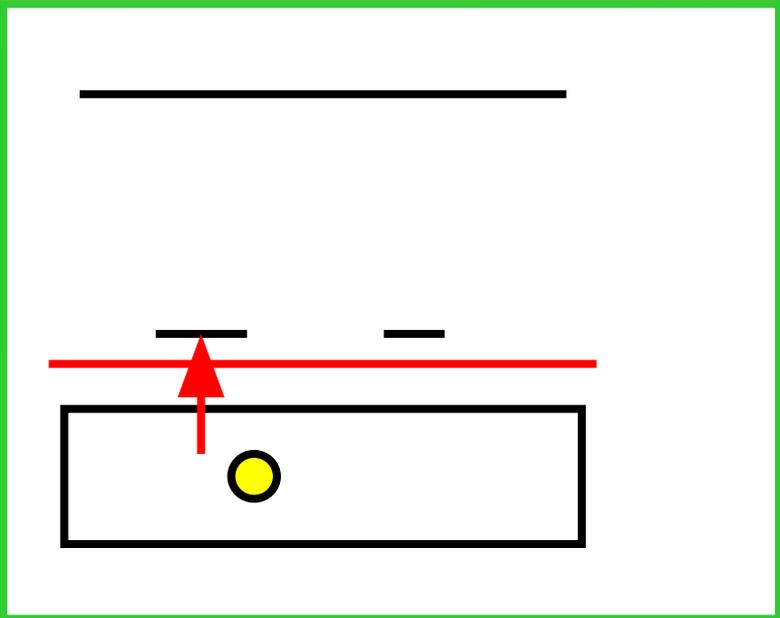
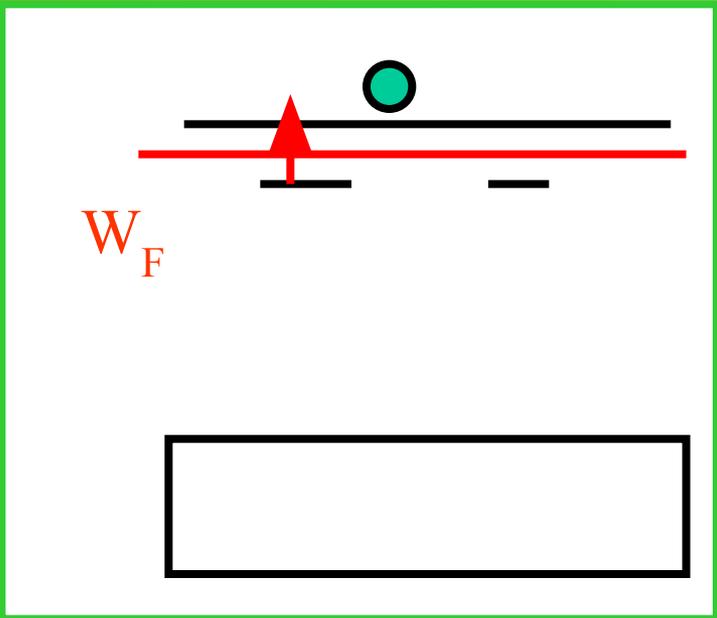
p-тип



n-тип

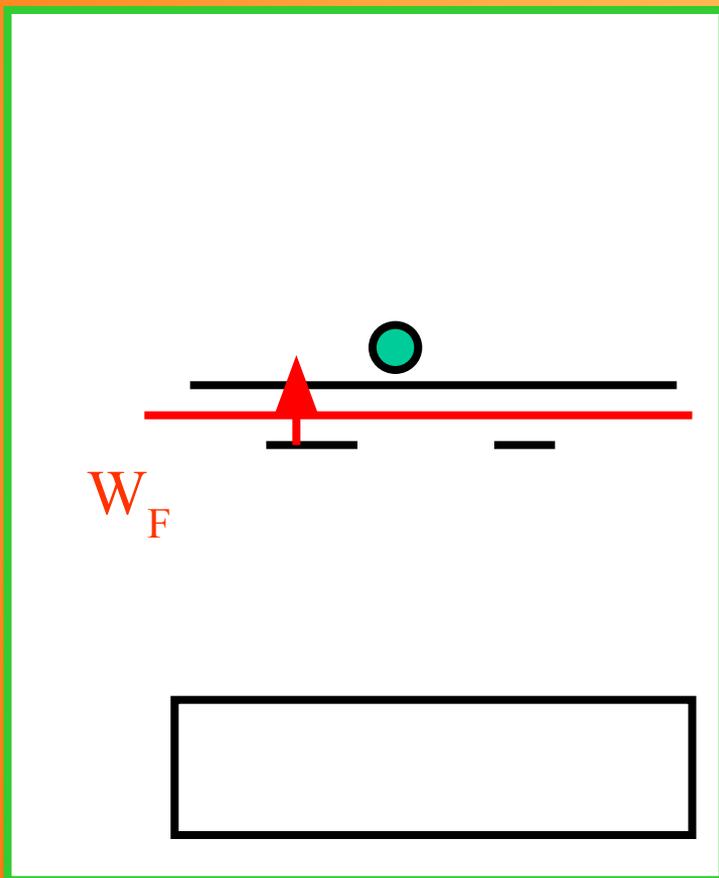
p-тип

n-тип

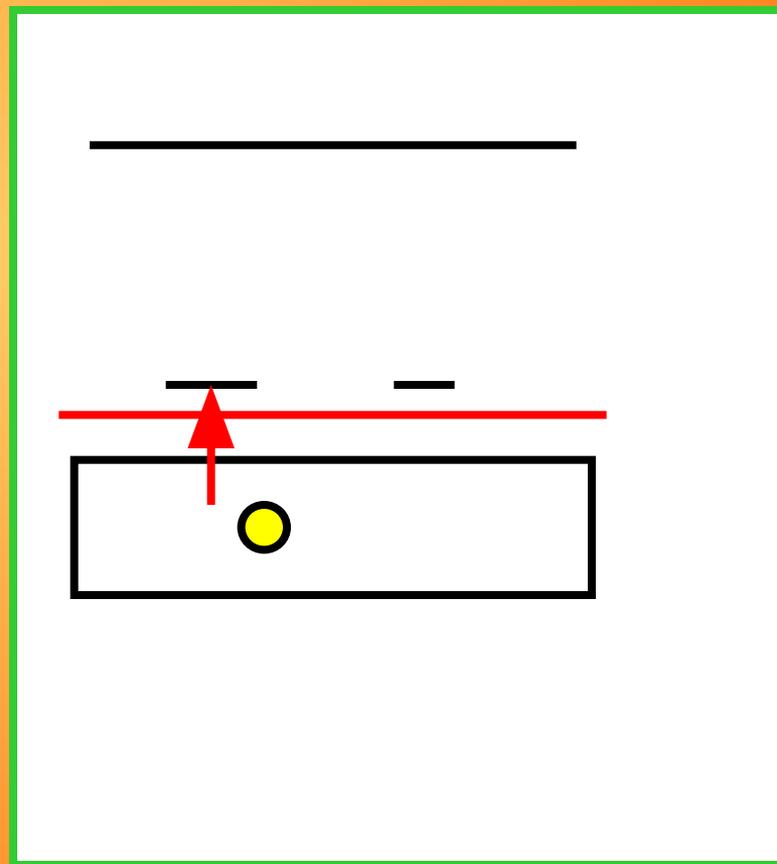


п-тип

п-тип



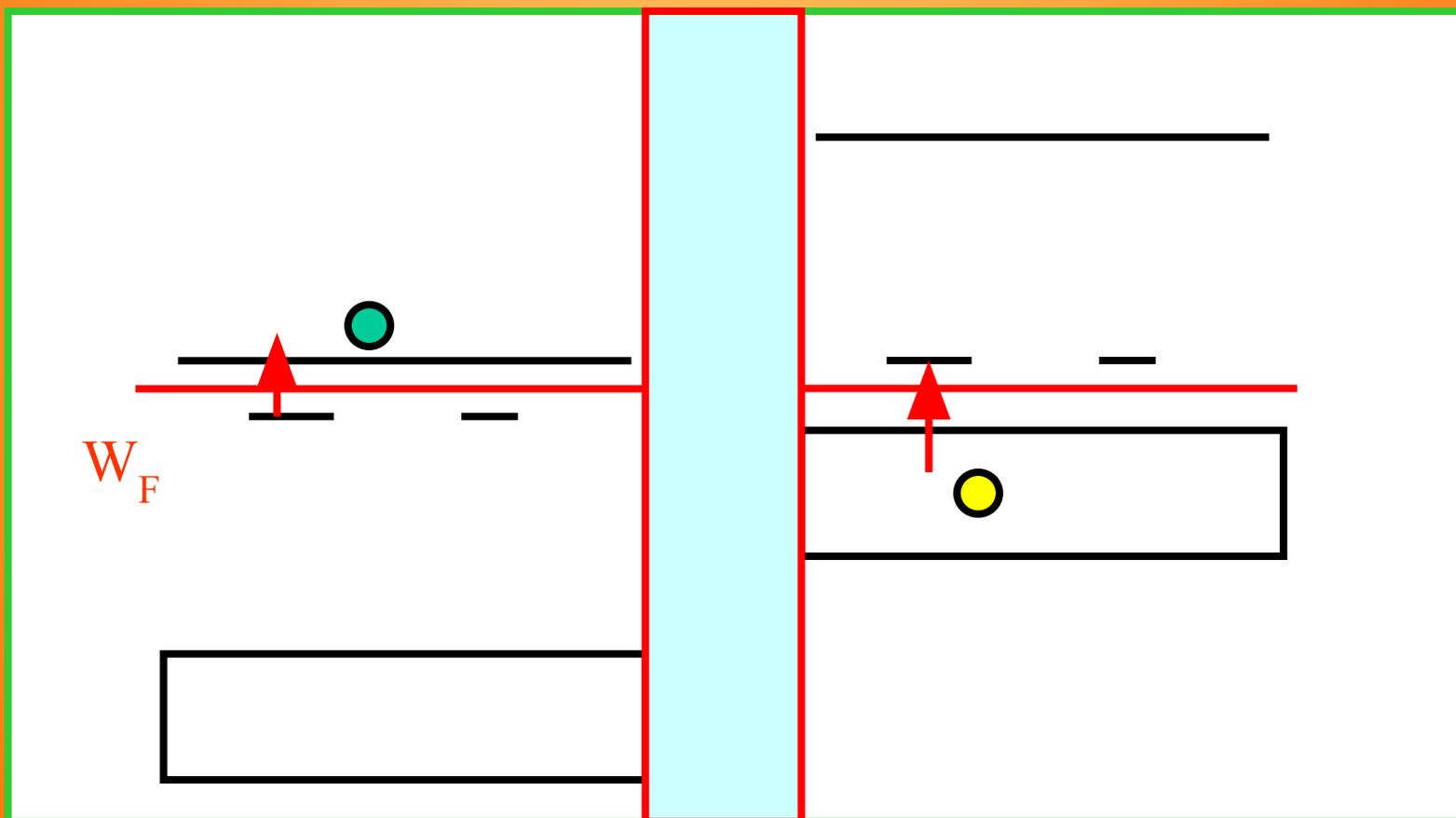
р-тип



n-тип

n-тип

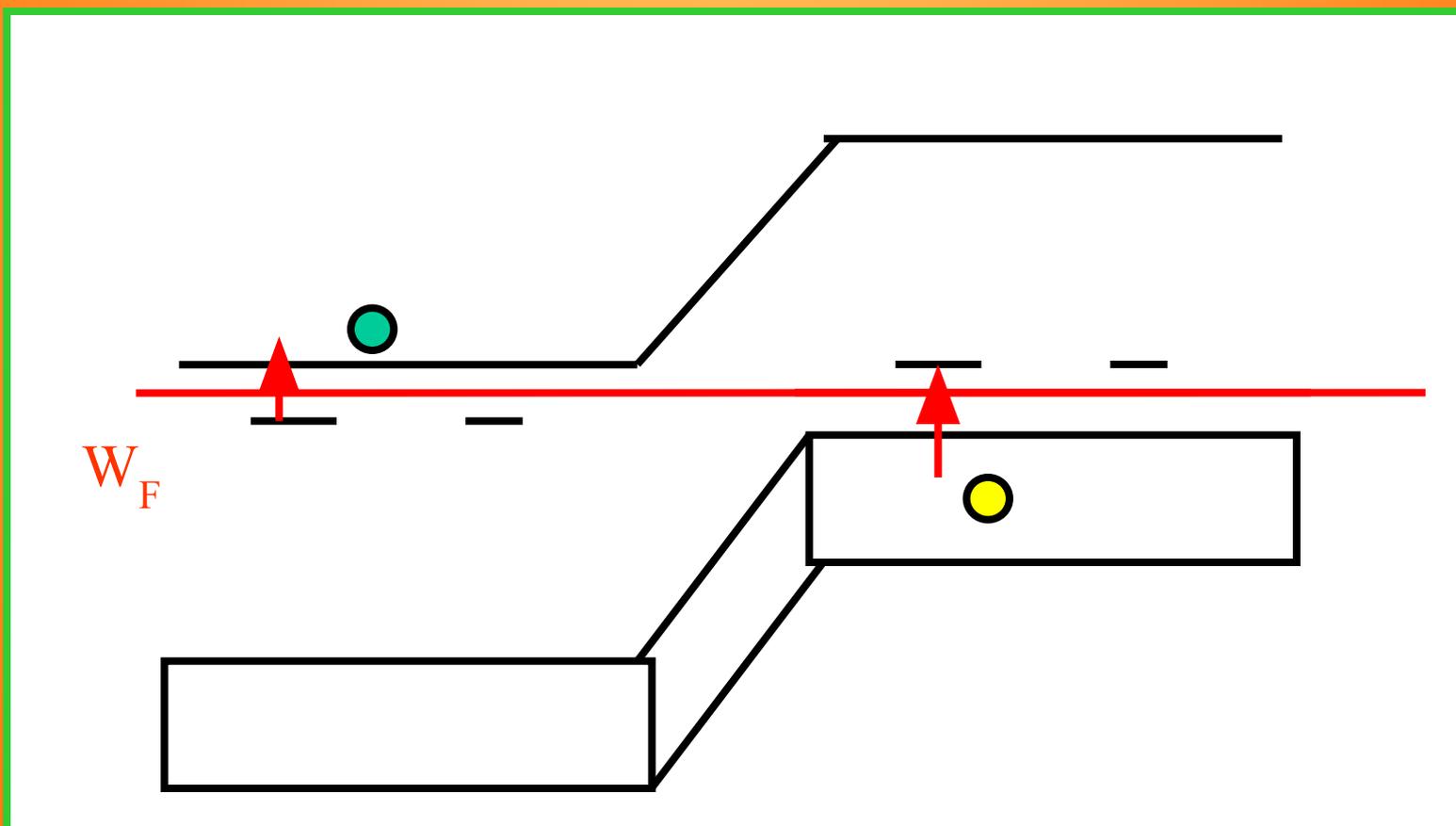
p-тип



n-тип

n-тип

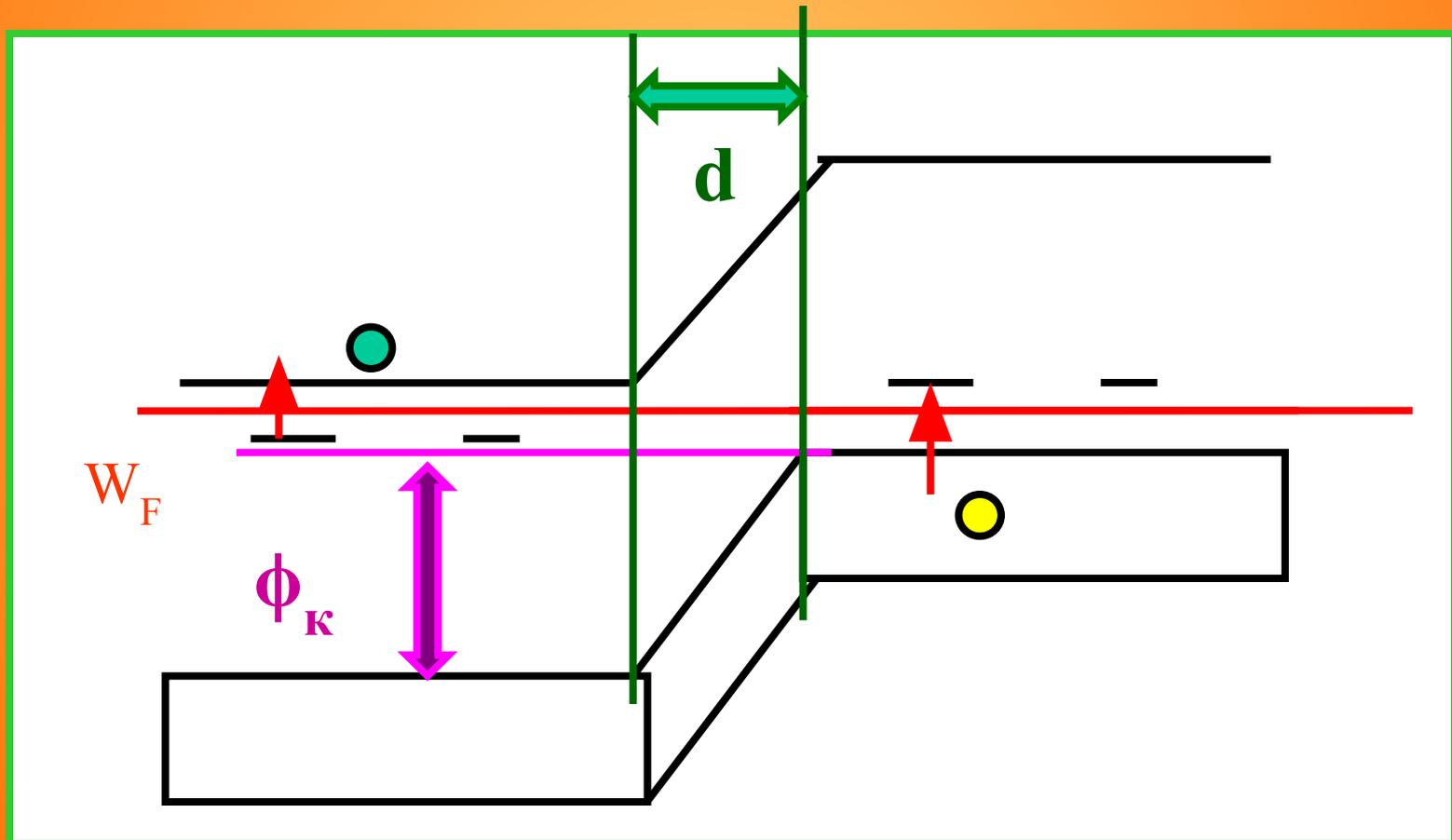
p-тип



Свойства р-п перехода

п-тип

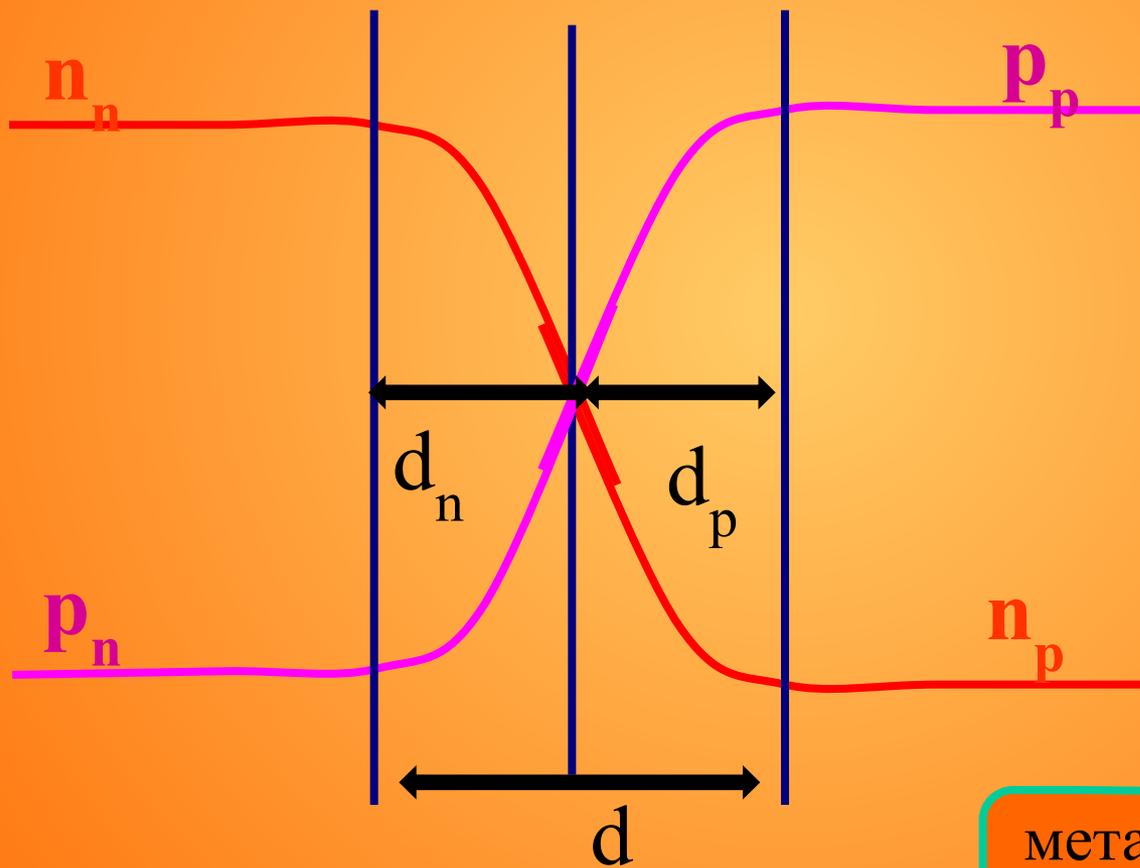
р-тип



n_n
n - часть

p - часть

$$N_D = N_A$$

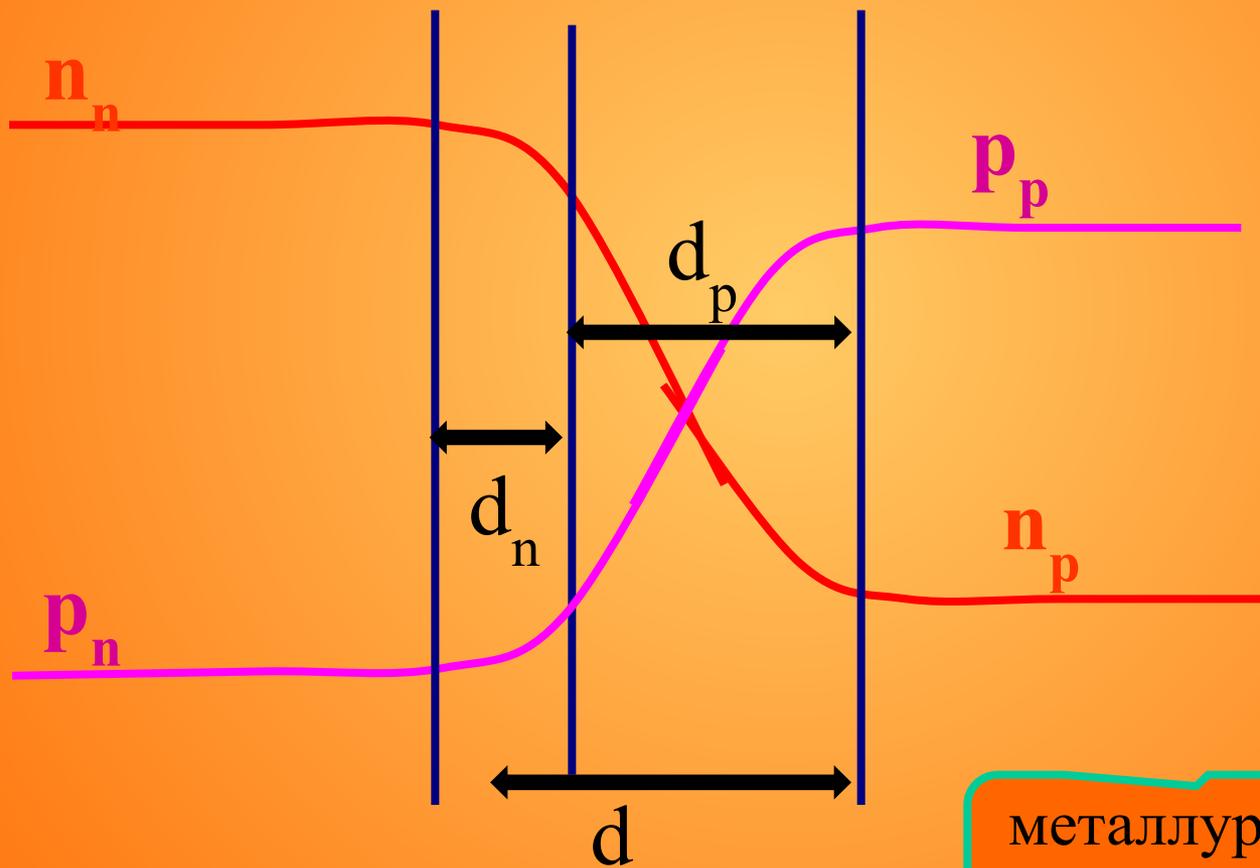


металлургическая
граница

n_n n^+ - часть

p - часть

$$N_D > N_A$$

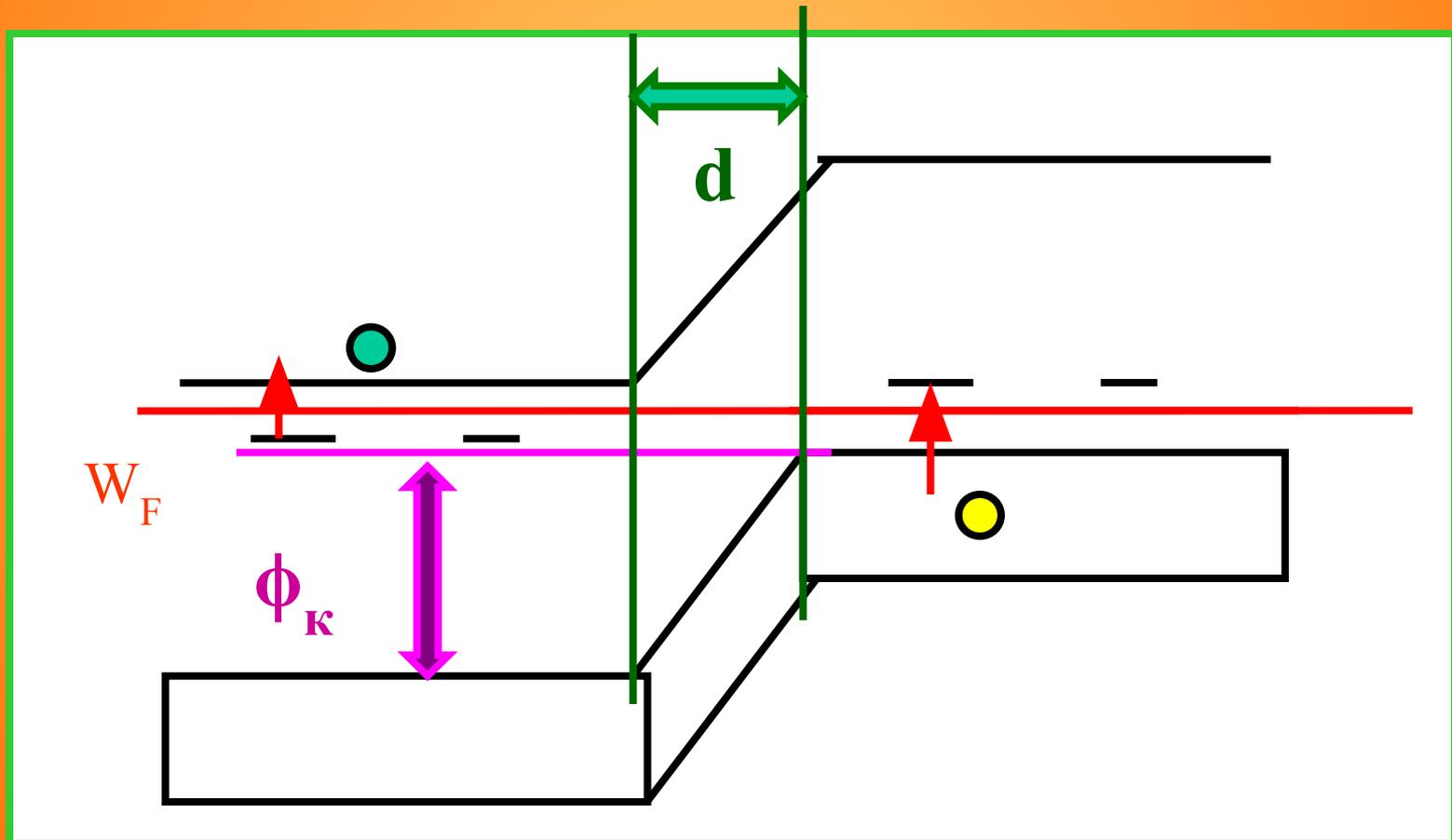


металлургическая
граница

Свойства р-п перехода

п-тип

р-тип



$$e \cdot \varphi_k = W_F^n - W_F^p$$

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{p_p}{p_n}$$

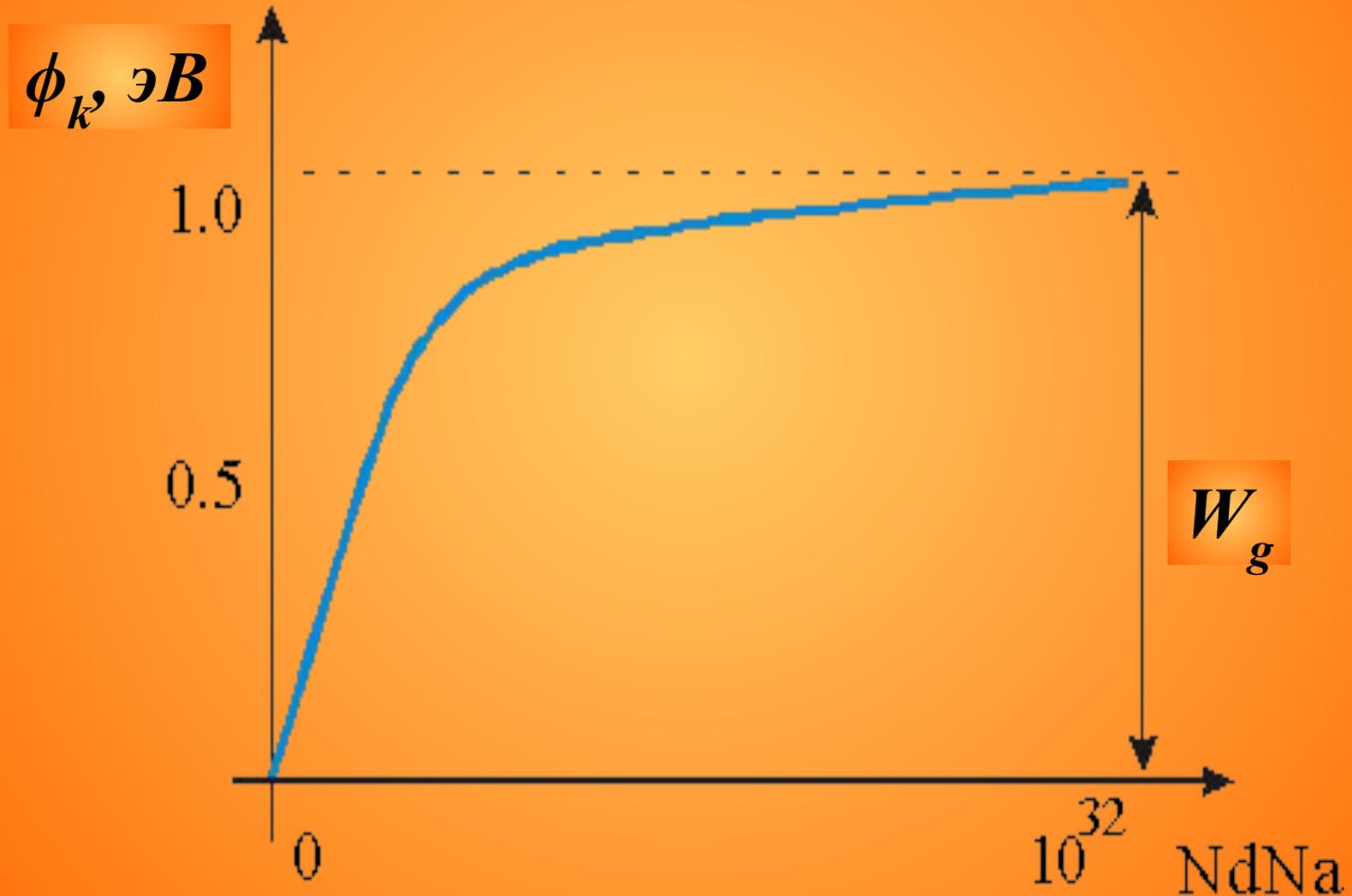
$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \cdot \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right)$$

$$d = d_n + d_p = \sqrt{2 \cdot \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \varphi_k}{e} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D}}$$

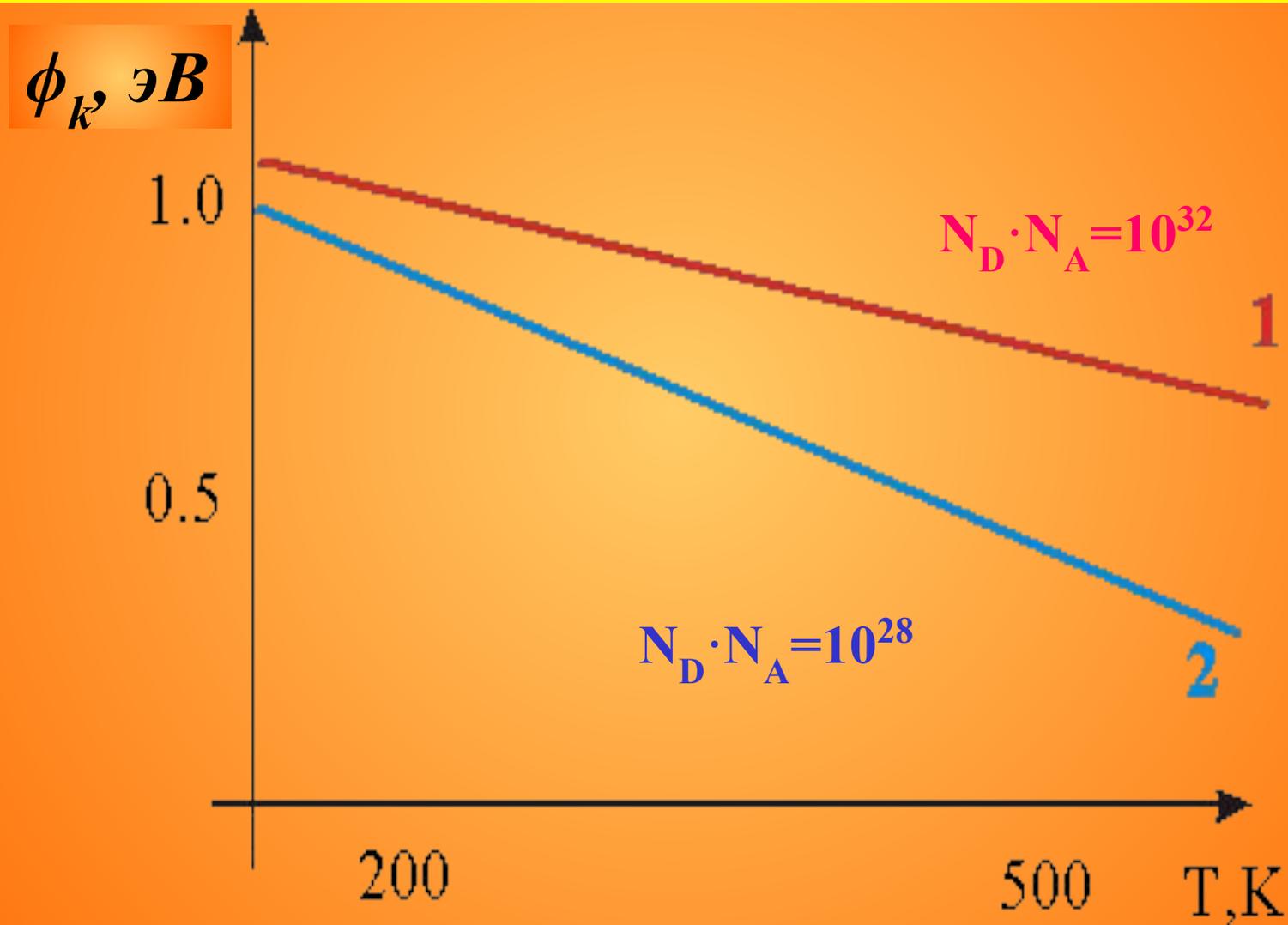
$$d_n = d \frac{N_a}{N_a + N_d} \quad d_p = d \frac{N_d}{N_a + N_d}$$

$$E_{\max} = \frac{2 \cdot \varphi_k}{d}$$

Зависимость ϕ_K от уровня легирования областей р-п перехода (Si, T=300 К)

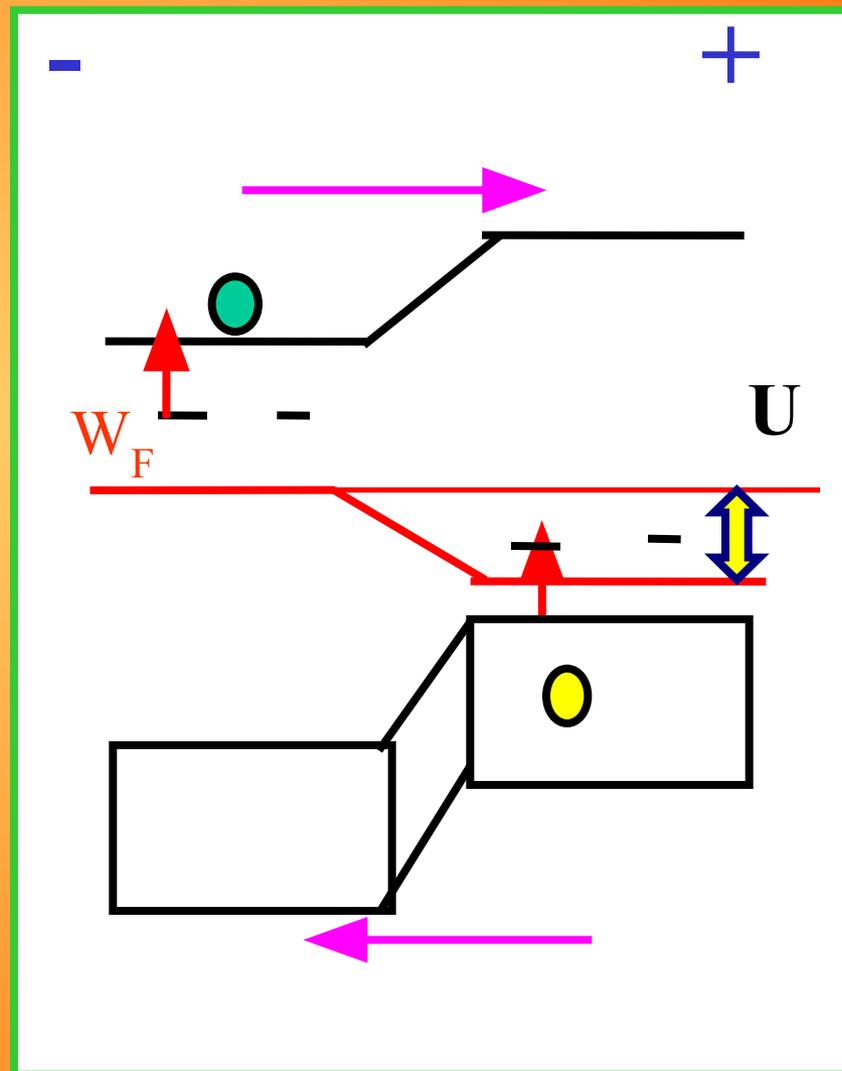
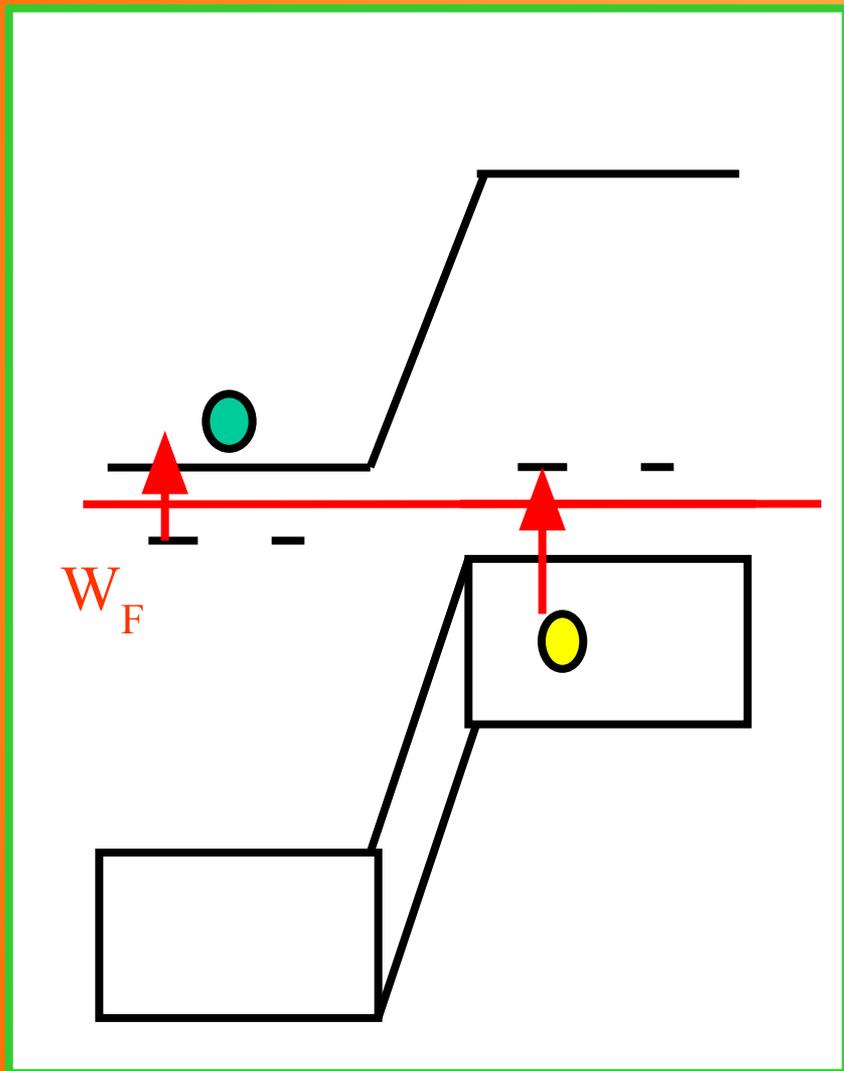


Зависимость ϕ_K от температуры



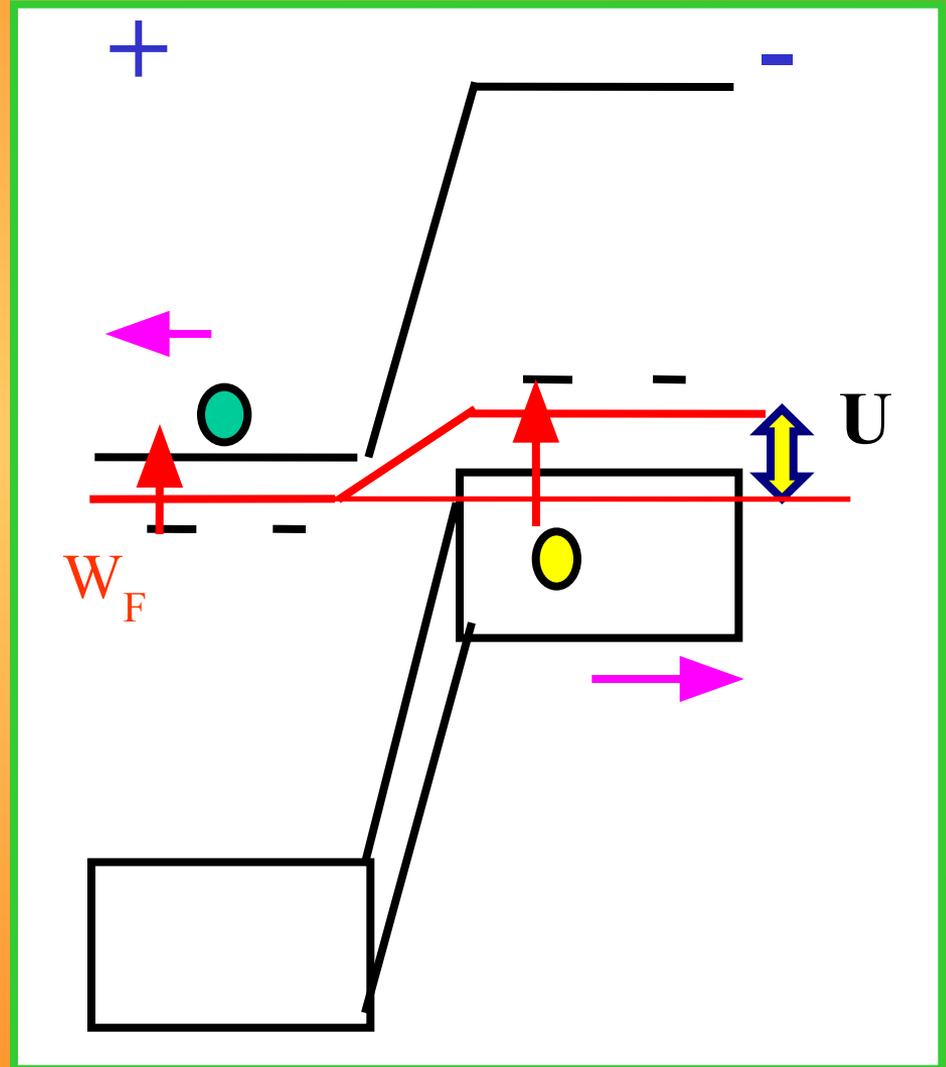
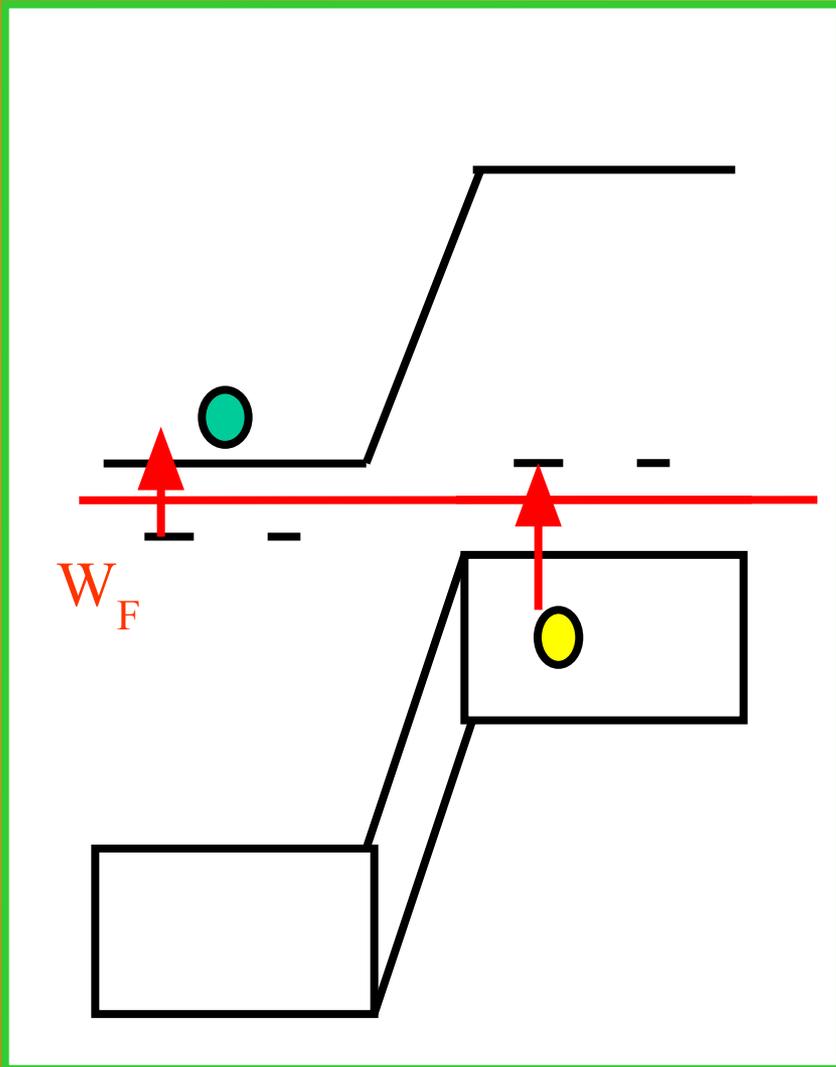
Свойства р-n перехода

Прямое напряжение

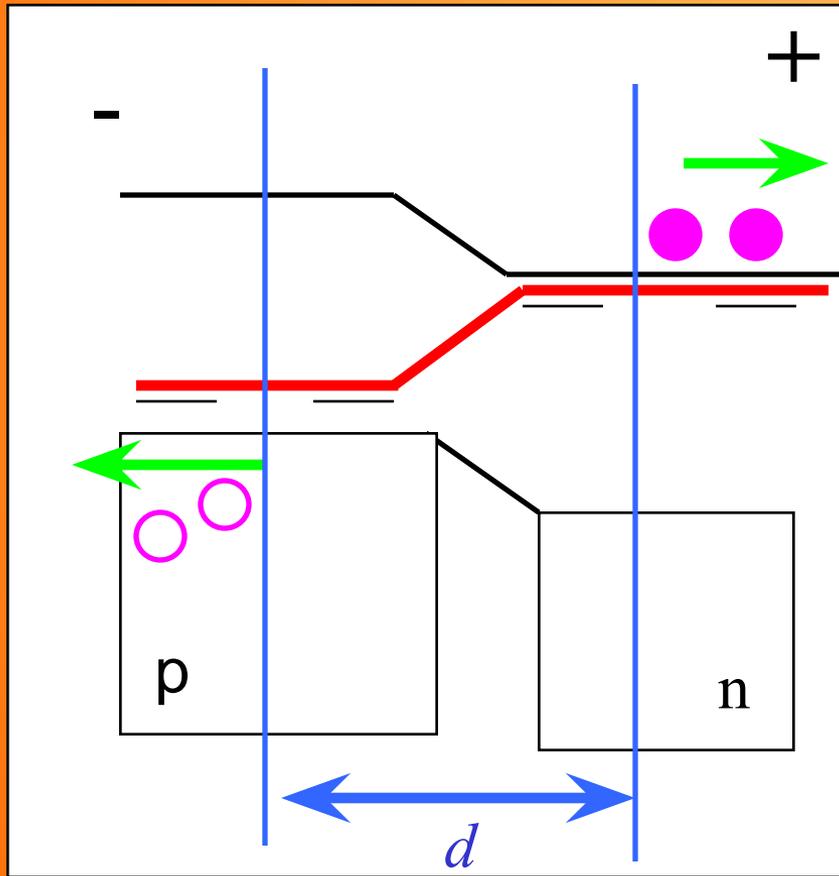


Свойства р-п перехода

Обратное напряжение



Барьерная ёмкость

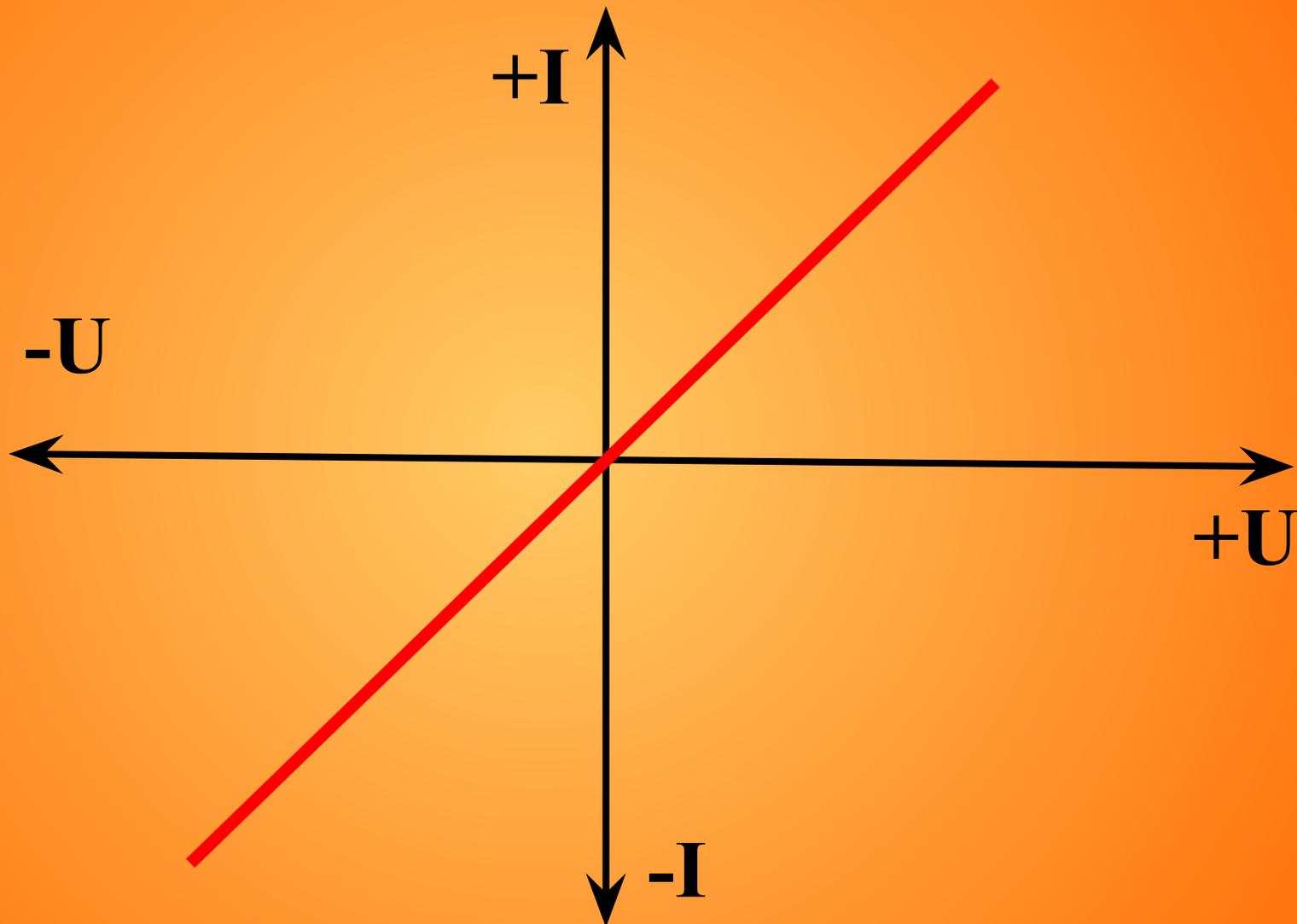


$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}$$

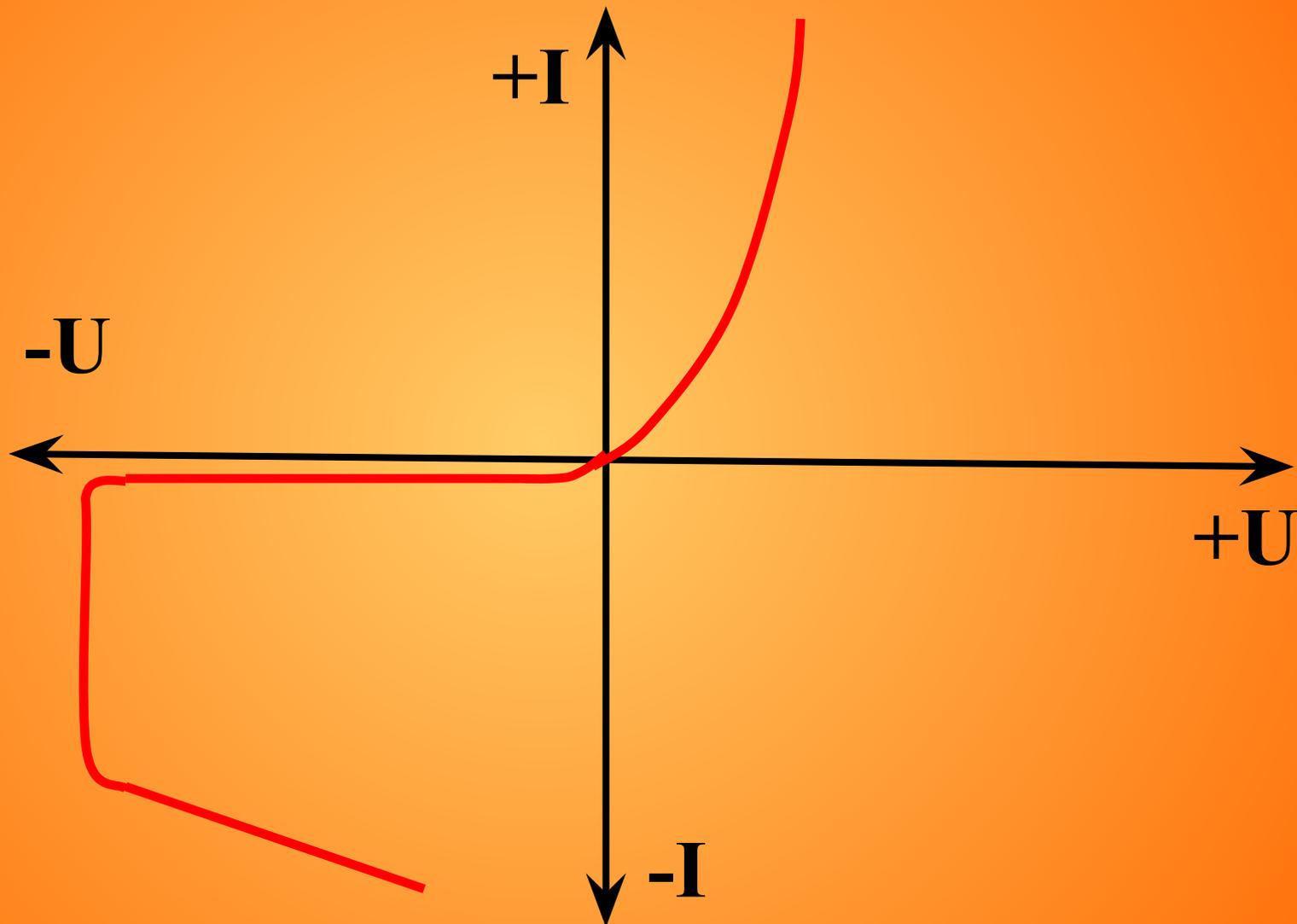
$$U \uparrow \Rightarrow d \uparrow \Rightarrow C \downarrow$$

$$C = S \sqrt{\frac{e \varepsilon \varepsilon_0}{2(\varphi_k - U)} \cdot \frac{N_A \cdot N_D}{N_A + N_D}}$$

ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА



ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА



ИНЪЕКЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА

$$\gamma_e = \frac{I_e}{I_e + I_h} \quad \text{- коэффициент инъекции для электронов}$$

$$\gamma_h = \frac{I_h}{I_e + I_h} \quad \text{- коэффициент инъекции для дырок}$$

где I_e - ток электронов и I_h - ток дырок.

$$\gamma_e = \frac{I_e}{I_e + I_h} = \frac{1}{1 + \frac{I_h}{I_e}} = \frac{1}{1 + \frac{p_p}{n_n}} \approx \frac{1}{1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_n}}$$

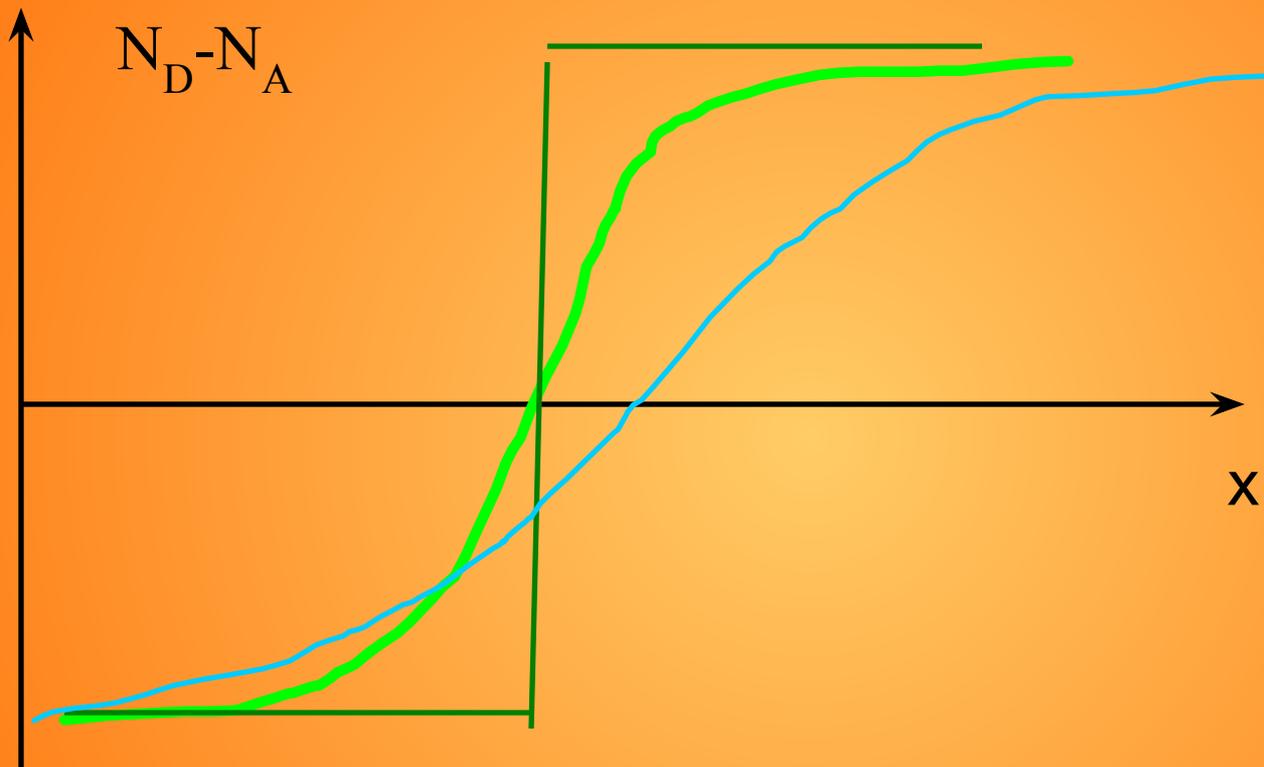
$$\sigma = e \cdot (n\mu_e + p\mu_h)$$

\mathbf{p}_p и \mathbf{n}_n - концентрации дырок в p-области и электронов в n-области;

σ_p и σ_n - удельные проводимости p- и n-областей.

**МЕТОДЫ
СОЗДАНИЯ
p-n ПЕРЕХОДА**

ВИДЫ p-n ПЕРЕХОДА



МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

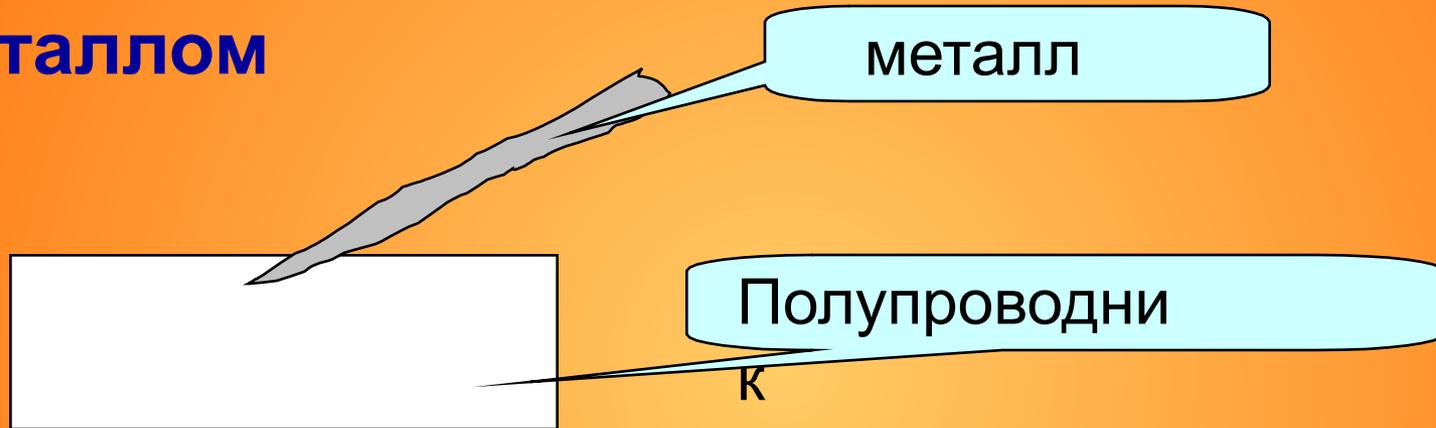
1. При выращивании монокристаллов

- изменение скорости роста
(от скорости зависит $K_{\text{расп}}$.)
- добавлении примеси в шихту

2. Дальнейшая обработка монокристаллов

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

1. Контакт с металлом



- **Выпрямляющий** (в области контакта образуется обедненный электронами слой)
- **Омический**

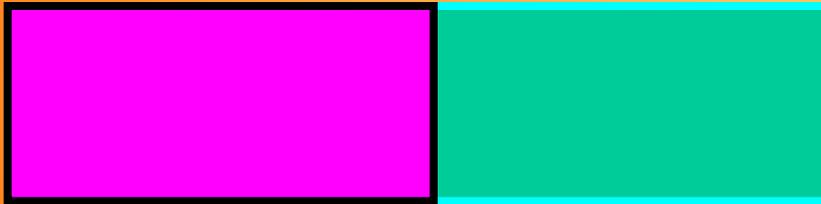
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

1. Контакт с металлом

Работа выхода электрона - A

полупроводник

металл

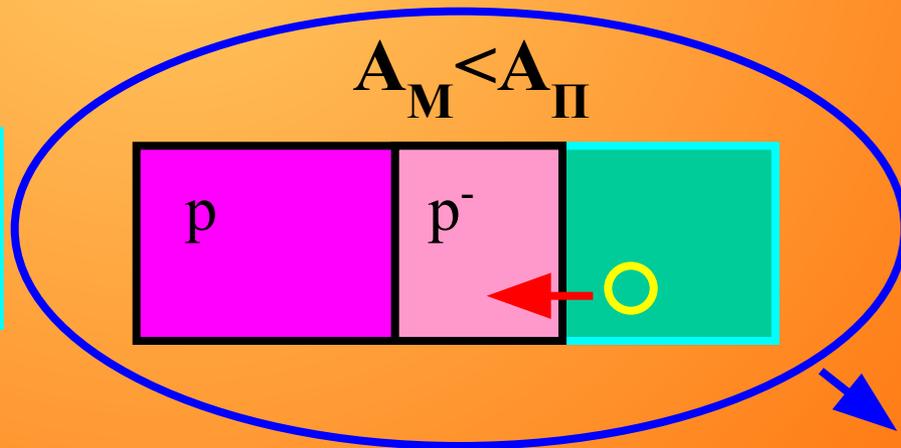
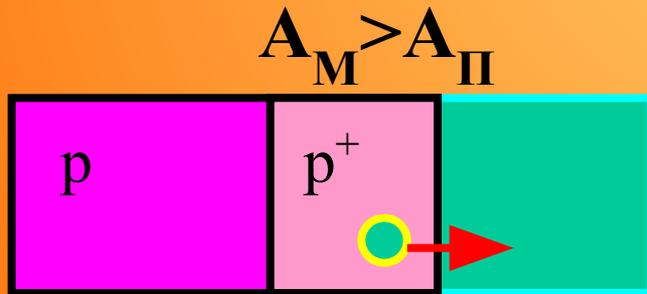
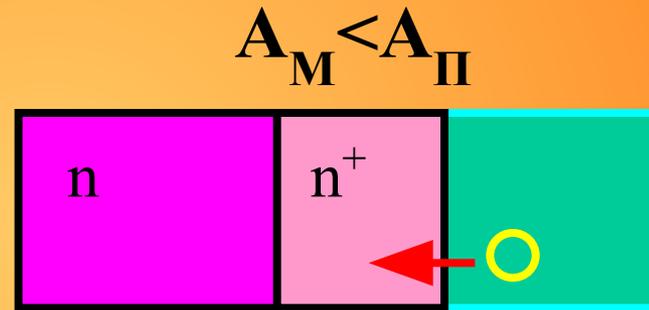
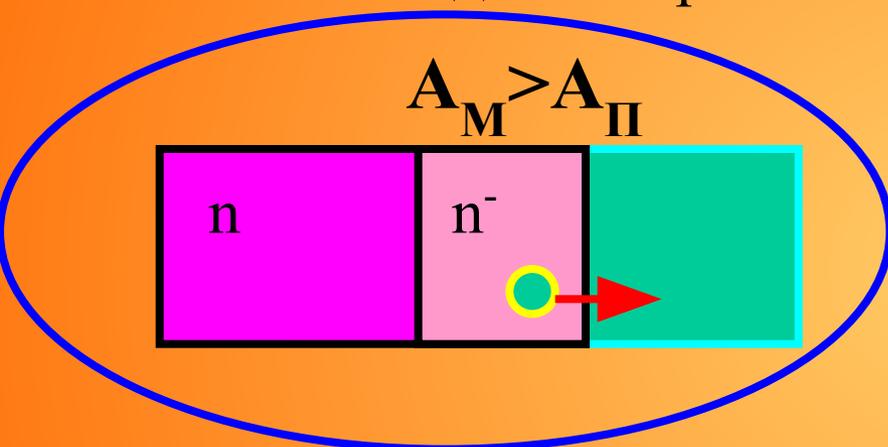


МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

1. Контакт с

металлом

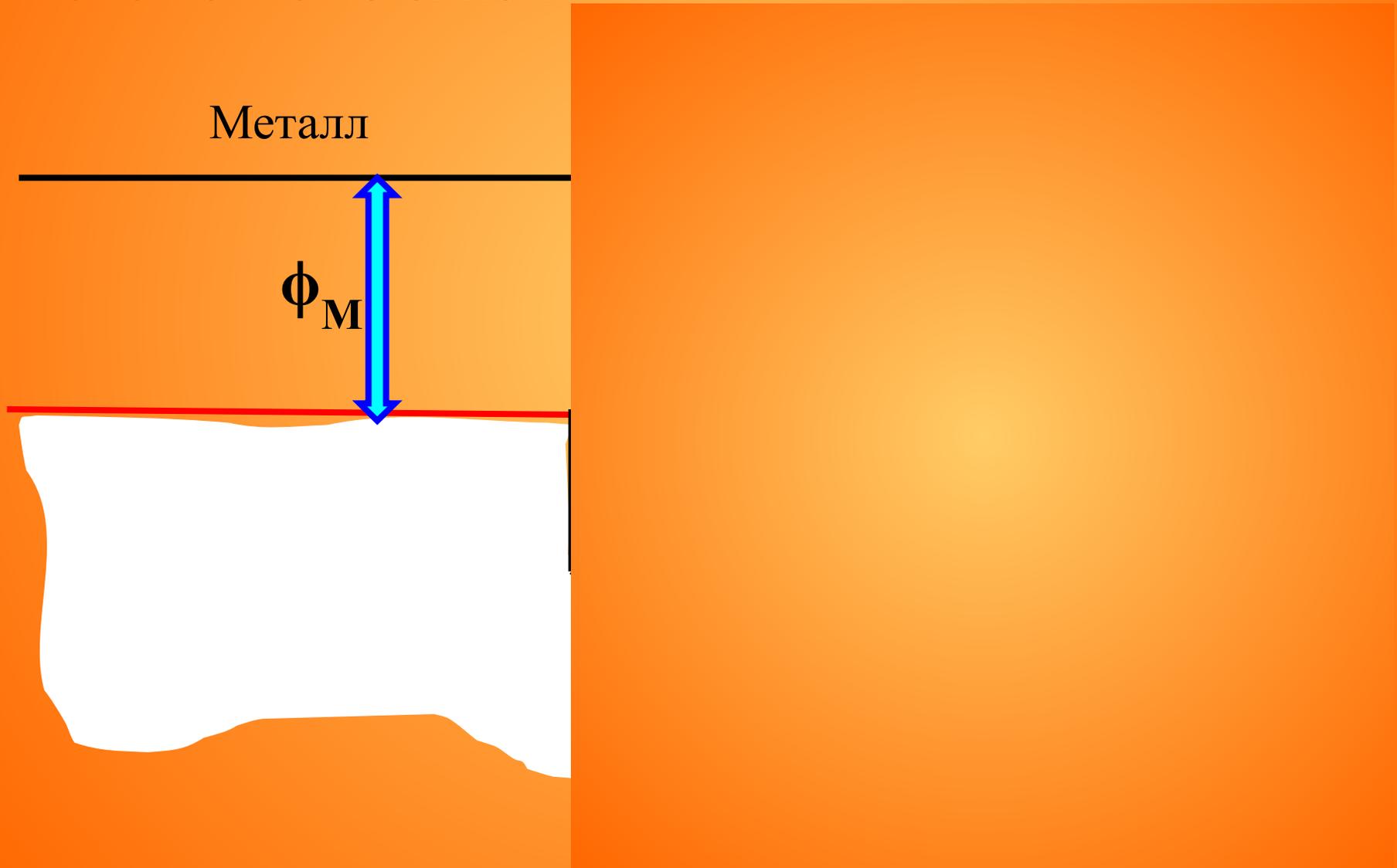
Работа выхода электрона - A



выпрямляющие

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

1. Контакт с металлом



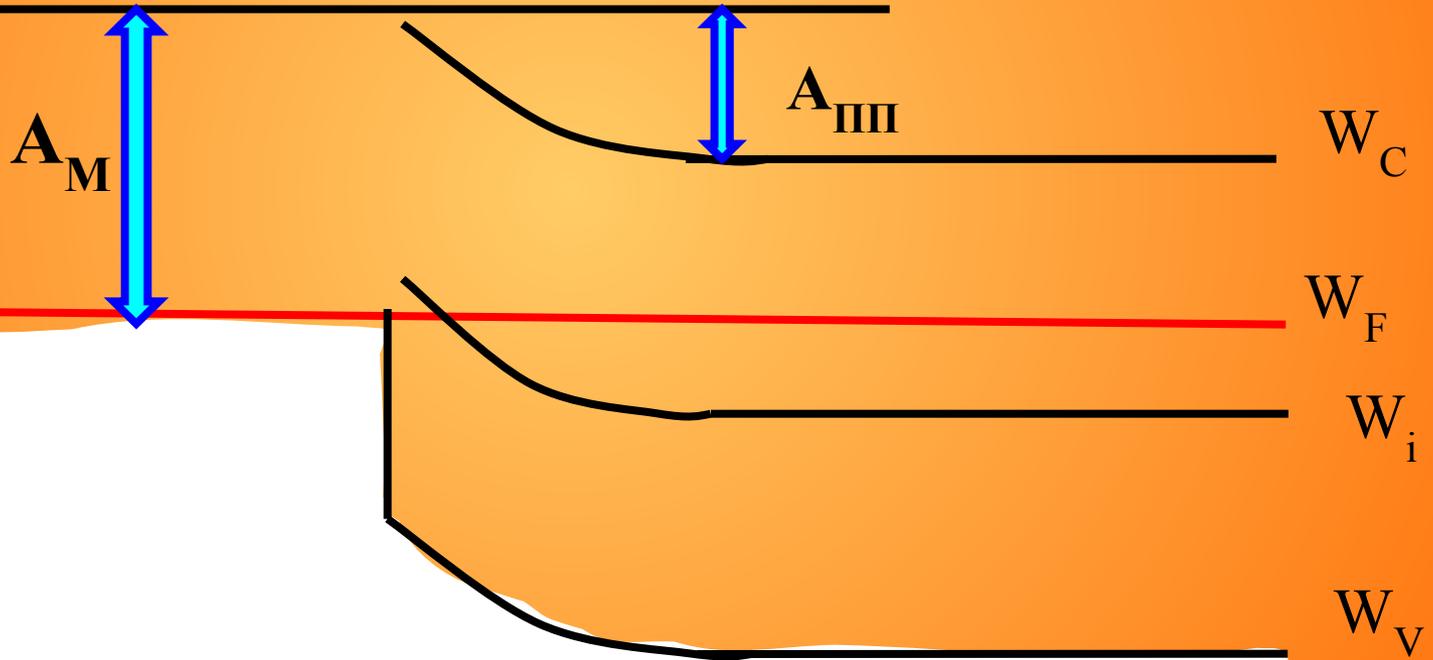
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

Омический контакт

$$A_M > A_{III}$$

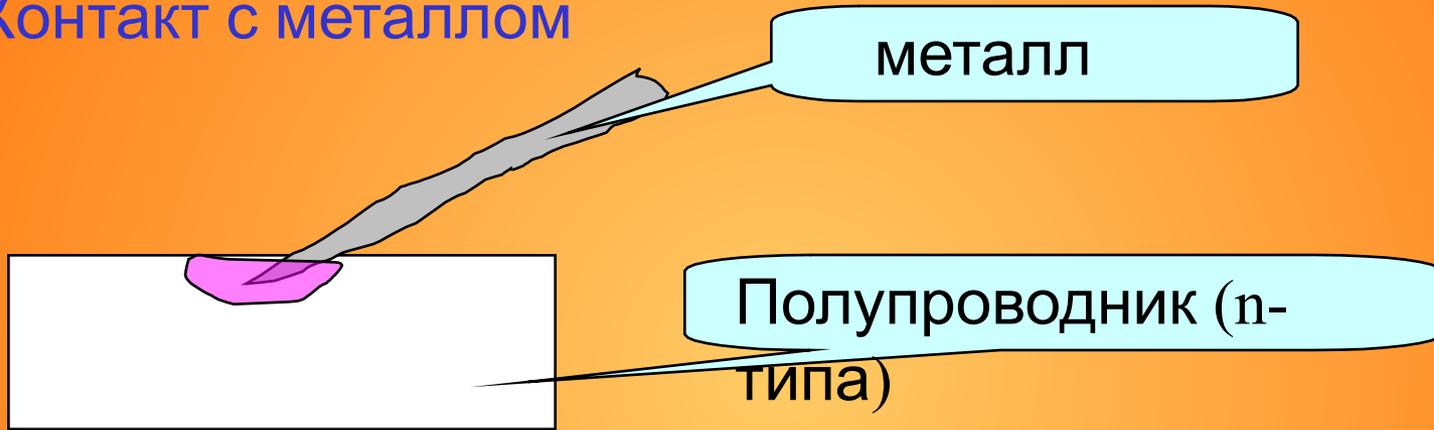
N - тип

Металл



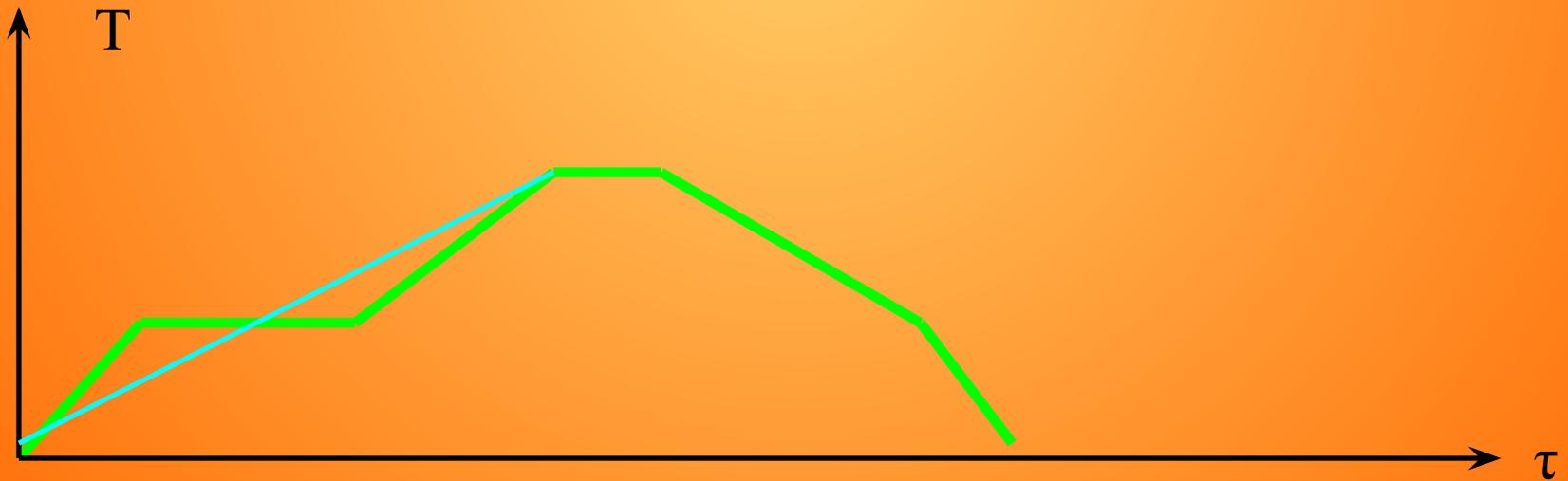
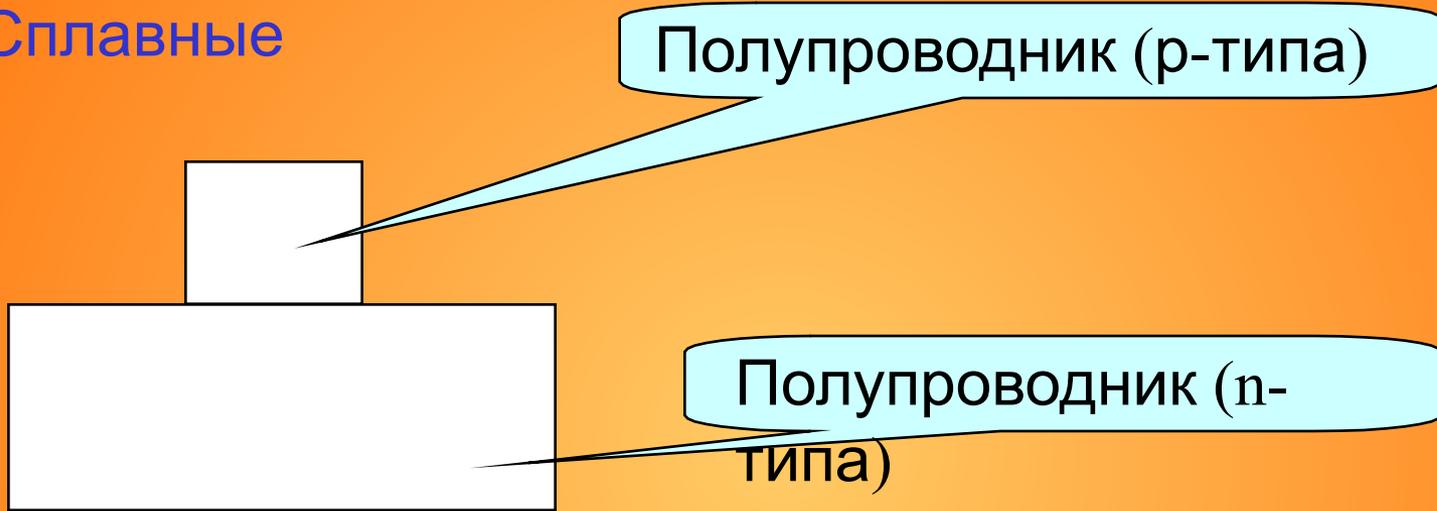
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

1. Контакт с металлом



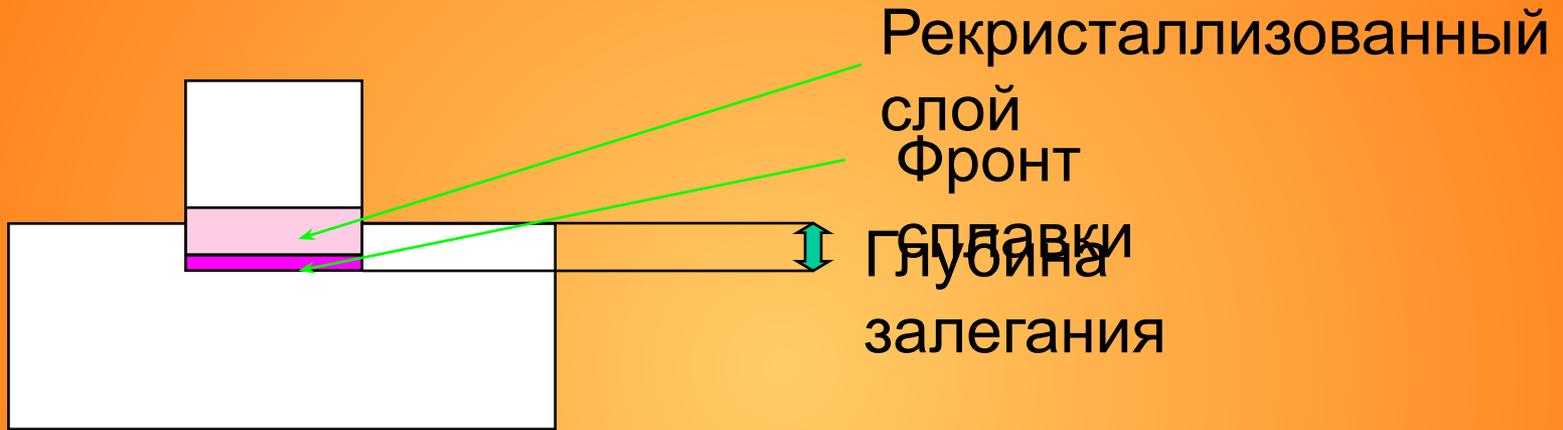
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

3. Сплавные



МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

3. Сплавные



МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

3. Сплавные

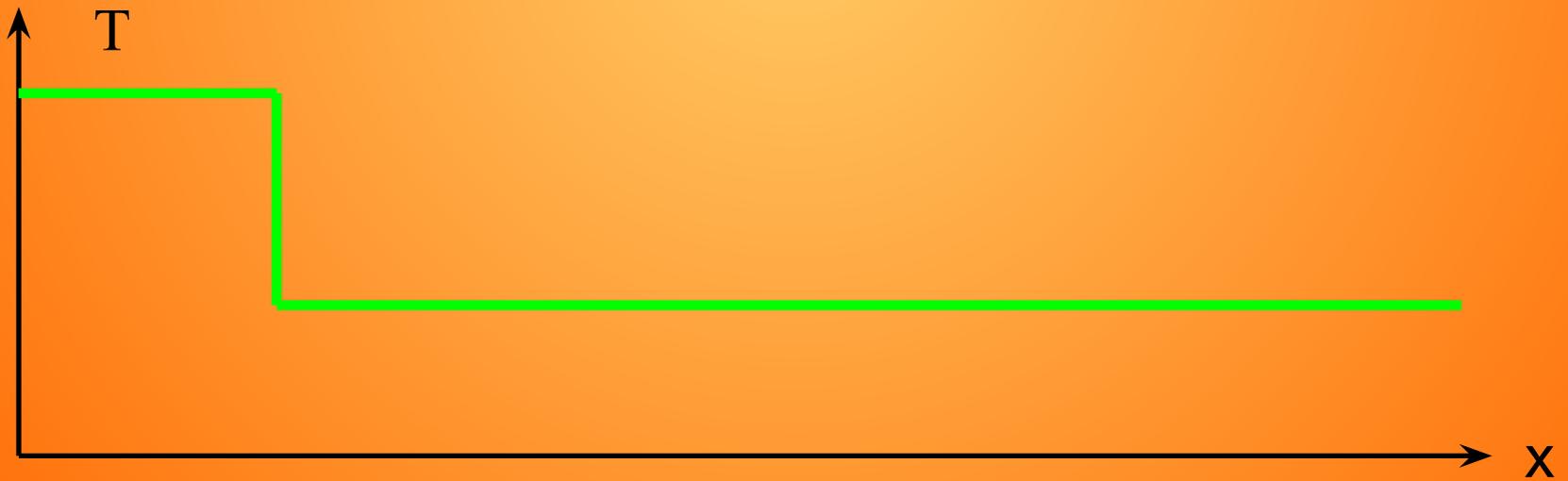
Недостатки сплавного

метода:

- плохая воспроизводимость
- трудность регулировки
- большие размеры
- большое влияние ориентации кристаллов

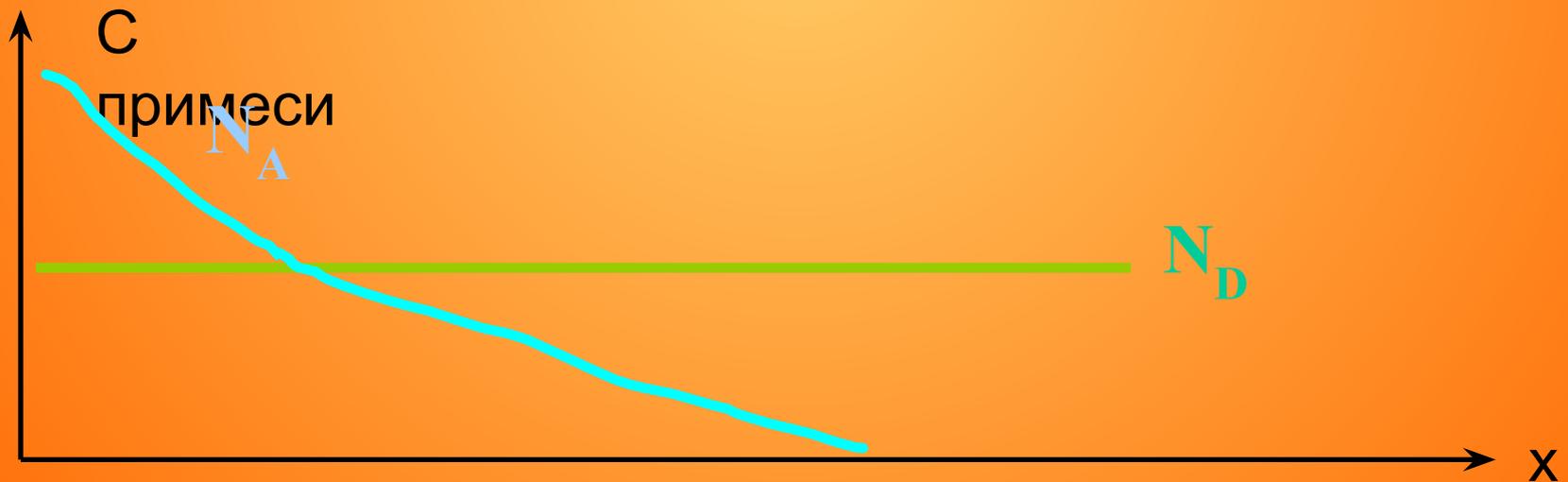
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

4. Диффузионные



МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

4. Диффузионные



МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

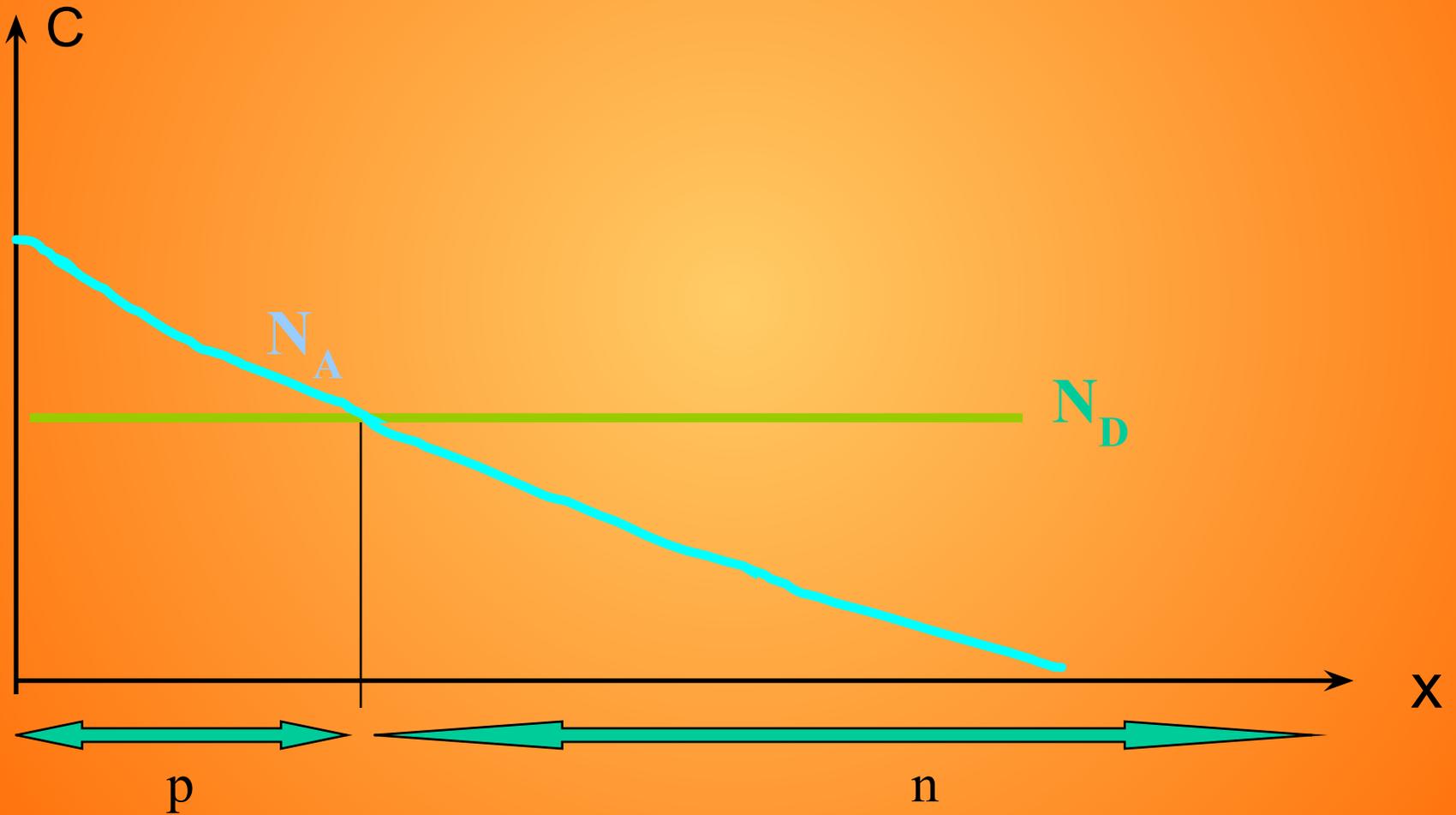
4. Диффузионные

Достоинства диффузионных методов:

- малые (до $0,001 \text{ мм}^2$) площади
- контролируемые параметры – концентрации и глубины залегания
- возможность проводить процесс с двух сторон (транзистор)

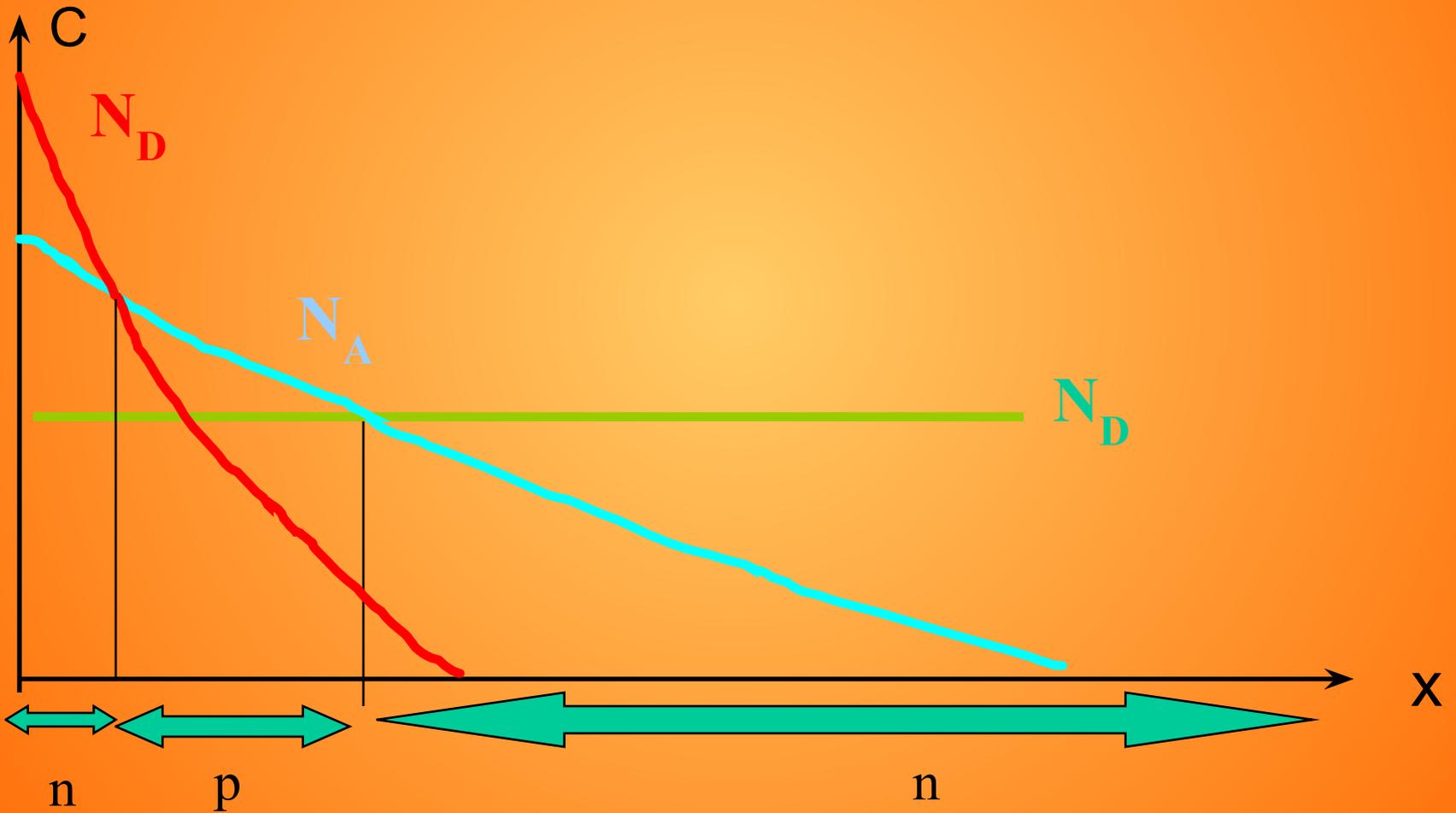
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

4. Диффузионные



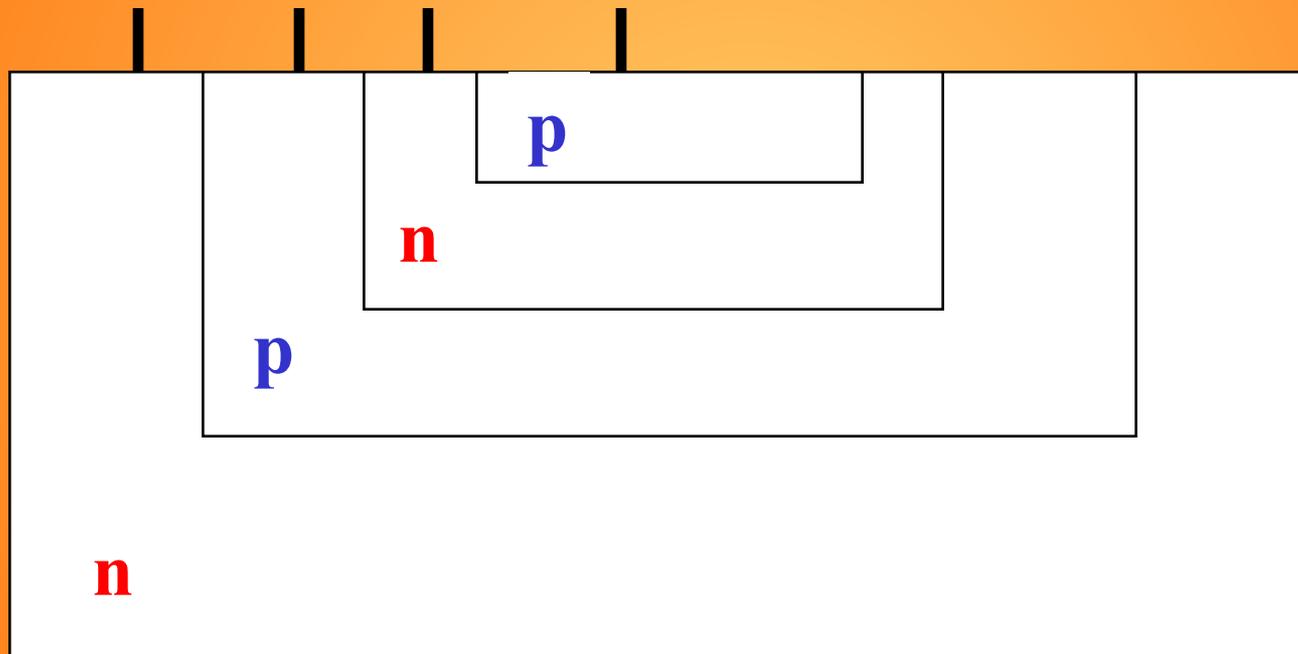
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

4. Диффузионные



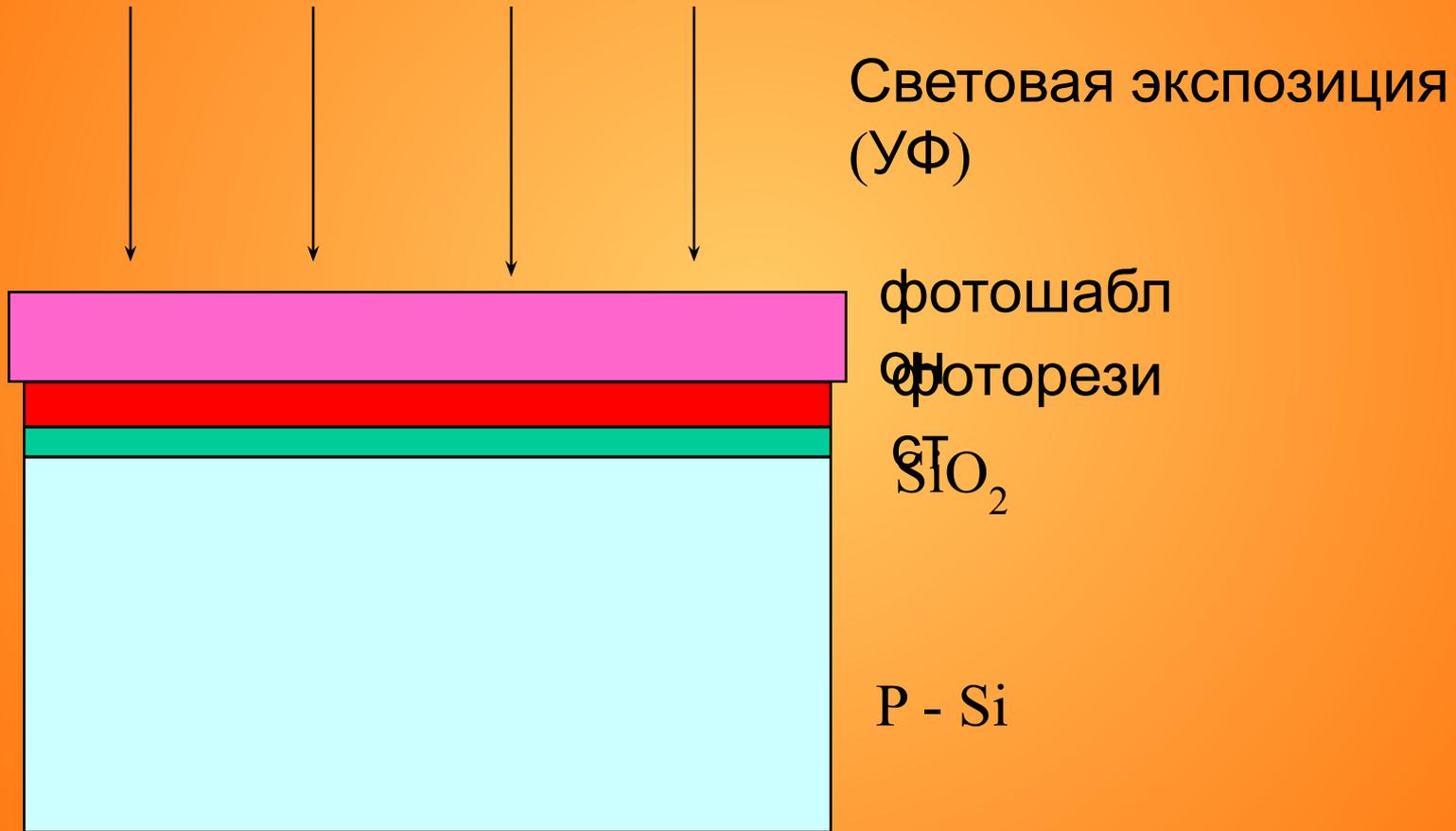
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

4. Планарная технология



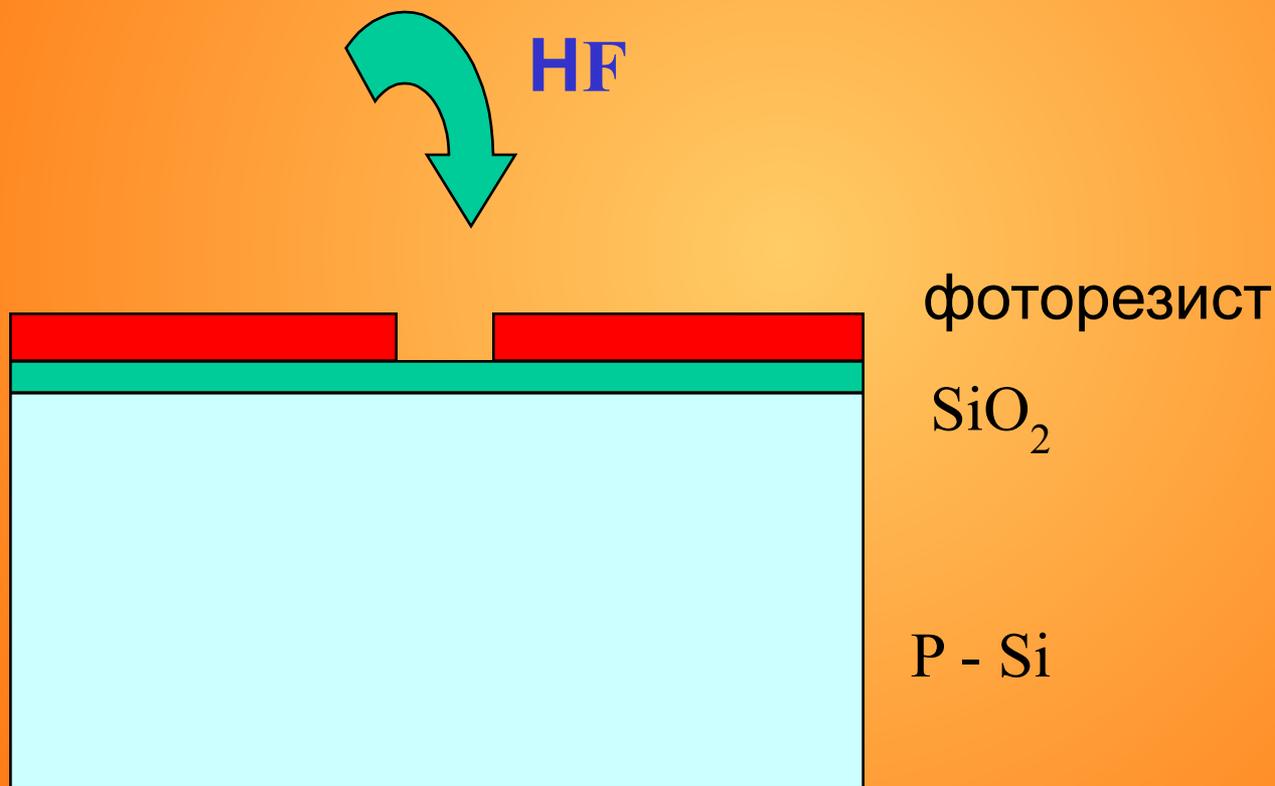
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

4. Планарная технология



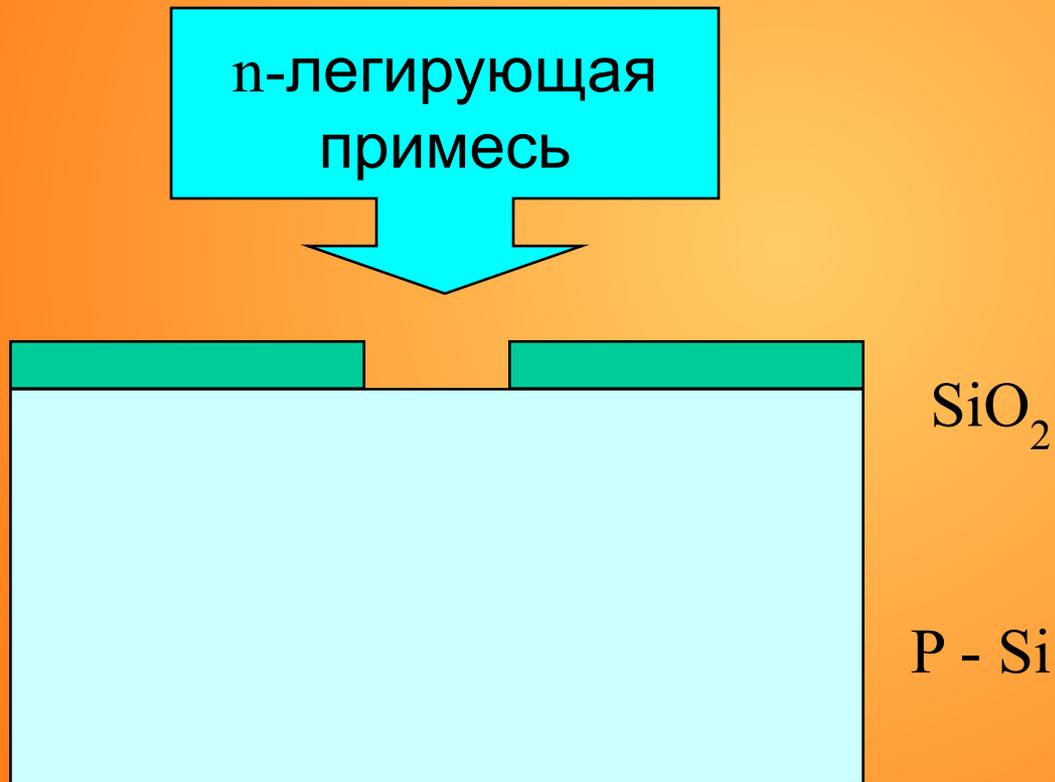
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

4. Планарная технология



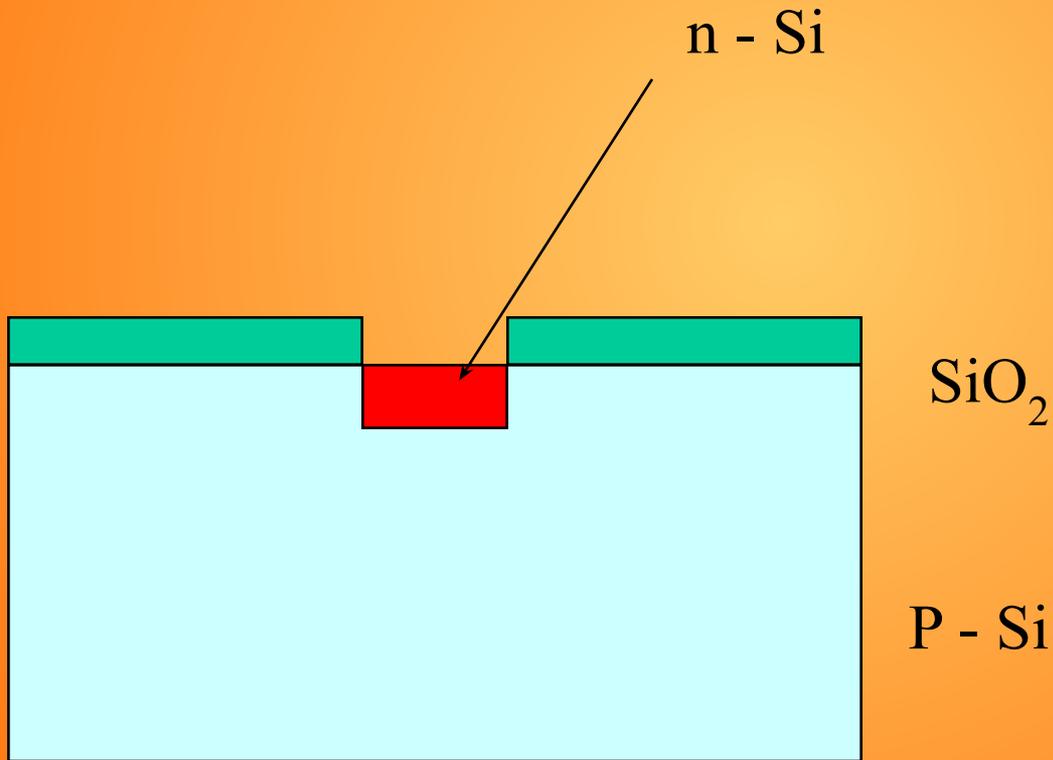
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

4. Планарная технология



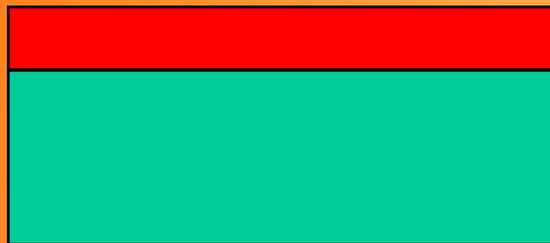
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

4. Планарная технология



МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

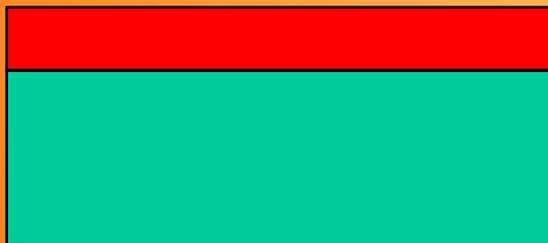
5. Эпитаксиальные пленки



n-Si

p-Si

Автоэпитаксия



GaAs

p-Si

Гетероэпитаксия
(при близких постоянных
решетки)

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ p-n ПЕРЕХОДА

6. Элионная технология

