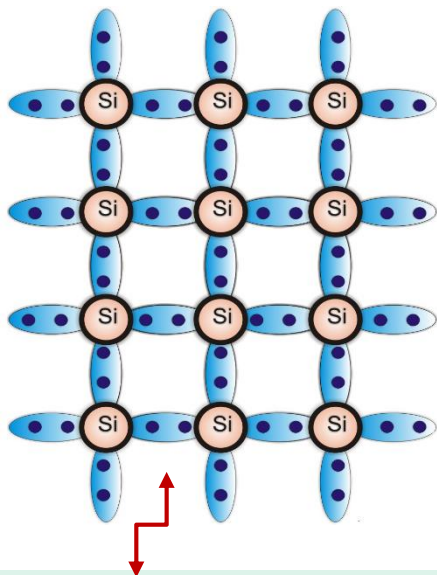


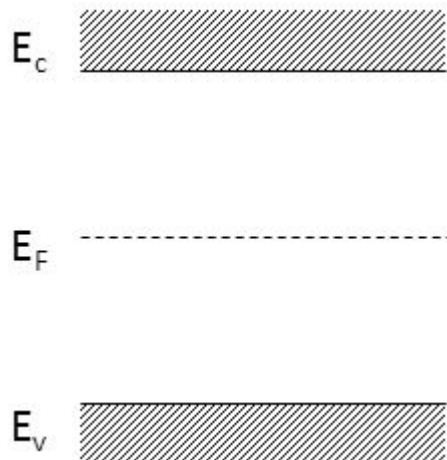
WYKŁAD 4

**Półprzewodniki samoistne i domieszkowe.
Przewodnictwo półprzewodników.
Półprzewodnik w polu elektrycznym. Złącze
półprzewodnikowe (p-n). Charakterystyka
prądowo-napięciowa złącza p-n. Technologie
półprzewodnikowe.**

Półprzewodnik niedomieszkowany (samoistny)



Rys. Schemat sieci krystalicznej dla półprzewodnika samoistnego w temperaturze 0K.



Rys. Schemat ułożenia pasm energetycznych w półprzewodniku samoistnym w temperaturze 0K:

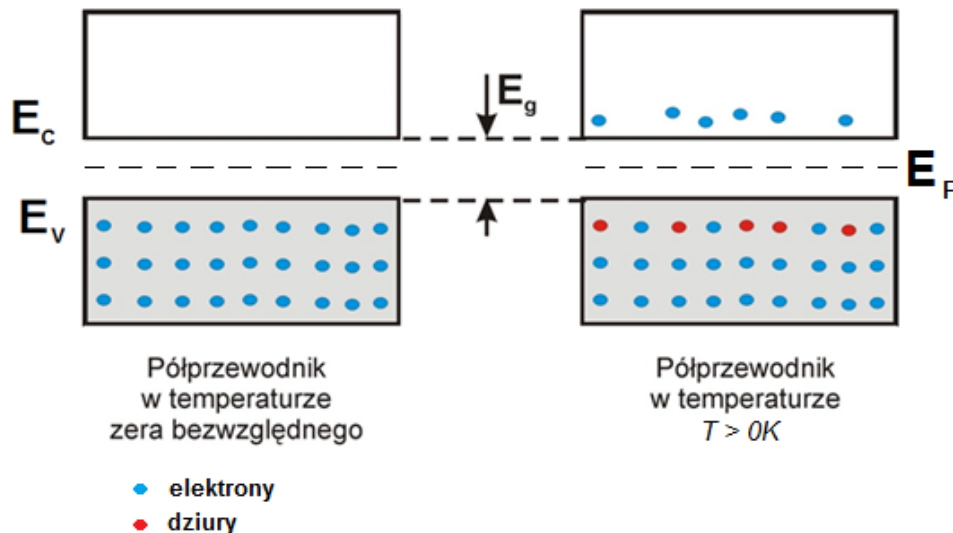
E_C – krawędź pasma przewodnictwa

E_V – krawędź pasma walencyjnego

E_F – energia Fermiego (poziom Fermiego).

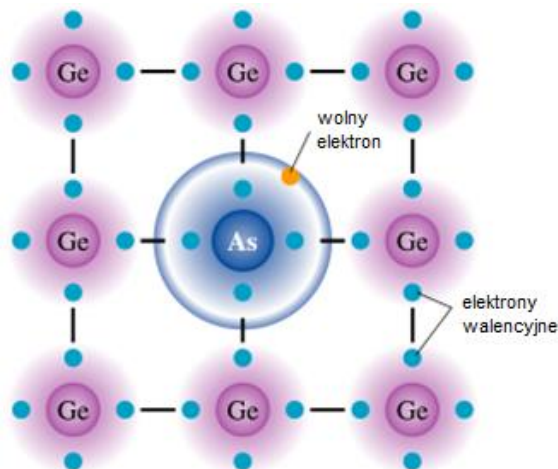
W półprzewodniku samoistnym koncentracje elektronów (n) i dziur (p) są jednakowe i równe koncentracji samoistnej n_i :

$$n = p = n_i$$



Dostarczenie elektronom energii $E_C - E_V$ powoduje ich przejście z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. W miejscach pustych po elektronach tworzą się tzw. **dziury**, tj. quasi-cząstki o ładunku dodatnim.

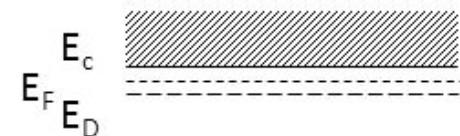
Półprzewodnik domieszkowy - donorowy (typu n)



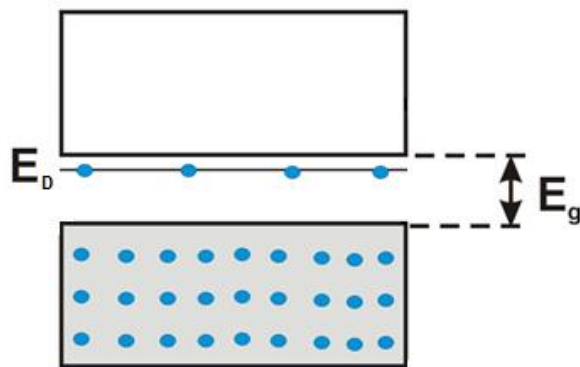
Rys. Schemat sieci krystalicznej dla półprzewodnika donorowego w temperaturze 0K.

Grupa $\Rightarrow$ Okres $\Downarrow$	II	III	IV	V	VI	VII
II		B	C			
III		Al	Si	P	S	
IV		Ga	Ge	As	Se	
V		In	Sn	Sb	Te	J
VI						

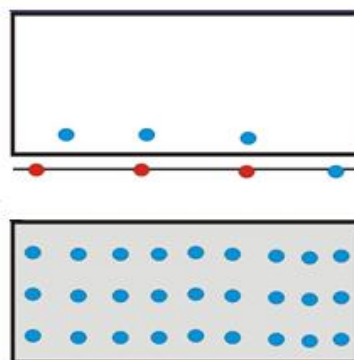
Półprzewodnik donorowy: np. german (Ge) domieszkowany arsenem (As).



Rys. Schemat ułożenia pasm energetycznych w półprzewodniku donorowym w temperaturze 0K:
 E_D – energia poziomu donorowego.



Półprzewodnik w temperaturze zera bezwzględnego



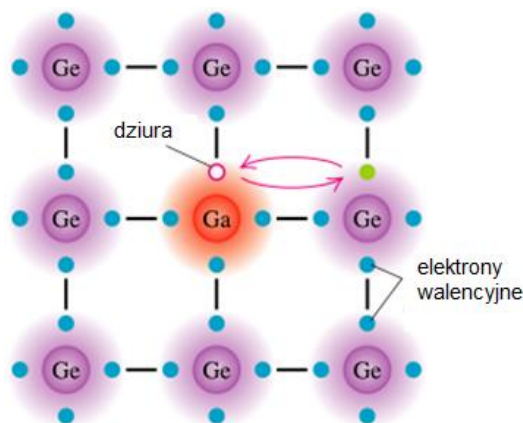
Półprzewodnik w temperaturze $T > 0K$

Dostarczenie elektronom energii $E_C - E_D$ powoduje ich przejście z poziomu donorowego o energii E_D do pasma przewodnictwa (E_C). Powstałe jony dodatnie domieszki donorowej są nieruchome i nie uczestniczą w przewodnictwie elektrycznym.

Elektrony w takim półprzewodniku są nośnikami większościowymi, a dziury – mniejszościowymi.

$$n_0 > p_0$$

Półprzewodnik domieszkowy - akceptorowy (typu p)



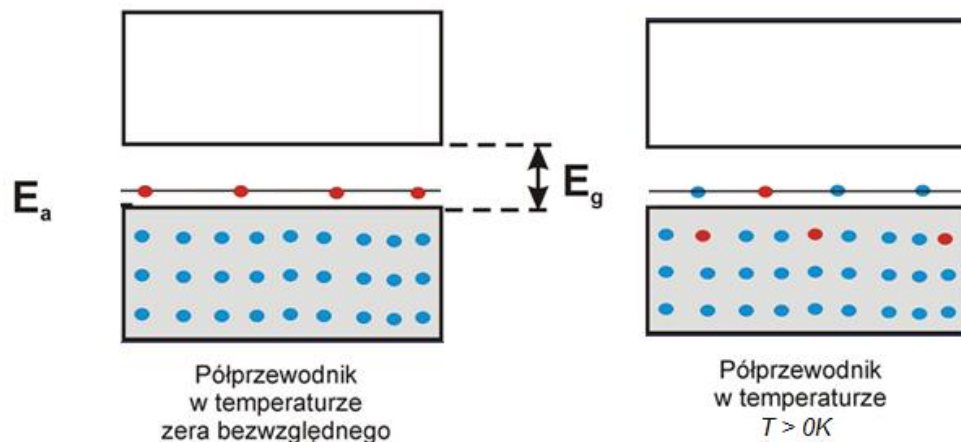
Rys. Schemat sieci krystalicznej dla półprzewodnika akceptorowego w temperaturze 0K.

Grupa ⇒ Okres ↓	II	III	IV	V	VI	VII
II		B	C			
III		Al	Si	P	S	
IV		Ga	Ge	As	Se	
V		In	Sn	Sb	Te	J
VI						

Półprzewodnik akceptorowy: np. german (Ge) domieszkowany galem (Ga).



Rys. Schemat ułożenia pasm energetycznych w półprzewodniku akceptorowym w temperaturze 0K: E_A – energia poziomu akceptorowego.



Dostarczenie elektronom energii $E_V - E_A$ powoduje ich przejście z pasma walencyjnego na poziom akceptorowy, co skutkuje pojawieniem się dziury w pasmie walencyjnym. Powstałe jony domieszki akceptorowej zyskują ładunek ujemny, są nieruchome i nie uczestniczą w przewodnictwie elektrycznym.

Elektrony w takim półprzewodniku są nośnikami mniejszościowymi, a dziury – większościowymi.

$$p_0 > n_0$$

Przewodność właściwa półprzewodników

$$\sigma(T) = en(T)\mu(T)$$

$n(T)$ – koncentracja nośników
[cm^{-3}]

Prędkość elektronu

$$\mu = \frac{v}{E} \left[\frac{cm^2}{Vs} \right]$$

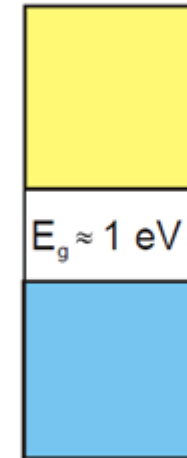
Ruchliwość

Natężenie pola elektrycznego

$$n(T) \sim e^{\frac{-E_g}{kT}}$$

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} J/K$$

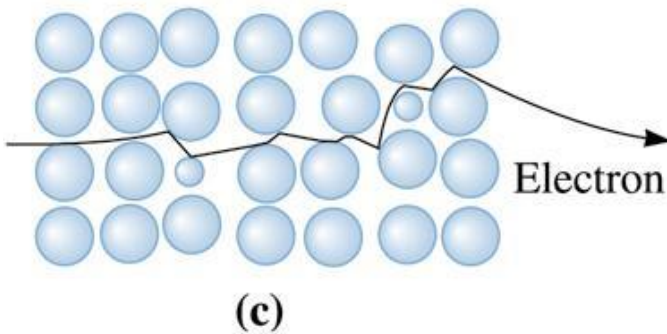
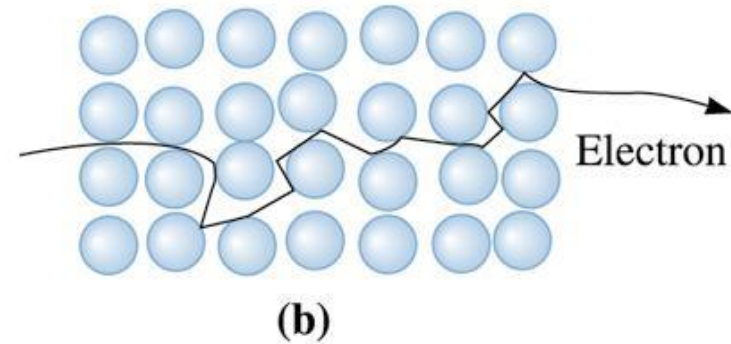
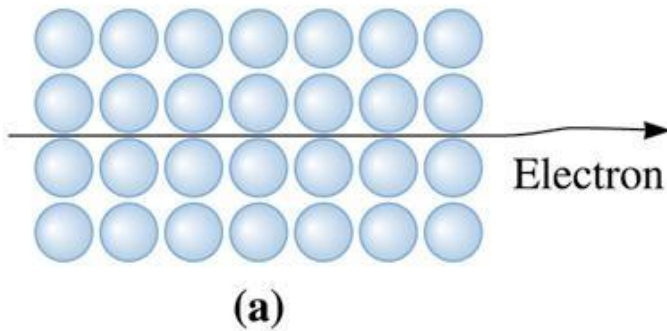
Pasmo przewodnictwa



Przerwa energetyczna

Pasmo walencyjne

Transport elektronów w kryształach półprzewodnikowych



- a) Elektron w perfekcyjnym kryształ
- b) Elektron w kryształ w skończonej temp.
- c) Elektron w kryształ zdefektowanym

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[®] is a trademark used herein under license.

$$\sigma = en\mu$$

Przewodność właściwa

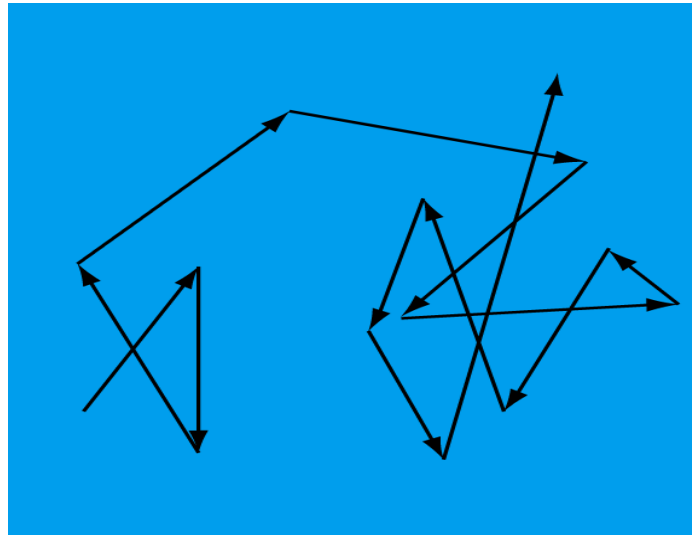
$$\mu = \frac{v}{E}$$

Prędkość elektronu

Natężenie pola elektrycznego

Ruchliwość

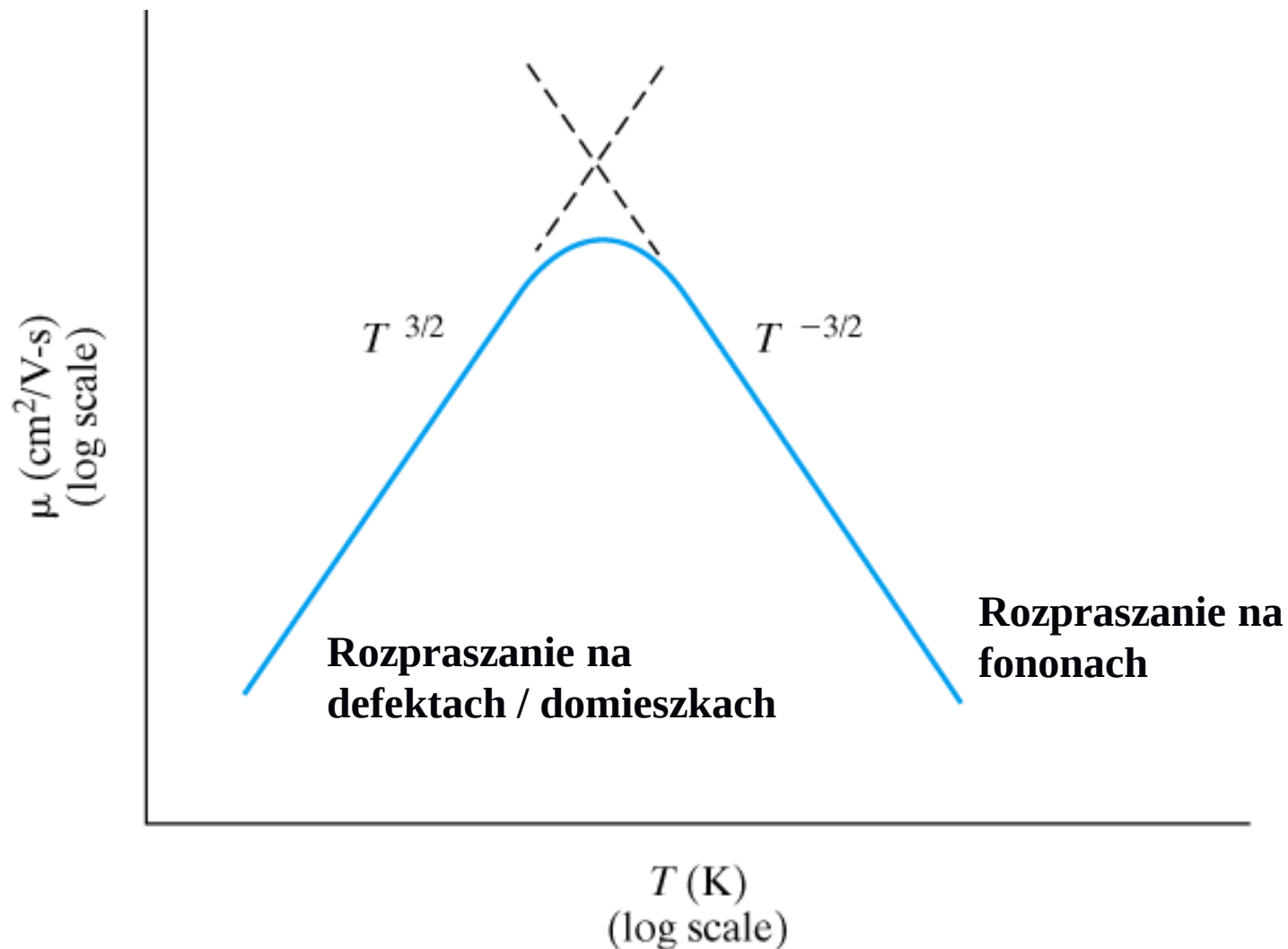
Ruchliwość nośników w półprzewodniku



Elektrony w sieci ulegają rozproszeniu na skutek:

- **drgań sieci (fonony)**
- **oddziaływań z defektami sieci**
- **zderzeń z innymi elektronami**

Ruchliwość nośników w półprzewodniku

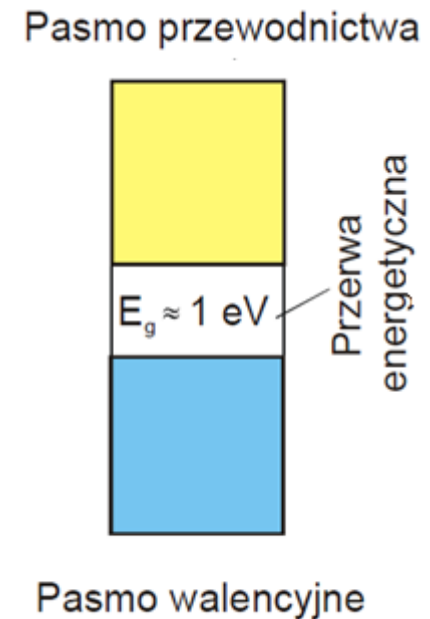


Przewodność właściwa półprzewodników

$$\sigma(T) = en(T)\mu(T)$$

$$n(T) \sim e^{\frac{-E_g}{kT}}$$

$$\mu(T) \sim T^a \quad (a = -\frac{3}{2} \text{ lub } \frac{3}{2})$$



W półprzewodnikach zależność przewodności właściwej od temperatury determinuje **zależność koncentracji nośników od temperatury**, ponieważ ruchliwość nie zmienia się istotnie wraz ze zmianą temperatury:

$$\sigma(T) \sim n(T)$$

Przewodność właściwa półprzewodnika samoistnego

Przewodność: $\sigma = en_i\mu$

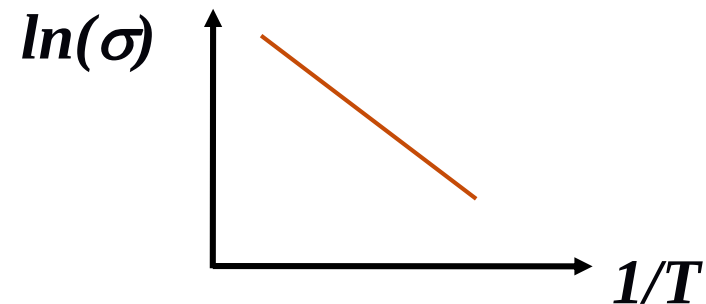
Jeśli ruchliwość nie zmienia się istotnie wraz ze zmianą temperatury to

$$\sigma(T) \sim n_i(T)$$

$$n_i(T) \sim e^{\frac{-E_g}{2kT}}$$

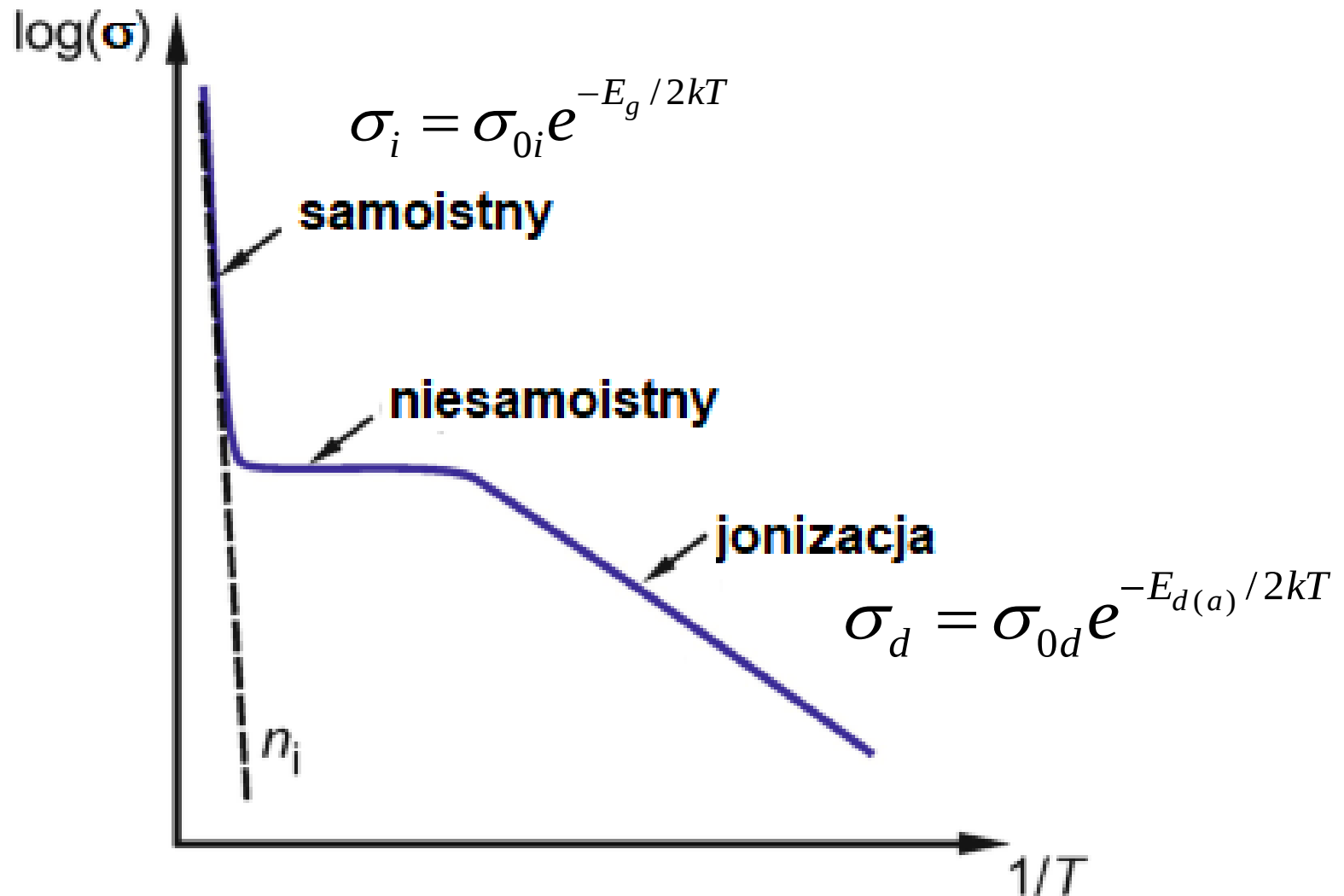
$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2k} \cdot \frac{1}{T}$$



Nachylenie prostej: $-\frac{E_g}{2k}$

Przewodność właściwa półprzewodnika domieszkowego



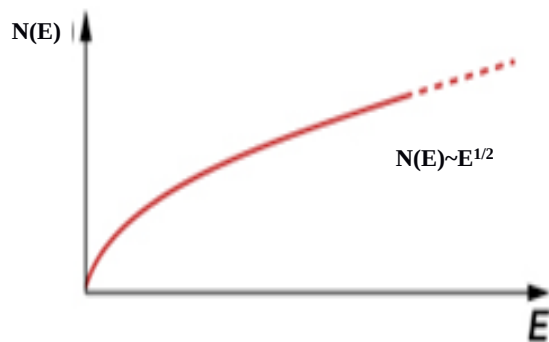
Przypomnienie z wykładu III

Jak liczy się koncentrację elektronów w metalu?

- **Najpierw wprowadza się pojęcie gęstości stanów, tzn. liczby dostępnych stanów (w pasmie przewodnictwa lub walencyjnym) na jednostkę objętości, zawartych w pewnym przedziale energii**
- **Potem gęstość stanów mnoży się przez prawdopodobieństwo, że elektrony obsadzą te stany, czyli przez funkcję Fermiego-Diraca**
- **Potem sumuje się (całkuje) ten iloczyn po wszystkich energiach dostępnych w pasmie przewodnictwa**

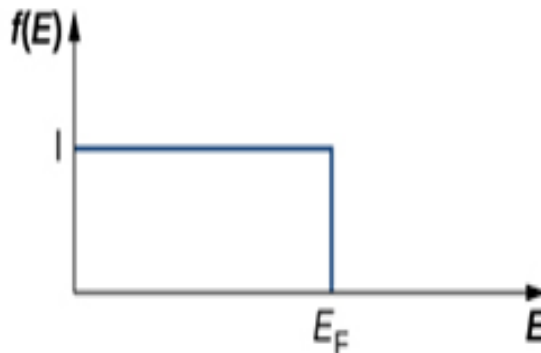
Jak to sobie przypomnimy, to obliczymy koncentrację elektronów w półprzewodniku typu n (p)...

Koncentracja elektronów w metalu



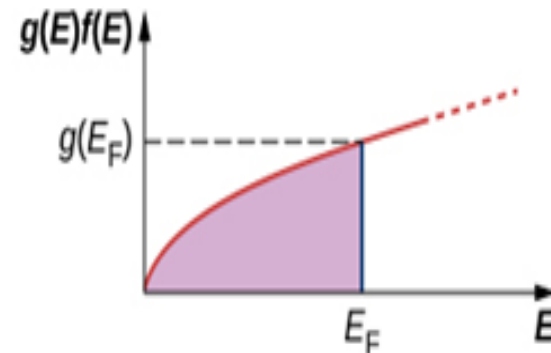
(a)

Gęstość stanów



(b)

Funkcja rozkładu
Fermiego-Diraca



(c)

Gęstość stanów
obsadzonych
elektronami

$$n = \int_0^{E_F} f(E)N(E)dE = \frac{16\sqrt{2}\pi m^{3/2}}{3h^3} E_F^{3/2}$$



pole pod wykresem c)

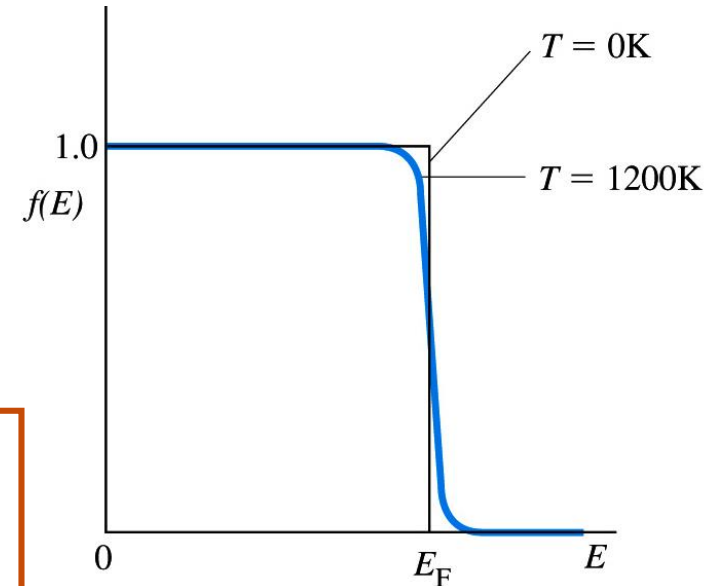
Funkcja rozkładu Fermiego-Diraca

Elektrony są fermionami.

Prawdopodobieństwo obsadzenia stanu fermionem:

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1}$$

$$\text{Dla } T = 0 \text{ K, } f(E) = \begin{cases} 1 & E < E_F \\ 0 & E > E_F \end{cases}$$



- W $T=0$ wypełnione są wszystkie stany o energiach poniżej E_F
- Dla dowolnej temperatury prawdopodobieństwo wypełnienia stanu o energii E_F wynosi 0.5:

$$f(E) = 0.5 \quad \text{dla} \quad E = E_F$$

Koncentracja elektronów i dziur w stanie równowagi termodynamicznej w półprzewodniku

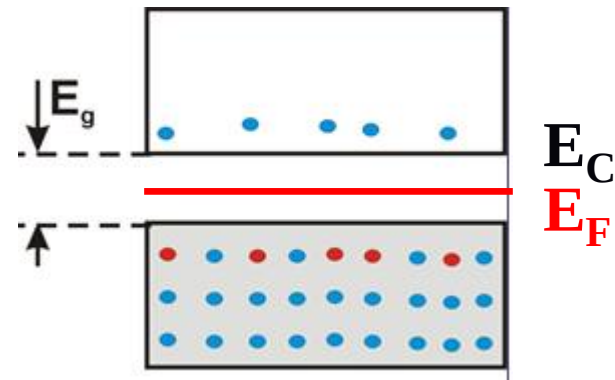
Koncentracja elektronów w pasmie przewodnictwa:

$$n_0 = \int_{E_C}^{\infty} f(E)N(E)dE$$

- kT (w 300K) = 0.025eV
- E_F znajduje się w połowie przerwy wzbronionej (w Si tj. 0.55eV)

$$\rightarrow E_C - E_F > kT$$

$$f(E_C) = \frac{1}{1 + e^{(E_C - E_F)/kT}} \approx e^{-(E_C - E_F)/kT} \quad (300K)$$



$T=300K$
półprzewodnik samoistny

Koncentracja elektronów w pasmie przewodnictwa

- $N(E) \sim \sqrt{E}$
- $f(E)N(E)$ maleje istotnie dla $E > E_C$, więc mało elektronów zajmuje stany powyżej dna pasma przewodnictwa
- wprowadza się *efektywną gęstość stanów* N_C : wszystkie stany zastępuje się stanami na dnie pasma przewodnictwa
- koncentracja elektronów w pasmie przewodnictwa = (*efektywna gęstość stanów* N_C) $\times$ (*funkcja Fermiego*) :

$$n_0 = N_C f(E_C) = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT}$$

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

Koncentracja dziur w pasmie walencyjnym

$$p_0 = N_V [1 - f(E_V)] = N_V e^{-(E_F - E_V)/kT}$$

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

Koncentracja równowagowa elektronów w pasmie przewodnictwa jest równa koncentracji równowagowej dziur w paśmie walencyjnym:

$$n_0 = p_0 = n_i$$

Koncentracja elektronów i dziur w stanie równowagi termodynamicznej

Równanie prawdziwe dla wszystkich półprzewodników:

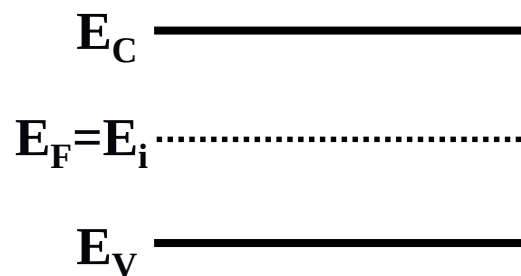
$$n_0 p_0 = n_i^2$$

W półprzewodniku samoistnym koncentracja dziur jest równa koncentracji elektronów, więc

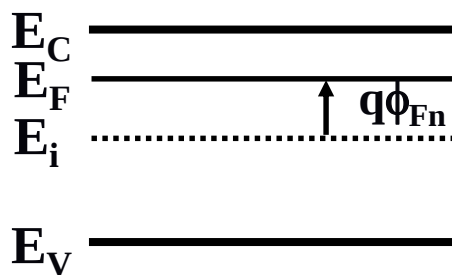
$$n_0 = p_0 = n_i$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-E_g / 2kT}$$

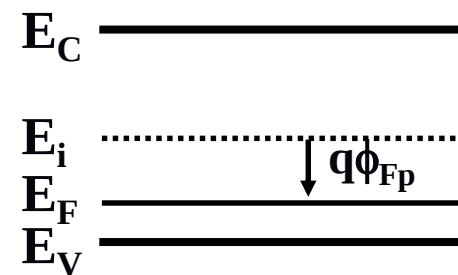
Koncentracja równowagowa nośników w półprzewodniku domieszkowym



samoistny



n-typu



p-typu

**Wpływ domieszkowania na
poziom Fermiego E_F**

**n-typu: poziom Fermiego
przesuwa się do góry**

**p-typu: poziom Fermiego
przesuwa się w dół**

$$n_0 = n_i e^{(E_F - E_i)/kT}$$

$$p_0 = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$$


 $q\phi_F = E_F - E_i$

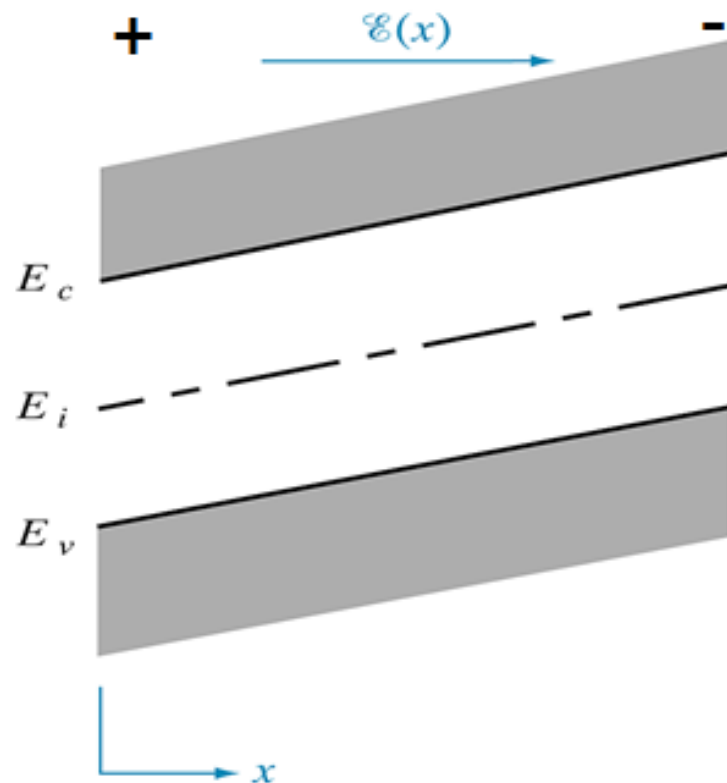
poziom Fermiego

Półprzewodnik w polu elektrycznym

$$F = -\frac{dE_p}{dx}$$

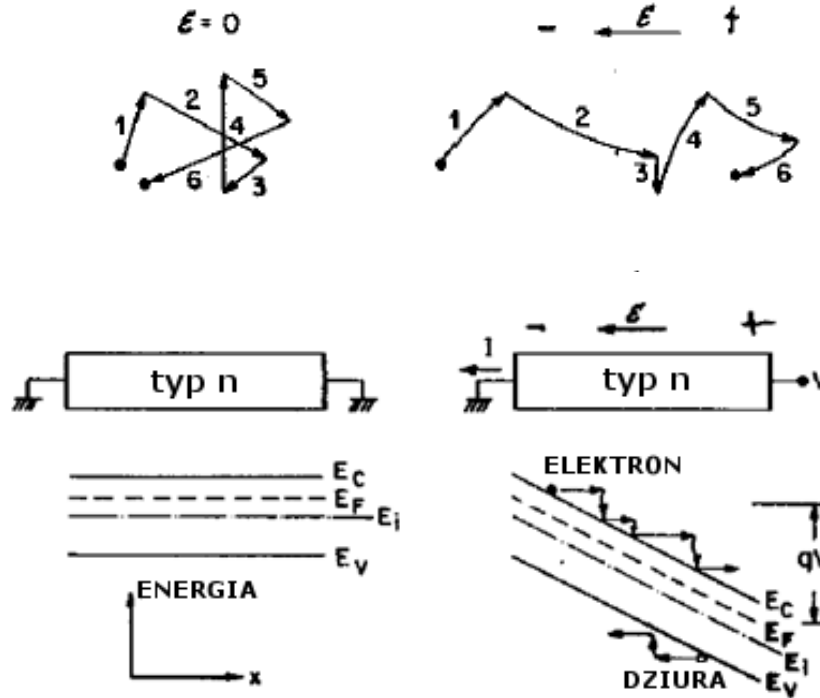
$$-e\varepsilon(x) = -(-e)\frac{dV}{dx}$$

$$\varepsilon(x) = -\frac{dV}{dx}$$



Gęstość prądu unoszenia

Prąd unoszenia:
wynika z obecności
pola elektrycznego



$$J_x = qn\mu_n \varepsilon_x$$

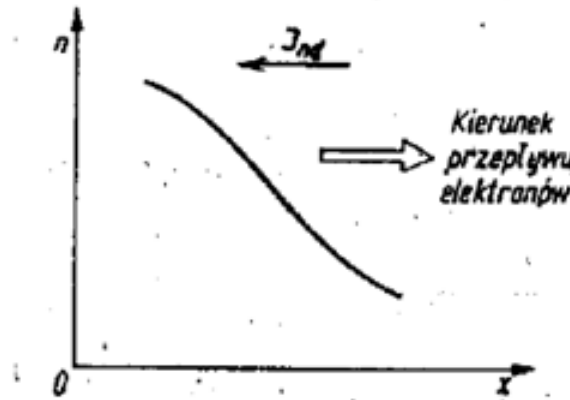
$$J_x = \sigma \varepsilon_x$$

Całkowity prąd unoszenia elektronowy i dziurowy:

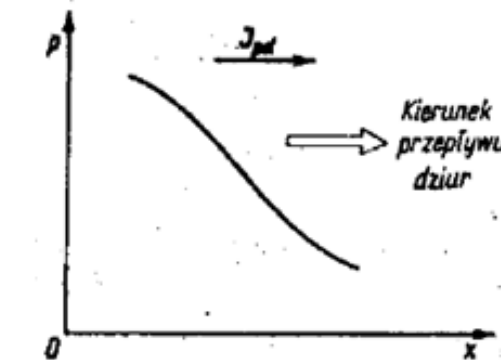
$$J_x = qn\mu_n \varepsilon_x + qp\mu_p \varepsilon_x = q(n\mu_n + p\mu_p) \varepsilon_x = \sigma \varepsilon_x$$

Gęstość prądu dyfuzyjnego

Prąd dyfuzyjny:
wynika z gradientu
koncentracji
nośników



$$J_n(\text{dyf}) = -(-q)D_n \frac{dn(x)}{dx} = +qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$



$$J_p(\text{dyf}) = -(+q)D_p \frac{dp(x)}{dx} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Całkowity prąd w obecności pola elektrycznego

Całkowity prąd jest sumą prądu dyfuzyjnego (elektronowego i dziurowego) i prądu unoszenia (elektronowego i dziurowego):

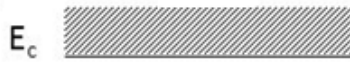
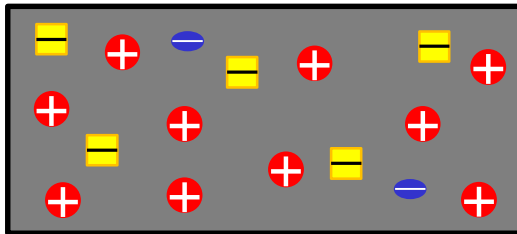
$$J(x) = J_n(x) + J_p(x)$$

$$J_n(x) = q\mu_n n(x)\varepsilon(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

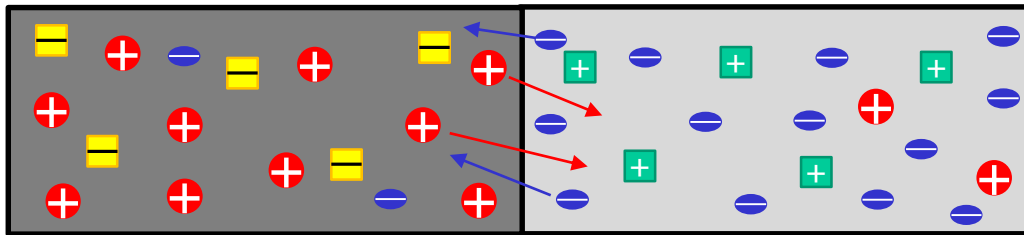
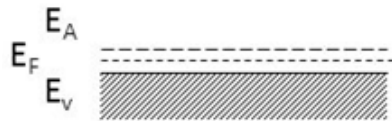
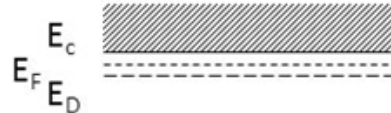
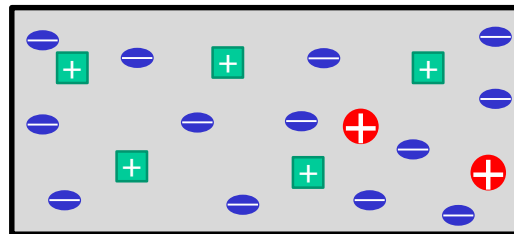
$$J_p(x) = q\mu_p p(x)\varepsilon(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Złącze p-n – tworzenie się złącza

Typ p



Typ n



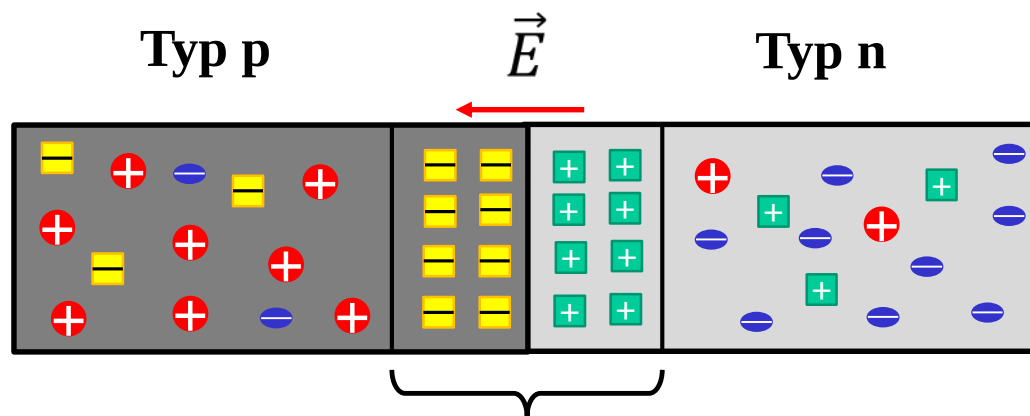
Oznaczenia:

- Dodatnio naładowane nieruchome donory
- Ujemne elektrony
- Ujemnie naładowane nieruchome akceptory
- Dodatnie dziury

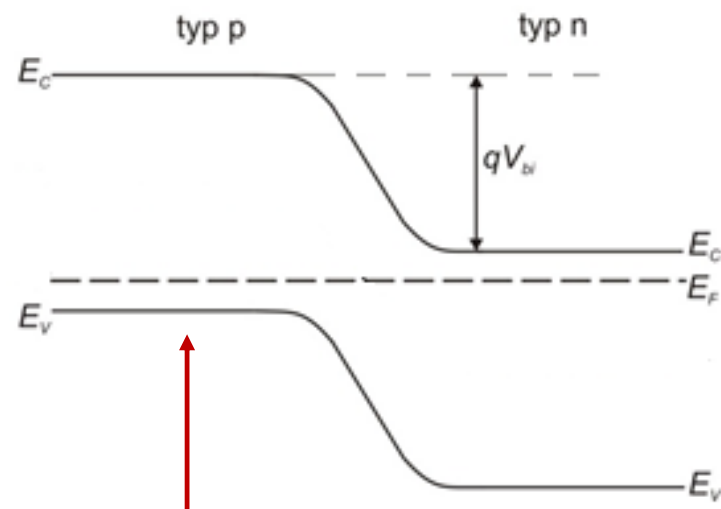
W półprzewodniku typu *n* występują następujące ładunki: nieruchome, dodatnie jony domieszki donorowej; ruchome elektrony będące nośnikami większościowymi oraz pojedyncze, ruchome dziury pełniące rolę nośników mniejszościowych. W przypadku półprzewodnika typu *p* wyróżnia się: nieruchome, ujemne jony domieszki akceptorowej; ruchome dziury - nośniki większościowe, oraz pojedyncze, ruchome elektrony będące nośnikami mniejszościowymi. W momencie połączenia warstw następuje **dyfuzja** nośników większościowych z obszaru o ich większej koncentracji do obszaru o koncentracji mniejszej. Zatem: **dziury dyfundują** z obszaru *p* do *n*, **elektrony** zaś z obszaru *n* do *p*.

Złącze p-n – tworzenie się złącza – c.d.

Prąd dyfuzyjny elektronów i dziur powoduje, że w obszarze granicznym złącza pozostają nieruchome jony domieszek, które tworzą warstwę ładunku przestrzennego, tzw. **obszar zubożony**. W obszarze zubożonym powstaje pole elektryczne E skierowane od + do -, tj. od półprzewodnika typu n do półprzewodnika typu p . Istnienie pola elektrycznego w obszarze zubożonym powoduje, że na granicy warstw pojawia się bariera potencjału o wysokości qV_{bi} , która jest źródłem **prądu unoszenia** czyli ruchu nośników mniejszościowych (dziur z typu n do p i elektronów z typu p do n). W stanie równowagi termodynamicznej prąd unoszenia równoważy prąd dyfuzyjny.



Obszar zubożony / warstwa ładunku przestrzennego (tylko dodatnio naładowane donory/ ujemnie naładowane akceptory)



Rys. Diagram pasmowy złącza p-n w stanie równowagi termodynamicznej.

Prąd dyfuzji i unoszenia – kierunki przepływu

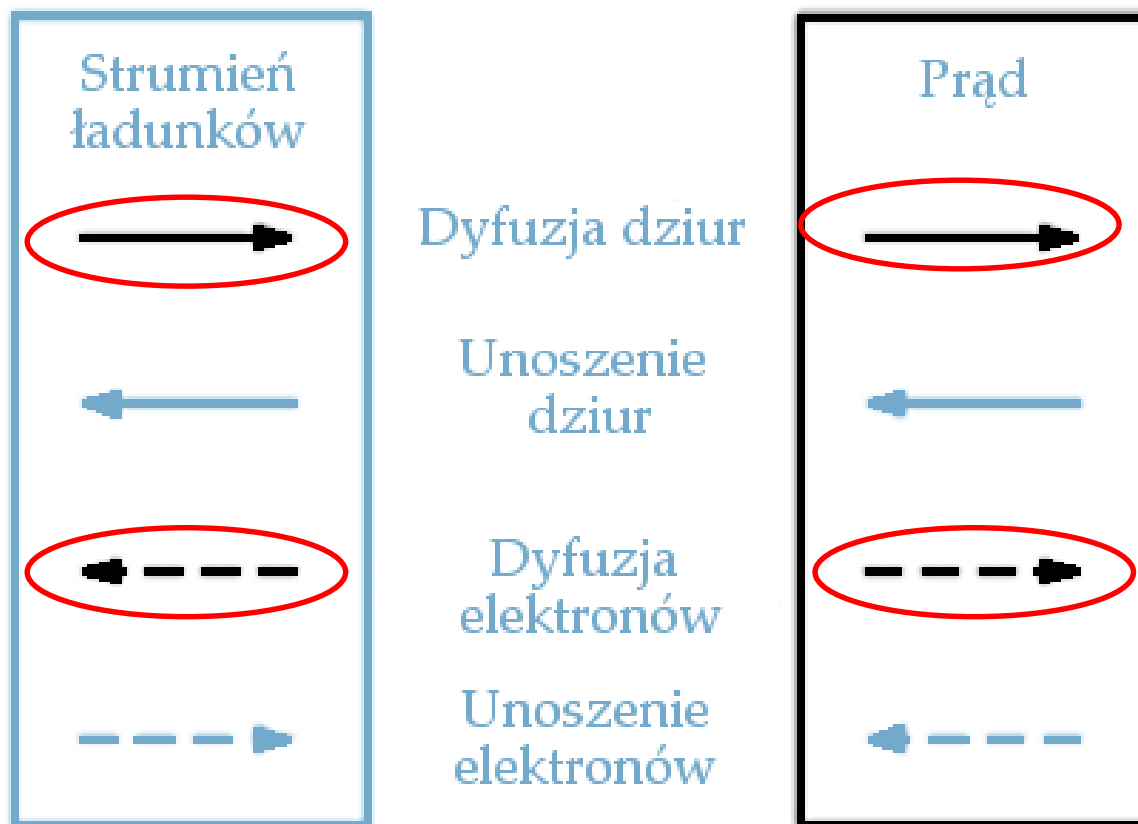
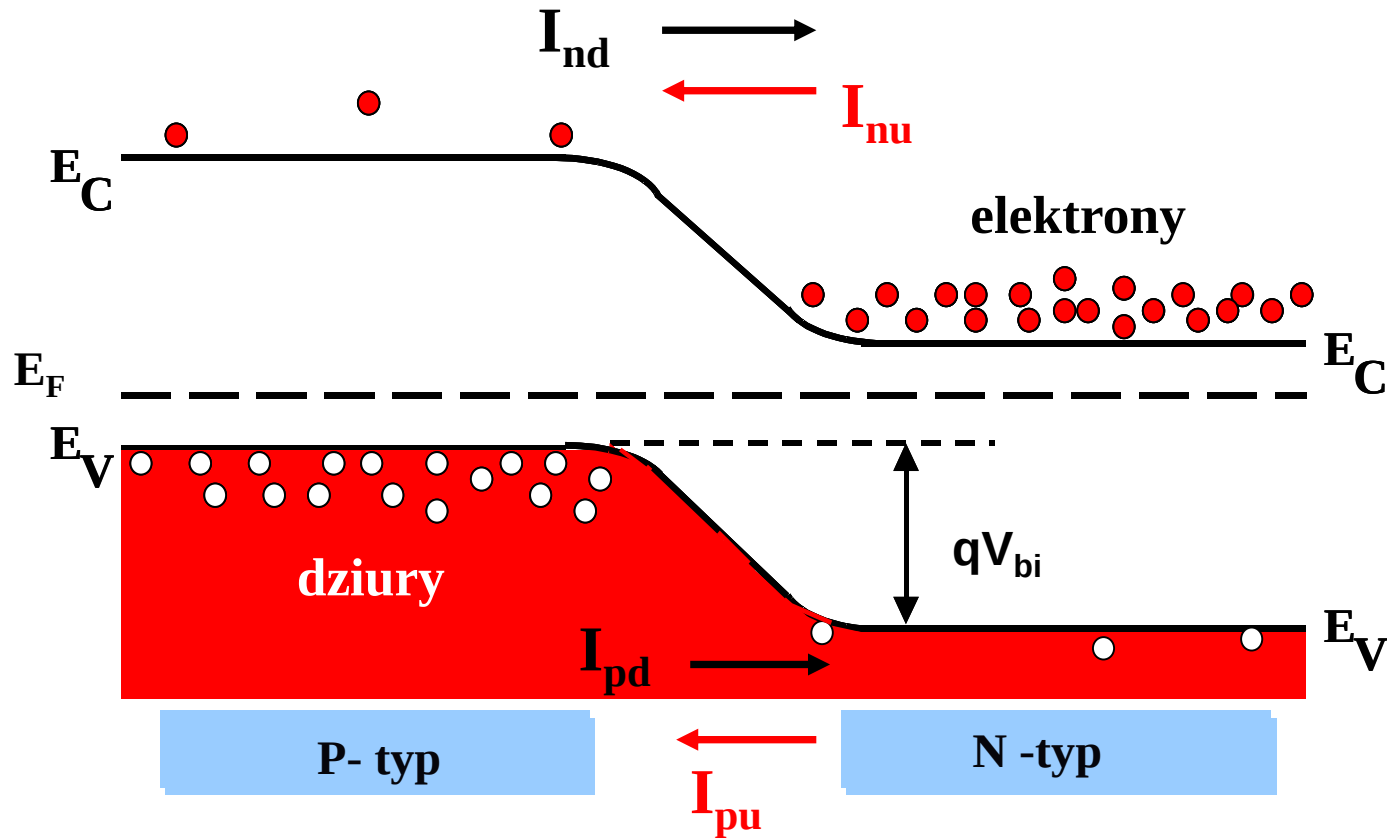


Diagram pasmowy złącza p-n w stanie równowagi termodynamicznej



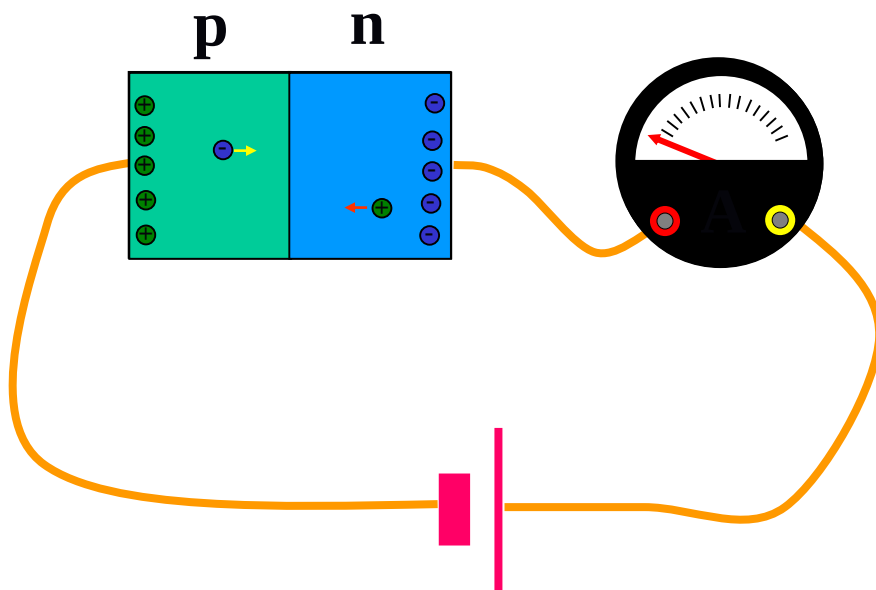
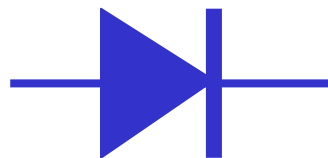
I_{nd} (I_{pd}) – prąd dyfuzyjny elektronowy (dziurowy)

I_{nu} (I_{pu}) – prąd unoszenia elektronowy (dziurowy)

V_{bi} – potencjał wbudowany

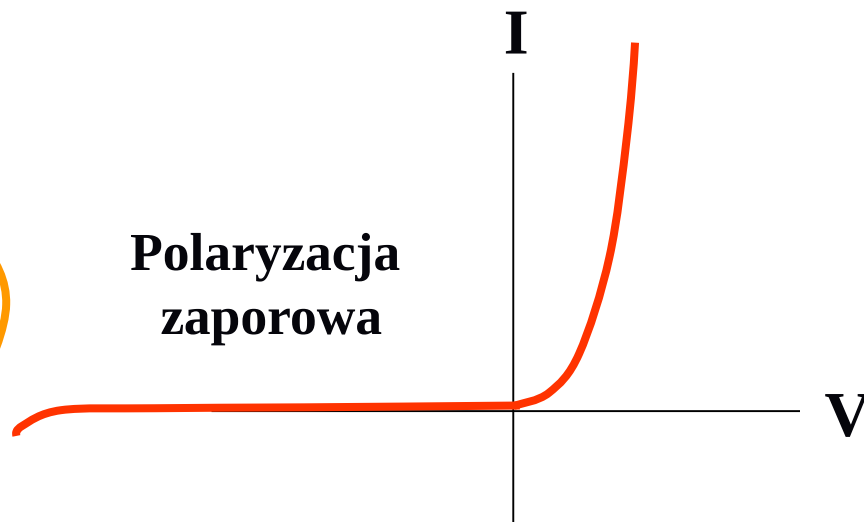
Złącze p-n → dioda półprzewodnikowa

Charakterystyka I-V - nieliniowa



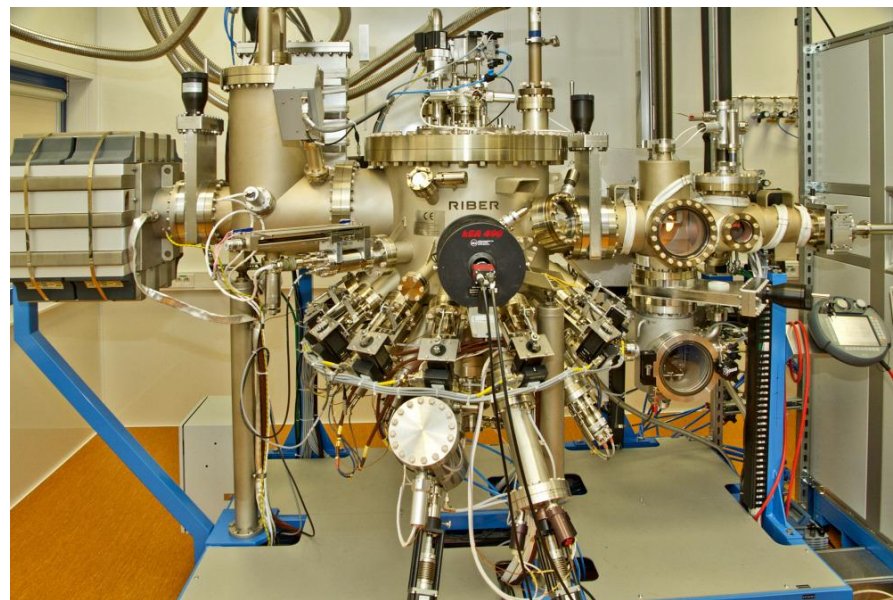
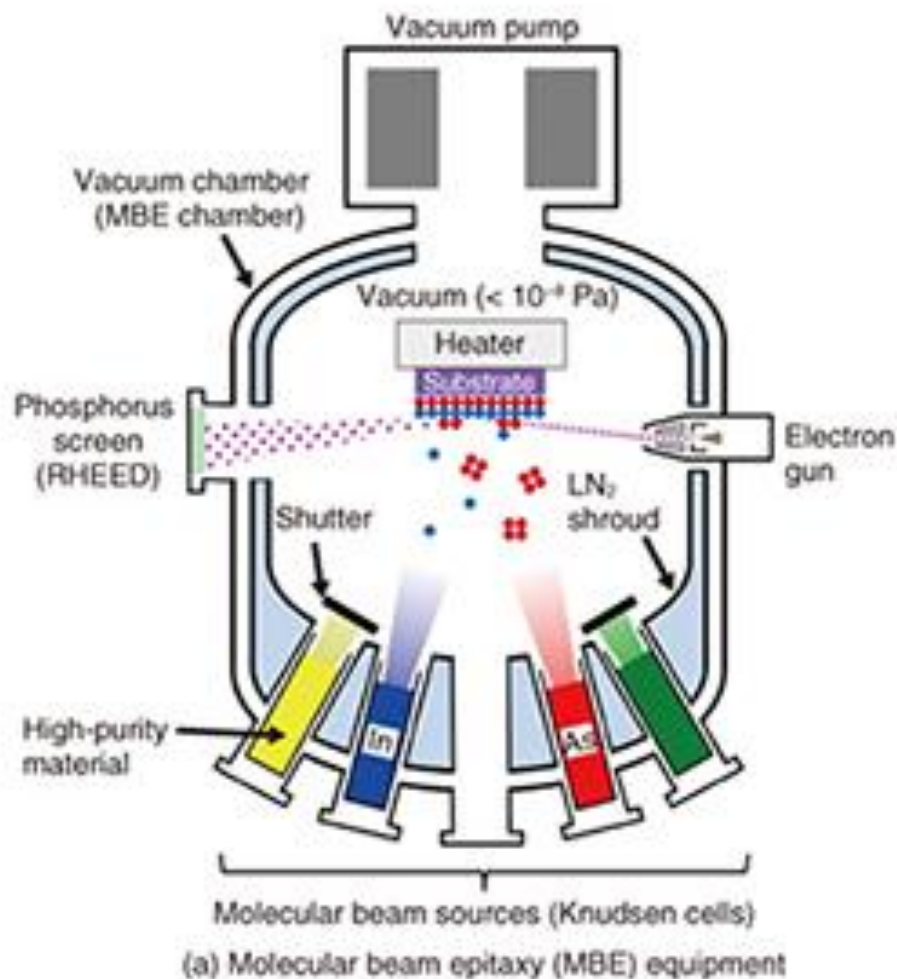
Polaryzacja w kier.
przewodzenia

Polaryzacja
zaporowa



Wybrane technologie półprzewodnikowe – MBE

MBE – z ang. *Molecular Beam Epitaxy*, tj. **epitaksja z wiązek molekularnych** – jedna z technik epitaksji polegająca na osadzaniu cienkich warstw półprzewodnikowych z wiązek molekularnych (lub atomowych) w ultrawysokiej próżni (ciśnienie $\leq 10^{-7}$ Pa).

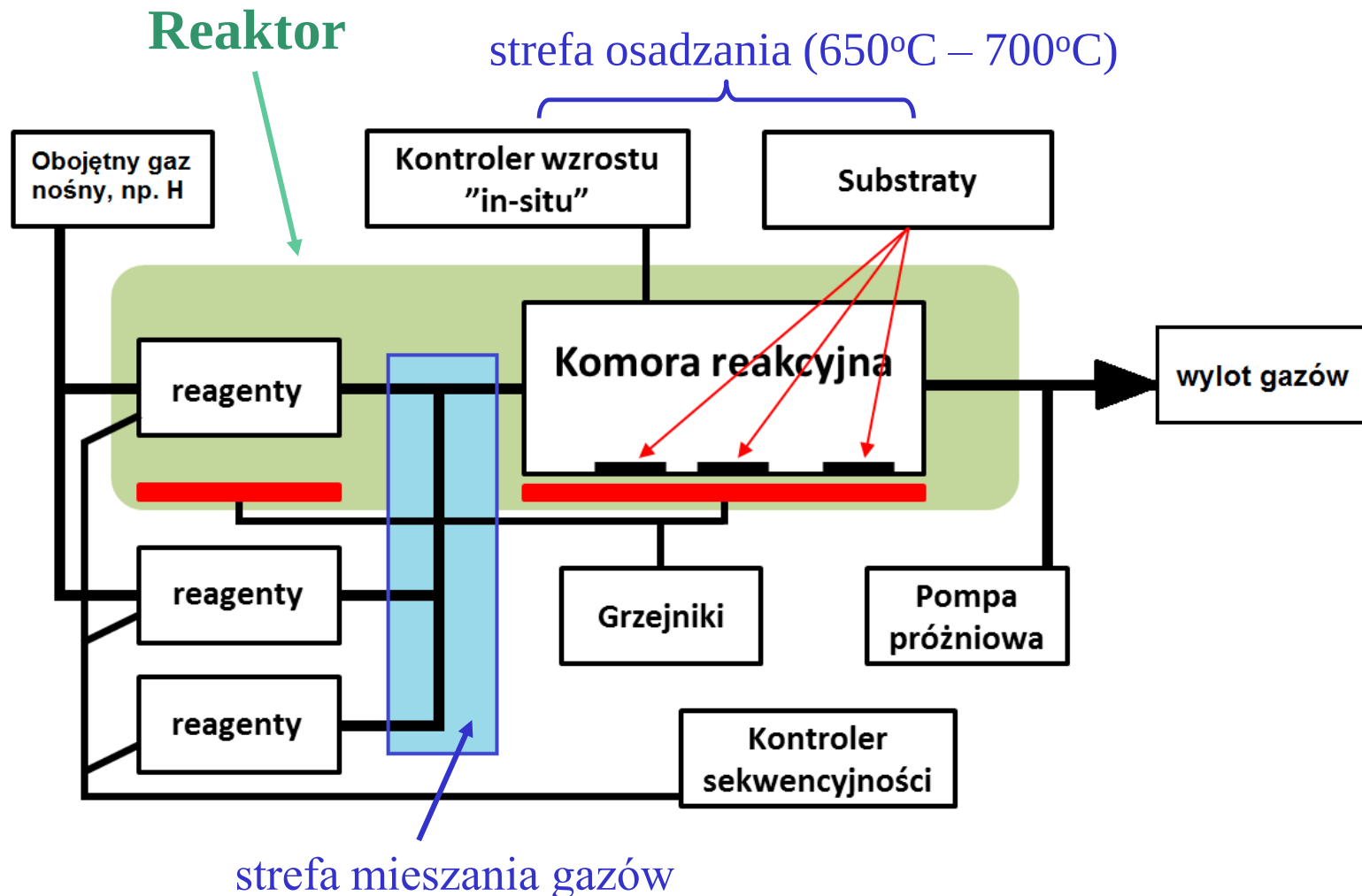


Technologia MBE:

- ✓ Zapewnia największą czystość i dokładność wykonania struktury;
- ✓ Pozwala na wytwarzanie bardzo zaawansowanych materiałów;
- ✓ Pozwala na uzyskanie warstw o grubości kilku nanometrów (monowarstw atomowych);
- ✓ Jest najlepsza do wytwarzania nanostruktur półprzewodnikowych.

Wybrane technologie półprzewodnikowe

MOCVD – z ang. *Metal Organic Chemical Vapor Deposition* - jest metodą chemicznego wytwarzania struktur epitaksjalnych. Technika osadzania warstw na powierzchni podłoża poprzez stosowanie związków metaloorganicznych w formie gazowej.



MOCVD



Zalety technologii MOCVD
→ struktury epitaksjalne
dużego formatu

THz laser kaskadowy na
bazie GaN ze studniami
kwantowymi AlGaIn/GaN

