

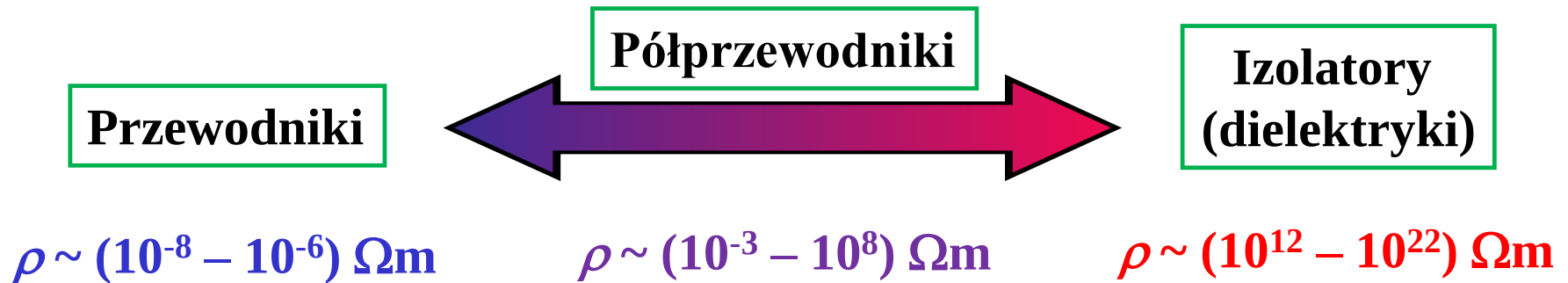
WYKŁAD 2

Materiały półprzewodnikowe. Złącze p-n i jego właściwości. Technologie półprzewodnikowe. Budowa i zasada działania wybranych przyrządów półprzewodnikowych i ich zastosowanie (dioda półprzewodnikowa, tranzystor polowy, etc.).

Klasyfikacja materiałów



Klasyfikacja materiałów – opór właściwy (ρ)

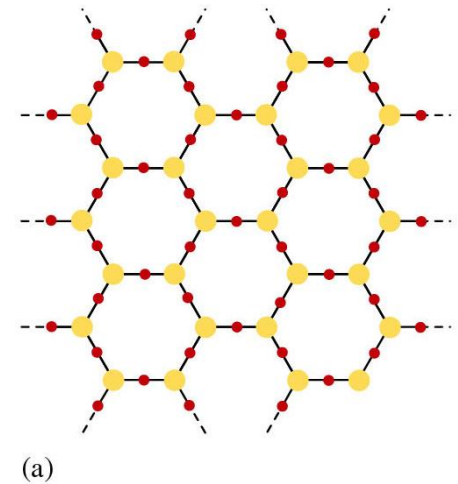


Ciała stałe można podzielić na:

- **Amorficzne** - brak uporządkowania atomów/cząsteczek, np. szkła, ciecze, smoła, wosk;
- **Krystaliczne** - o uporządkowanym ułożeniu atomów lub molekuł tworzących sieć krystaliczną, np. półprzewodniki, metale.

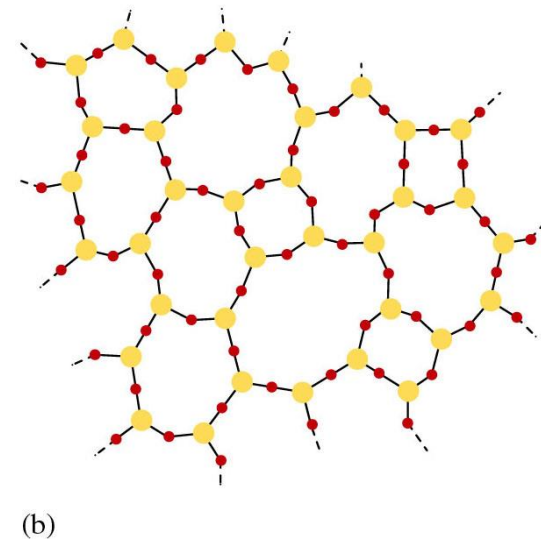
Struktura krystaliczna →

Kryształ - uporządkowanie atomów -
dalekozasięgowe



Struktura amorficzna →

Uporządkowanie atomów
bliskozasięgowe



Kryształy. Model sieci krystalicznej. Rodzaje sieci krystalicznych



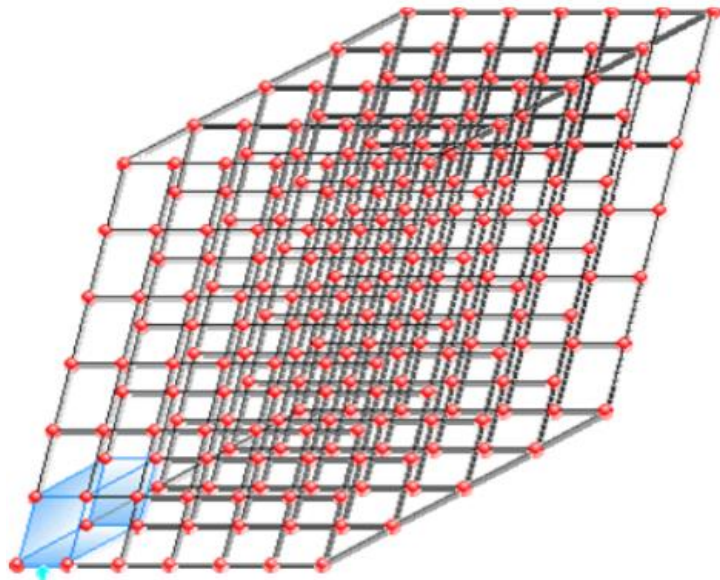
Przewodniki

miedź

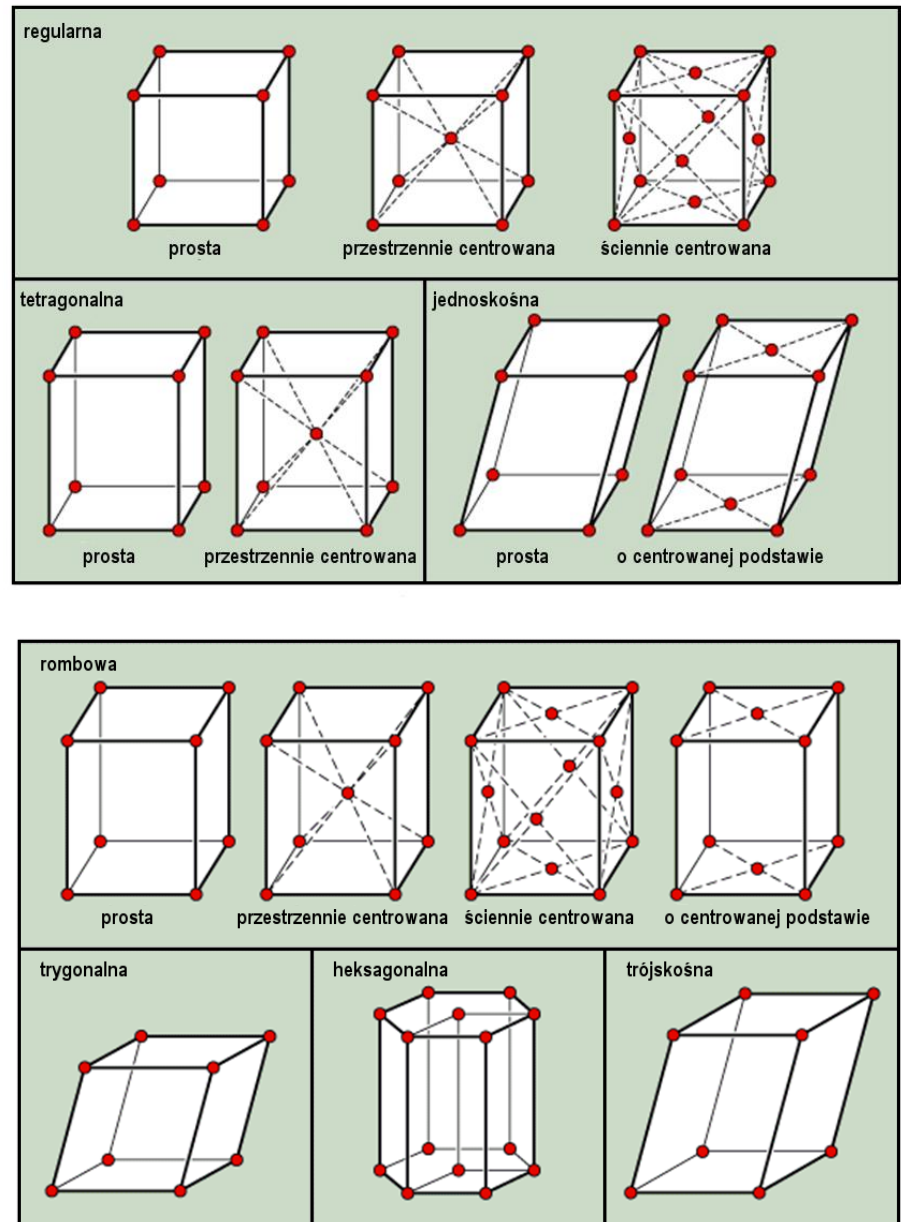


Półprzewodniki

krzem



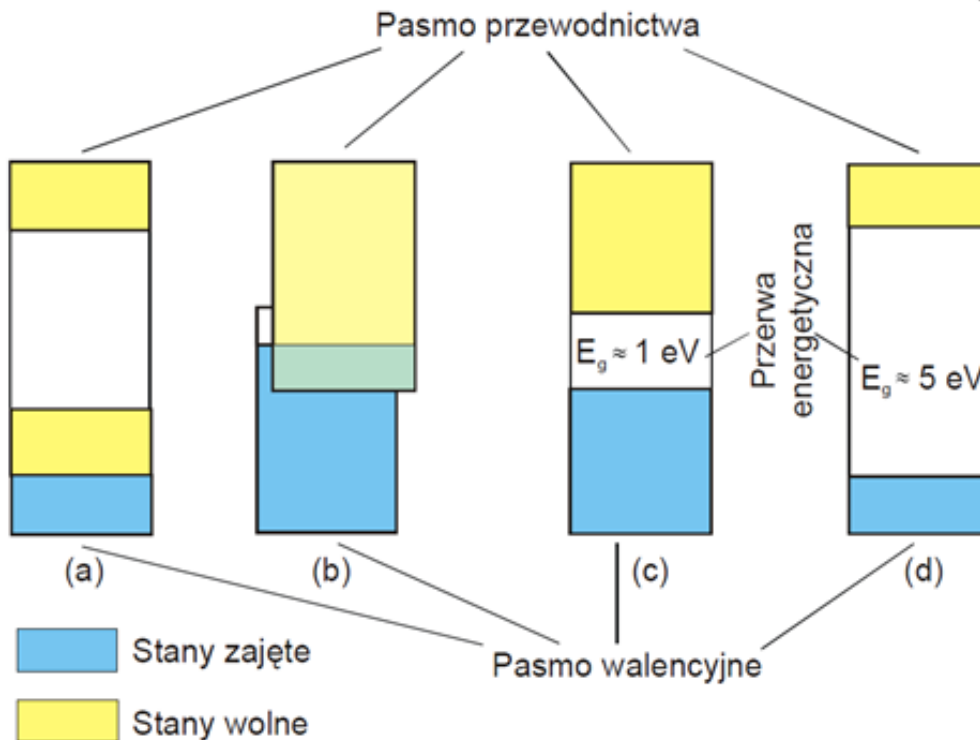
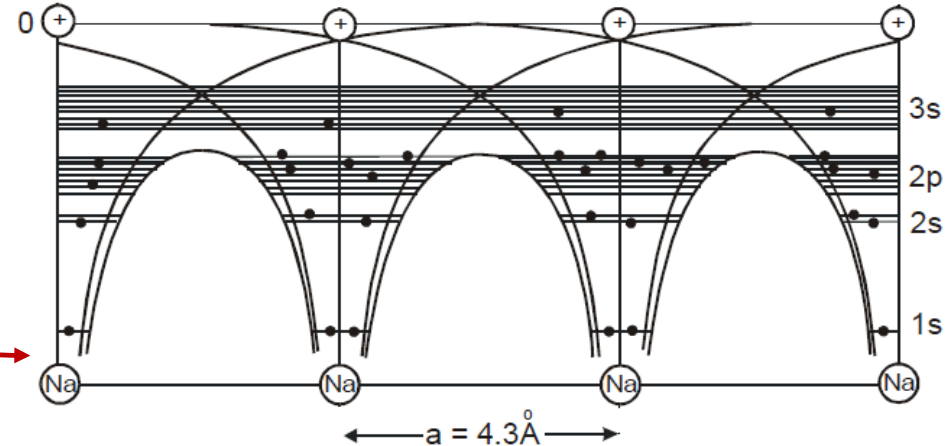
Rys. Model sieci krystalicznej, przedstawiający kryształ składający się z prostopadłościennych **komórek elementarnych** (jedna dla przykładu zaznaczona kolorem niebieskim). W narożnikach każdej z komórek elementarnych znajdują się atomy (czerwone kulki).



Klasyfikacja materiałów – przerwa wzbroniona (E_g)

- Zbliżenie atomów w kryształach prowadzi do rozszczepienia poziomów energetycznych
- Rozszczepione poziomy grupują się w pasma

Rys. Rozszczepienie poziomów energetycznych dla atomów sodu (Na) przy zbliżeniu się atomów znajdujących się w odległości rzędu parametru stałej sieci ($a = 4.3 \text{ \AA}$).

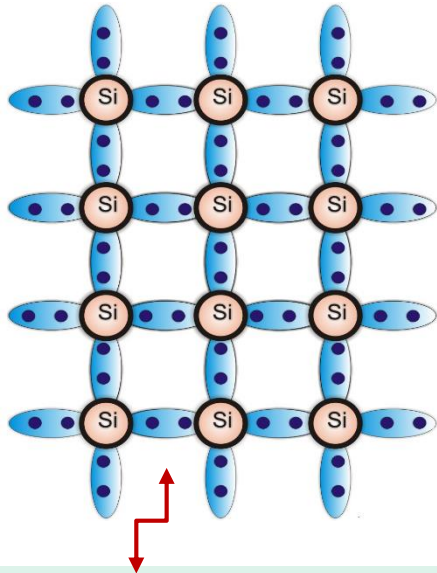


(a) i (b) – **metale** (częściowo wypełnione pasmo energetyczne, **swobodne elektrony w pasmach**),

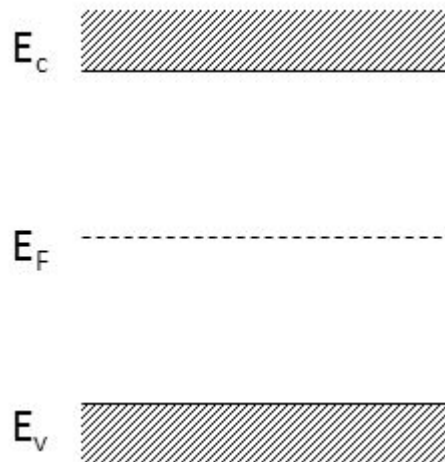
(c) **półprzewodnik** (całkowicie wypełnione pasmo walencyjne, przerwa wzbroniona $\sim 1 \text{ eV}$ – umownie, całkowicie puste pasmo przewodnictwa)

(d) **izolator** (całkowicie wypełnione pasmo walencyjne, przerwa wzbroniona $> 5 \text{ eV}$ – umownie, całkowicie puste pasmo przewodnictwa)

Półprzewodnik niedomieszkowany (samoistny)



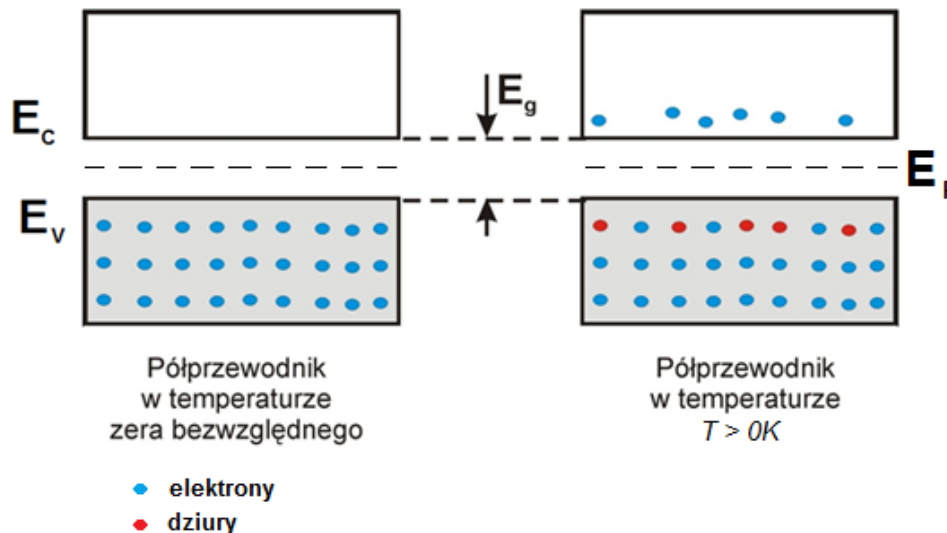
Rys. Schemat sieci krystalicznej dla półprzewodnika samoistnego w temperaturze 0K.



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).

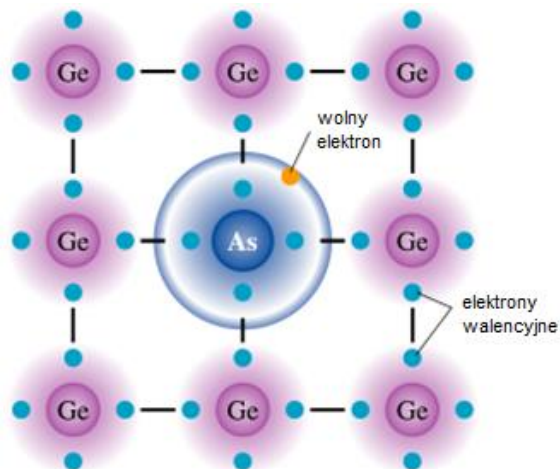
W półprzewodniku samoistnym koncentracje elektronów (n) i dziur (p) są jednakowe i równe koncentracji samoistnej n_i :

$$n = p = n_i$$



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.

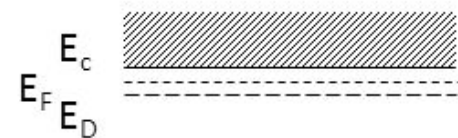
Półprzewodnik domieszkowy - donorowy (typu n)



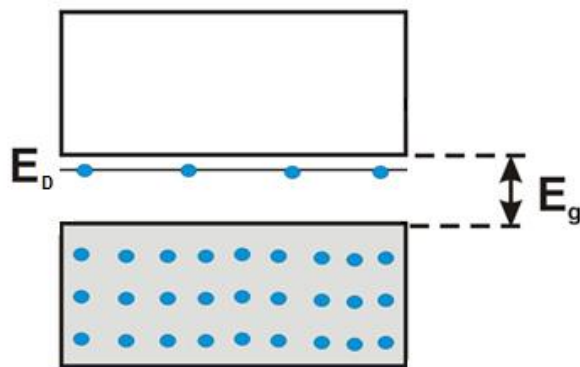
Rys. Schemat sieci krystalicznej dla półprzewodnika donorowego w temperaturze 0K.

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						

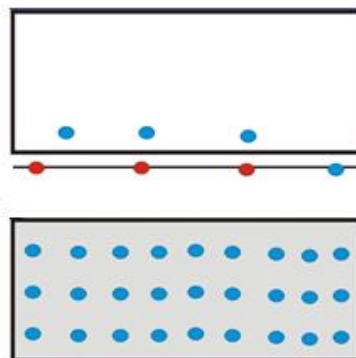
Półprzewodnik donorowy: np. german (Ge) domieszkowany arsenem (As).



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



Półprzewodnik
w temperaturze
zera bezwzględnego

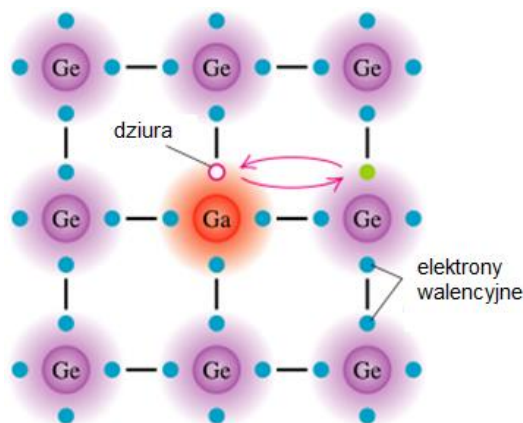


Półprzewodnik
w temperaturze
 $T > 0K$

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.

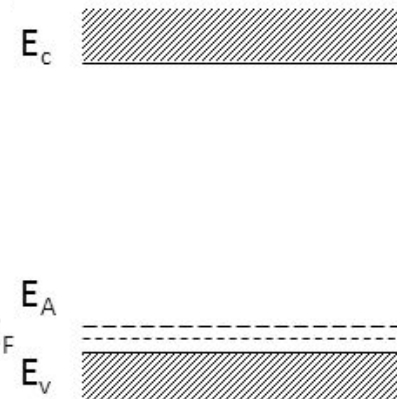
Półprzewodnik domieszkowy - akceptorowy (typu p)



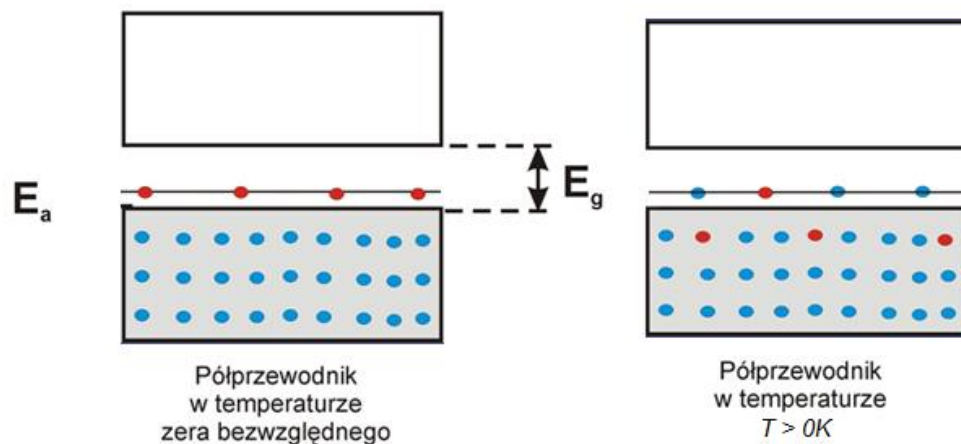
Rys. Schemat sieci krystalicznej dla półprzewodnika akceptorowego w temperaturze 0K.

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.

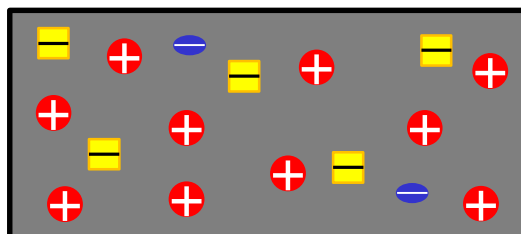


Elektrony w takim półprzewodniku są nośnikami mniejszościowymi, a dziury – większościowymi.

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.

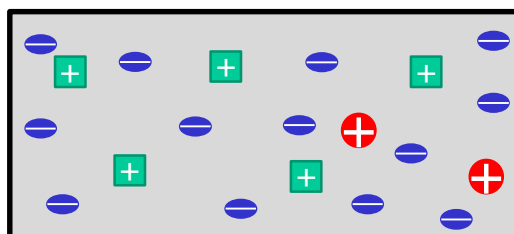
Złącze p - n – tworzenie się złącza

Typ p



E_c

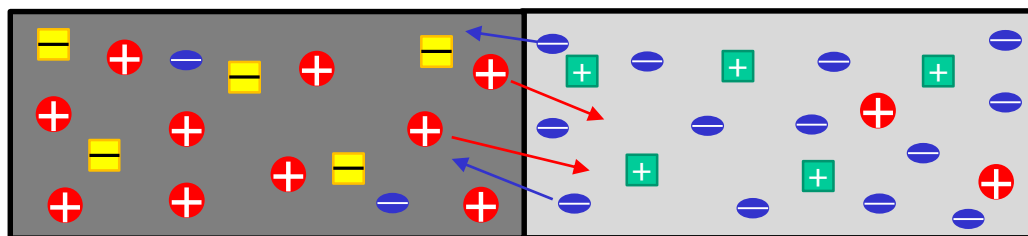
Typ n



E_c
 E_F
 E_D

E_A
 E_F
 E_v

E_v



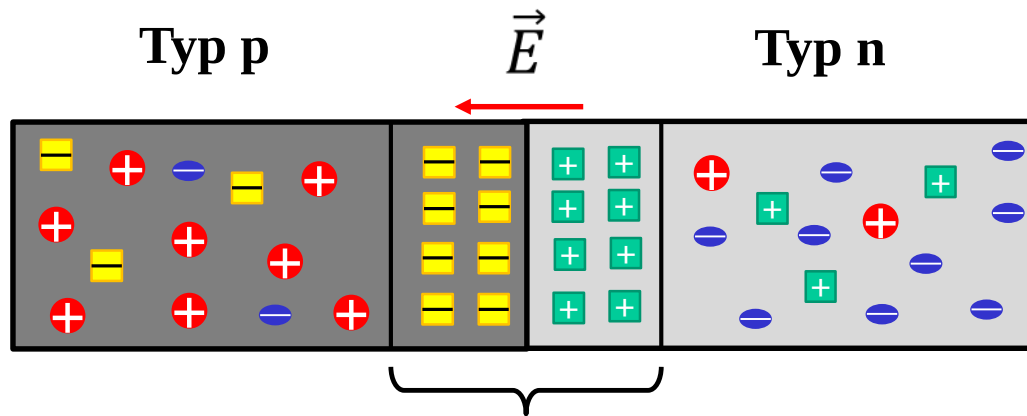
Oznaczenia:

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

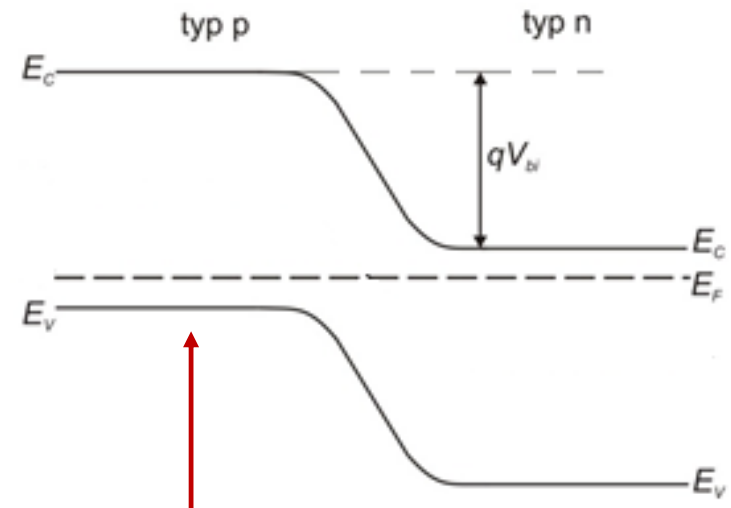
W półprzewodniku typu n występują następujące ładunki: nieruchome, dodatnie jony domieszki donorowej; ruchome elektrony będące nośnikami większościowymi oraz pojedyncze, ruchome dziury pełniące rolę nośników mniejszościowych. W przypadku półprzewodnika typu p wyróżnia się: nieruchome, ujemne jony domieszki 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.



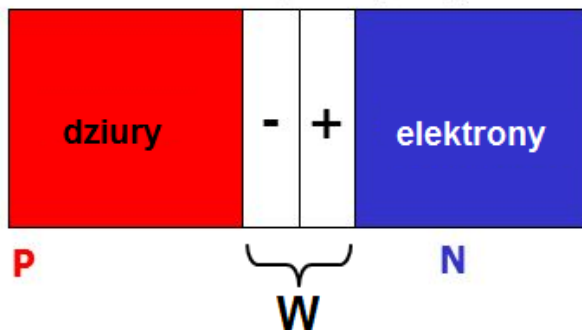
Obszar zubożony / warstwa ładunku przestrzennego (tylko dodatnio naładowane donory/ ujemnie naładowane akceptory)



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

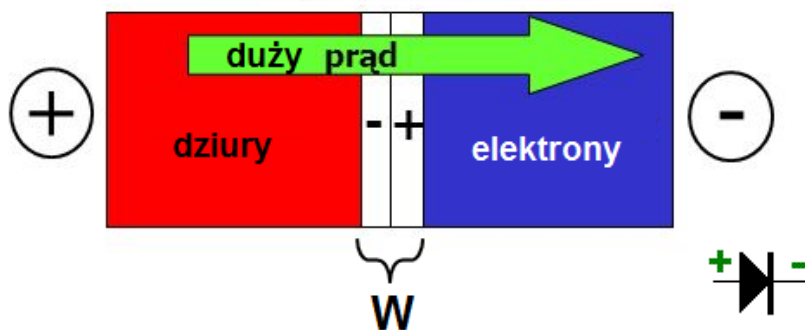
Spolaryzowane złącze p - n

Bez polaryzacji

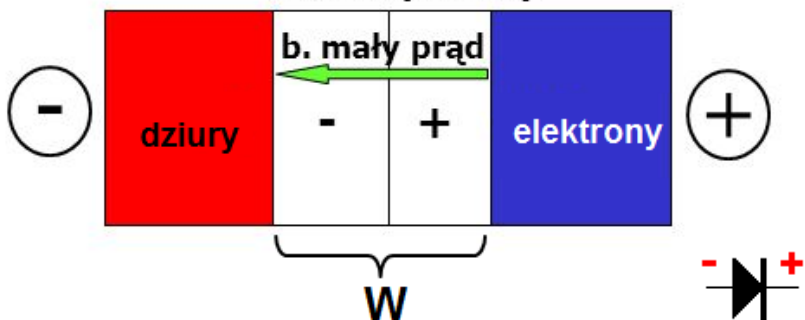


A – anoda
K – katoda

kier. przewodzenia

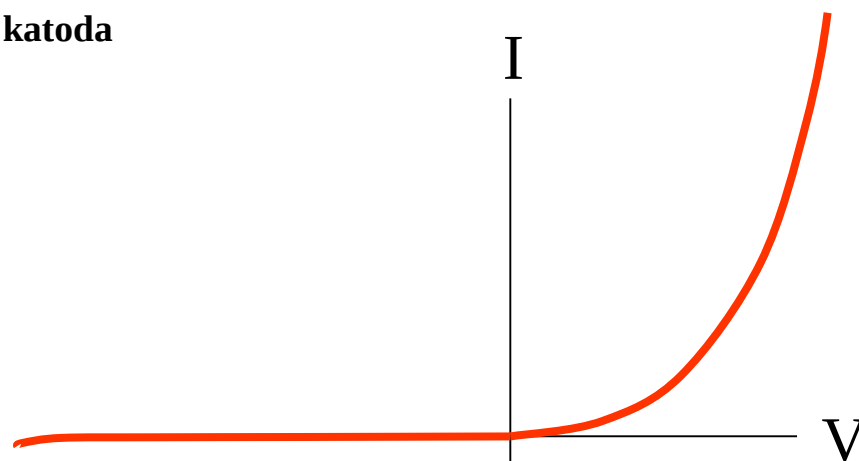


kier. zaporowy



Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza p - n
(diody półprzewodnikowej)

Polaryzacja w kier. przewodzenia



Polaryzacja w kier. zaporowym

W – szerokość obszaru zubożonego

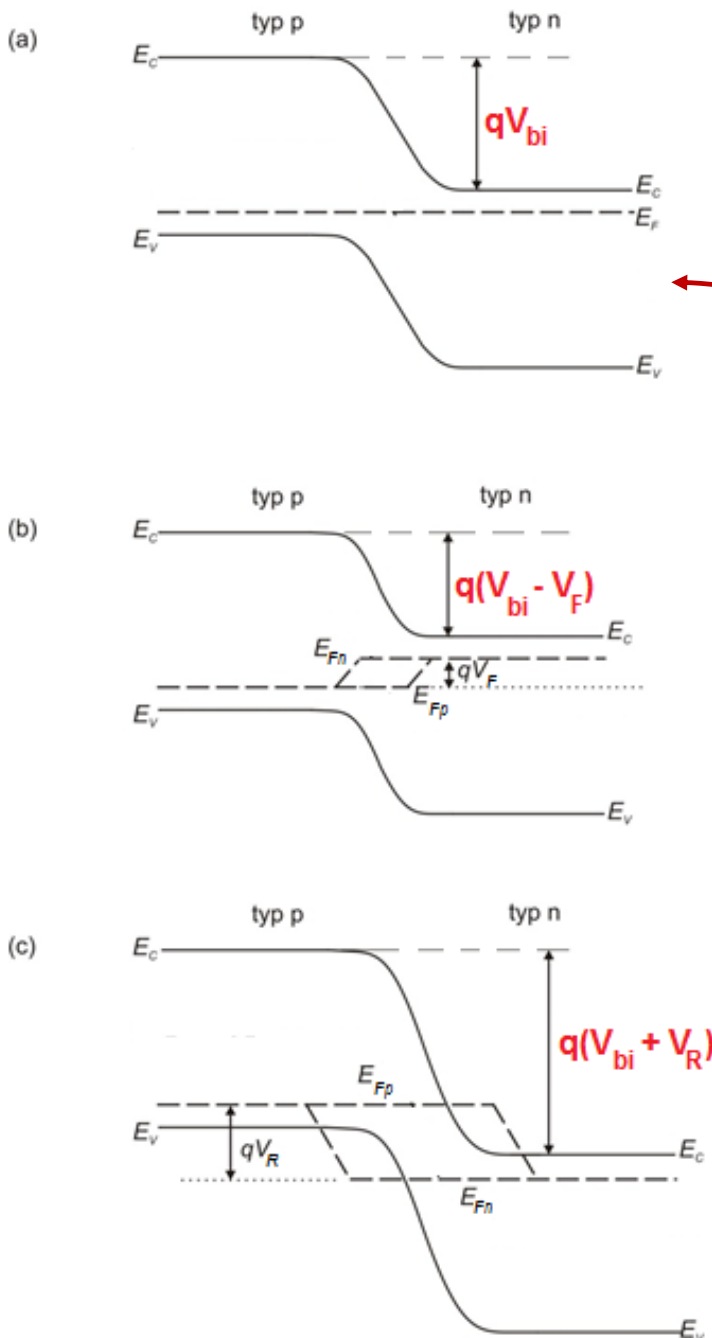
Spolaryzowane złącze $p-n$ – c.d.

Rys. Diagramy pasmowe złącza $p-n$:

(a) niespolaryzowanego,

(b) spolaryzowanego w kierunku przewodzenia,

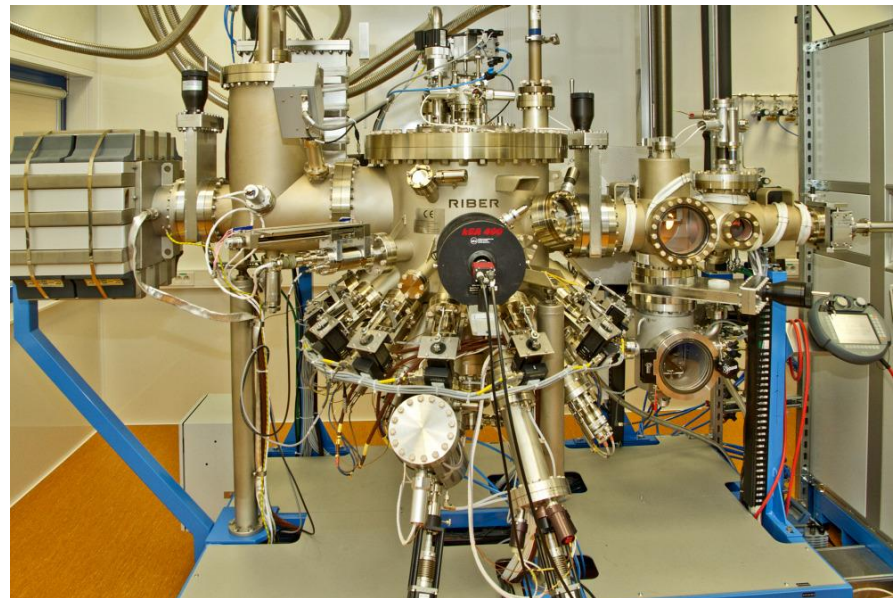
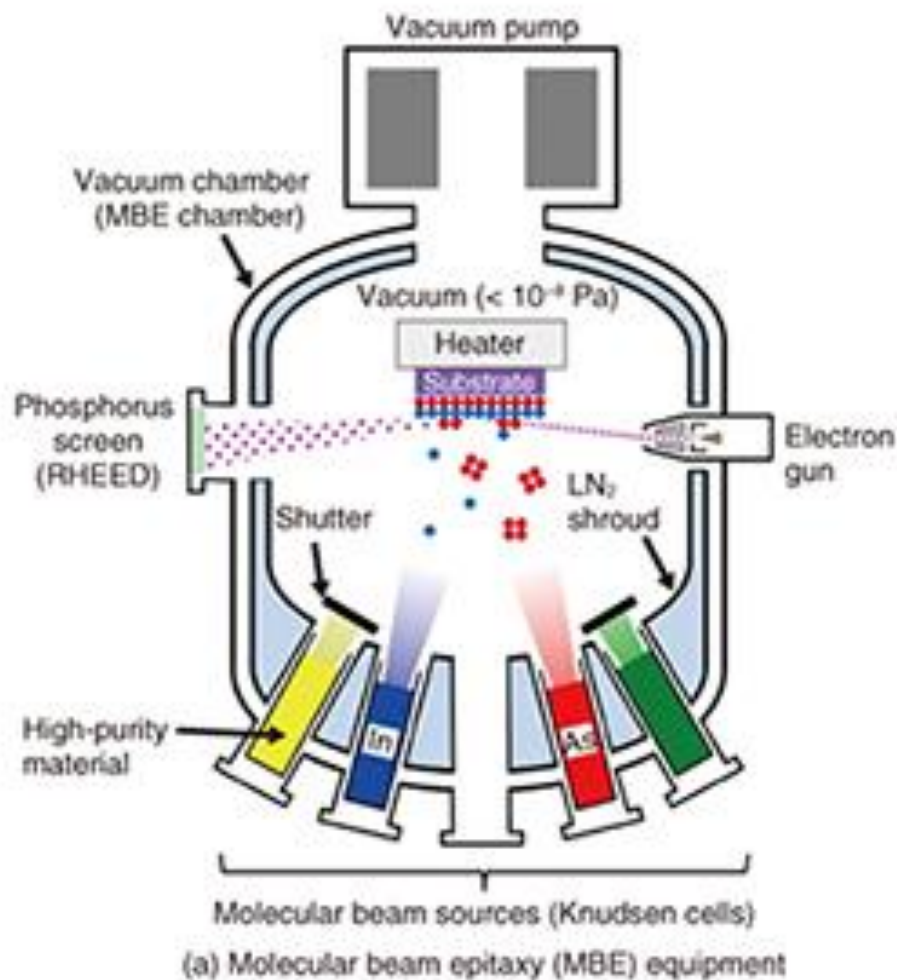
(c) spolaryzowanego w kierunku zaporowym.



W niespolaryzowanym złączu $p-n$ (Rys. (a)) prądy dyfuzyjne są równoważone przez prądy unoszenia i przez złącze nie płynie prąd. W przypadku polaryzacji o napięciu V_F w kierunku przewodzenia, zewnętrzne pole elektryczne jest skierowane przeciwnie do wbudowanego pola elektrycznego E wytworzonego w złączu $p-n$ (Rys. (b)). Wypadkowe pole elektryczne zmniejsza się co powoduje, że bariera potencjału obniża się i jest równa $q(V_{bi} - V_F)$. Szerokość obszaru zubożonego (W) jest mniejsza niż w przypadku niespolaryzowanego złącza $p-n$ (por. z rysunkiem na poprzednim slajdzie). Obniżenie bariery potencjału przyczynia się do zwiększenia prawdopodobieństwa przejścia nośników większościowych, co z kolei wpływa na **zwiększenie prądów dyfuzji elektronów i dziur**. Prądy unoszenia nośników mniejszościowych nie ulegają zmianie. Podczas polaryzacji złącza napięciem V_R w kierunku zaporowym (Rys. (c)), zewnętrzne pole elektryczne jest skierowane w tym samym kierunku co wbudowane pole E w złączu. Wypadkowe pole elektryczne zwiększa się powodując wzrost bariery potencjału do wartości $q(V_{bi} + V_R)$. Zwiększa się również szerokość obszaru zubożonego. Wzrost bariery potencjału zmniejsza prawdopodobieństwo przejścia nośników większościowych, czyli **zmniejsza wartość prądów dyfuzji elektronów i dziur**. Prądy unoszenia pozostają takie same.

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).

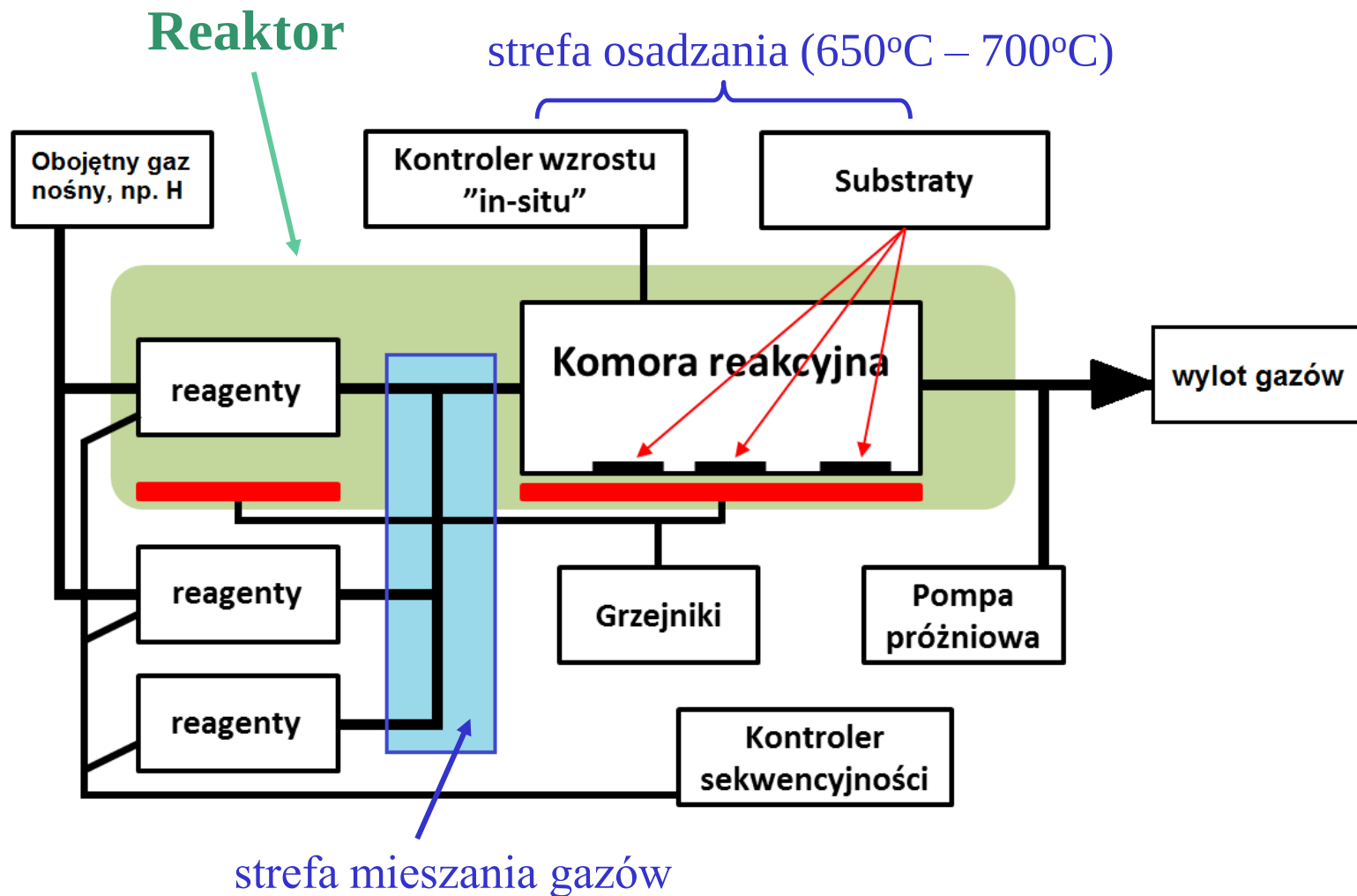


Technologia MBE:

- ✓ 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.

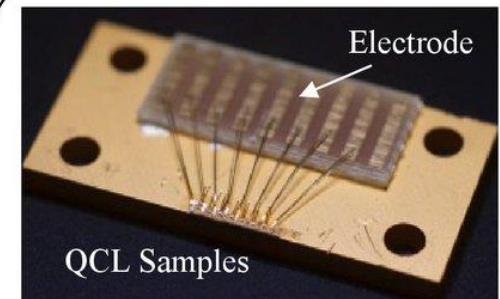
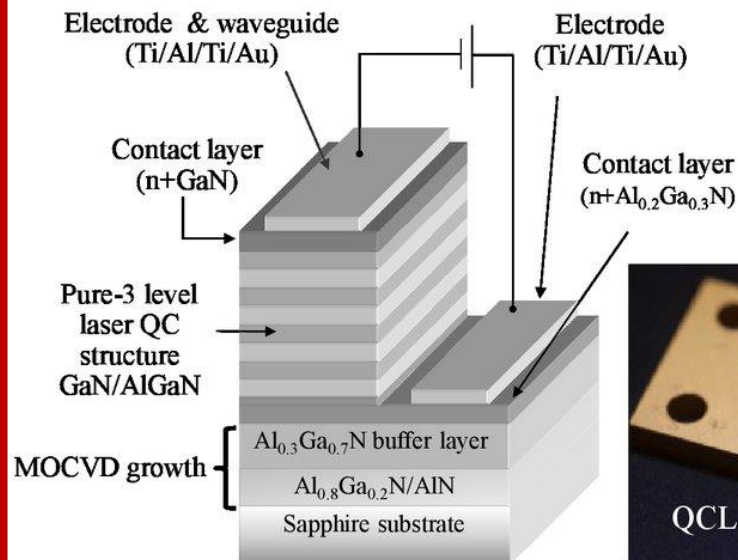


MOCVD



Zaleta technologii MOCVD
→ struktury epitaksjalne
dużego formatu

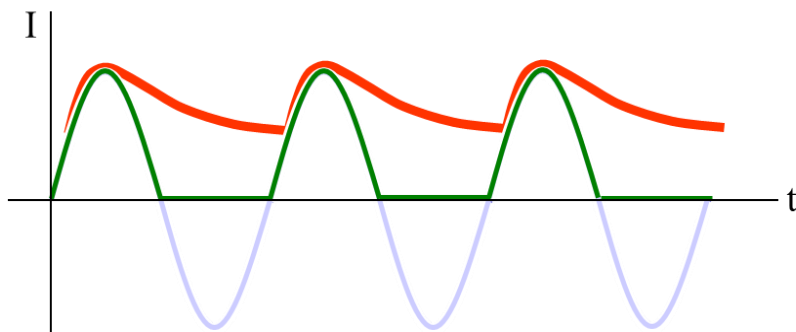
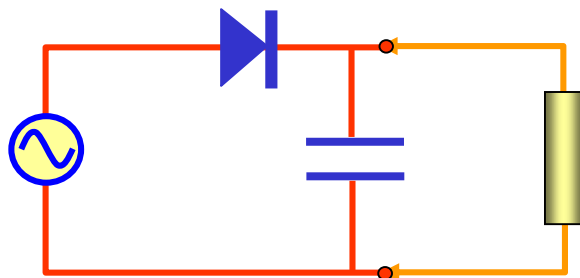
THz laser kaskadowy na
bazie GaN ze studniami
kwantowymi AlGaIn/GaN



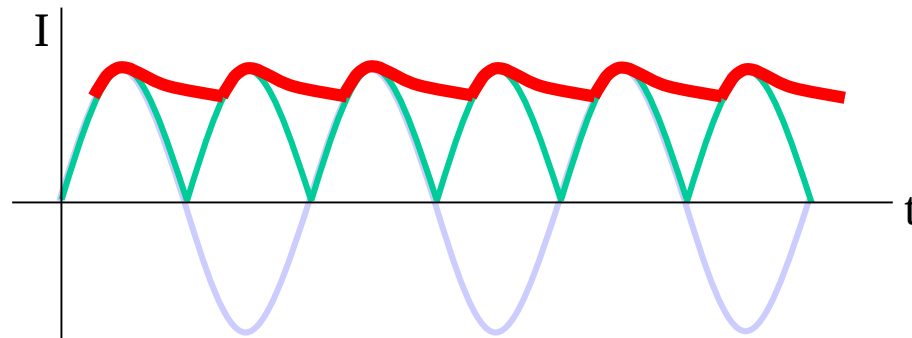
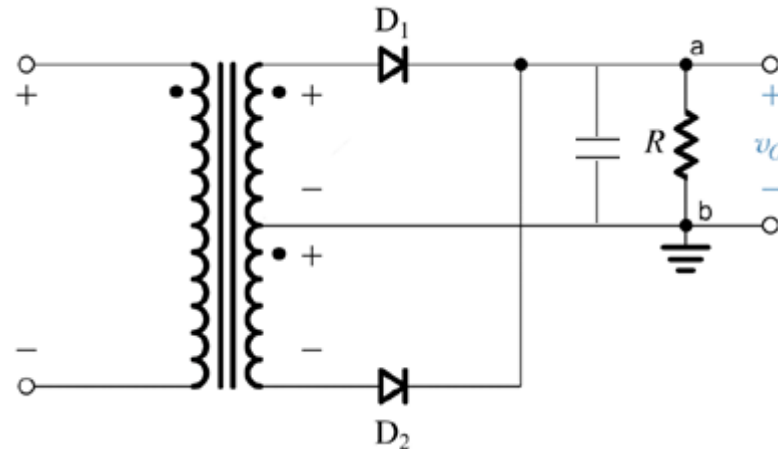
Złącze p-n (dioda półprzewodnikowa) – prostownik

- **Prostownik** – jest to układ, który zamienia prąd przemienny na prąd stały

➤ Prostownik jednopółwkowy



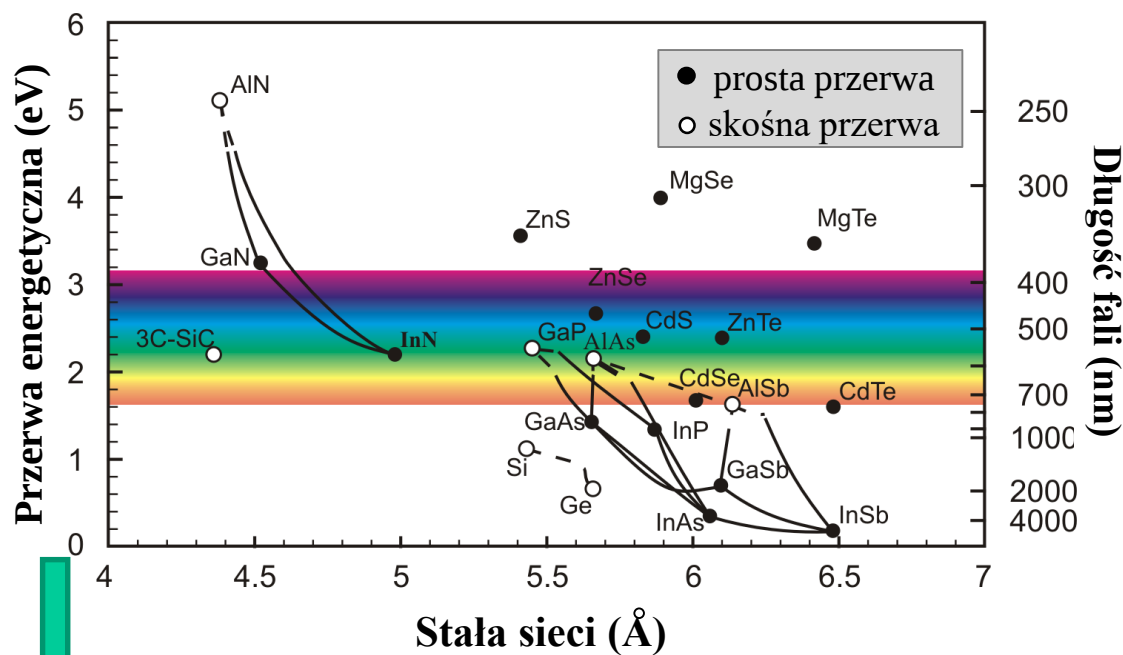
➤ Prostownik dwupółwkowy



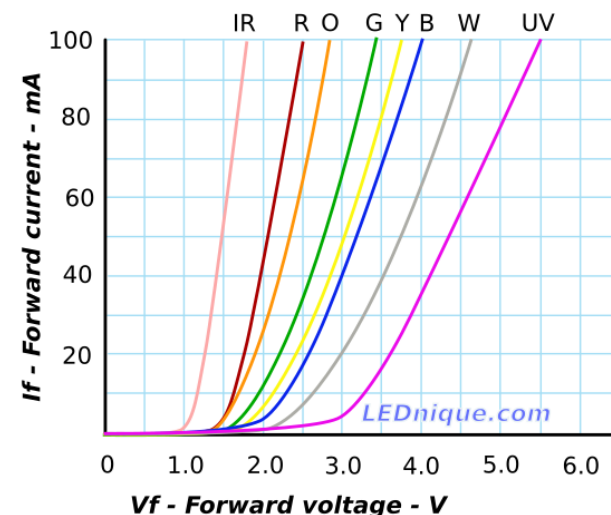
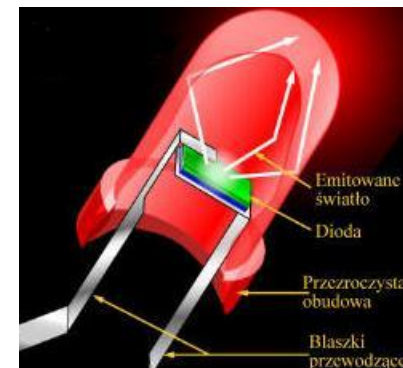
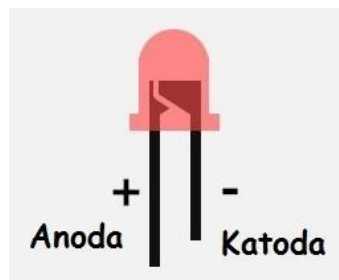
Rys. Przebieg prądu przemiennego na wyjściu prostownika jednopółwkowego (lewa strona) i dwupółwkowego (prawa strona). Przebieg **bez kondensatora** (zielona krzywa) i **z kondensatorem** (czerwona krzywa). Niebieski przebieg sinusoidalny – prąd przemienny na wejściu prostownika.

Dioda elektroluminescencyjna (LED)

Diody elektroluminescencyjne (ang. *light emitting diodes*, LED) – wykonywane są na bazie półprzewodnikowych złączy *p-n*. Działają w oparciu o zjawisko elektroluminescencji, tzn. przetwarzają energię elektryczną na energię promieniowania elektromagnetycznego. Barwa światła, które emitują diody LED, jak również długość fali, zależy od materiału półprzewodnikowego, z którego dioda jest wykonana.



$$E_g = \frac{hc}{\lambda}$$

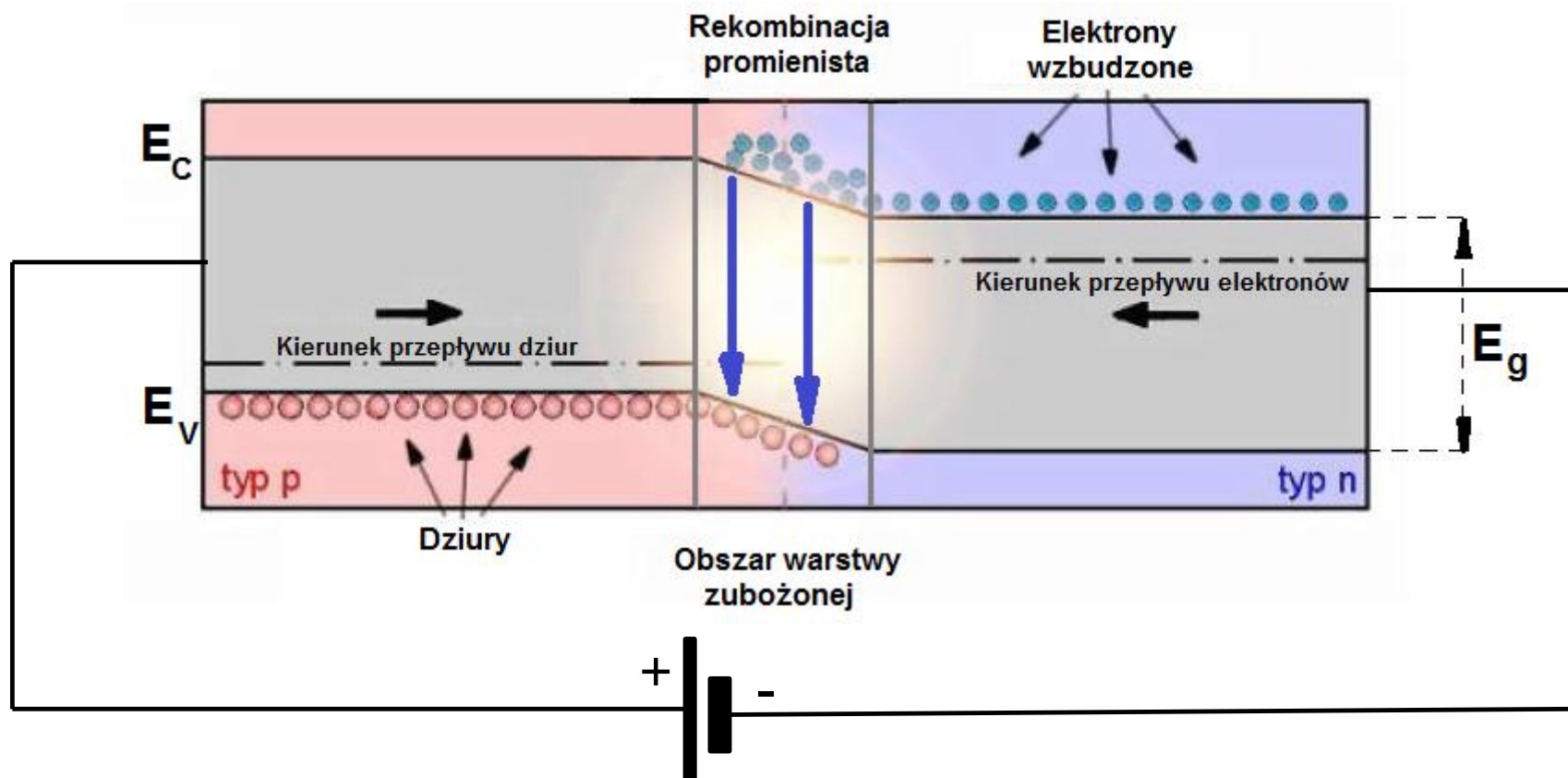


I_f – natężenie prądu w kierunku przewodzenia
 V_f – napięcie polaryzacji w kierunku przewodzenia

h – stała Plancka, c – prędkość światła, λ – długość fali

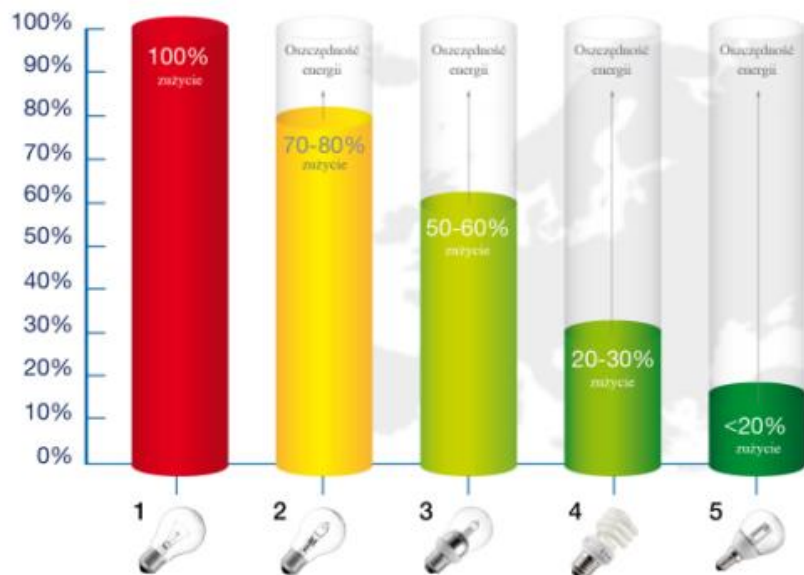
Dioda LED – zasada działania

Zjawisko elektroluminescencji, w oparciu o które działają diody LED, polega na wytwarzaniu światła pod wpływem pola elektrycznego (przy podłączeniu napięcia polaryzacji w kierunku przewodzenia). Elektroluminescencja zachodzi w wyniku **rekombinacji promienistej dziur i elektronów w obszarze warstwy zubożonej** złącza *p-n*. Przejściom elektronów z wyższego poziomu energetycznego na niższy towarzyszy wydzielenie energii w postaci światła.

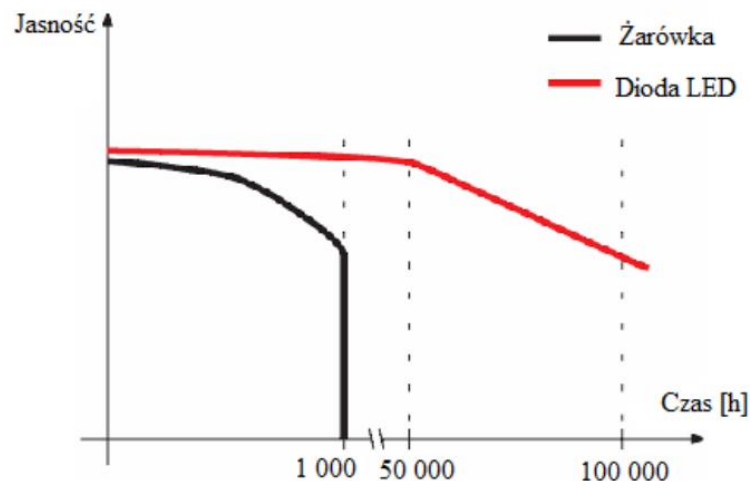


Diody LED – wybrane zalety i zastosowania

1. Energooszczędność



2. Czas życia



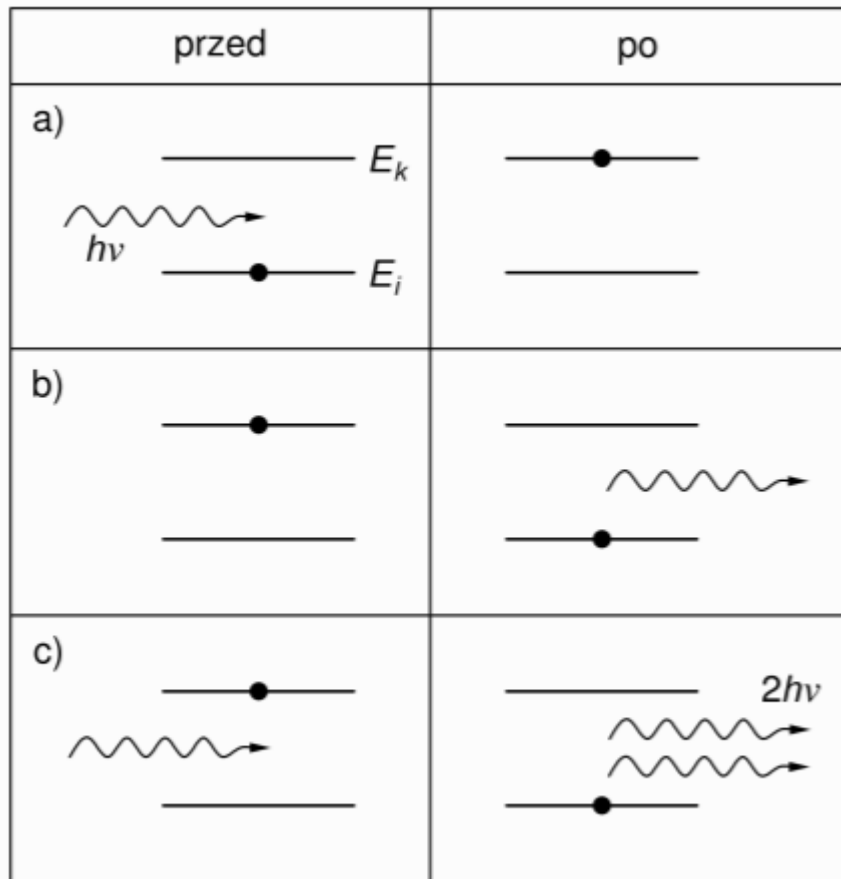
- 1: Tradycyjne żarówki
- 2: Ulepszone żarówki (klasa C na etykiecie efektywności energetycznej, lampa halogenowa z ksenonem)
- 3: Ulepszone żarówki (klasa B na etykiecie efektywności energetycznej, lampa halogenowa z powłoką IRC)
- 4: Kompaktowe lampy fluorescencyjne (CFL)
- 5: Diody LED

3. Zastosowania



<https://elektronikab2b.pl/raporty/16913-krajowi-dostawcy-diod-led-i-komponentow-zasilajacych>

Laser – zasada działania



Rys. Trzy elementarne procesy opisujące oddziaływanie fotonu z układem kwantowym: a) absorpcja, b) emisja spontaniczna, c) emisja wymuszona. Symbole: E_i – poziom o niższej energii, E_k – poziom o wyższej energii.

W procesie **absorpcji** (rys. a) padający foton o energii $h\nu$ znika, a jego energia idzie na przeniesienie elektronu z poziomu niższego o energii E_i na wyższy E_k .

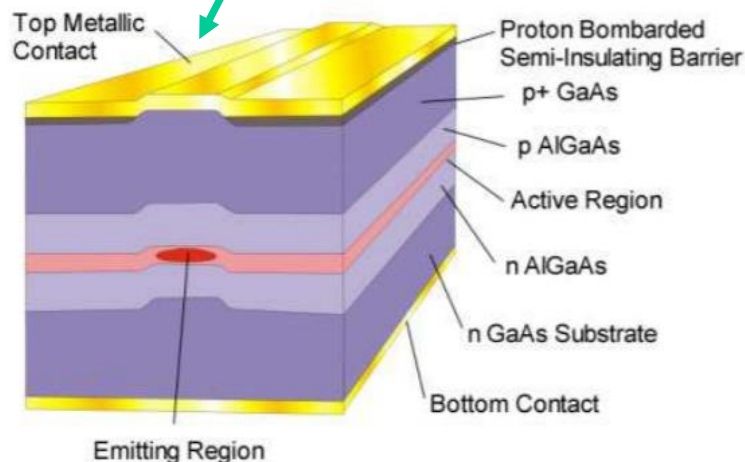
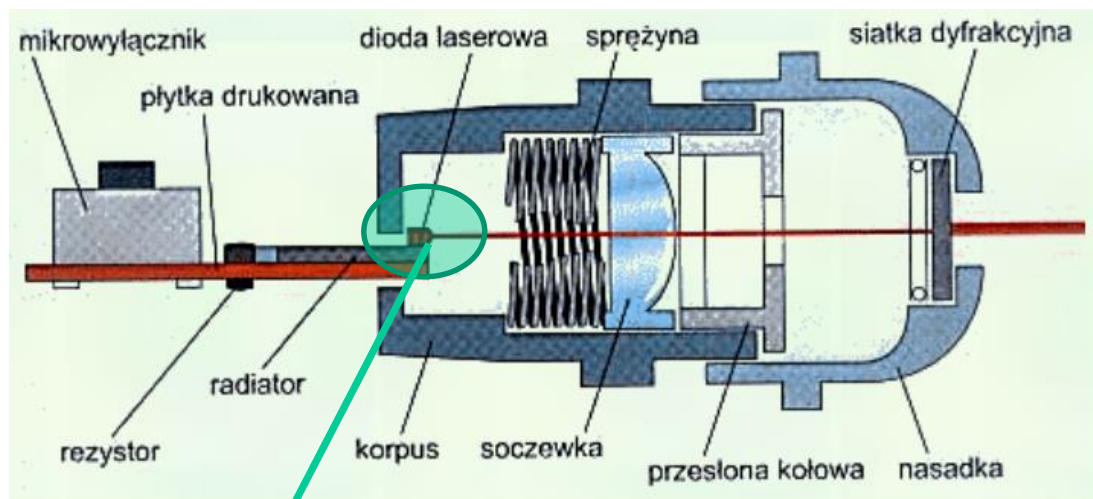
W procesie **emisji spontanicznej** (rys. b) elektron przechodzi z poziomu wyższego na niższy, a różnica energii jest wypromieniowana w formie fotonu.

Działanie lasera opiera się na zjawisku **emisji wymuszonej** (rys. c), w którym padający foton o energii $h\nu$ wymusza przejście układu kwantowego ze stanu o energii wyższej do niższej.

Warunek konieczny na wystąpienie akcji laserowej – **inwersja obsadzeń**, która mówi o tym, że **liczba elektronów w stanie o energii E_k musi być większa od liczby elektronów w stanie o energii E_i** . Uzyskanie stanu, dla którego zachodzi taka inwersja obsadzeń, jest możliwe kosztem energii dostarczonej z zewnątrz. Proces ten zwany jest potocznie **pompowaniem**.

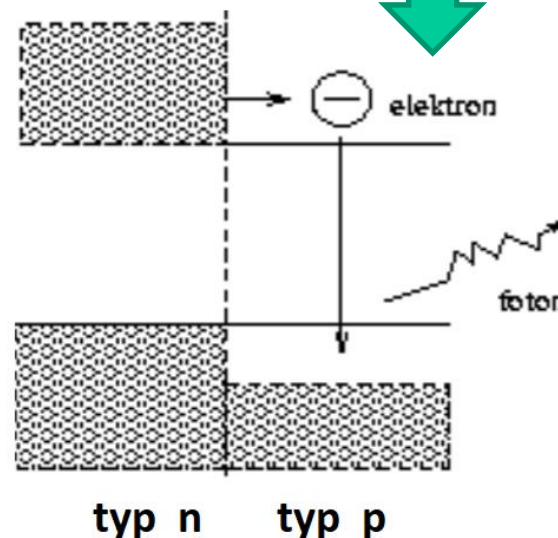
Istnieją dwa rodzaje pompowania w układach laserujących: *elektryczne* i *optyczne*.

Laser półprzewodnikowy – konstrukcja



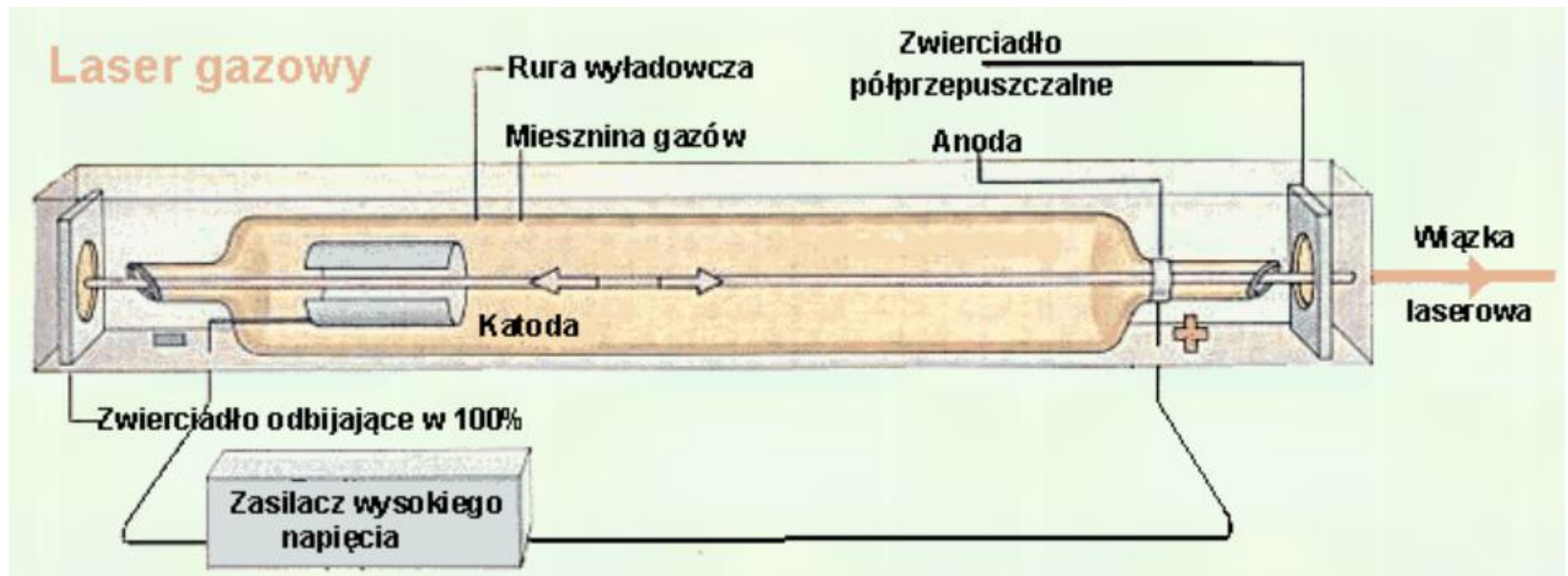
Rys. Przykład schematu budowy „medium” lasera półprzewodnikowego – tj. złącza p-n.

Inwersję obsadzeń poziomów energetycznych, uzyskuje się poprzez **wstrzykiwanie mniejszościowych nośników ładunku** do obszaru złącza p-n spolaryzowanego w kierunku przewodzenia.



stany energetyczne wypełnione elektronami

Dla porównania laser gazowy – konstrukcja



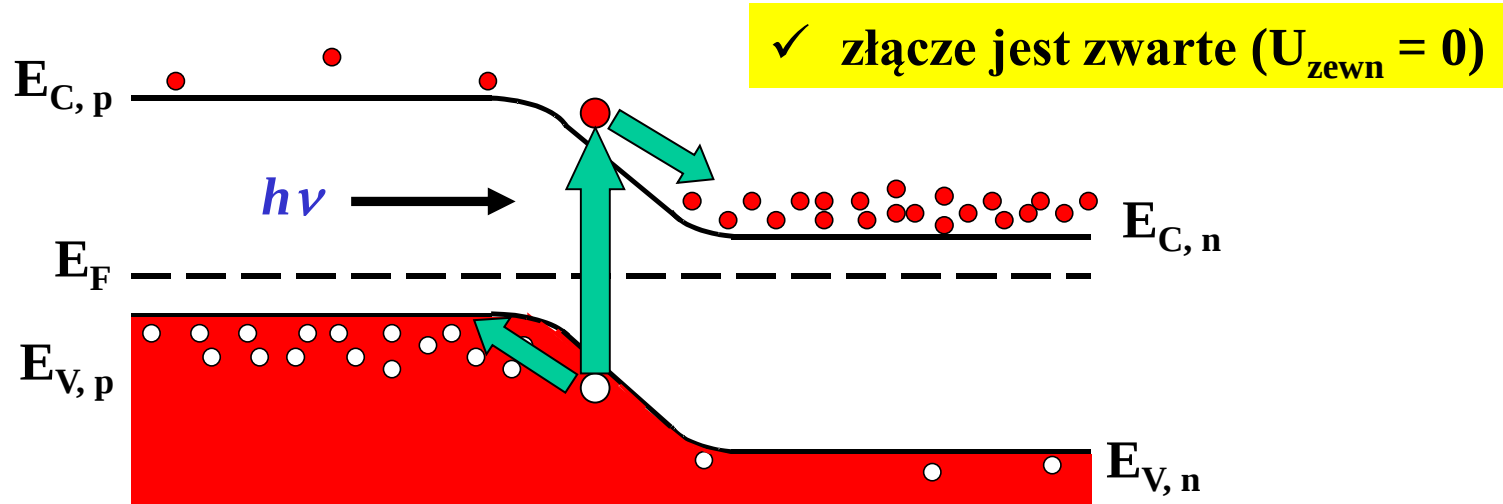
Wybrane zalety laserów półprzewodnikowych:

- Urządzenia wąskopasmowe (o bardzo małej szerokości linii emisyjnej);
- Emitują światło monochromatyczne - pojedynczego koloru o określonej długości fali świetlnej;
- Duża wydajność oraz moc;
- Emitują światło koherentne, spójne w czasie i przestrzeni;
- Małe gabaryty w porównaniu z innymi laserami, np. gazowymi



Fotodioda – zasada działania

Fotodioda jest urządzeniem półprzewodnikowym, w którym zachodzi proces zamiany energii świetlnej fotonów padających na nią w energię elektryczną. Podstawą działania fotodiody jest efekt fotowoltaiczny. Poniżej przedstawiono na czym polega ten efekt w półprzewodnikowym złączu *p-n*.



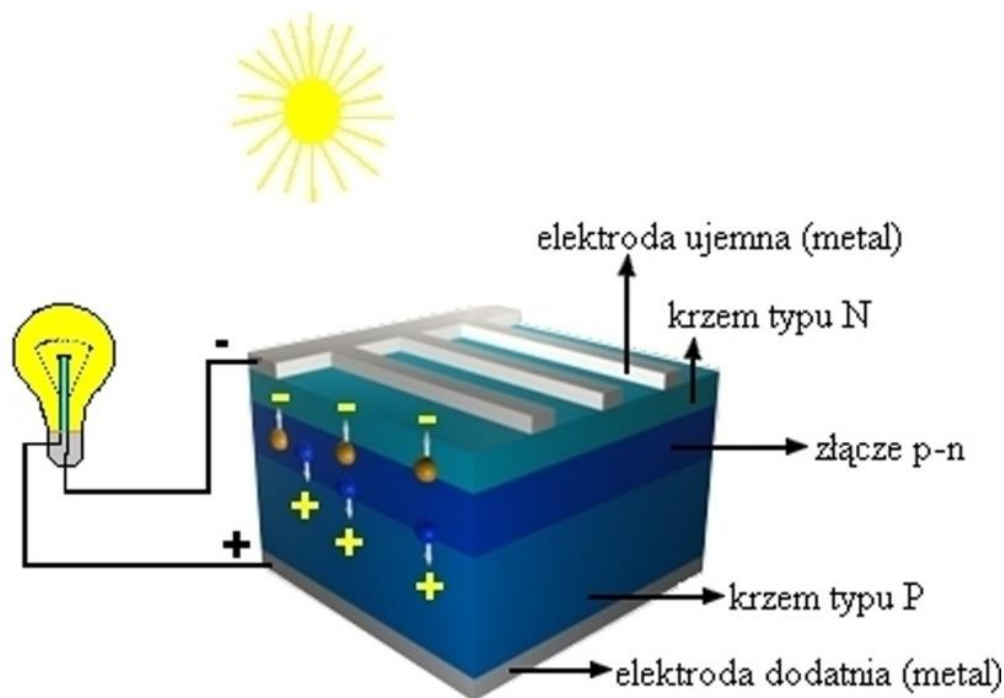
- Padające na fotodiode światło jest absorbowane dla energii $h\nu \geq E_g$.
- W obszarze warstwy zubożonej tworzą się nośniki mniejszościowe, tj. pary elektron-dziura, które są separowane przez wbudowane pole elektryczne w złączu.
- Nośniki mniejszościowe są transportowane przez złącze i powodują wzrost prądu wstecznego, jeśli obwód zewnętrzny złącza jest zwarty. Powstaje wówczas tzw. prąd zwarcia (I_{sc}).
- Jeśli złącze jest rozwarte, to na jego krańcach pojawia się różnica potencjałów – tj. napięcie rozwarcia (V_{oc}).
- To jest właśnie efekt fotowoltaiczny: po oświetleniu złącza można uzyskać źródło prądu lub napięcia, czyli źródło energii elektrycznej.

Ogniwo słoneczne – zasada działania

- Przyrząd, który zamienia energię słoneczną w energię elektryczną:

$$P = I_{sc} \times V_{oc} = I^2 \times R = U^2/R$$

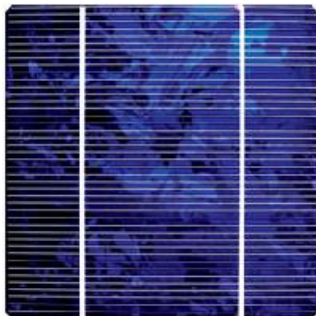
- Można porównywać go do baterii, bo dostarcza mocy prądu stałego.
- Różni się od baterii tym, że napięcie, które wytwarza zależy od oporności obciążenia R.



Baterie słoneczne

I Generacji - Krzemowe (Si)

- Monokrystaliczny Si
- Poli-(multi) krystaliczny Si



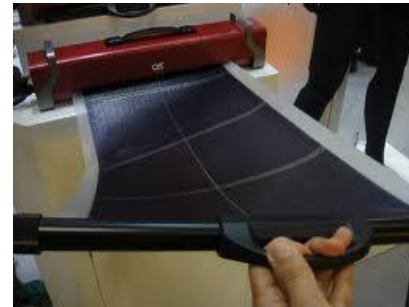
II Generacji - Cienkowarstwowe

- Tellurek kadmu (CdTe)
- CIGS (Cu-In-Ga-Se)
- Amorficzny Si



III Generacji

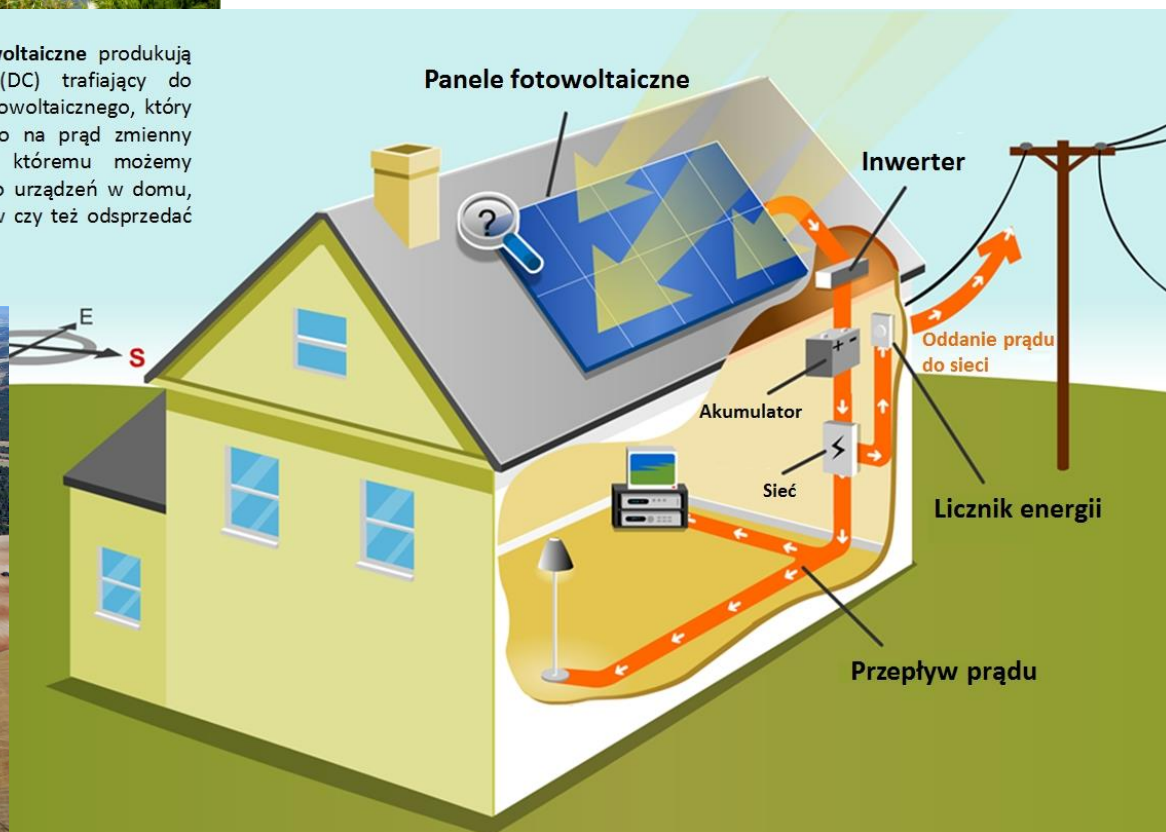
- Ogniwa wielozłączowe
- Ogniwa polimerowe i organiczne
- Na nanorurkach węglowych
- Z kropkami kwantowymi
- Barwnikowe



Baterie słoneczne – zastosowania



Panele fotowoltaiczne produkują prąd stały (DC) trafiający do inwertera fotowoltaicznego, który przemienia go na prąd zmienny (AC), dzięki któremu możemy używać go do urządzeń w domu, akumulatorów czy też odsprzedać go do sieci.

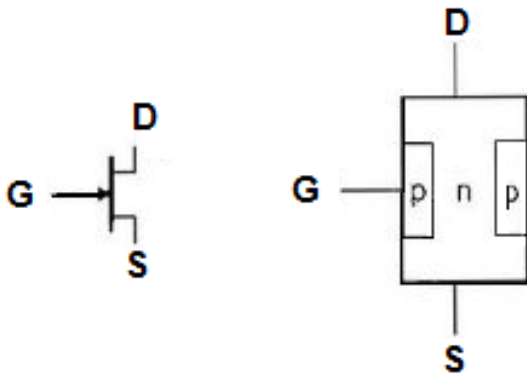


Wybrane przyrządy półprzewodnikowe - tranzystor polowy JFET

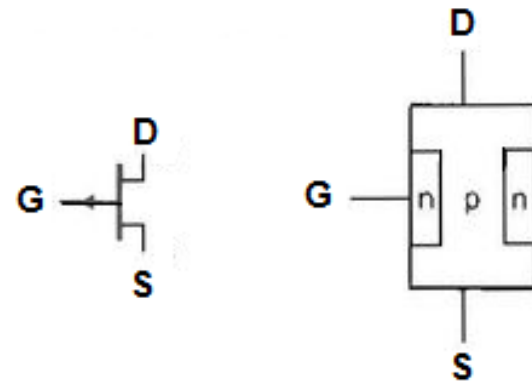


Tranzystor polowy JFET (ang. *Junction Field Effect Transistor*) – przyrząd półprzewodnikowy, w którym sterowanie prądem odbywa się za pomocą pola elektrycznego (napięcia). Tranzystor polowy JFET składa się z warstwy półprzewodnika typu n (tranzystor z kanałem typu n) lub typu p (tranzystor z kanałem typu p) oraz wbudowanej w nią, silnie domieszkowanej warstwy półprzewodnika przeciwnego typu (odpowiednio p lub n). Tak więc tranzystor zbudowany jest na bazie złącza n - p - n lub p - n - p . Na zewnątrz obudowy wyprowadzone są trzy końcówki: **dren** (ang. drain, ozn. D); **źródło** (ang. source, ozn. S) oraz **bramka** (ang. gate, ozn. G)

(a) Tranzystor z kanałem typu n

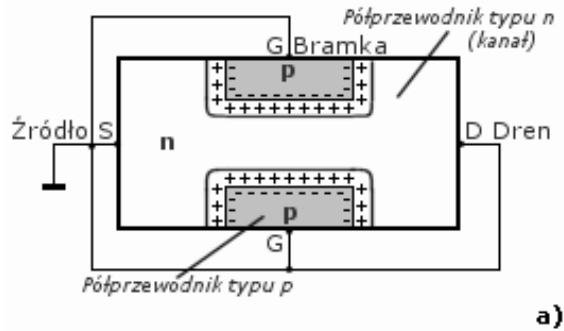


(b) Tranzystor z kanałem typu p

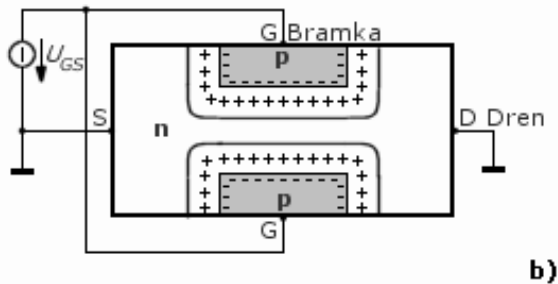


Rys. Symbole graficzne i budowa tranzystorów JFET.

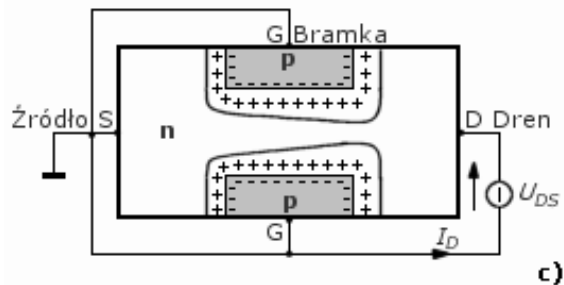
Tranzystor polowy JFET – zasada działania



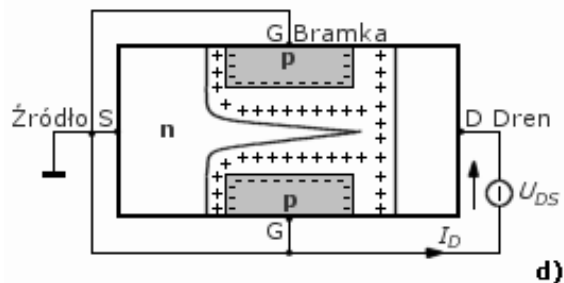
Rys. a) Obszar półprzewodnika występujący między drenem (D) i źródłem (S) stanowi kanał, przez który płynie prąd. Zmianę przekroju kanału uzyskuje się przez rozszerzenie lub zwężenie warstwy zubożonej złącza p - n , a więc przez zmianę **napięcia bramka-źródło (U_{GS})** polaryzującego to złącze w kierunku zaporowym.



Rys. b) Pod wpływem napięcia U_{GS} szerokość warstwy zubożonej zwiększy się, z kolei przekrój kanału zmniejszy się. Łatwo można sobie wyobrazić, że dalsze zwiększanie napięcia U_{GS} w kierunku zaporowym spowoduje, że warstwy zubożone połączą się i kanał zostanie zamknięty.

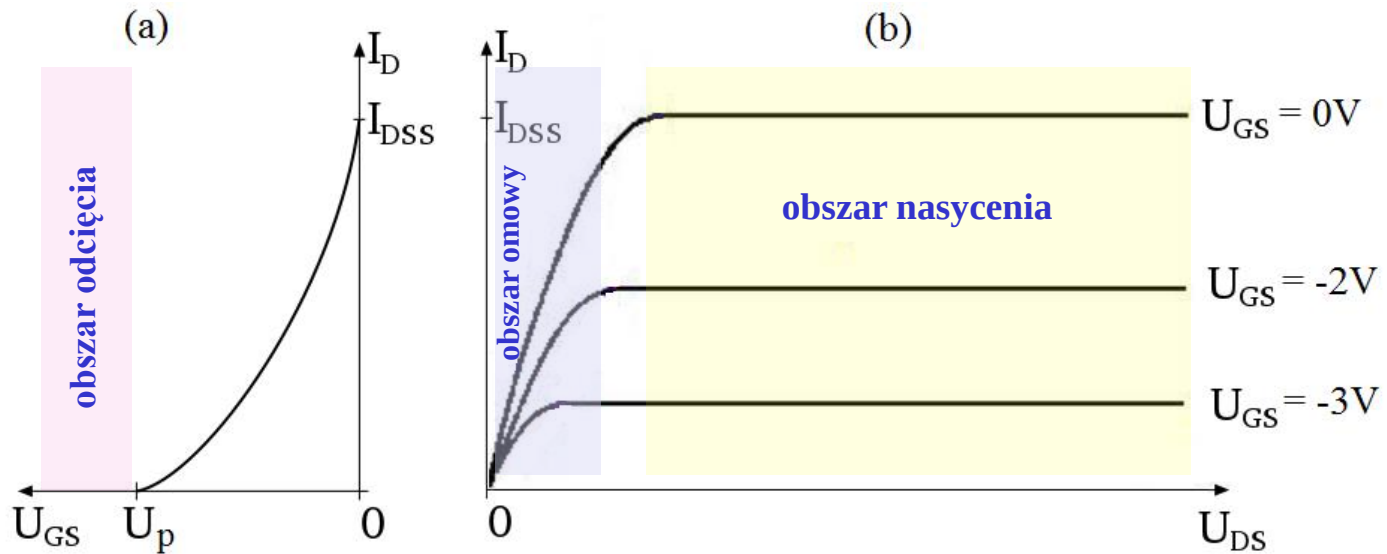


Rys. c) Gdy doprowadzone jest **napięcie dren-źródło (U_{DS})**, przy zachowaniu tego samego napięcia U_{GS} , w pobliżu drenu warstwa zaporowa jest szersza niż w pobliżu źródła. Jest to spowodowane tym, że złącze p - n wzdłuż kanału jest polaryzowane różnymi napięciami.



Rys. d) Dalszy wzrost napięcia U_{DS} powoduje dalsze rozszerzanie warstwy zubożonej aż do zamknięcia kanału, co powoduje stan nasycenia. W takiej sytuacji dalszy wzrost napięcia U_{DS} nie będzie powodował praktycznie dalszego wzrostu **prądu drenu I_D** .

Charakterystyki tranzystora polowego JFET



Rys. (a) Charakterystyka przejściowa tranzystora JFET, U_p – napięcie odcięcia, (b) charakterystyki wyjściowe tranzystora JFET, I_{DSS} – prąd nasycenia.

Obszary pracy tranzystora JFET:

- **obszar odcięcia:** tranzystor jest wyłączony. Nie ma przepływu prądu ($I_D = 0$) przez kanał. Dzieje się to przy napięciu bramka-źródło $U_{GS} > U_p$
- **obszar nasycenia (aktywny):** tranzystor jest włączony. Prąd drenu osiąga stan nasycenia (I_{DSS}), tzn. jest niezależny od napięcia U_{DS} , jest kontrolowany przez napięcie U_{GS} . W tym obszarze tranzystor może pracować jako wzmacniacz
- **obszar omowy:** tranzystor jest włączony ale pracuje jak rezystor o oporności kontrolowanej napięciem. Dzieje się to wówczas, gdy napięcie U_{DS} jest mniejsze niż w obszarze aktywnym. Prąd drenu jest proporcjonalny do napięcia U_{DS} i jest kontrolowany przez napięcie bramki U_{GS} .

Tranzystory – wybrane zalety i zastosowania

➤ Zalety

- duża rezystancja wejściowa, co wiąże się z potrzebą niewielkiej mocy do sterowania tranzystorem
- małe wymiary

➤ Zastosowania

- wzmacniacze tranzystorowe: różnicowe, operacyjne, selektywne, szerokopasmowe, elektroakustyczne, mocy
- generatory
- przełączniki
- bramki logiczne
- pamięci półprzewodnikowe
- kluczowy element wielu układów elektronicznych

