

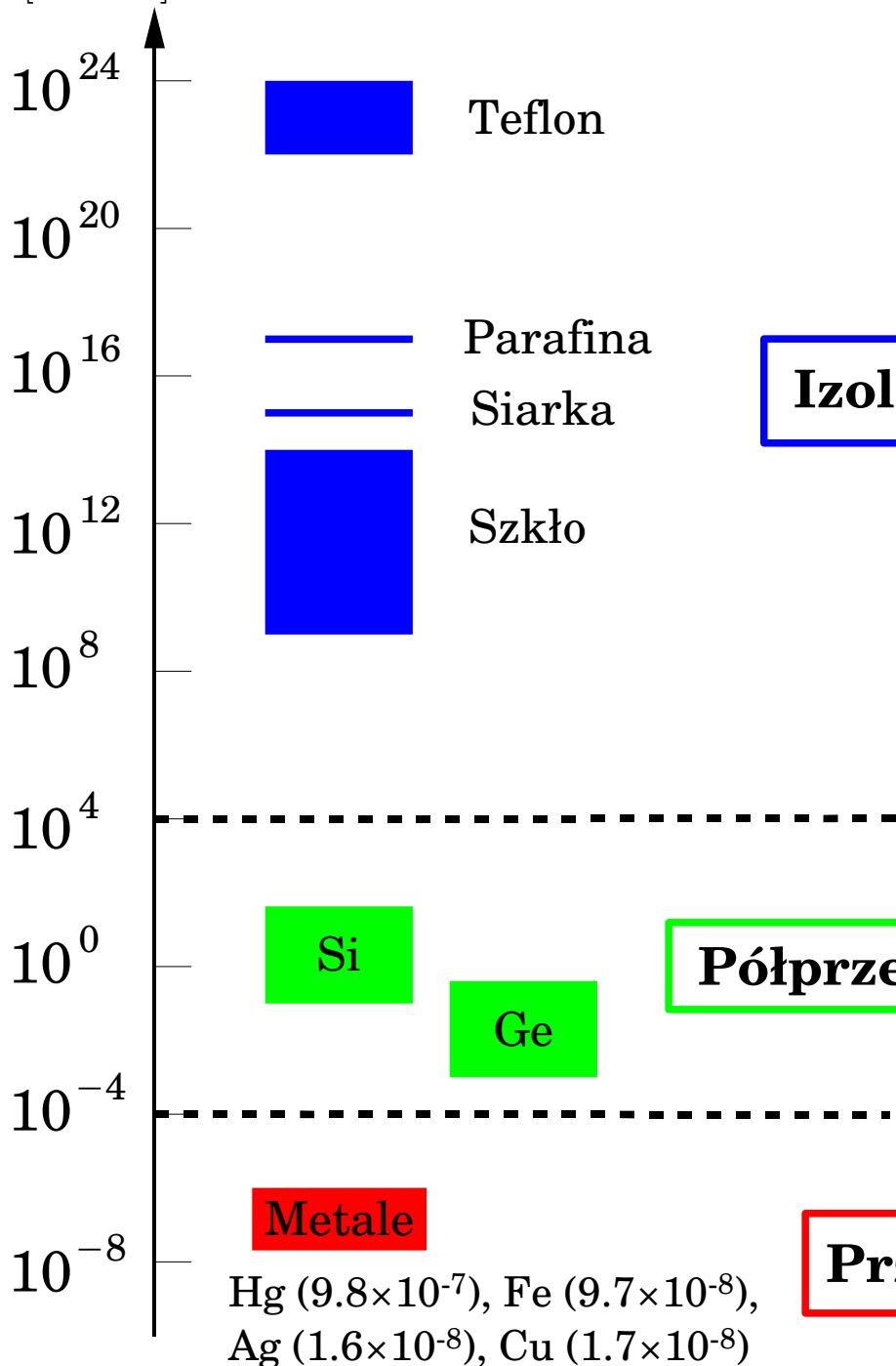
WSTĘP DO ELEKTRONIKI

Część V

Elementy półprzewodnikowe – diody, tranzystory

Przewodnictwo elektryczne ciał stałych

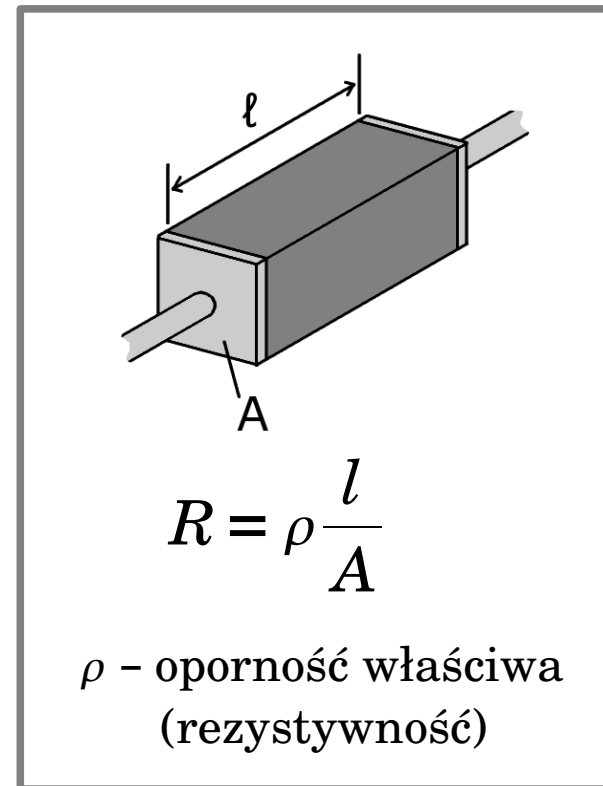
ρ [Ωm]



Izolatory

Półprzewodniki

Przewodniki



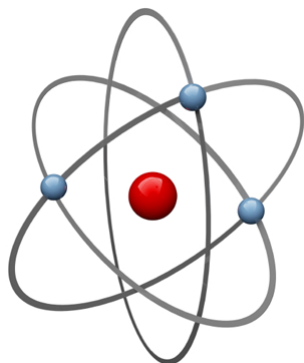
Rezystywność półprzewodników:

- silnie zależy od zanieczyszczeń
- maleje z temperaturą

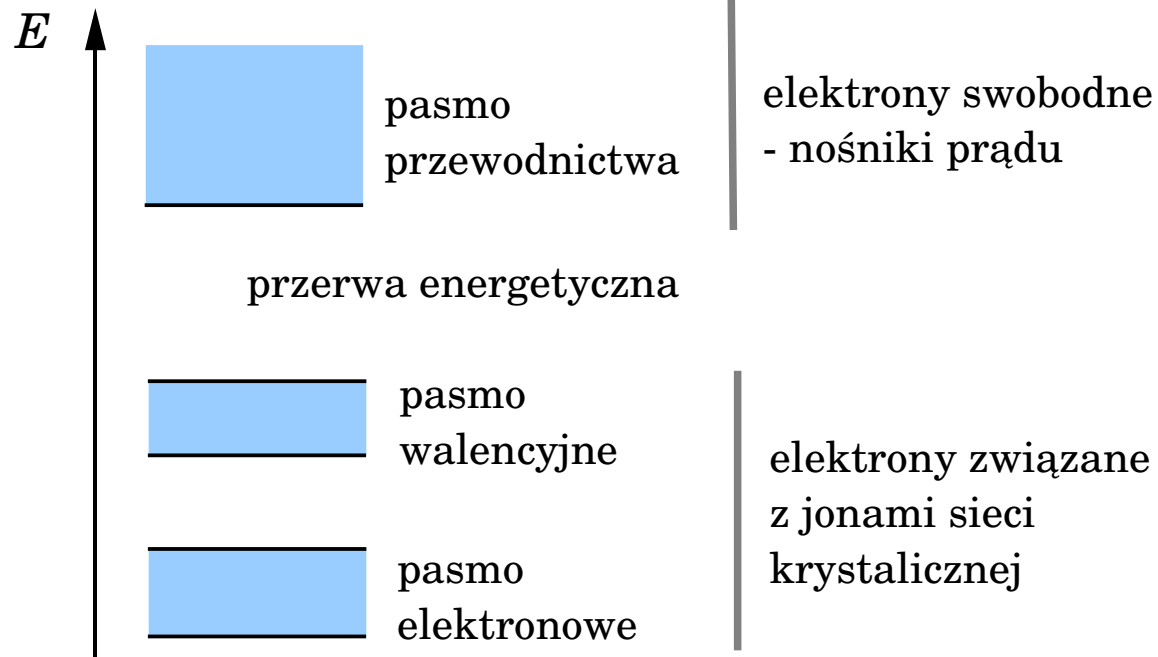
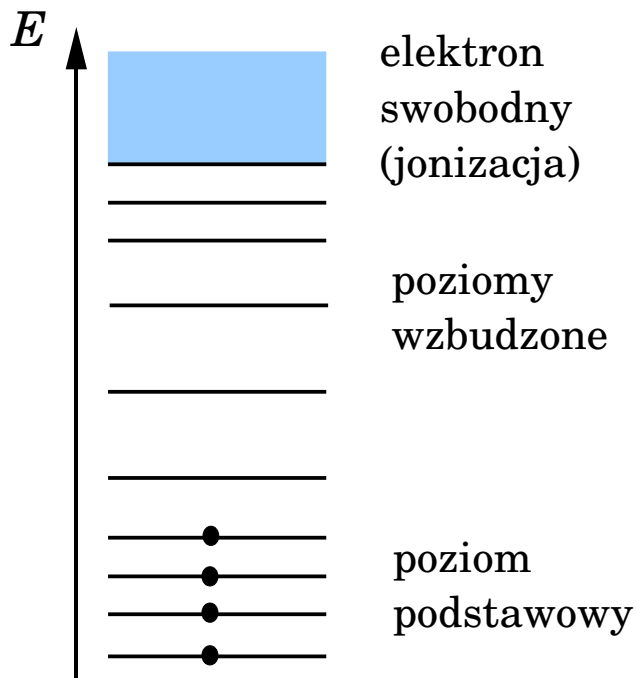
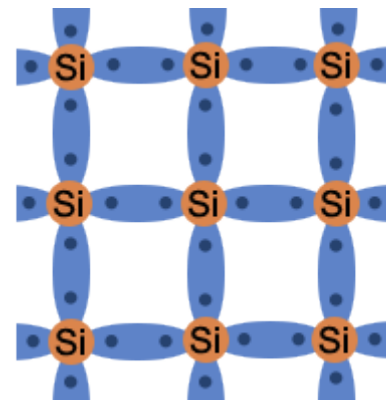
Rezystywność metali
rośnie z temperaturą

Poziomy energetyczne elektronów w kryształach

ATOM



KRYSTAŁ



Dyskretne wartości energii elektronów w atomach (poziomy energetyczne)

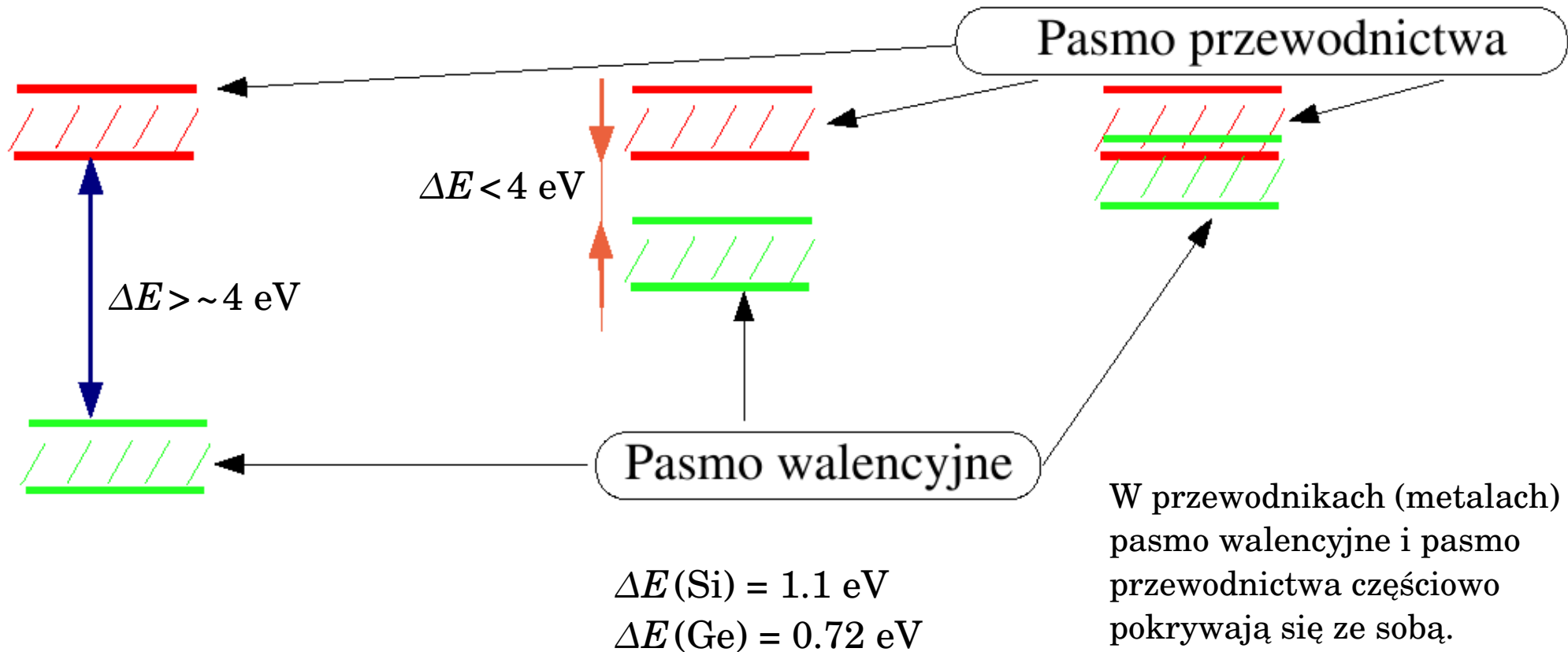
W kryształach poziomy energetyczne ulegają modyfikacji do postaci pasm energii.

Rodzaje materiałów krystalicznych

IZOLATORY

PÓŁPRZEWODNIKI

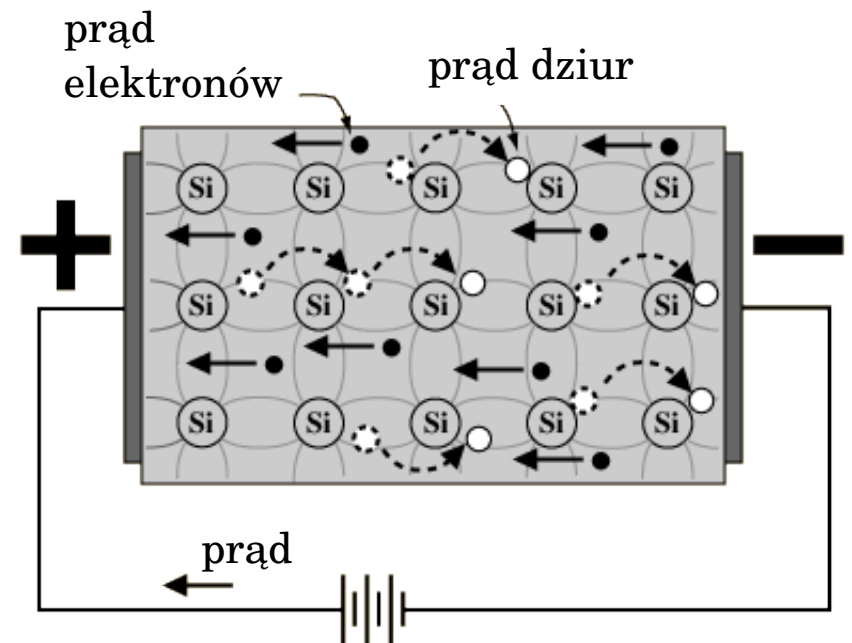
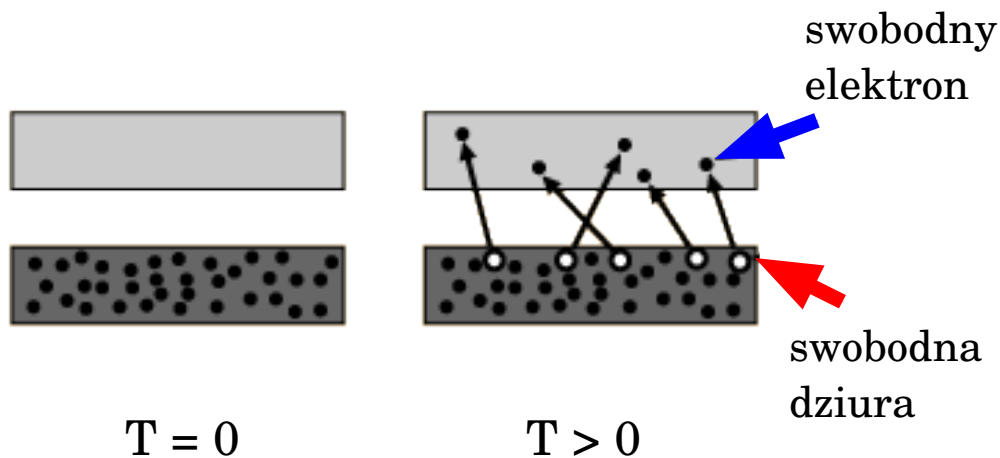
PRZEWODNIKI



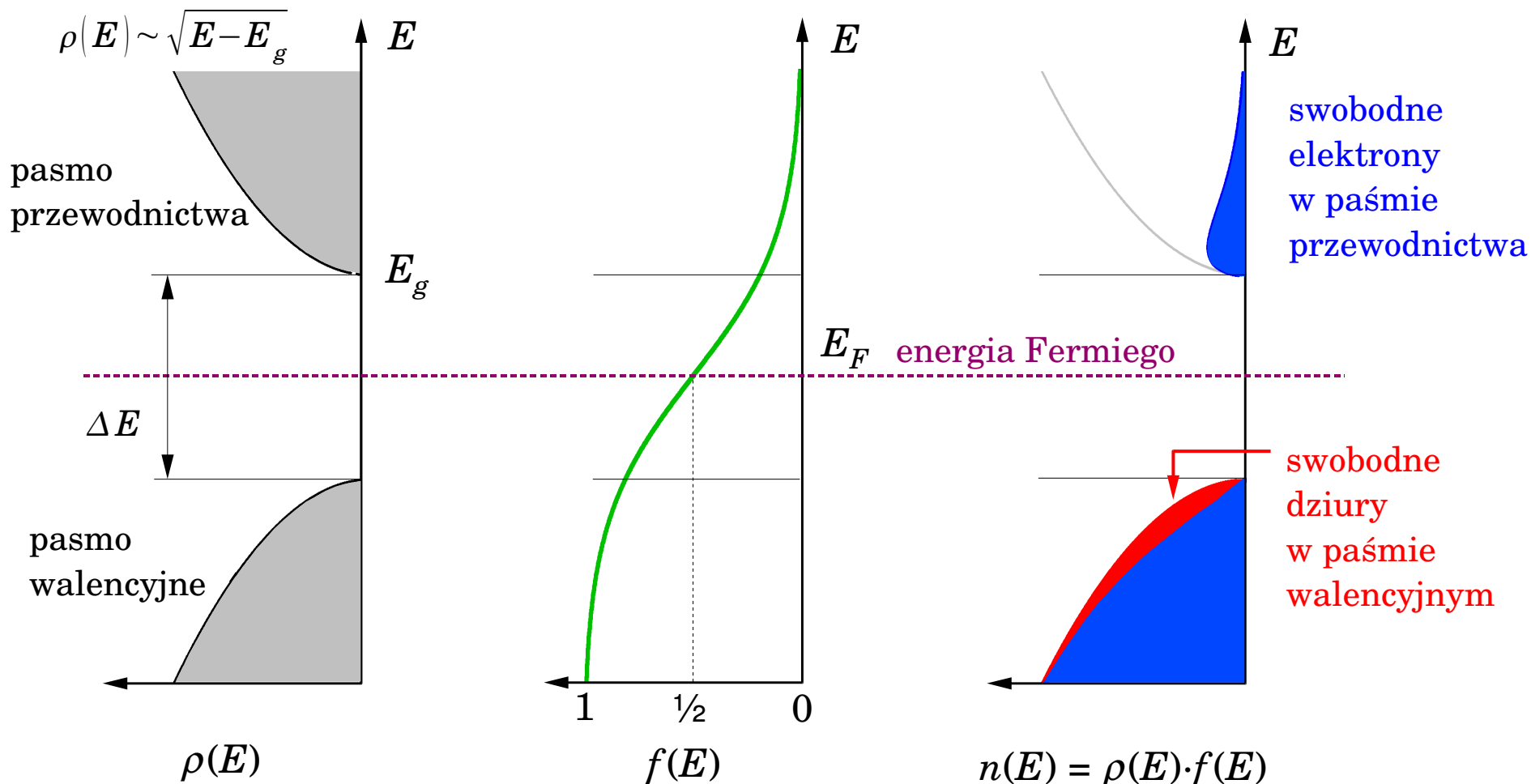
W przewodnikach (metalach) pasmo walencyjne i pasmo przewodnictwa częściowo pokrywają się ze sobą. Istnieje koncentracja swobodnych elektronów w paśmie przewodnictwa, które są nośnikami prądu.

Półprzewodnik samoistny

W idealnym monokryształe półprzewodnika w stanie podstawowym ($T = 0$) nie powinniśmy obserwować przewodnictwa ponieważ nie ma nośników prądu w postaci swobodnych ładunków. Aby zaobserwować przewodnictwo elektryczne, należy dostarczyć elektronom energii, dostatecznej do przejścia do pasma przewodnictwa. Energii aktywacji może dostarczyć fluktuacja termiczna lub kwant światła. Powstaniu swobodnego elektronu towarzyszy utworzenie pustego miejsca w paśmie walencyjnym, nazywanego dziurą, o własnościach ładunku dodatniego. Zarówno elektrony w paśmie przewodnictwa jak i dziury w paśmie walencyjnym stanowią nośniki prądu elektrycznego. Koncentracja nośników, a tym samym przewodnictwo, zależy od temperatury (oraz natężenia padającego promieniowania). Procesom generacji par elektron-dziura towarzyszą procesy ich rekombinacji (anihilacji). W określonej temperaturze ustala się stan równowagi pomiędzy tymi procesami. Koncentracja nośników silnie zależy od szerokości przerwy energetycznej. W izolatorach przerwa energetyczna jest na tyle duża, że liczba elektronów zdolnych znaleźć się w paśmie przewodnictwa jest bardzo mała.



Rozkład prawdopodobieństwa znalezienia swobodnych nośników prądu w półprzewodniku



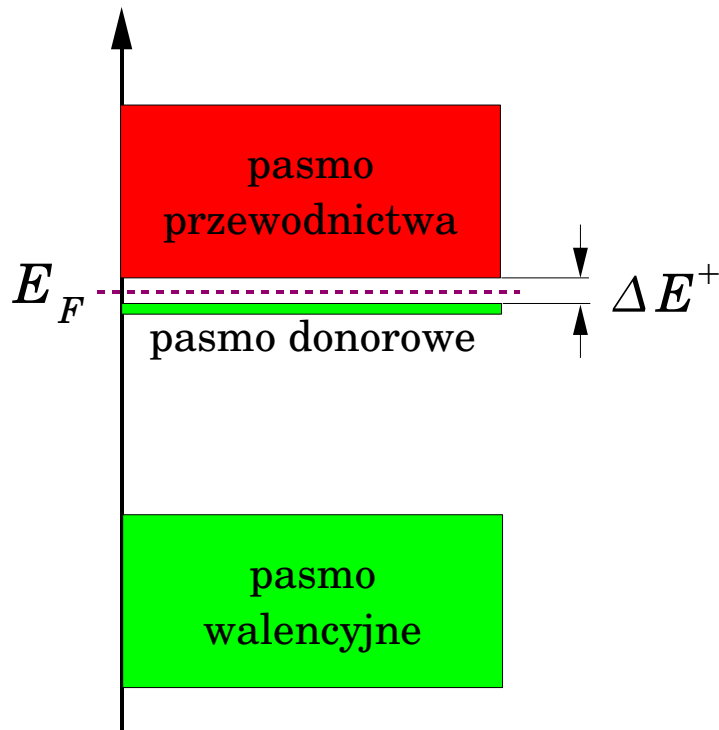
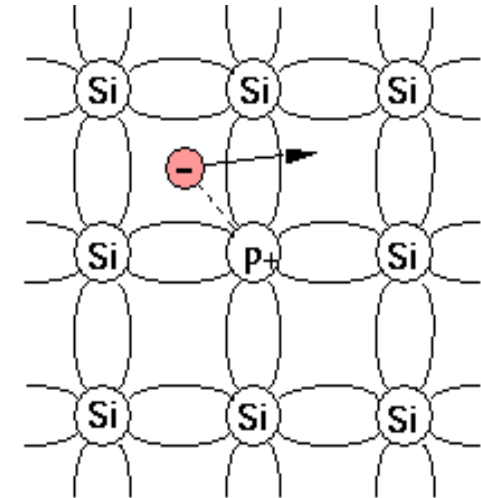
Gęstość stanów elektronowych

Prawdopodobieństwo obsadzenia stanów przez elektrony (rozkład Fermiego-Diraca)

Liczba elektronów w stanach o energii E

Półprzewodniki domieszkowane typu n

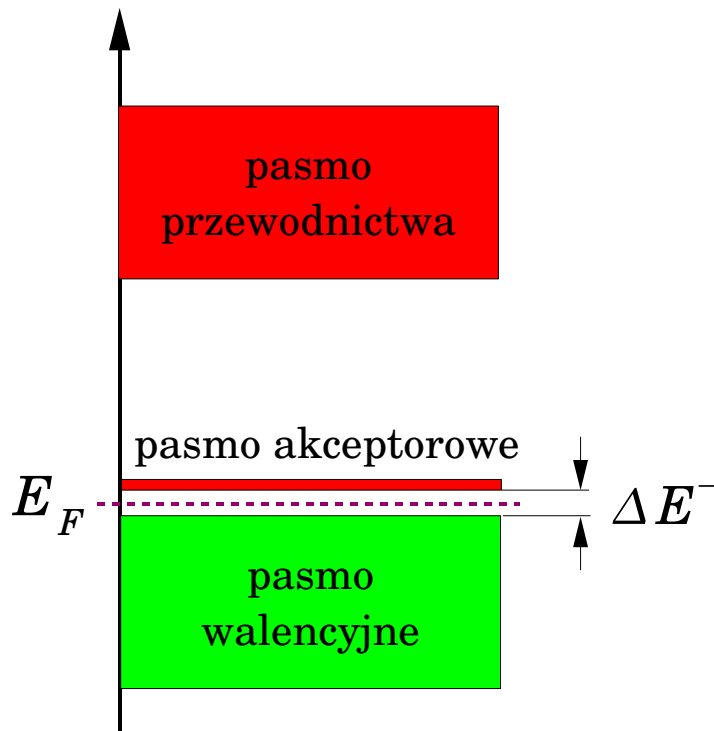
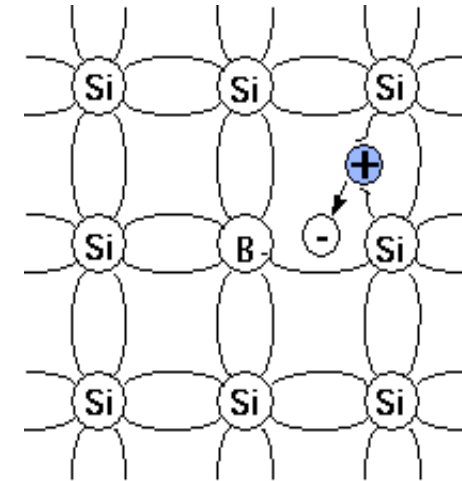
Wprowadzenie do sieci krystalicznej zbudowanej z atomów czterowartościowych (Si, Ge) domieszki ($10^{-5} \div 10^{-3} \%$) atomów pięciowartościowych (P, As, Sb), zwanych **donorami**, powoduje wytworzenie elektronów słabo związanych z siecią krystaliczną. Taki półprzewodnik nazywamy **półprzewodnikiem typu n** (n – negative, ujemny).



W temperaturze $T = 0$ stany pasma donorowego są obsadzone przez elektrony. W temp. pokojowej ($kT \gg \Delta E^+$) elektrony z pasma donorowego przechodzą do pasma przewodnictwa zwiększając znacznie koncentrację swobodnych elektronów. Półprzewodnik wykazuje przewodnictwo typu elektronowego (nośnikami większościowymi są elektrony).

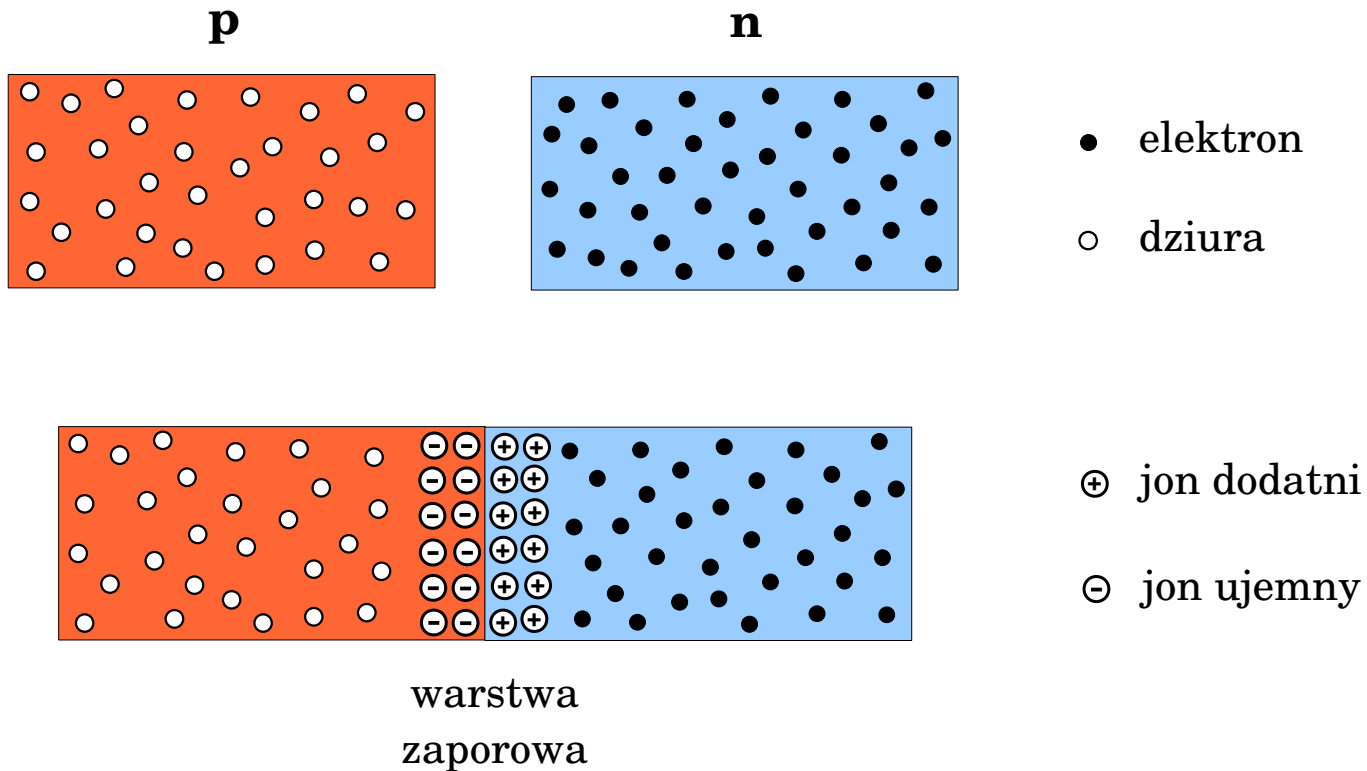
Półprzewodniki domieszkowane typu p

Wprowadzenie do sieci krystalicznej zbudowanej z atomów czterowartościowych (Si, Ge) domieszki atomów trójwartościowych (B, Al, Ga, In), zwanych **akceptorami**, powoduje wytworzenie dziur słabo związanych z siecią krystaliczną. Taki półprzewodnik nazywamy **półprzewodnikiem typu p** (p – positive, dodatni).



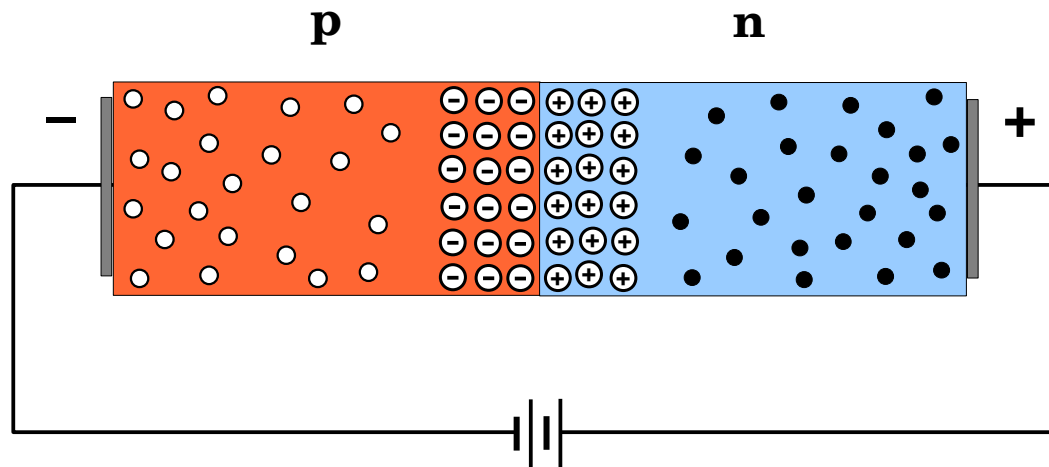
W temperaturze $T = 0$ pasmo akceptorowe jest puste. W temp. pokojowej ($kT \gg \Delta E^-$) elektrony z pasma walencyjnego przechodzą do pasma akceptorowego zwiększając znacznie koncentrację swobodnych dziur w paśmie walencyjnym. Półprzewodnik wykazuje przewodnictwo typu dziurowego (nośnikami większościowymi są dziury).

Złącze półprzewodnikowe p - n



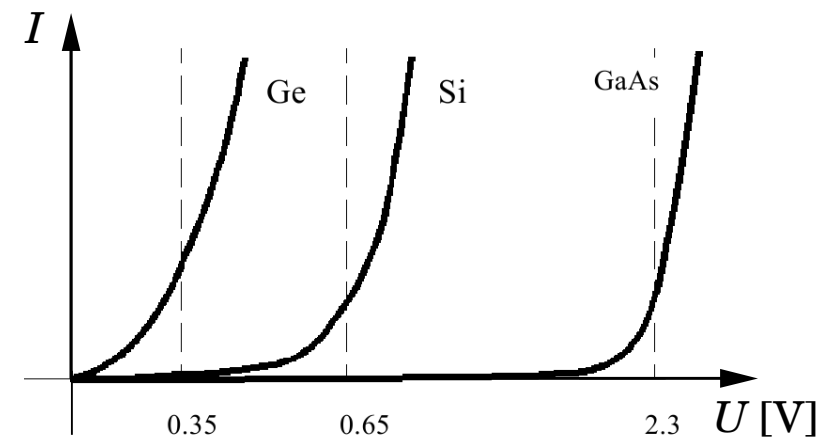
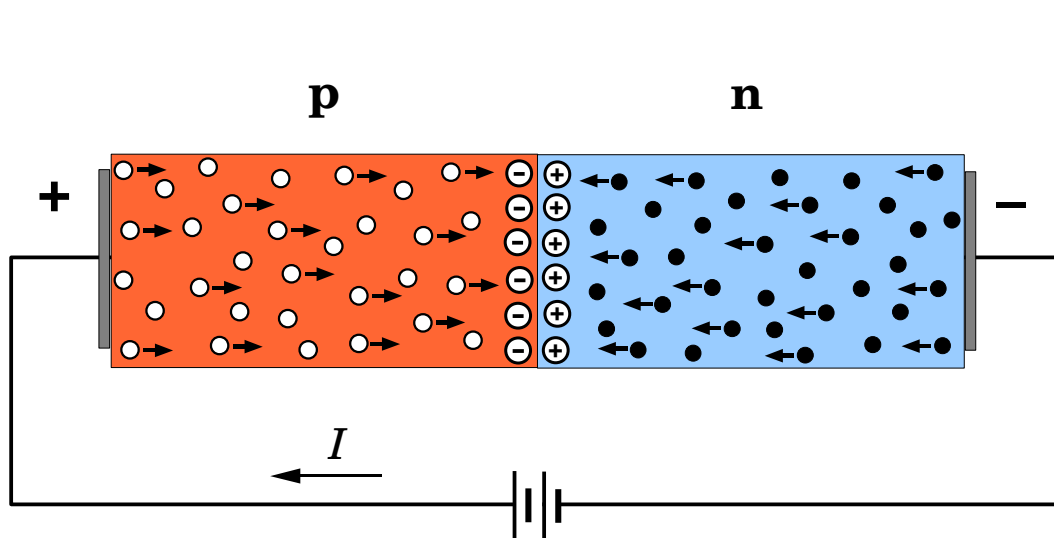
Po złączeniu półprzewodników elektrony z obszaru **n** dyfundują do obszaru **p** gdzie rekombinują z dziurami tworząc w pobliżu złącza ujemne jony związane z siecią krystaliczną (centra akceptorowe). Również swobodne dziury z obszaru **p** dyfundują do obszaru **n** gdzie ulegają rekombinacji. W obszarze **n** tworzy się warstwa jonów dodatnich (centra donorowe). Nieruchomy ładunek jonów tworzy warstwę dipolową, na której wytwarza się skok potencjału przeciwdziałający dalszej dyfuzji.

Złącze półprzewodnikowe p – n spolaryzowane w kierunku zaporowym



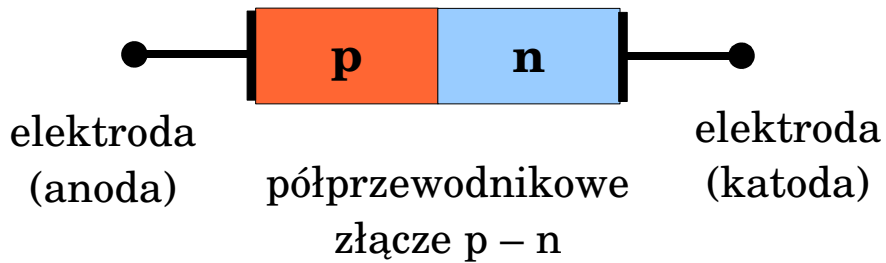
Przyłożenie napięcia (+) na **n** oraz (-) na **p** powoduje rozsuniecie ładunku swobodnego i poszerzenie warstwy zaporowej. Skok potencjału na złączu (bariera potencjału) powiększa się o przyłożone napięcie. Liczba swobodnych nośników zdolnych do pokonania wysokiej bariery potencjału (w wyniku fluktuacji termicznych) jest bardzo mała, a zatem prąd przepływający przez złącze jest nieznaczny (prąd wsteczny).

Złącze półprzewodnikowe p - n spolaryzowane w kierunku przewodzenia

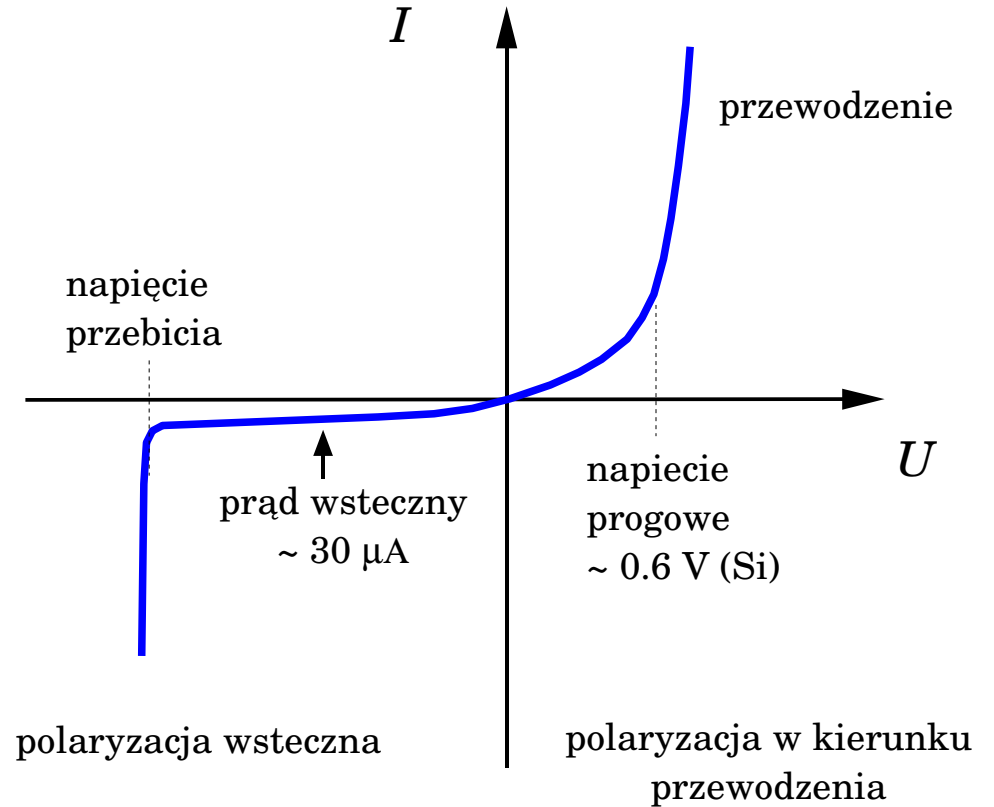
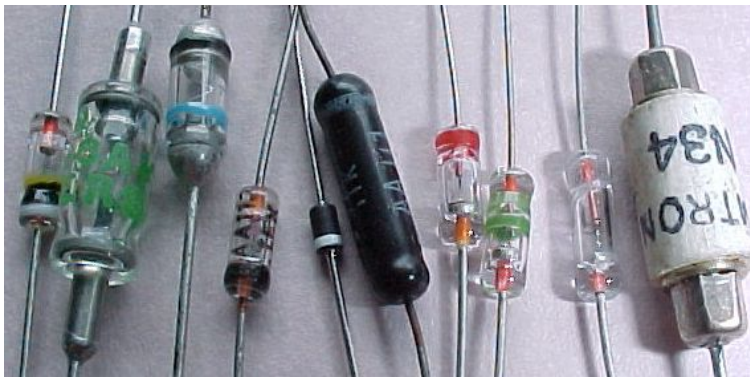
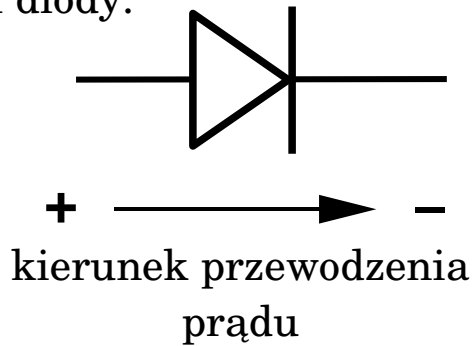


Przyłożenie napięcia (+) na **p** oraz (-) na **n** powoduje zmniejszenie szerokości warstwy zaporowej oraz obniżenie bariery potencjału o wartość przyłożonego napięcia. Swobodne elektrony i dziury dryfują w kierunku złącza gdzie następuje ich rekombinacja. Ustala się prąd płynący przez złącze, zależny od wartości przyłożonego napięcia i temperatury. Po przekroczeniu napięcia wynoszącego ok. 0.65 V dla złącz krzemowych, 0.35 V dla germanowych i 2.3 V z arsenku galu następuje silny wzrost natężenia prądu (wzrost eksponencjalny).

Dioda półprzewodnikowa



Symbol diody:



Charakterystyka prądowo-napięciowa diody

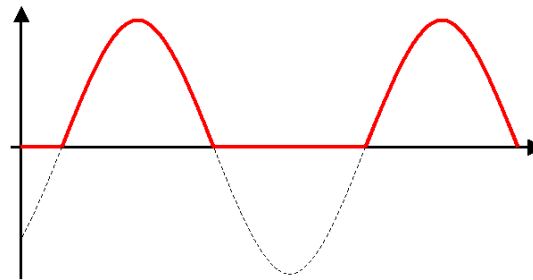
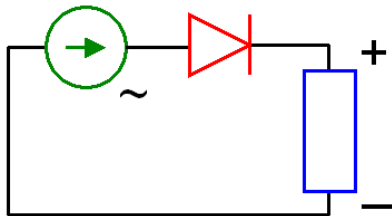
Rodzaje diod i zastosowania

- **Dioda prostownicza**
- **Dioda pojemnościowa (warikap)**
- **Dioda Zenera**
- **Dioda tunelowa**
- **Dioda świecąca (elektroluminescencyjna) – LED**
- **Laser diodowy**
- **Fotodioda**

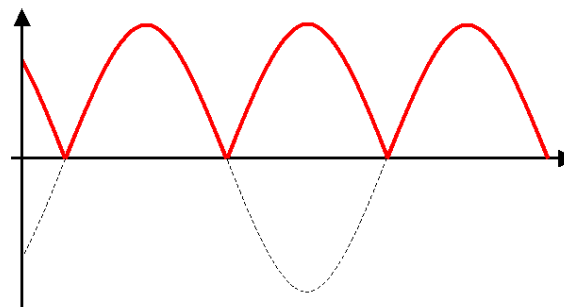
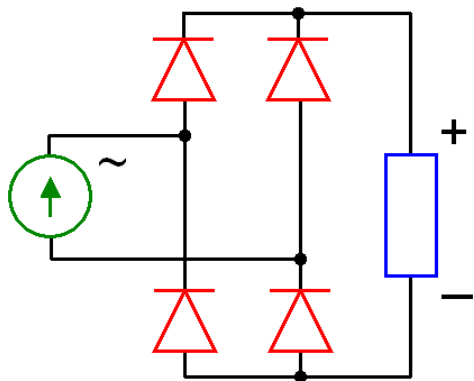
Dioda prostownicza

Diody prostownicze przeznaczone są do przetwarzania prądu przemiennego (o małej częstotliwości) na prąd jednokierunkowy. Wykorzystywana jest własność jednokierunkowego przewodzenia diody. W układzie prostowniczym dioda pełni funkcję zaworu jednokierunkowego.

Prostownik jednopółkowy:



Czterodiodowy prostownik dwupółkowy (mostek Graetza):

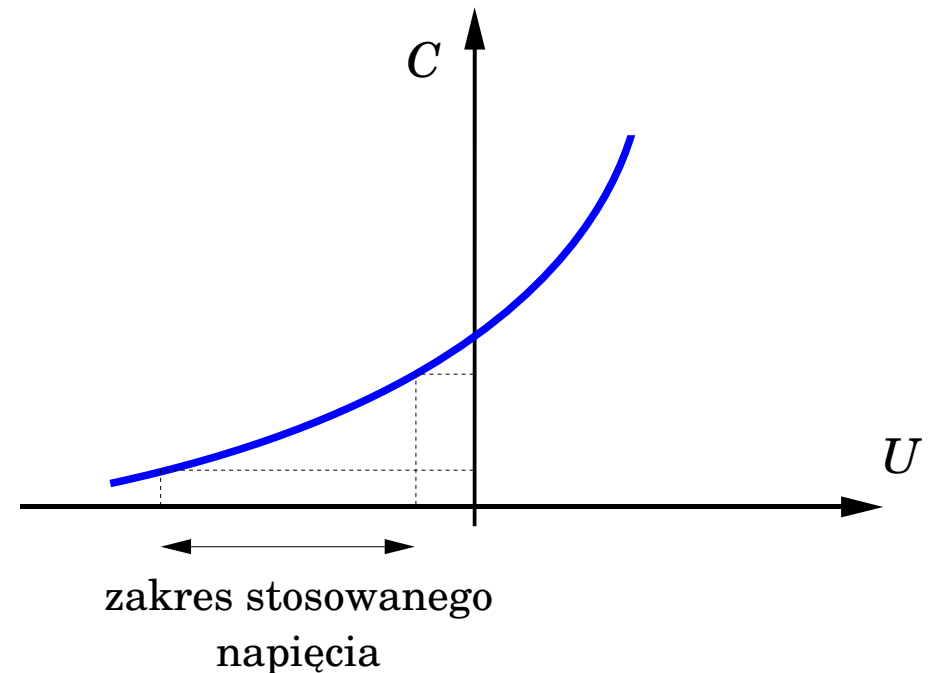
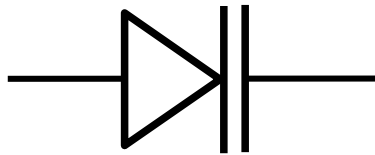


Dioda pojemnościowa (warikap)

Warstwa zaporowa złącza (obszar pozbawiony nośników) zachowuje się jak izolator. Pojemność złącza jest funkcją szerokości tej warstwy, którą można zmieniać poprzez zmianę napięcia polaryzacji. Diody pojemnościowe pracują przy polaryzacji zaporowej. Stosowane są m. in. w układach rezonansowych wysokiej częstotliwości (radio, telewizja), umożliwiając ich przestrajanie (zmiana C ----> zmiana częstotliwości rezonansowej określonej przez stałą czasową RC).

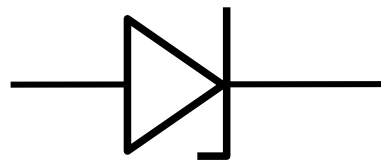
Charakterystyka pojemnościowo-napięciowa:

Symbol diody pojemnościowej:

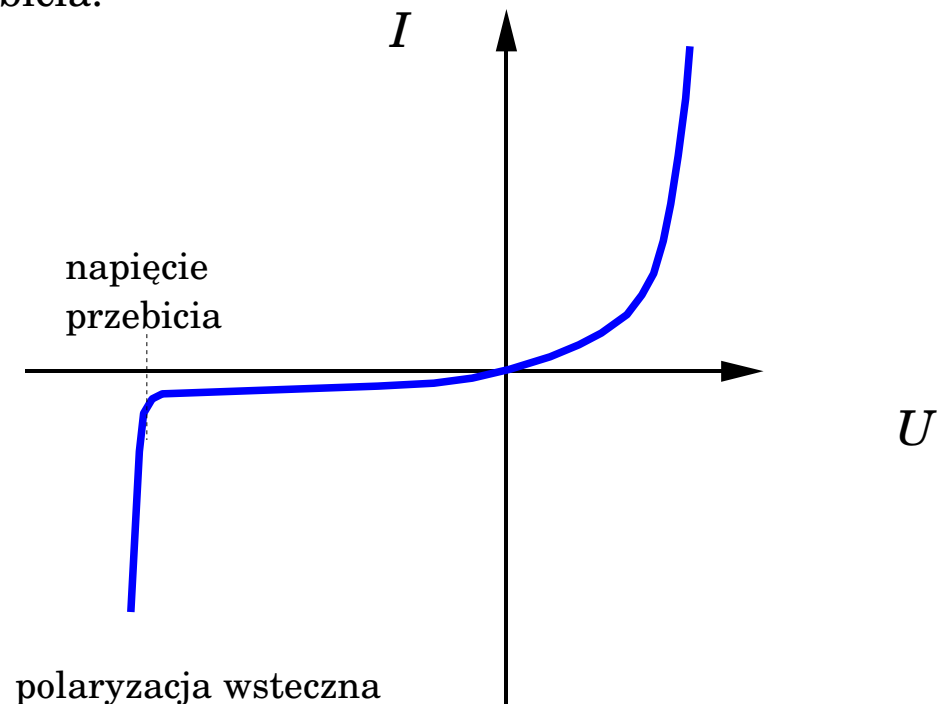


Dioda Zenera

W diodach Zenera wykorzystujemy efekt przebicia występujący przy odpowiednio dużym napięciu wstecznym. Po przekroczeniu napięcia przebicia prąd diody gwałtownie się zwiększa. Występujące przebicie może być wynikiem tzw. efektu Zenera, polegającego na wyrywaniu elektronów z ich wiązań w paśmie walencyjnym półprzewodnika typu p i przechodzeniu w wyniku tunelowania do pasma przewodnictwa półprzewodnika typu n. Innym mechanizmem prowadzącym do podobnego efektu jest przebicie lawinowe. Generowane w złączu nośniki są przyspieszane do energii, przy których zderzając się z siecią krystaliczną generują wtórne pary elektron-dziura, które są dalej powielane (lawinowe powielanie nośników). Przebieg Zenera obserwujemy przy odpowiednio dużym domieszkowaniu w obszarach n i p, przy napięciach do ok. 5 V (polaryzacji wstecznej). Przebieg lawinowy występuje w złączach o mniejszym domieszkowaniu i przy napięciach powyżej ok. 8 V. W zakresie napięć 5 – 8 V obydwa mechanizmy prowadzą do efektu przebicia. Nazwa „dioda Zenera” obejmuje tradycyjnie swym znaczeniem zarówno diody o przebiciu Zenera, jak i diody o przebiciu lawinowym.



symbol diody Zenera

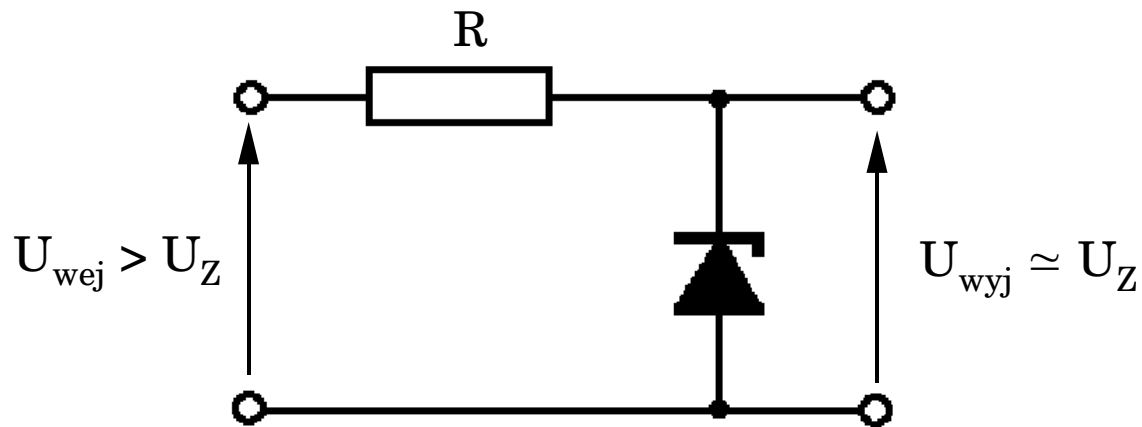


Zastosowania diody Zenera

Diody Zenera znajdują zastosowanie w układach elektronicznych

- do stabilizacji napięcia
- jako źródło napięcia odniesienia
- do przesuwania poziomów napięć
- jako elementy zabezpieczające i przeciwnapięciowe.

Dzielnik napięcia z diodą Zenera wykorzystywany do stabilizacji napięcia:

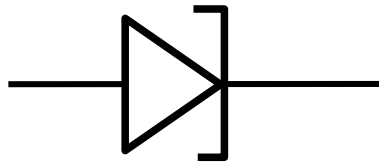


U_Z – napięcie Zenera

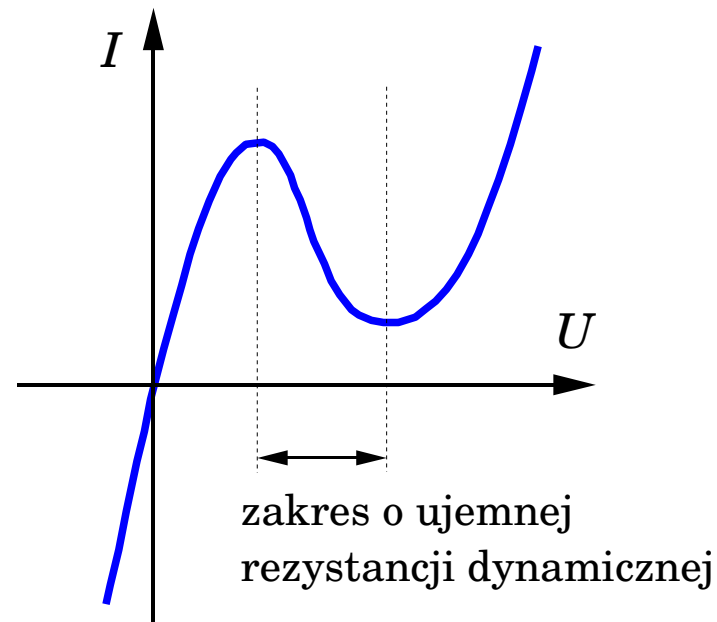
Dioda tunelowa

W silnie domieszkowanym złączu p-n warstwa zaporowa jest bardzo cienka. Możliwe jest znane w fizyce kwantowej zjawisko tunelowego przejścia nośników większościowych przez barierę potencjału (bardzo cienki obszar zaporowy). Pojawia się dodatkowy prąd (tunelowy) przy polaryzacji diody w kierunku przewodzenia. Ponieważ prąd ten zanika wraz z rosnącym napięciem, to w charakterystyce diody obserwujemy obszar o ujemnej rezystancji dynamicznej. Takie diody nazywamy tunelowymi lub diodami Esakiego.

Charakterystyka prądowo-napięciowa



Symbol diody tunelowej



$$r = \frac{dU}{dI} < 0$$

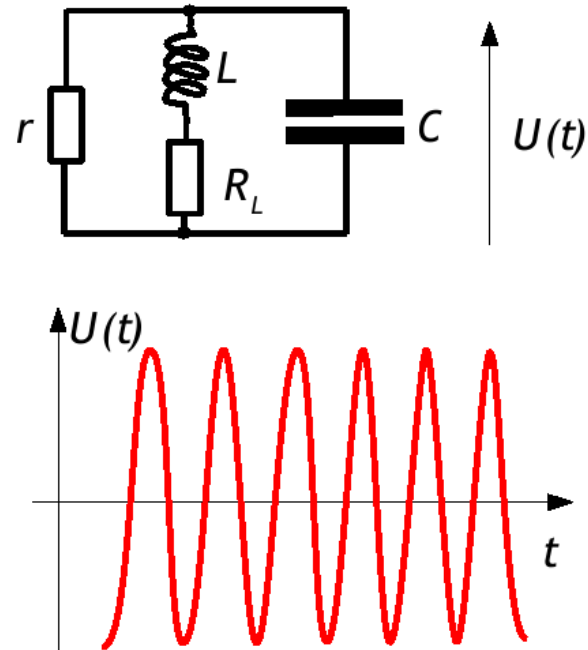
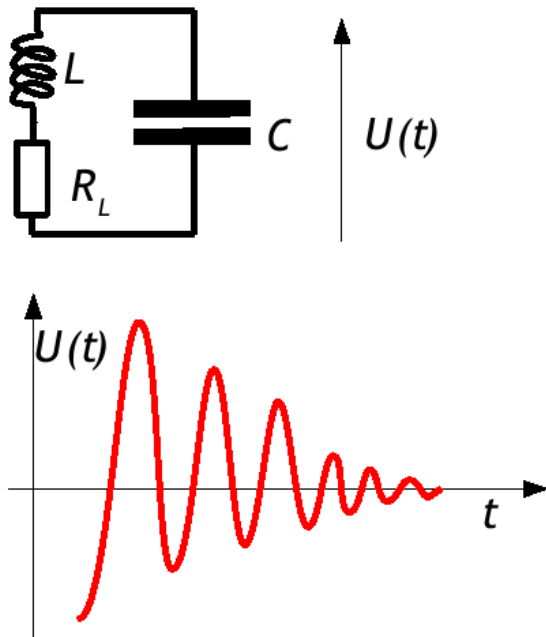
Zastosowania diody tunelowej

Diody tunelowe wykorzystuje się

- do wytwarzania, wzmacniania i detekcji drgań wysokich częstotliwości
- w przełącznikach
- w układach impulsowych o dużej szybkości działania (np. układach cyfrowych).

Przykład zastosowania:

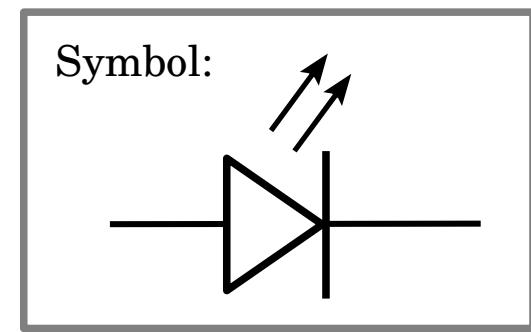
Ujemna rezystancja dynamiczna r umożliwia od tłumienie układu drgającego LC (kompensacja rezystancji cewki R_L powodującej tłumienie oscylacji)



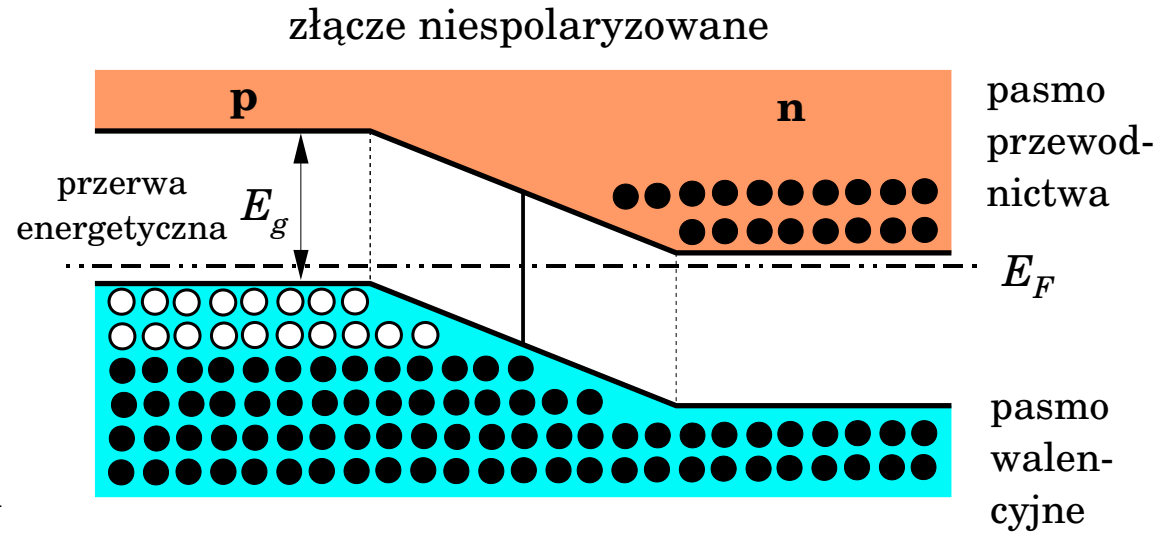
Dioda świecąca

/ Dioda elektroluminescencyjna /

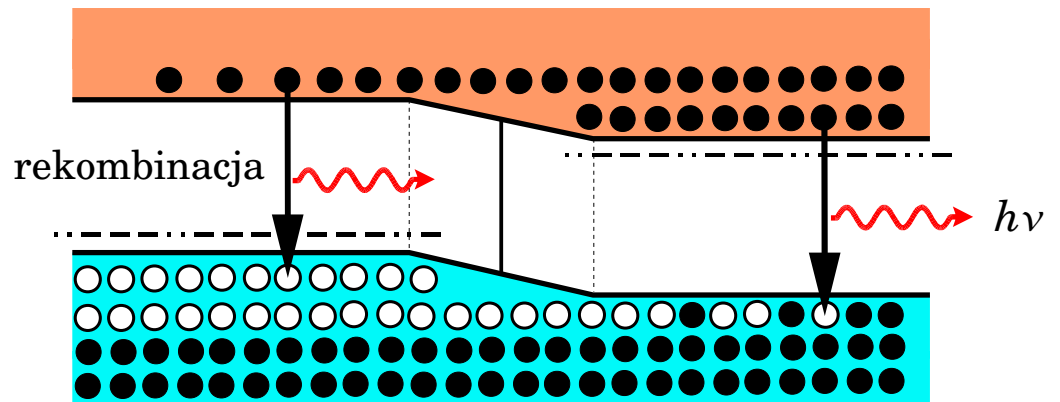
/ LED – Light Emitting Diode /



Gdy złącze p-n jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, bariera potencjału ulega obniżeniu i elektrony wnikają do półprzewodnika typu p, a dziury do półprzewodnika typu n. W złączu następują rekombinacje elektronów i dziur związane z emisją kwantów promieniowania elektromagnetycznego o energii zbliżonej do szerokości przerwy energetycznej $h\nu \approx E_g$.

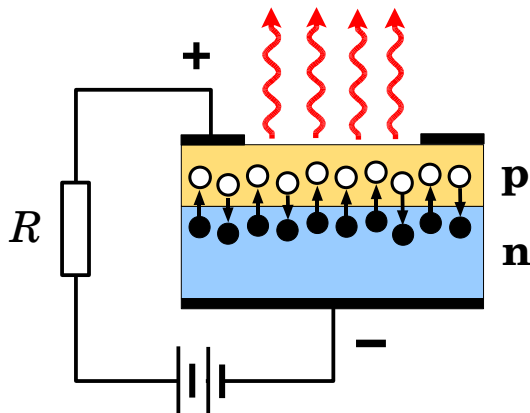


złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia



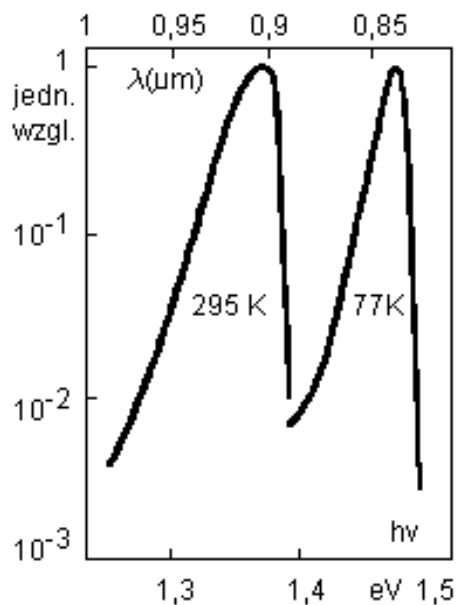
● – elektron

○ – dziura



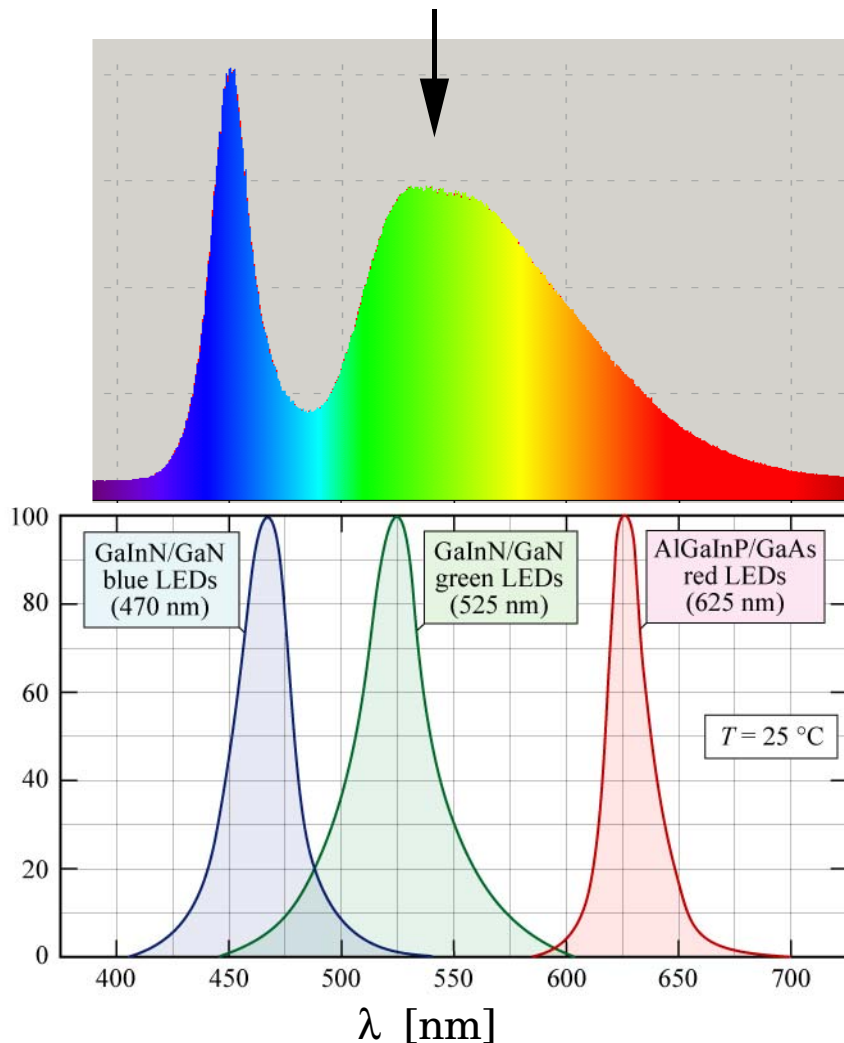
Dioda świecąca

Material	Barwa emitowanego światła
GaAs	podczerwień
AlGaAs	podczerwień, czerwona
GaP	czerwona, żółta, zielona
GaAsP	czerwona, pomarańczowa, żółta, zielona
GaN	zielona, niebieska, biała
ZnSe	niebieska
AlN, AlGaN	ultrafiolet



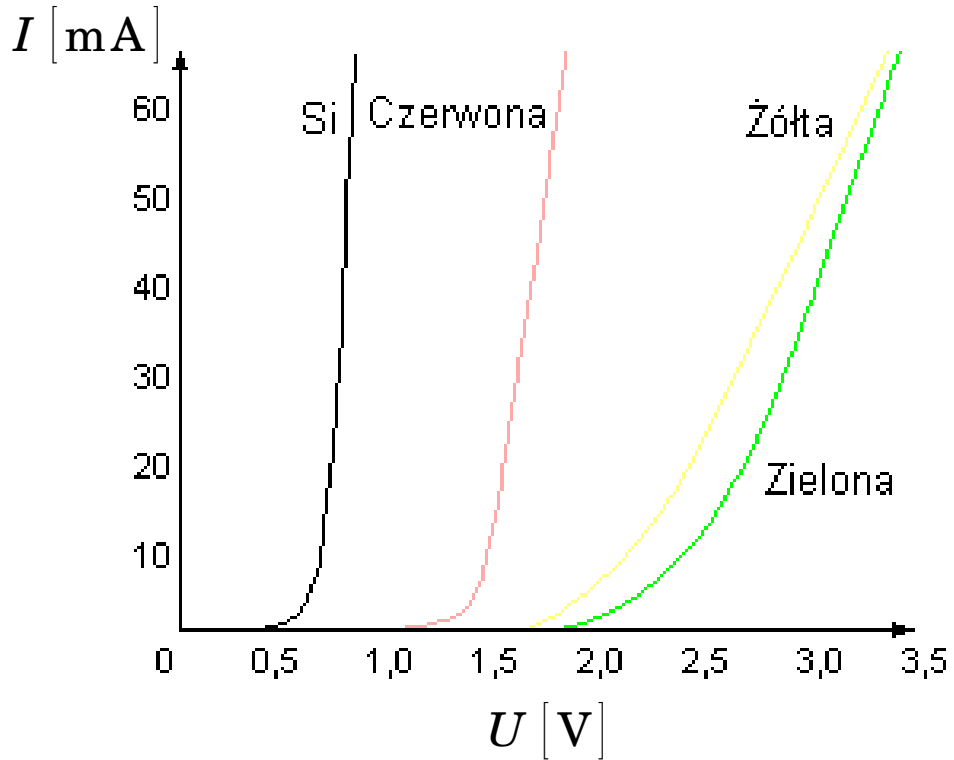
Charakterystyki spektralne diody z GaAs w różnych temperaturach.

Spektrum diody „białej”. Emitowane światło niebieskie (InGaN) przechodzi przez warstwę materiału fosforescencyjnego ($Ce^{3+}:YAG$). Część światła niebieskiego jest konwertowana na światło o większych długościach fali.

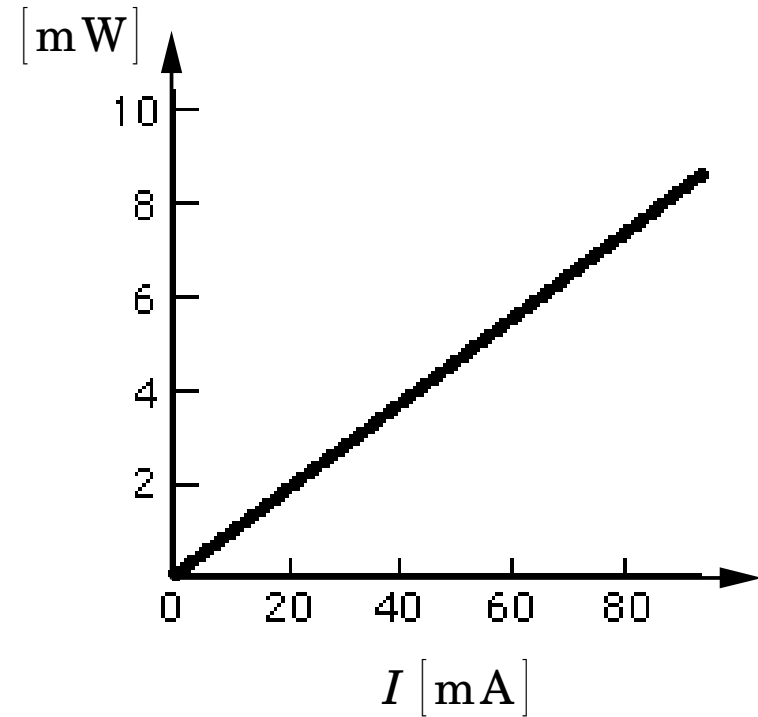


Charakterystyki spektralne diod świecących: natężenie emitowanego światła w zależności od długości fali.

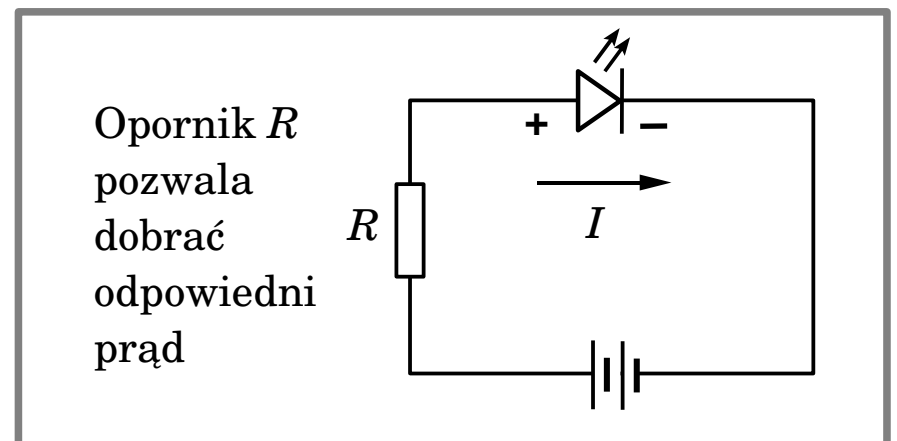
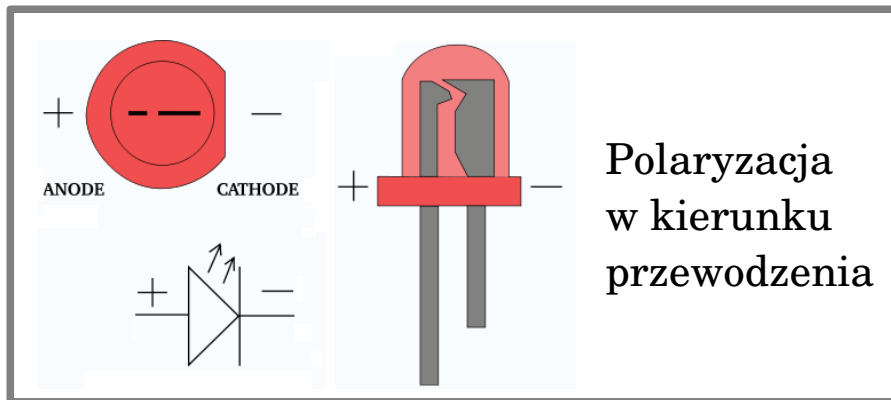
Dioda świecąca



Charakterystyki prądowo-napięciowe



Moc emitowanego światła w funkcji natężenia prądu (zależność typowa)



Rodzaje i zastosowania LED

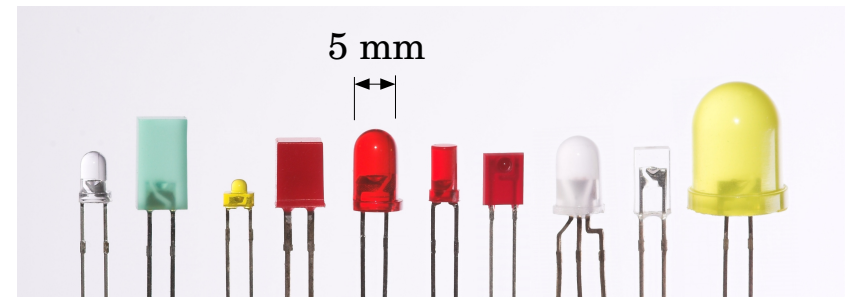
IR – emitujące promieniowanie podczerwone ---> łącza światłowodowe, urządzenia zdalnego sterowania.

HBLED (High Brightness LED) – diody o wysokiej jasności świecenia (> 0.2 cd)
---> sygnalizacja uliczna, oświetlenie pojazdów, latarki.

Tricolor LED – generujące trzy podstawowe barwy (czerwona, zielona, niebieska)
---> umożliwiają uzyskanie światła dowolnej barwy poprzez mieszanie barw podstawowych w odpowiednich proporcjach.

Zalety:

- mały pobór prądu
- niskie napięcie zasilające
- duża sprawność (~ 25 – 30 %)
- małe rozmiary
- duża trwałość (ponad 12 lat)
- duża wartość luminacji



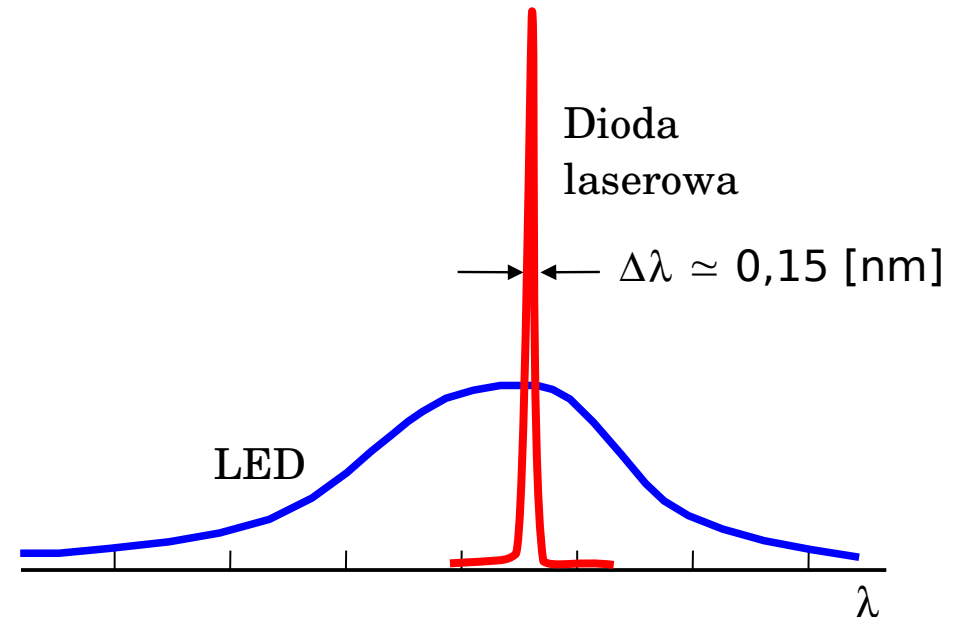
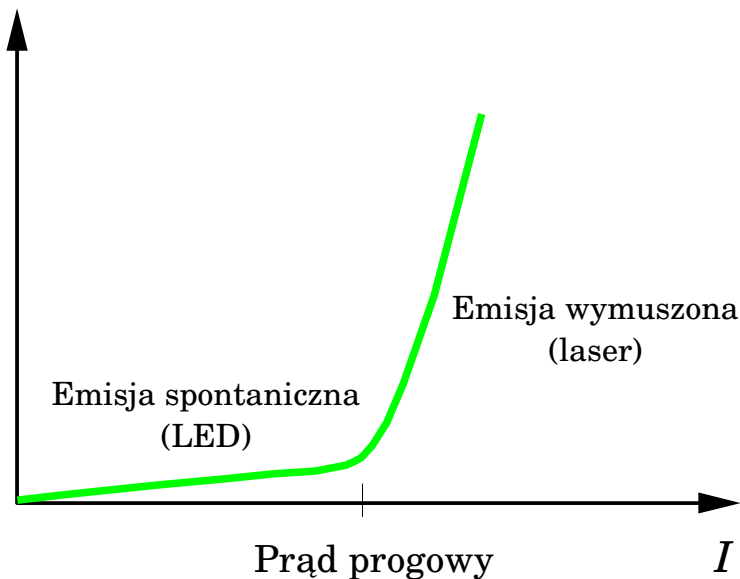
Dioda laserowa

/ Laser półprzewodnikowy /

/ Laser diodowy /

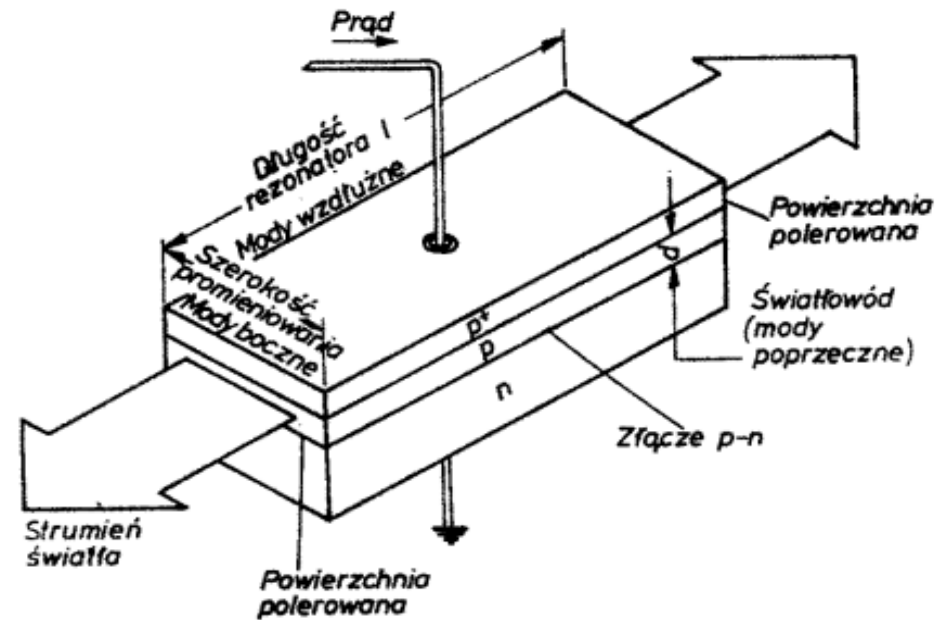
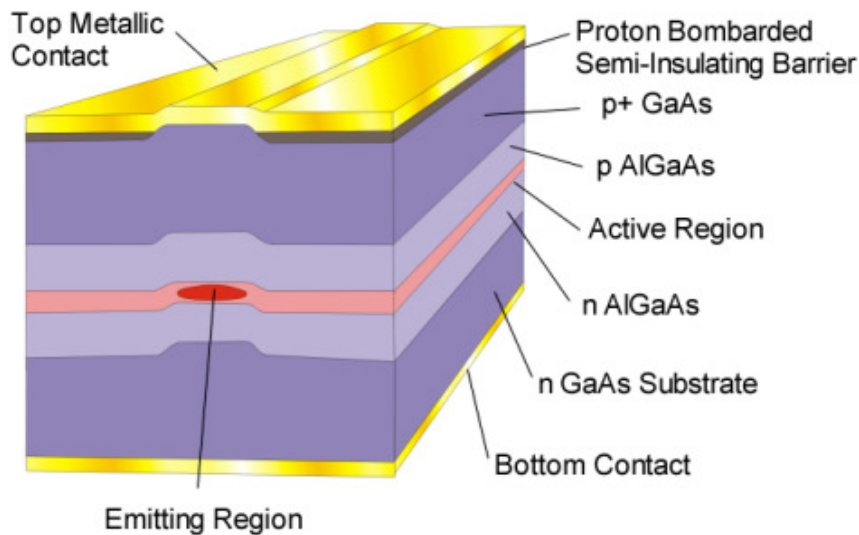
Zasada działania diody laserowej jest podobna do zasady działania LED. Zasadnicze znaczenie ma uzyskanie inwersji obsadzeń nośników w obszarze przyłączeniowym. Inwersję tę można uzyskać gdy złącze p-n spolaryzowane jest bardzo silnym prądem w kierunku przewodzenia (ok. 250 mA). W półprzewodniku typu n koncentracja dziur będzie dominowała nad koncentracją elektronów, a w półprzewodniku typu p koncentracja elektronów będzie dominowała nad koncentracją dziur. W tych warunkach rekombinacja następuje lawinowo i jest wymuszona fotonami emitowanymi we wcześniejszej rekombinacji promienistej. Złącze emituje spójne promieniowanie laserowe.

Moc świetlna



Diody laserowa

Jednym z rodzajów diody laserowej jest laser z emisją krawędziową, z rezonatorem Fabry-Perota:



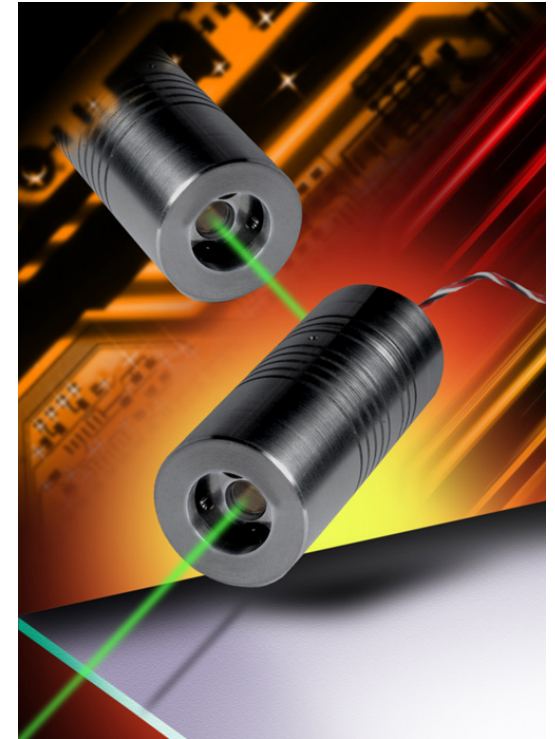
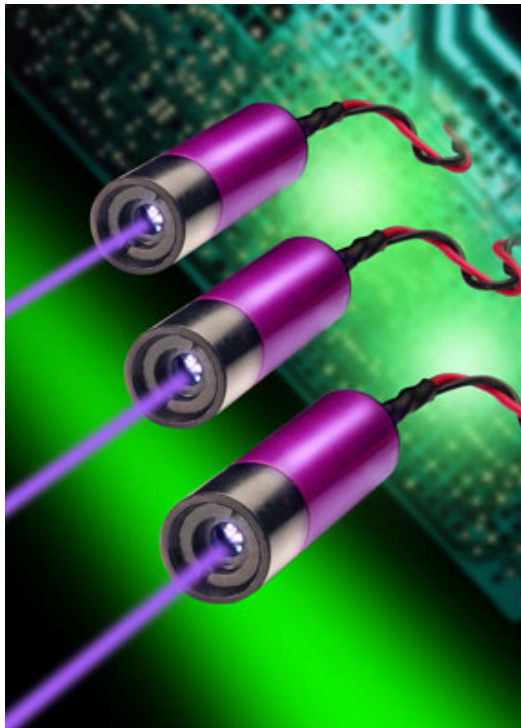
Britney Spears Guide to Semiconductor Physics:
<http://britneyspears.ac/lasers.htm>

Rezonator optyczny ma kształt prostopadłościanu o rozmiarach rzędu ułamka milimetra. Stanowią go wypolerowane powierzchnie kryształów.

Dioda laserowa

Zalety:

- małe rozmiary
- proste zasilanie
- niezawodność pracy, trwałość
- łatwość modulacji emitowanego światła



Zastosowania:

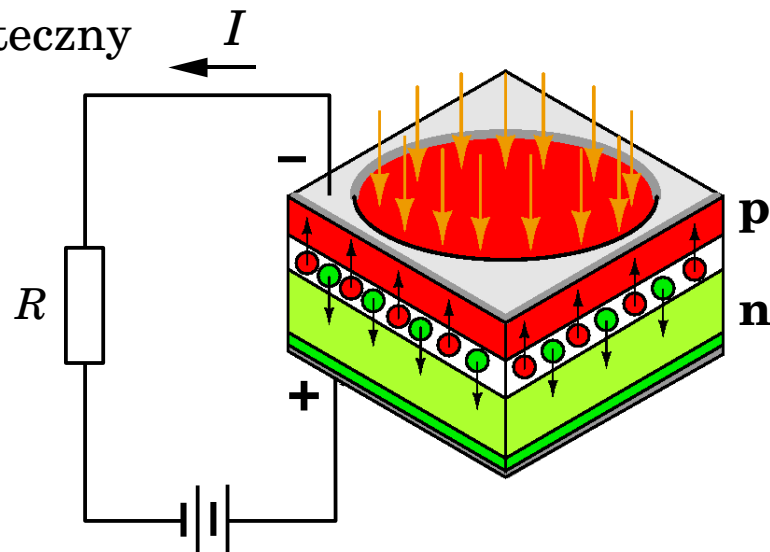
- łączność światłowodowa
- czytniki CD, DVD
- wskaźniki laserowe
- medycyna, kosmetyka ...

Fotodioda

Jeżeli oświetlimy złącze p-n, to prąd płynący w kierunku zaporowym będzie zależał od natężenia oświetlenia. Wiąże się to z generacją przez światło nośników (par elektron-dziura) w obszarze złącza. Efekt ten wykorzystywany jest w fotodiodach służących do detekcji światła.

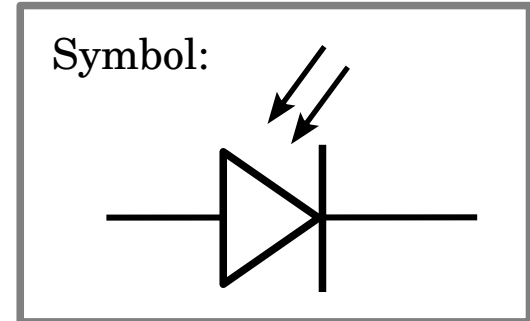
Prąd

wsteczny



Polaryzacja w kierunku zaporowym

Symbol:



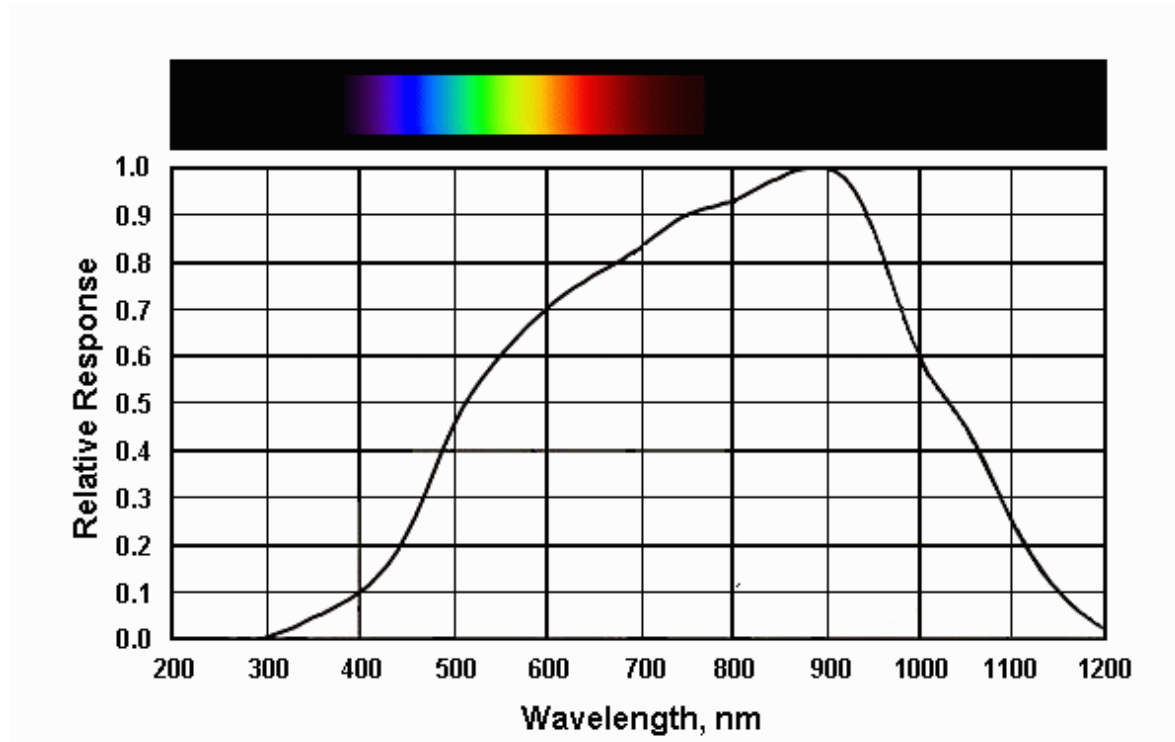
Fotodioda

Czułość spektralna fotodiody zależy od rodzaju materiału złącza:

Si $\lambda = 200 - 1200$ nm

Ge 400 - 1700 nm

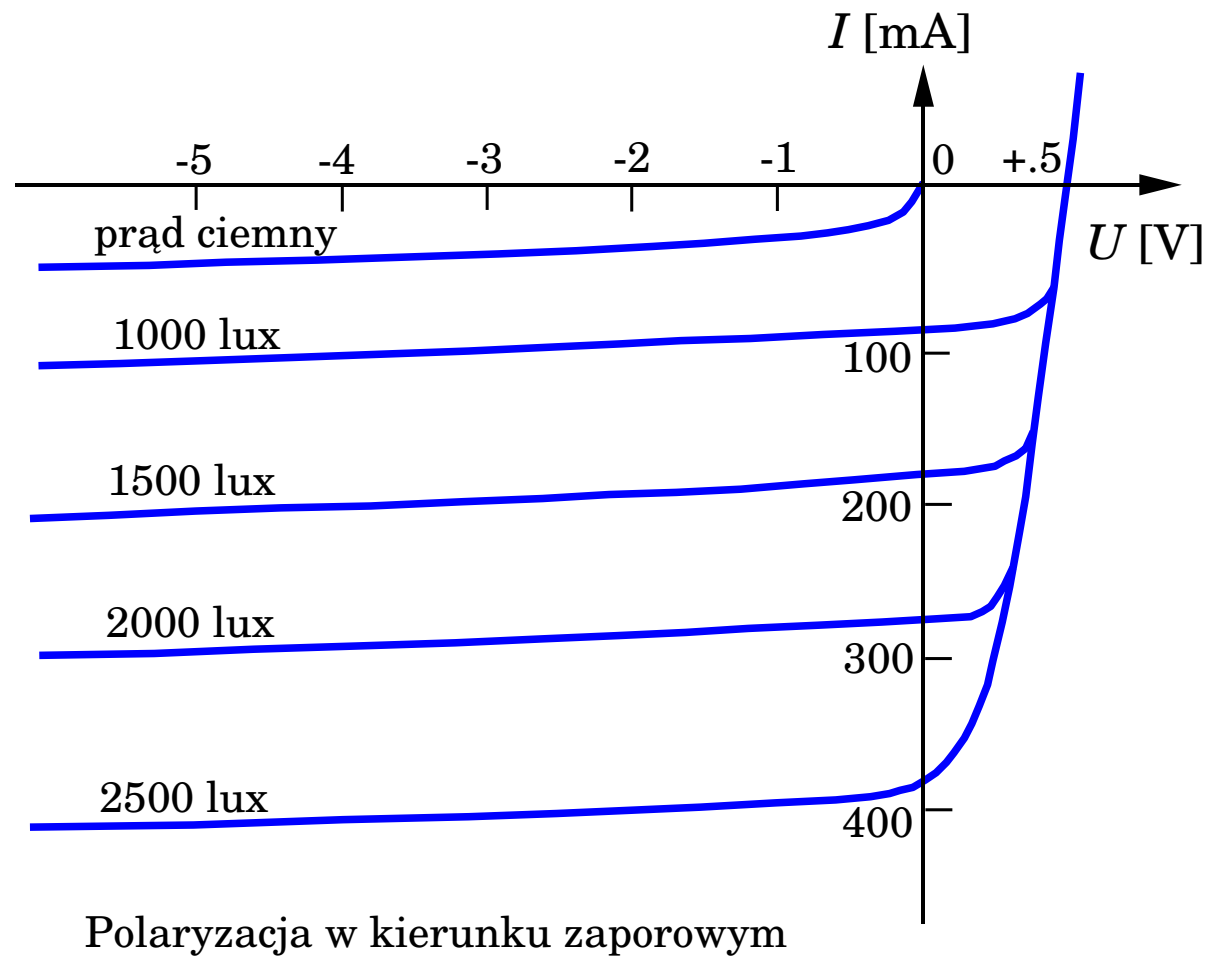
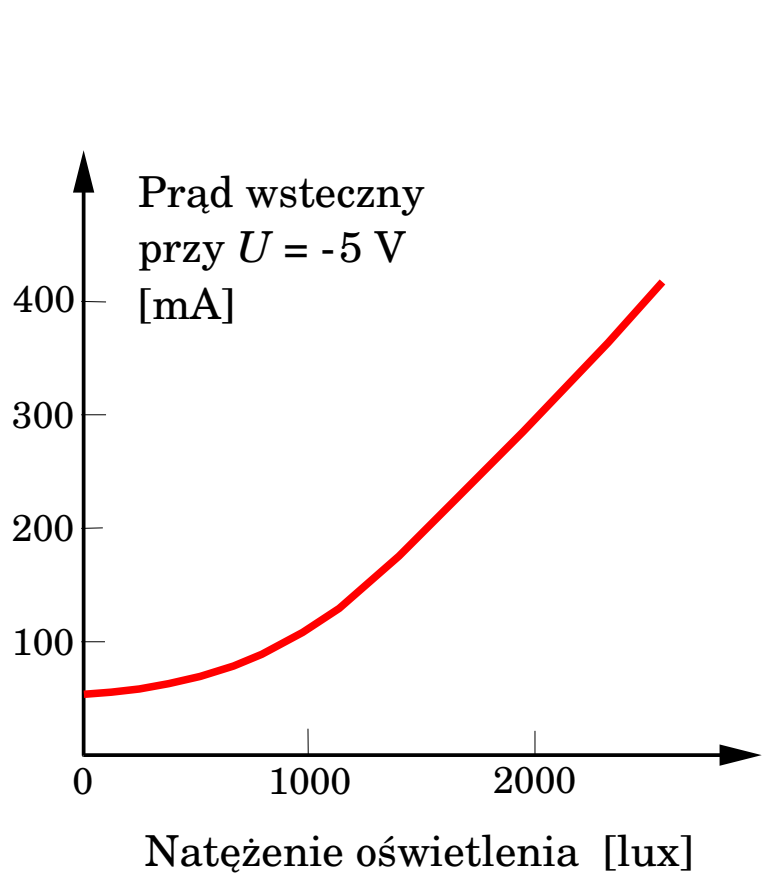
InGaAs 800 - 2600 nm



Czułość spektralna fotodiody krzemowej

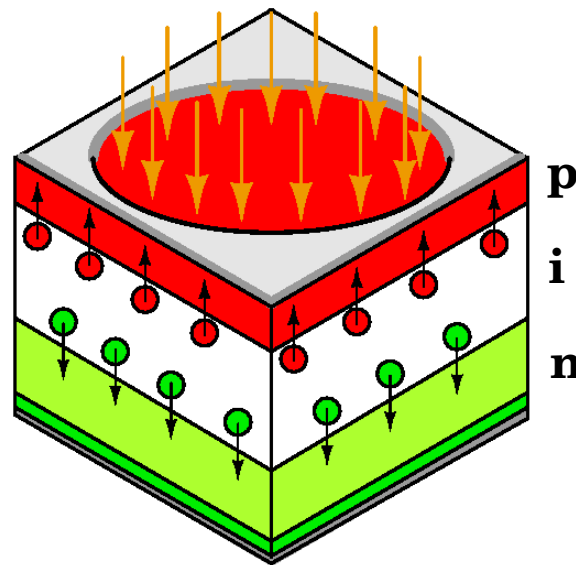
Fotodioda

Typowe charakterystyki prądowo-napięciowe fotodiody krzemowej przy różnych natężeniach oświetlenia złącza p-n :



Fotodioda PIN

Pomiędzy półprzewodnikiem typu **p** a półprzewodnikiem typu **n** znajduje się warstwa półprzewodnika samoistnego **i**. Warstwa zaporowa w takim złączu ma dużą grubość, równą w przybliżeniu grubości warstwy samoistnej, co powoduje, że pojemność elektryczna złącza jest bardzo mała. Dzięki temu uzyskuje się dużą szybkość działania odpowiadającą częstotliwościom przekraczającym 10 GHz. Fotodiody PIN należą do najszybszych detektorów promieniowania. Dzięki dużej grubości złącza obszar fotoczuły ma większą objętość, co zwiększa także wydajność konwersji światła.

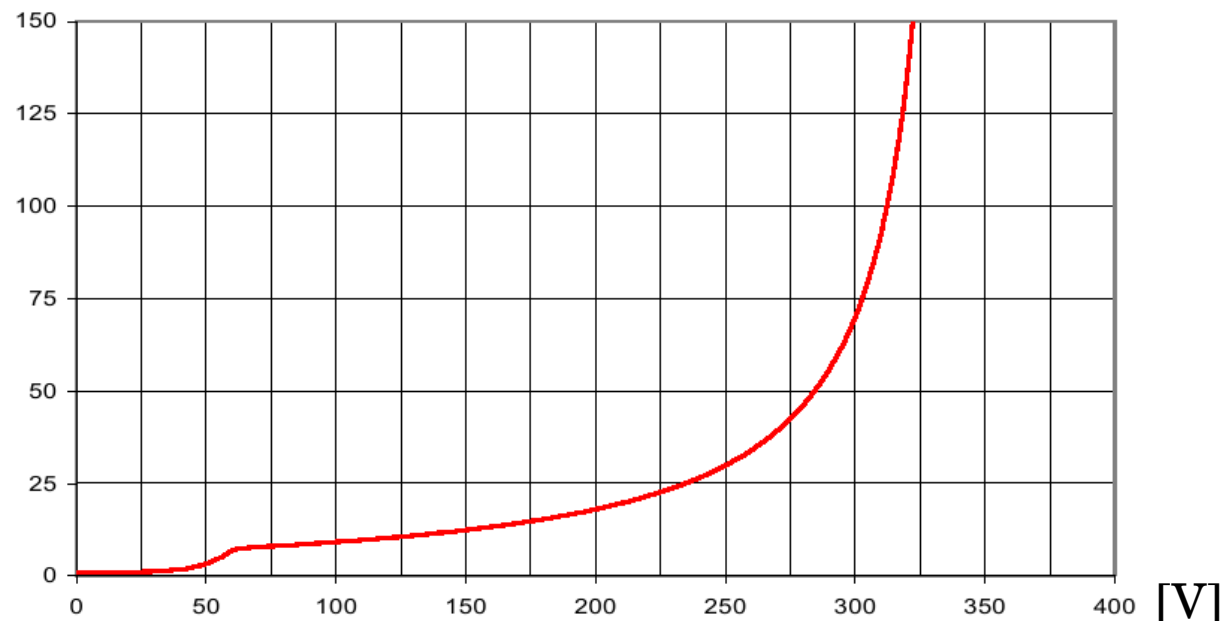


Fotodioda lawinowa

Fotodioda lawinowa jest elementem pracującym w zakresie przebicia lawinowego złącza p-n. Po oświetleniu złącza następuje lawinowe powielanie wygenerowanych par elektron-dziura. Sygnał prądowy jest wzmacniany wewnętrznie, typowo $10^2 - 10^3$ razy.

Stosując odpowiednie techniki można uzyskać znacznie większe wzmocnienia, sięgające $\sim 10^8$. Możliwa jest wówczas detekcja pojedynczych fotonów.

Fotodioda lawinowa jest najbardziej czułym półprzewodnikowym detektorem światła.



Przykładowa charakterystyka krzemowej fotodiody lawinowej: wzmocnienie jako funkcja napięcia (w kierunku zaporowym).

Fotodioda

Zalety:

- **małe rozmiary**
- **proste zasilanie**
- **niezawodność pracy, trwałość**
- **niski koszt**
- **liniowa zależność prądu od oświetlenia**
- **niskie szумы**

Zastosowania :

- **detektory podczerwieni, światła widzialnego oraz UV**
- **komunikacja światłowodowa**
- **mierniki odległości**
- **noktowizory**
- **tomografia**

TRANZYSTORY

Tranzystor jest to trójelektrodowy półprzewodnikowy aktywny element elektroniczny, posiadający zdolność wzmacniania sygnału elektronicznego.

Wyróżnia się dwie główne grupy tranzystorów:

- **Tranzystory bipolarne**, w których prąd wyjściowy jest funkcją prądu wejściowego (sterowanie prądowe)
- **Tranzystory unipolarne** (tranzystory polowe), w których prąd wyjściowy jest funkcją napięcia (sterowanie napięciowe).

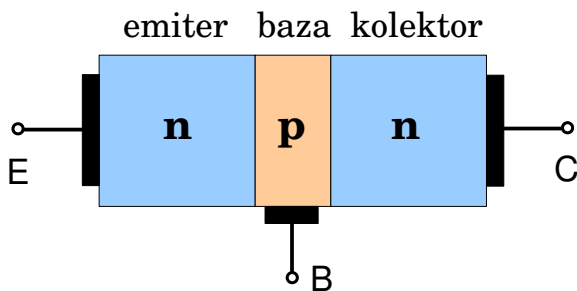
Nazwa tranzystor wywodzi się od angielskiego zwrotu „**transfer resistor**”, który oznacza element transformujący rezystancję.

Tranzystory wykorzystuje się do wzmacniania małych sygnałów oraz przetwarzania informacji w układach cyfrowych.

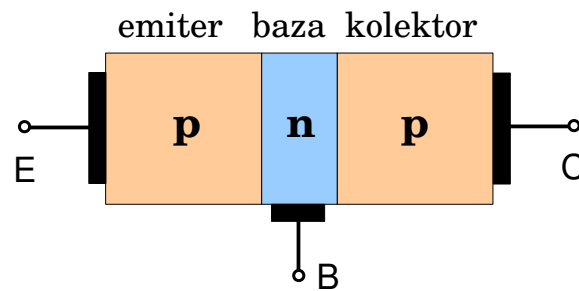
Tranzystor bipolarny

Tranzystor bipolarny zbudowany jest z trzech warstw półprzewodników domieszkowanych, tworzących parę złącz p-n. Warstwy te noszą nazwy: emiter (E), baza (B) oraz kolektor (C). Do poszczególnych warstw przyłączone są elektrody umożliwiające odpowiednią polaryzację złącz oraz doprowadzenie sygnałów.

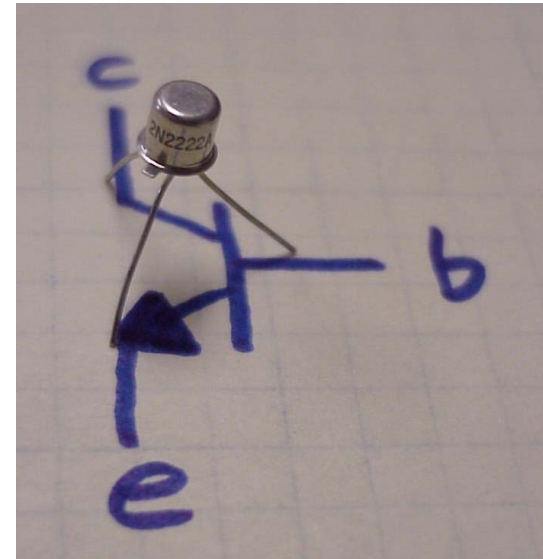
Dwa rodzaje tranzystorów bipolarnych:



Tranzystor n-p-n



Tranzystor p-n-p

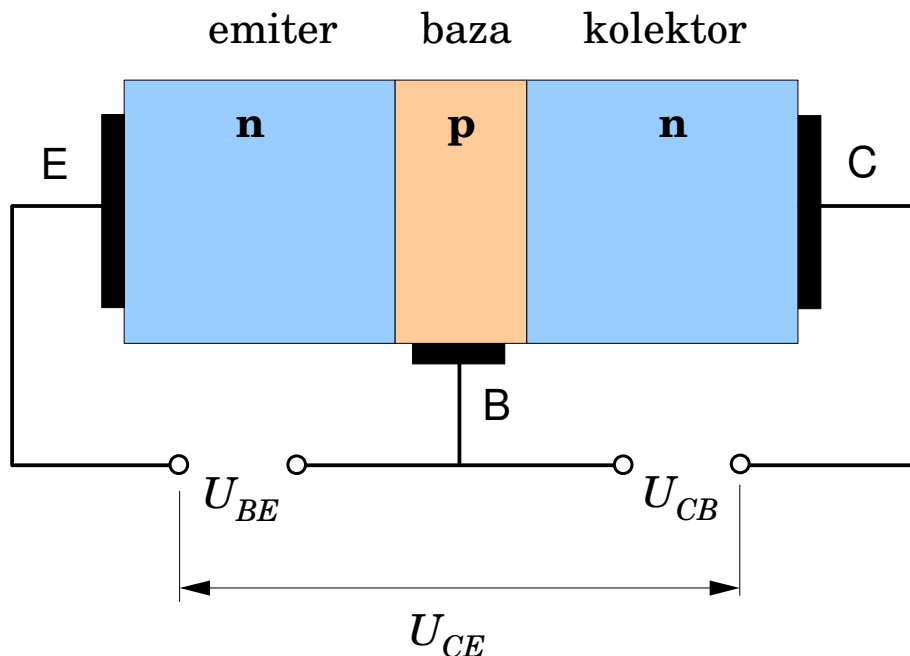


Tranzystor bipolarny

Sposób polaryzacji złącz określa stan pracy tranzystora:

- Stan aktywny – złącze BE spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze CB zaporowo
- Stan zatkania (odcięcia) – obydwie złącza spolaryzowane w kierunku zaporowym
- Stan nasycenia – obydwie złącza spolaryzowane w kierunku przewodzenia.

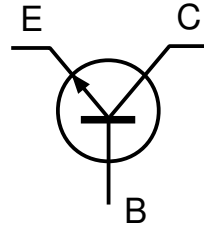
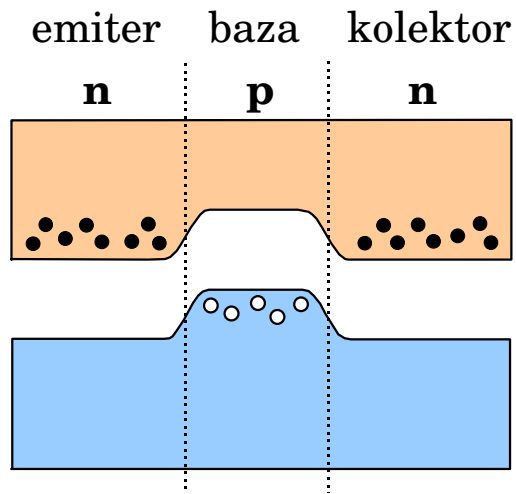
Stan aktywny jest podstawowym stanem pracy, który wykorzystywany jest we wzmacniaczach. Stany zatkania i nasycenia stosowane są w technice impulsowej oraz układach cyfrowych.



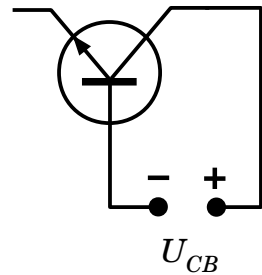
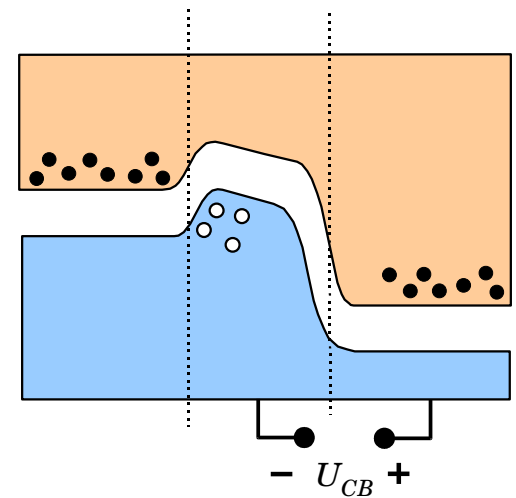
Obszar emitera jest stosunkowo silnie domieszkowany.

Obszar bazy jest stosunkowo słabo domieszkowany, a szerokość bazy jest niewielka. Dzięki temu nośniki wstrzykiwane z emitera do bazy mogą dyfundować do kolektora bez ich znacznego ubytku spowodowanego rekombinacją.

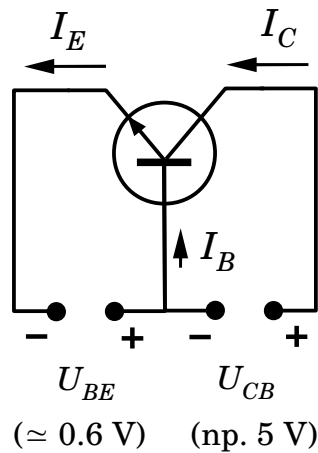
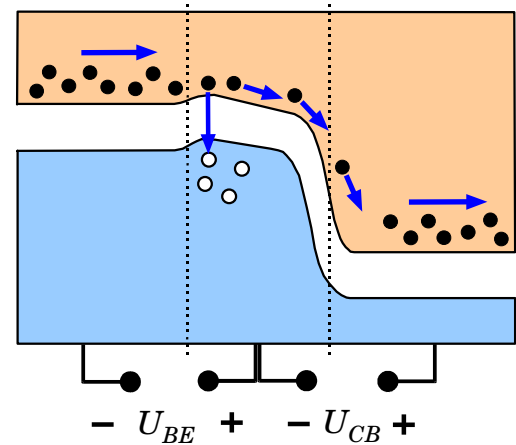
Działanie tranzystora na przykładzie tranzystora npn



W stanie bez polaryzacji zewnętrznej elektrony z emitera nie przenikają do kolektora ponieważ są blokowane przez barierę potencjału.

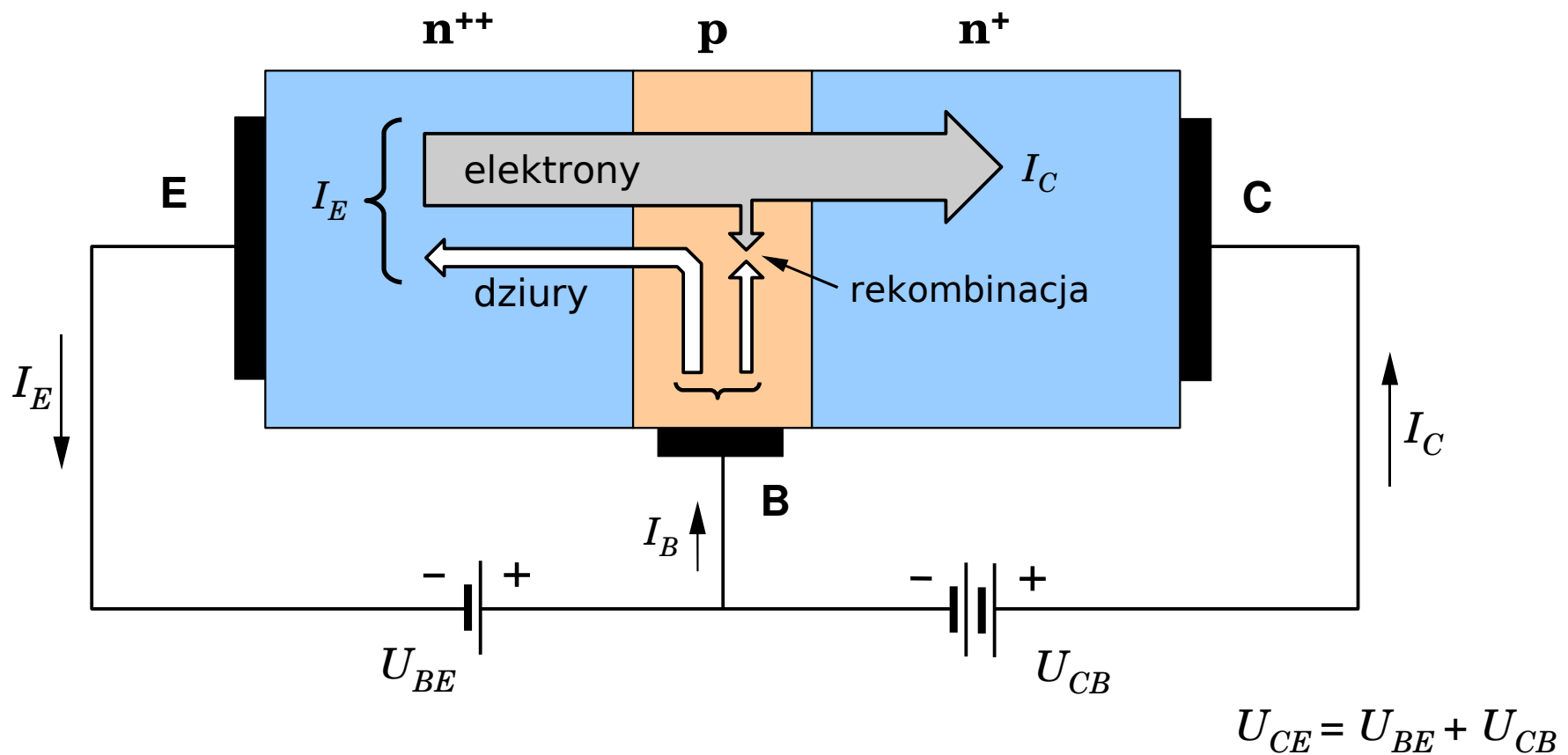


Złącze baza-kolektor spolaryzowane w kierunku zaporowym. Elektrony z emitera dalej pozostają zablokowane przez barierę na złączu emiter-baza.



Jeżeli między emiter i bazę przyłożymy napięcie zmniejszające tę barierę potencjału (polaryzacja w kierunku przewodzenia), elektrony z emitera przechodzą do bazy, a następnie dyfundują do kolektora generując prąd I_C . W obszarze bazy niewielka część elektronów rekombinuje z dziurami tworząc prąd I_B . Niewielkie zmiany napięcia U_{BE} , regulującego wysokość bariery potencjału, prowadzą do znacznych zmian prądu kolektora (oporności między emiterem i kolektorem).

Rozkład prądów w tranzystorze bipolarnym



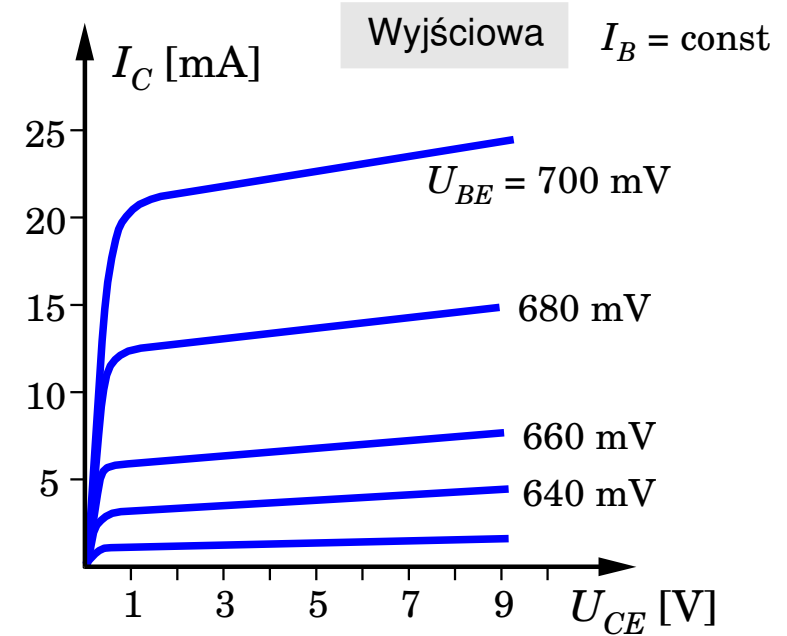
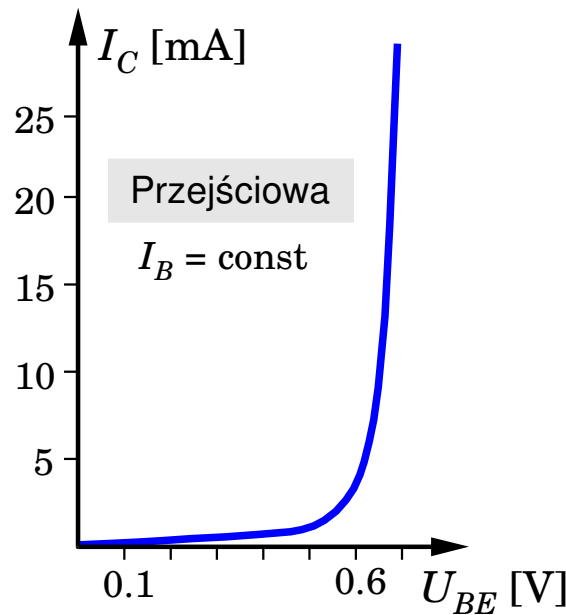
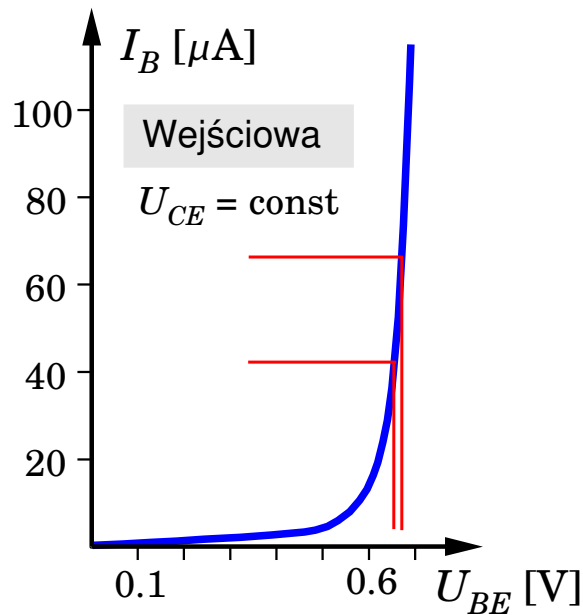
$$I_E = I_C + I_B$$

Współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

przyjmuje wartości od kilku do kilkuset, zwykle $\beta \simeq 100$ $\Rightarrow I_E \simeq I_C$

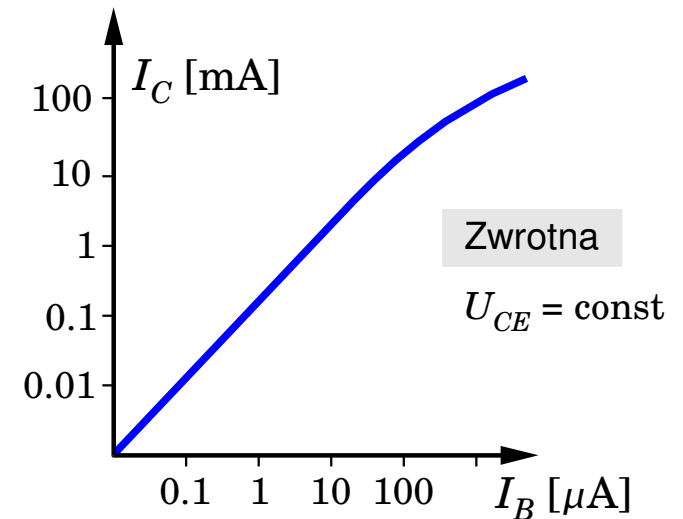
Podstawowe charakterystyki tranzystora



We wzmacniaczach tranzystor pracuje przy napięciach U_{BE} przekraczających napięcie przewodzenia złącza:
~0.65 V dla krzemu,
~0.35 V dla germanu.

Prąd kolektora I_C silnie zależy od napięcia baza-emiter U_{BE} , a słabo od napięcia kolektor-emiter U_{CE} .

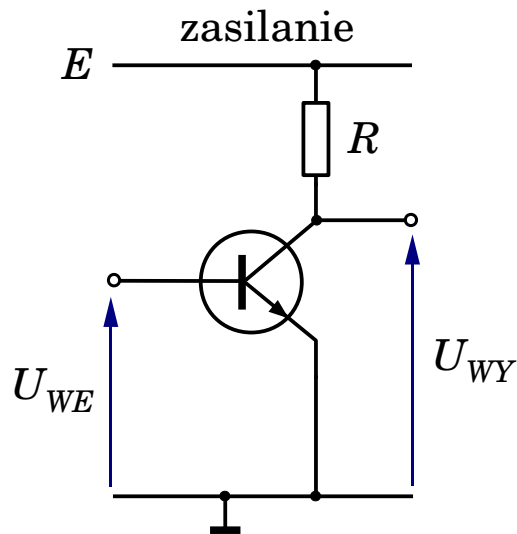
Prąd kolektora jest w szerokim zakresie proporcjonalny do prądu bazy $I_C = \beta I_B$.



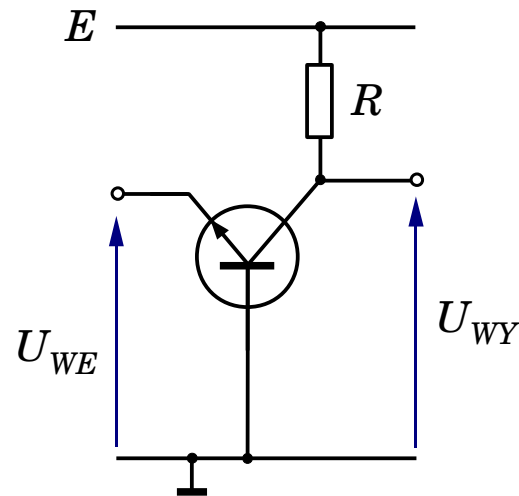
Wzmacniacz tranzystorowy

We wzmacniaczu energia zasilacza zamieniana jest na energię sygnału wyjściowego. Procesem tym steruje sygnał wejściowy – sygnał wyjściowy jest funkcją (jest proporcjonalny do) sygnału wejściowego.

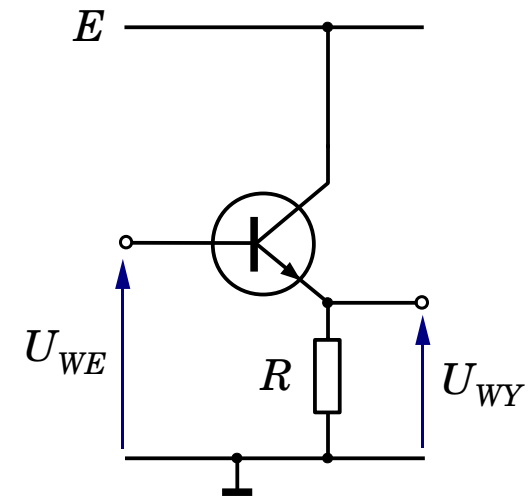
Podstawowe układy wzmacniające z tranzystorem bipolarnym:



o wspólnym emiterze

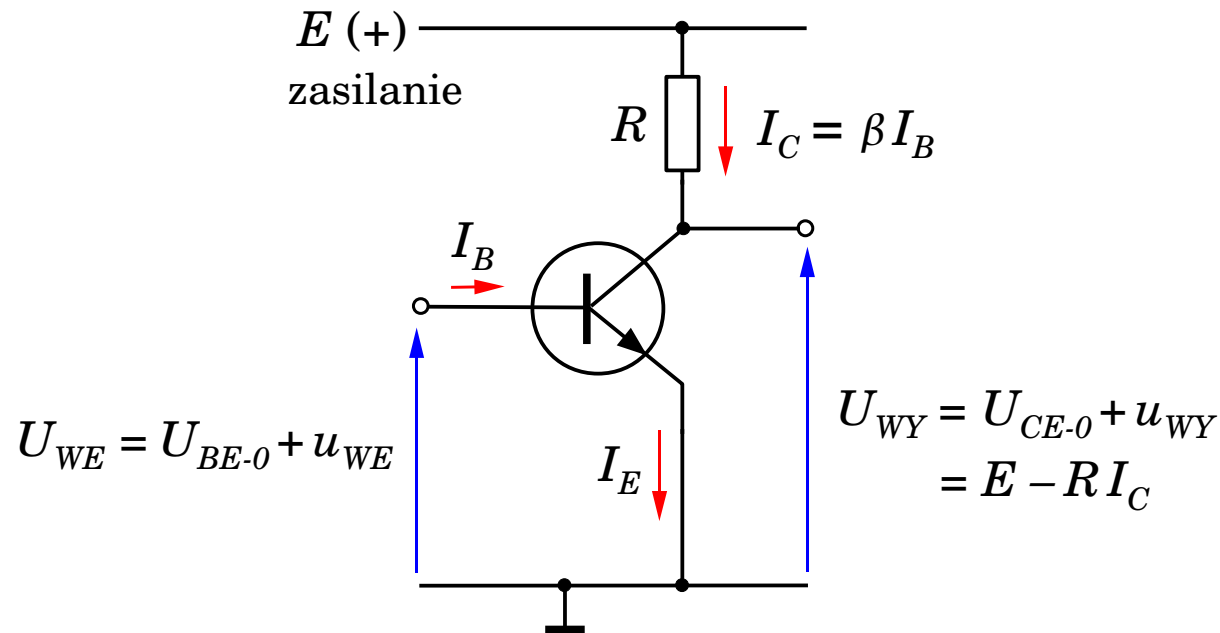


o wspólnej bazie



o wspólnym kolektorze

Wzmacniacz o wspólnym emiterze



- Napięcie na wejściu układu U_{WE} jest sumą stałego napięcia U_{BE-0} , które polaryzuje złącze emiter-baza w kierunku przewodzenia, oraz zmiennego w czasie sygnału wejściowego u_{WE} .
- Sygnał wejściowy u_{WE} generuje na wyjściu sygnał zmiennie-napięciowy u_{WY} . Napięcia stałe polaryzujące tranzystor (U_{BE-0} , U_{CE-0}) określają tzw. punkt pracy.
- Prąd wyjściowy (prąd płynący przez rezystor R) jest prądem kolektora, β -krotnie większym od prądu wejściowego (prądu bazy). Wzmocnienie prądowe tego układu jest duże.
- Napięcie wyjściowe zależy liniowo od spadku napięcia na rezystancji R . Wzmocnienie napięciowe jest zatem proporcjonalne do R i może osiągać duże wartości.
- Sygnał wyjściowy jest przesunięty w fazie względem sygnału wejściowego o 180° .
- Rezystancja wejściowa układu jest rzędu $1 \text{ k}\Omega$, rezystancja wyjściowa $\simeq R$.

Tranzystory polowe (unipolarne)

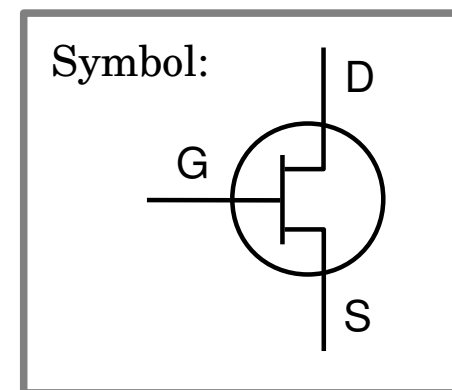
Field Effect Transistor (FET)

W tranzystorach polowych sterowanie przepływem prądu w kanale utworzonym pomiędzy elektrodami zwanymi źródłem (S) i drenem (D) odbywa się za pomocą zmian pola elektrycznego przyłożonego do elektrody nazywanej bramką (G).

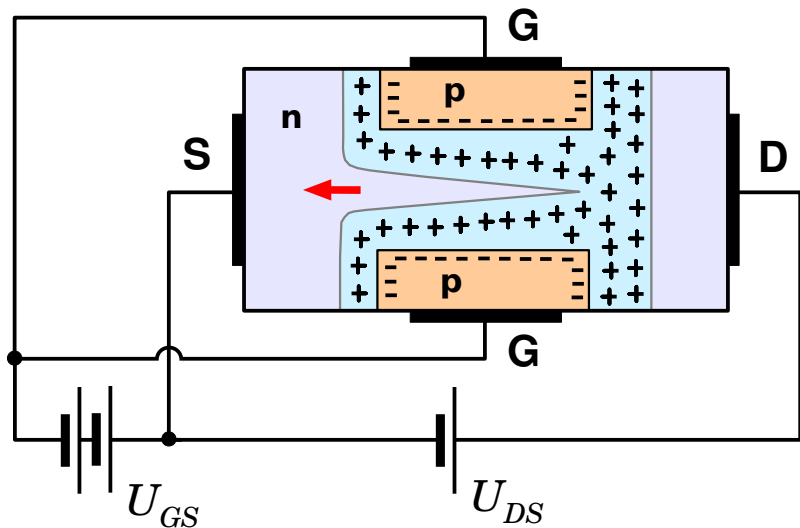
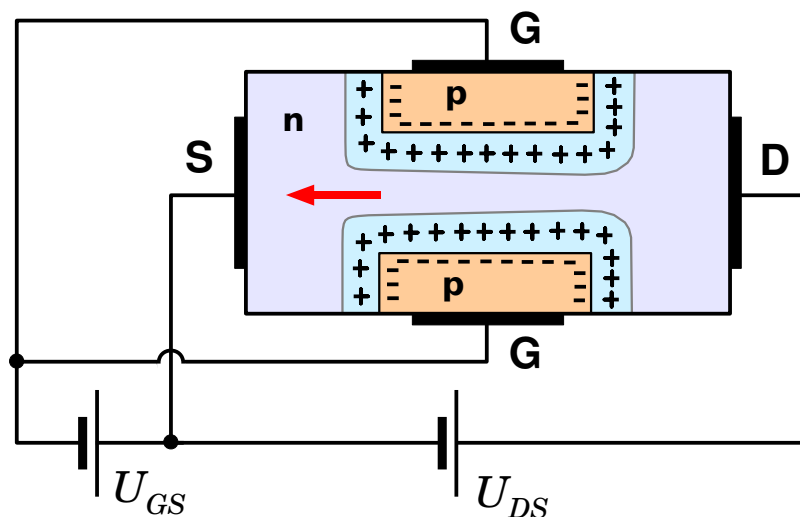
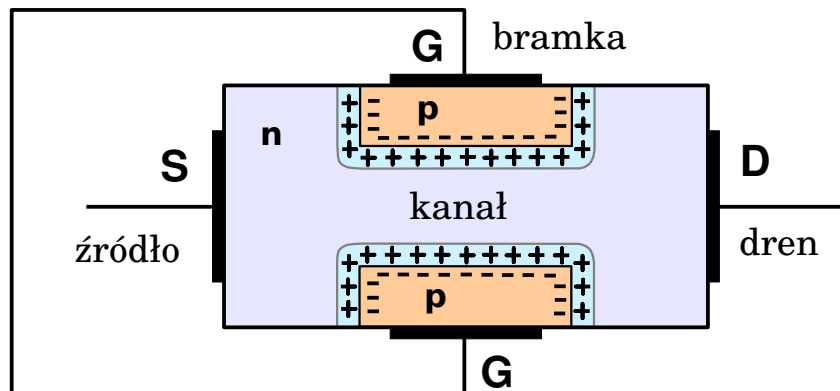
Wyróżnia się dwa główne rodzaje tranzystorów polowych:

- złączowe (JFET, Junction FET)
- z izolowaną bramką (IGFET, MOSFET).

Różnią się one sposobem odizolowania bramki od kanału.



Tranzystor JFET



Tranzystor polowy złączowy zbudowany jest z półprzewodnika (w naszym przykładzie typu n), w który wdyfundowano dwa obszary bramki (typu p). Pomędzy źródłem i drenem prąd może płynąć tylko kanałem, którego szerokość ograniczona jest obszarami złącza z bramką, czyli strefami ładunku przestrzennego o wysokiej oporności. Rezystancję kanału można zmieniać przez zmianę jego szerokości, a więc przez zmianę napięcia U_{GS} polaryzującego złącze p-n w kierunku zaporowym. Odpowiednio duże napięcie U_{GS} może spowodować połączenie warstw zaporowych i zamknięcie kanału. Rezystancja będzie wówczas bardzo duża (rzędu $M\Omega$).

Tranzystor JFET stanowi rezystor sterowany napięciowo.