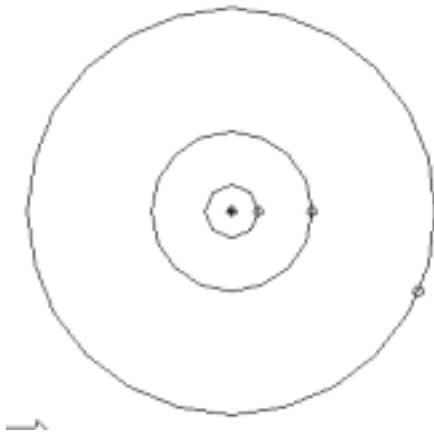


WYKŁAD 4

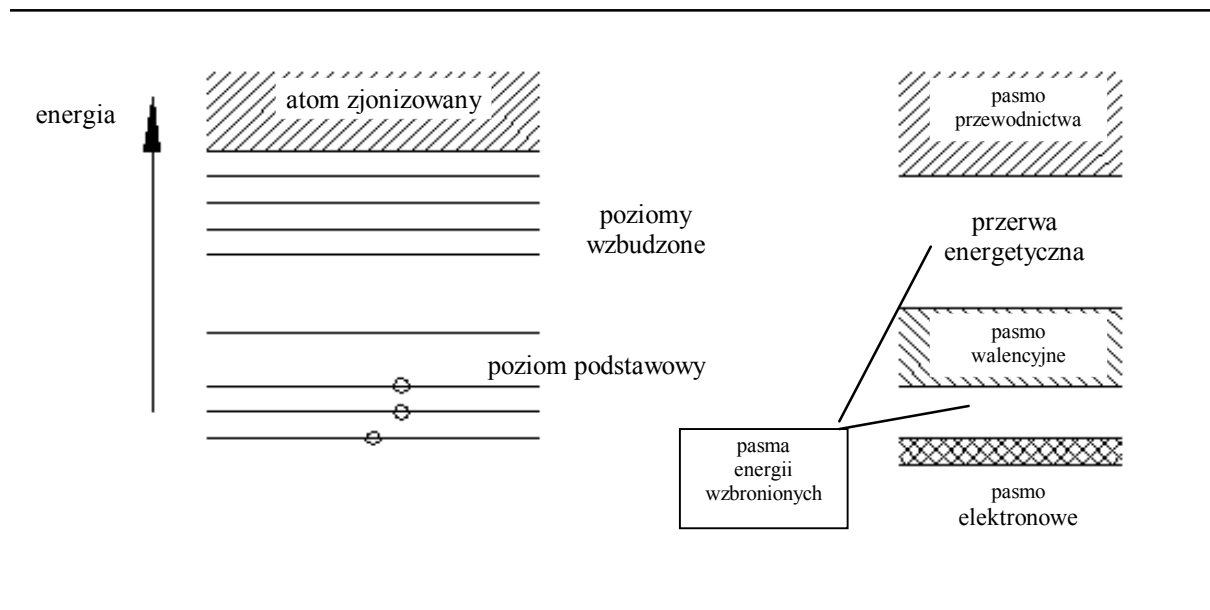
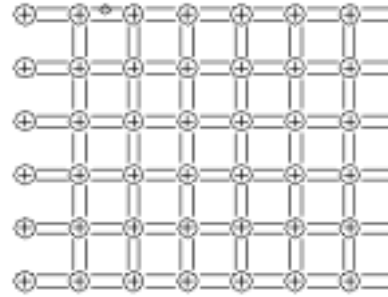
Przewodnictwo kryształów.

W atomach elektrony mogą przyjmować dyskretne wartości energii - mówimy, że mogą znajdować się na pewnych **poziomach energetycznych**.

ATOM



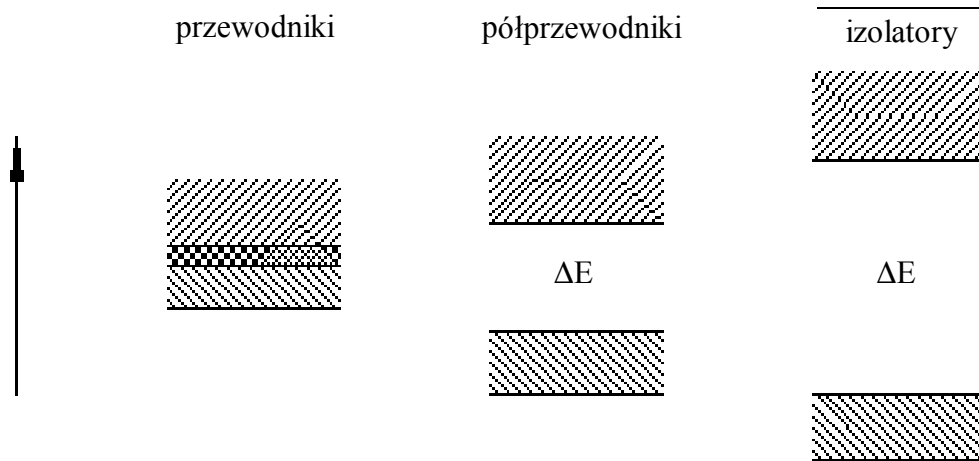
KRYSZTAŁ



W kryształach, ze względu na wzajemne oddziaływanie gęsto upakowanych jonów i elektronów, poziomy elektronowe ulegają modyfikacji do postaci **pasm energii** dozwolonej dla elektronów, oddzielonych **pasdami energii zabronionej**. Pasmo walencyjne to najwyższe pasmo wypełnione elektronami związanymi z jonami sieci krystalicznej. W paśmie przewodnictwa elektron staje się wspólny dla całego kryształu i może się w nim przemieszczać pod wpływem pola

elektrycznego. Mówimy wtedy, że jest nośnikiem prądu. O przewodnictwie kryształu decyduje koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa.

Materiały krystaliczne dzielą się na:



W przewodnikach (metalach) pasmo przewodnictwa i pasmo walencyjne częściowo pokrywają się ze sobą. Istnieje więc określona i w miarę stabilna koncentracja elektronów zdolnych do przewodzenia prądu. W półprzewodnikach (samoistnych) pasmo walencyjne i pasmo przewodnictwa są rozdzielone przerwą energetyczną, na tyle małą, że na elektrony mogą po otrzymaniu porcji energii $>\Delta E$ pokonać ją (ΔE szerokość pasma zabronionego). Energii aktywacji dostarczyć może kwant światła lub fluktuacja termiczna. Dlatego koncentracja nośników (a tym samym przewodnictwo) w półprzewodniku zależy od temperatury, natężenia promieniowania, itp. W izolatorach przerwa energetyczna jest na tyle duża, że w normalnych warunkach liczba elektronów zdolnych znaleźć się w paśmie przewodnictwa jest bardzo mała.

Przewodnictwo metali.

Prąd jest ruchem ładunków pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. W próżni pojedynczy elektron porusza w jednorodnym polu elektrycznym ruchem jednostajnie przyspieszonym. W materiałach elektron, który rozpędza się pod wpływem pola elektrycznego, po pewnym czasie zderza się z przeszkodą. Najwydajniejszymi centrami rozpraszania są nie jony tworzące kryształ, lecz zanieczyszczenia lub oscylacje sieci krystalicznej - **fonony**. W rezultacie rozpraszania elektrony tworzą chmurę, która zwolna dryfuje wzdłuż pola elektrycznego z prędkością V (rzędu cm/s) znacznie mniejszą niż średnia prędkość pojedynczych elektronów w chmurze. Gęstość prądu wynosi:

$$J = \frac{I}{S} = -en_e v$$

- gdzie I oznacza całkowite natężenie prądu, S - pole powierzchni przekroju przewodnika, n_e - koncentrację elektronów, e - ładunek elektronu. Średnia prędkość elektronu określona jest przez czas upływający między zderzeniami τ_e :

$$v = \frac{e\Sigma\tau_e}{2m_e}$$

- gdzie Σ oznacza natężenie pola elektrycznego, m_e - masę elektronu. Prawo Ohma :

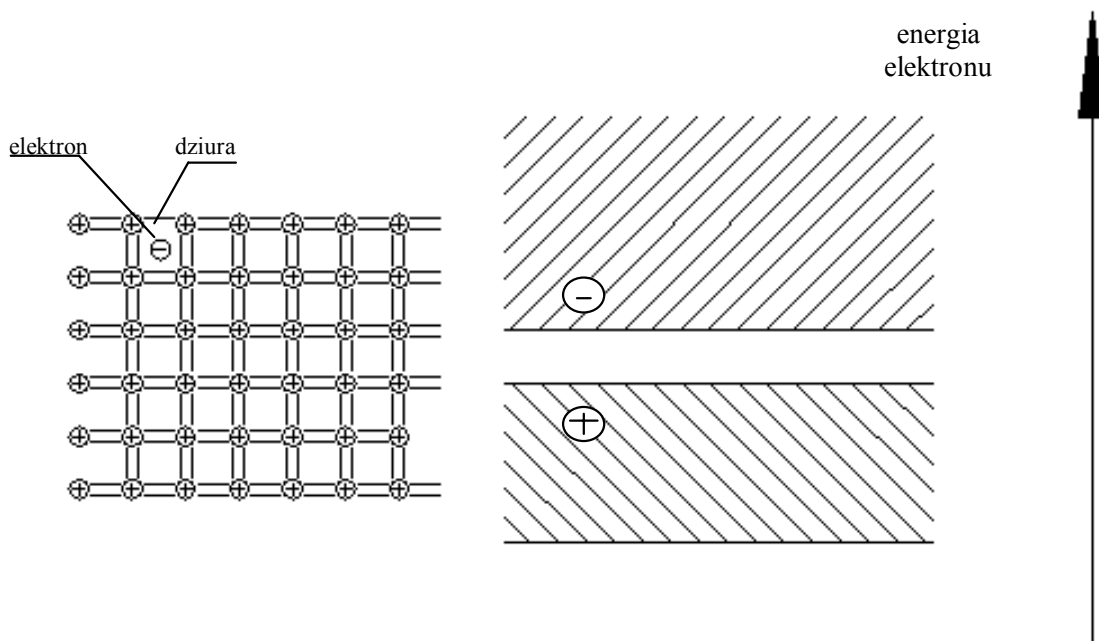
$$\Sigma = \frac{U}{l} = \frac{IR}{l} = \frac{JS}{l} \frac{l}{\sigma S} = \frac{J}{\sigma}$$

Tutaj l oznacza długość przewodnika, σ - przewodnictwo materiału. Po przekształceniach :

$$\sigma = \frac{n_e e^2 \tau_e}{2m_e}$$

W metalach koncentracja elektronów bardzo słabo zależy od temperatury ($n_e = \text{const}$). Jednak wraz ze wzrostem temperatury zwiększają się drgania sieci krystalicznej. Rośnie więc koncentracja fononów. Powoduje to zwiększenie rozpraszania i zmniejszenie τ_e . Dzięki temu **opór metali zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury.**

Półprzewodniki samoistne.



Jeżeli elektron znajdujący się w paśmie walencyjnym zaabsorbuje porcję (kwant) energii o wielkości przekraczającej szerokość pasma energii wzbronionej, nastąpi zerwanie wiązania w kryształ, czyli uwolnienie elektronu do pasma przewodnictwa. Odpowiedni kwant energii może być

dostarczony np. przez termiczne drgania sieci krystalicznej (fonony)¹, czy też przez napromieniowanie kryształu falami elektromagnetycznymi (fotonami) o odpowiedniej częstotliwości. Po przeniesieniu elektronu do pasma przewodnictwa w paśmie walencyjnym pozostaje dziura, czyli quasi ładunek dodatni, który także może się przemieszczać w kryształ. Swobodne elektrony i dziury są **nośnikami prądu**. W półprzewodniku samoistnym **przewodnictwo jest elektronowo-dziurowe: nośnikami prądu są elektrony i dziury**. Rozkład energii² E nośników jest w przybliżeniu rozkładem Boltzmana : $n_e \propto \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$ (k - stała Boltzmana, T - temperatura)

Para nośników elektron- dziura rekombinuje średnio po czasie $10^{-5} - 10^{-7}$ s.

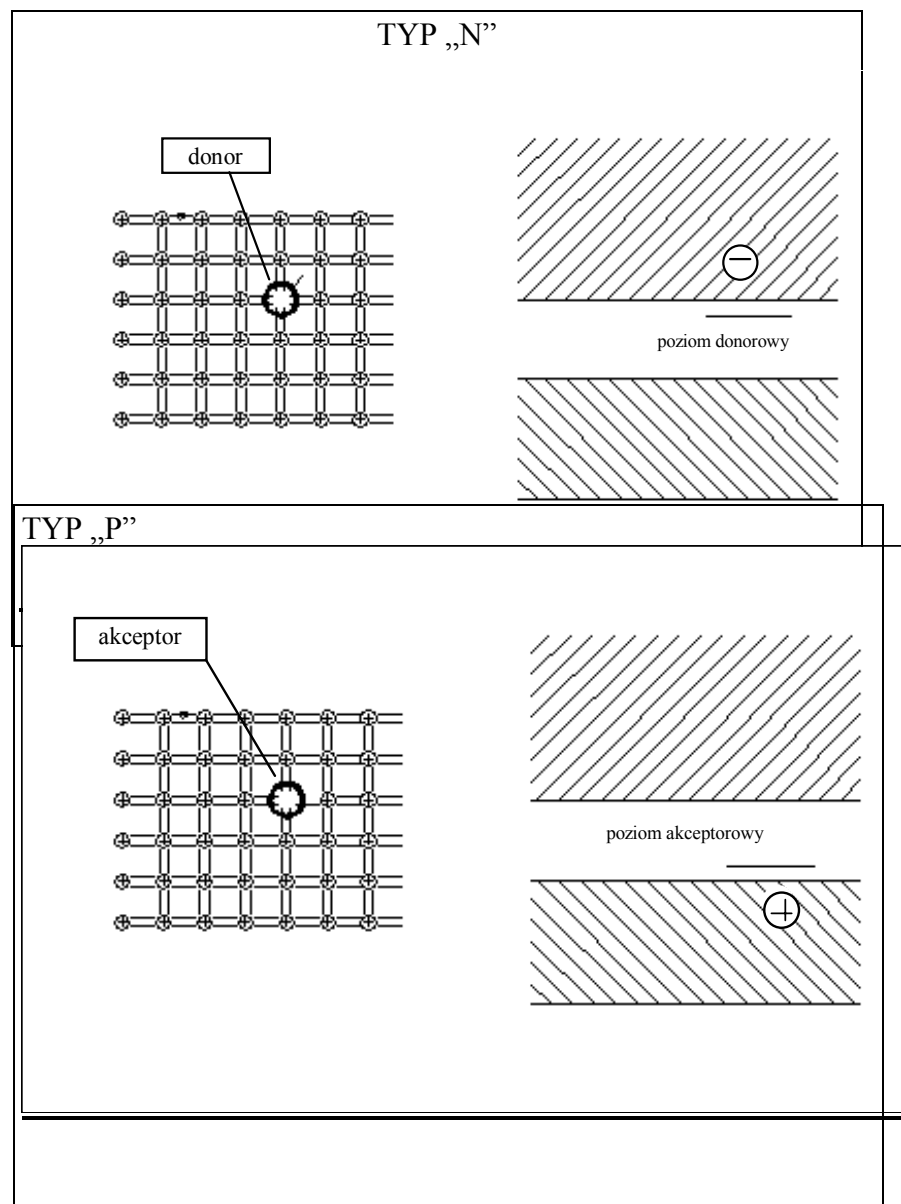
Półprzewodniki

domieszkowane.

Wtrącenie do sieci krystalicznej zbudowanej z atomów czterowartościowych domieszki pięciowartościowej (donoru) powoduje wytworzenie elektronu słabo związanego z siecią.

Wtrącenie do sieci krystalicznej zbudowanej z atomów czterowartościowych domieszki trójwartościowej (akceptora) powoduje wytworzenie dziury słabo związanej z siecią.

W temperaturze pokojowej wszystkie domieszki są praktycznie zjonizowane. W ten sposób można wytwarzać półprzewodniki o kontrolowanej, nadmiarowej koncentracji elektronów lub dziur.



¹ Ponieważ drgania sieci zwiększają się wraz ze wzrostem temperatury, przewodność półprzewodników również zwiększa się wraz z temperaturą (odwrotnie niż w metalach).

² Rozkład jest funkcją informującą ile elektronów z ogólnej ich populacji posiada energię zawierającą się między wartościami E i $E+dE$

Złącze p-n.

Eksperyment myślowy³ : dokonujemy zetknięcia kryształu typu n z kryształem typu p.

Różnica stężeń nośników jest przyczyną dyfuzji.

Dziury z półprzewodnika p dyfundują do kryształu typu n, gdzie rekombinują. Elektrony z kryształu typu n dyfundują do kryształu typu p, gdzie również rekombinują. Blisko złącza w kryształach typu p pozostają centra akceptorowe, a w kryształach typu n



centra donorowe, czyli niezobojętnione **jony związane z siecią krystaliczną nie mogące przewodzić prądu**. Tworzą one **ładunek przestrzenny**. Wskutek zubożenia w nośniki obszar ładunku przestrzennego charakteryzuje znacznie zwiększoną rezystancją.

Dzięki ucieczce elektronów i napływowi dziur kryształ typu n naładował się dodatnio.

Dzięki ucieczce dziur i

napływowi elektronów kryształ typu p naładował się ujemnie. W rezultacie, w krótkim czasie na styku obu materiałów powstaje **bariera potencjału** o wartości

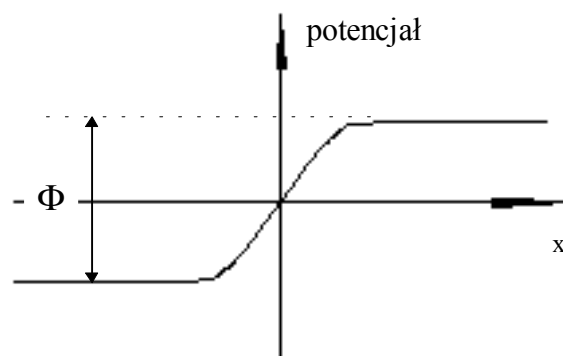
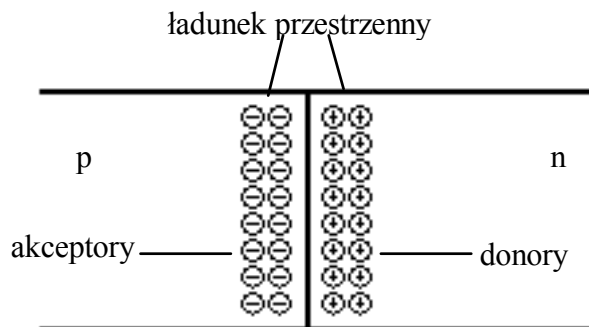
Φ . Ogranicza ona dyfuzję

nośników i prowadzi do

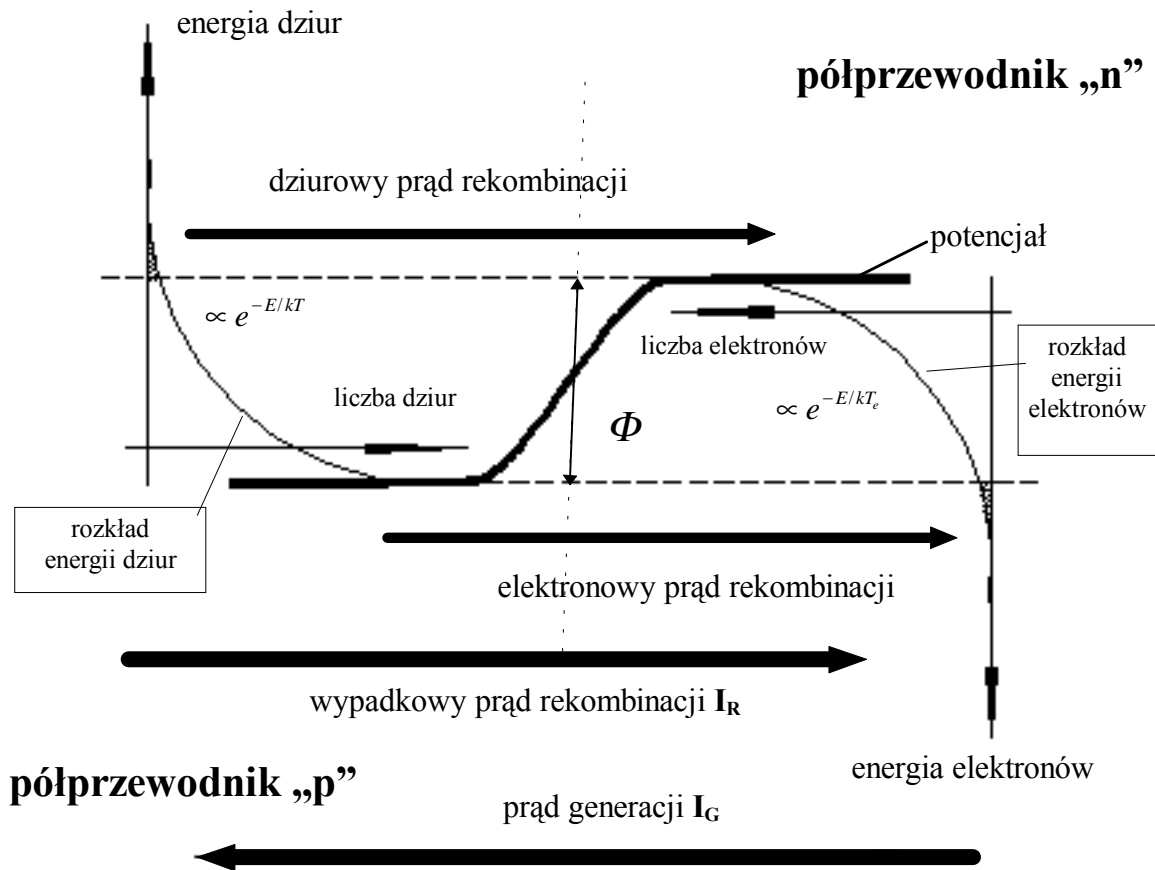
stabilizacji sytuacji w złączu.

Jest to jednak równowaga

dynamiczna.



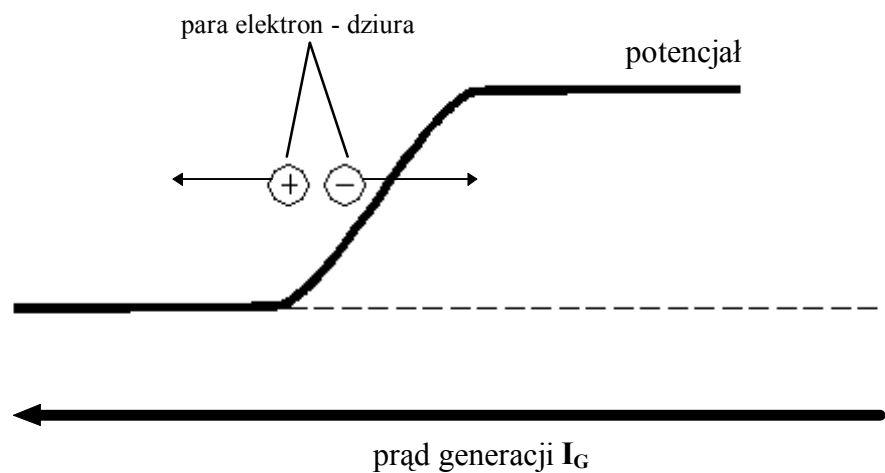
³ W rzeczywistości złącza p-n nie da się wytworzyć przez proste zetknięcie dwóch kryształów, technologia wykonywania złącza jest znacznie bardziej skomplikowana.



Barierę potencjału mogą pokonać tylko nośniki o dużych energiach. Ruch tych nośników jest odpowiedzialny za dziurowy i elektronowy prąd rekombinacji, składające się na wypadkowy **prąd rekombinacji I_R** . Ponieważ jest on proporcjonalny do liczby nośników zdolnych pokonać barierę potencjału Φ :

$$I_R \propto \int_{e\Phi}^{\infty} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE \quad \text{czyli} \quad I_R = I_A \exp\left(-\frac{e\Phi}{kT}\right)$$

Całkowity prąd płynący przez złącze jest jednak równy zero, gdyż prąd I_R jest równoważony przez prąd generacji I_G powstający w wyniku wytwarzania w złączu par elektron-dziura. A więc prąd generacji :

$$I_G = I_A \exp\left(-\frac{e\Phi}{kT}\right)$$


Po przyłożeniu do złącza napięcia zewnętrznego U , jak na rysunku obok, następuje zmniejszenie napięcia bariery potencjału Φ o to napięcie. Wtedy zwiększa się liczba nośników, które są zdolne ją pokonać i prąd płynący przez złącze wzrasta. Mówimy, że złącze zostało **spolaryzowane w kierunku przewodzenia**.

Gdy kierunek zewnętrznego napięcia U jest odwrotny, (złącze zostało **spolaryzowane w kierunku zaporowym**) bariera potencjału wzrasta do wartości $\Phi+U$ i prąd rekombinacji maleje. W ogólności wyraża się on wzorem :

$$I_R = I_A \exp\left[-\frac{e(\Phi - U)}{kT}\right]$$

czyli :

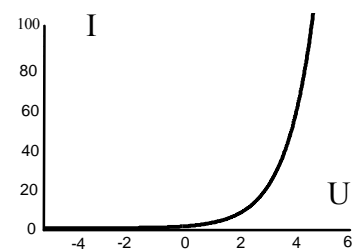
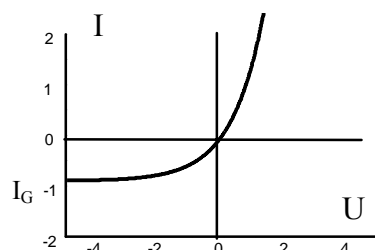
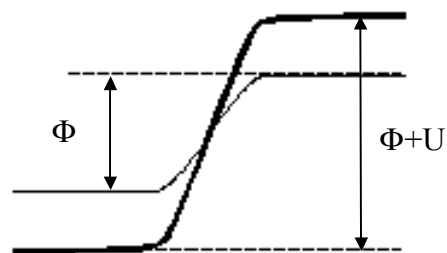
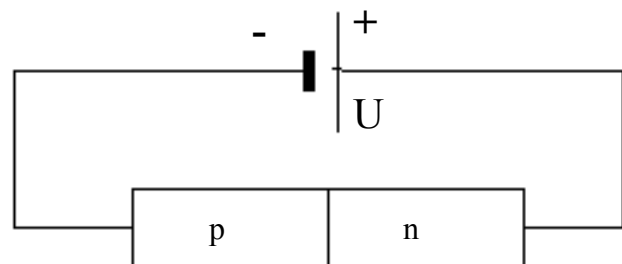
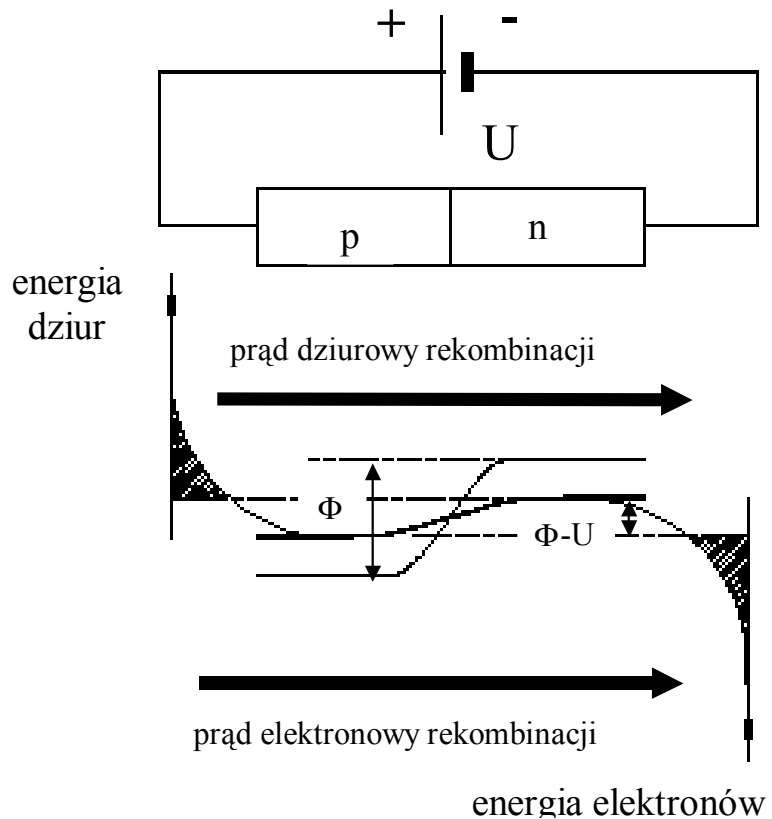
$$I_R = I_G \exp\left[\frac{eU}{kT}\right]$$

Ponieważ prąd płynący przez złącze jest sumą prądu rekombinacji i generacji, to :

$$I = I_G \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$$

Jest to równanie opisujące pracę złącza p-n, zwane równaniem Shockley'a.

Najpowszechniej wykorzystuje się nieliniowe własności złącza pn do **prostowania prądów elektrycznych**.

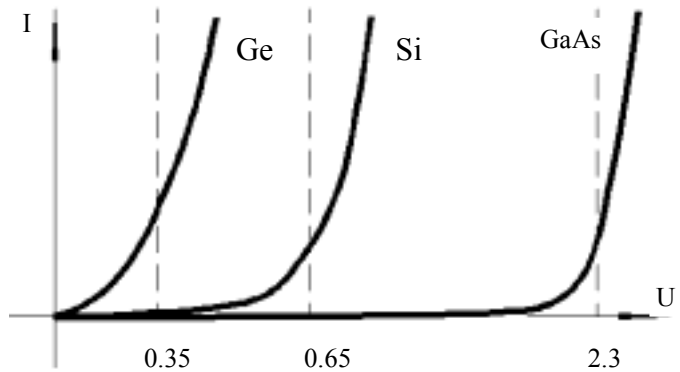


Dioda półprzewodnikowa.

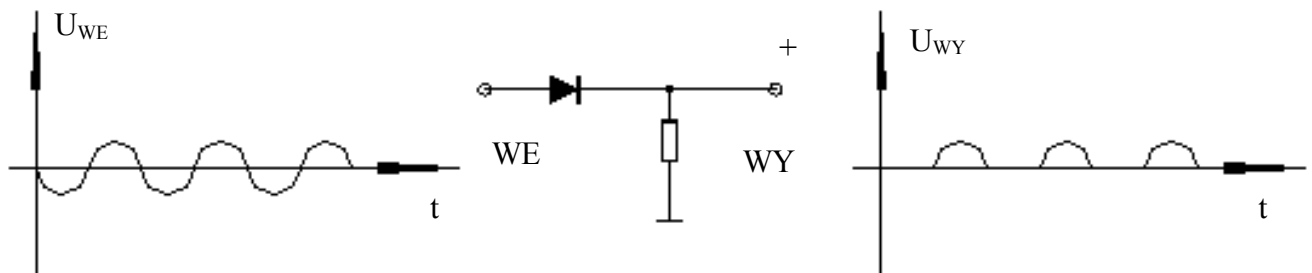
W praktyce, dla większych prądów równanie Shockley'a należy zmodyfikować do postaci :

$$U = \frac{MkT}{e} \ln\left(\frac{I}{I_G} + 1\right) + Ir$$

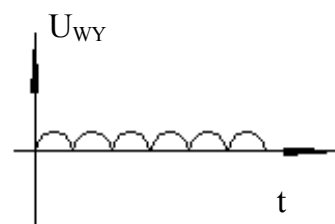
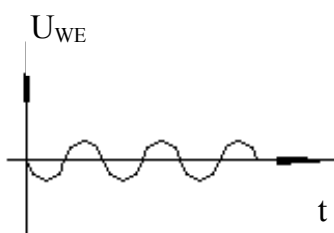
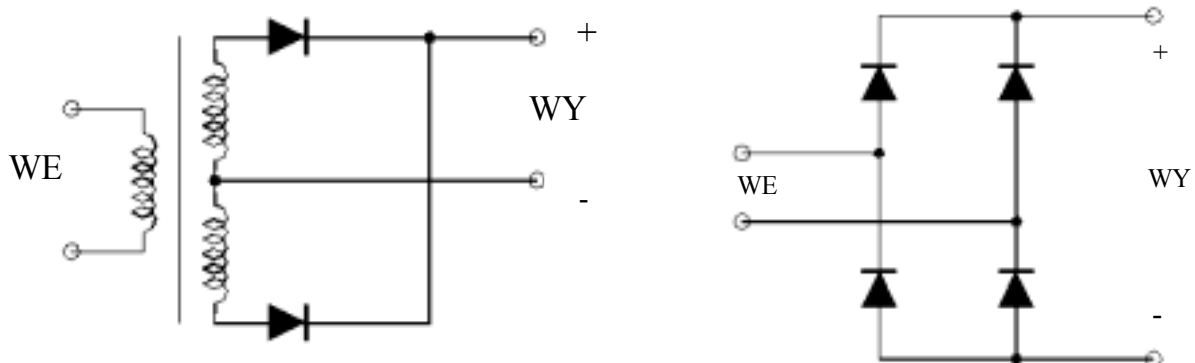
gdzie r oznacza rezystancję materiały diody (pasożytnicza), a M - współczynnik związany z typem półprzewodnika. M określa **napięcie przewodzenia (U_p) złącza danego rodzaju**, czyli napięcie w kierunku przewodzenia, dla którego prąd diody osiąga umownie dużą wartość. Wynosi ono około : **0.35 V dla złącz germanowych, 0.65 V dla krzemowych i 2.3 V dla złącz z arsenku galu.**



Prostownik jednopółwkowy.



Prostowniki dwupółwkowe.



Najważniejsze parametry diody półprzewodnikowej to dopuszczalne napięcie wsteczne, dopuszczalny prąd przewodzenia oraz tzw. czas odzyskiwania zdolności zaworowej τ_{rr} .

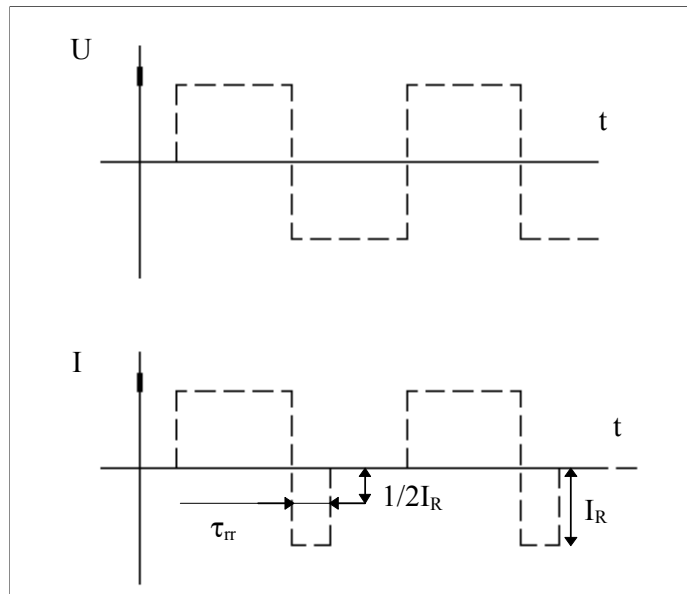
Gdy złącze pn znajduje się w stanie przewodzenia dziury wpływają do półprzewodnika typu n a elektrony do półprzewodnika typu p. Rekombinacja ich następuje średnio po czasie $10^{-5} - 10^{-7}$ s. Jeżeli następują szybkie zmiany napięcia na złączu nośniki, które nie zrekombinowały, mogą powrócić przez złącze, dając impuls prądu wstecznego o amplitudzie I_R trwający przez czas τ_{rr} . Czas τ_{rr} ogranicza częstotliwość prądów, które mogą być przez daną diodę prostowane.

Dioda Zenera.

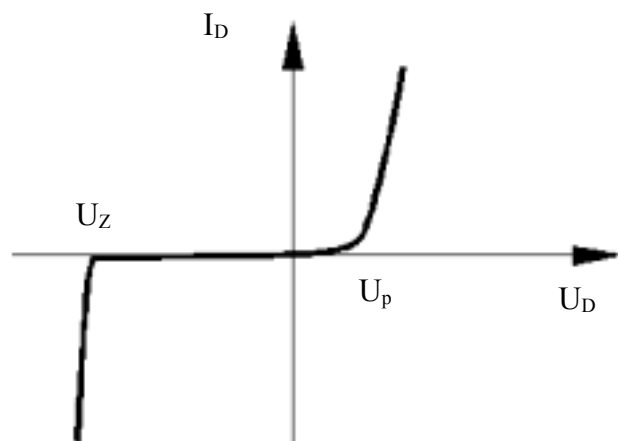
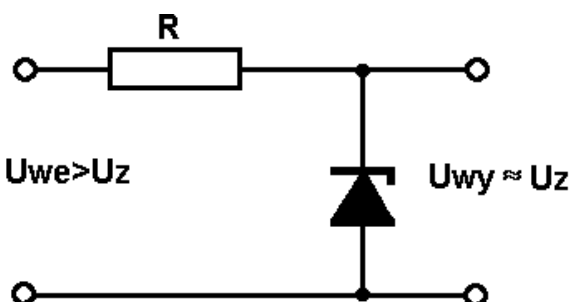
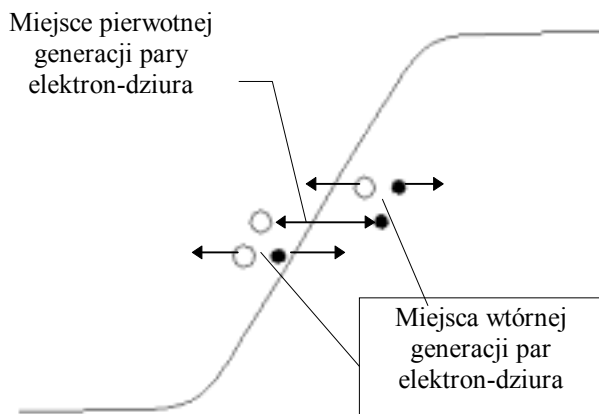
Dopuszczalne napięcie wsteczne diody jest ograniczone przez napięcie przebicia, zwane **napięciem Zenera (U_Z)**. Dla wysokich napięć zaporowych natężenie pola elektrycznego jest tak duże, że generowane w złączu nośniki są przyspieszane do energii, przy których zderzając się z siecią krystaliczną powodują generację wtórnych par elektron-dziura, które są dalej powielane itd. W rezultacie w złączu powstaje lawina nośników i złącze przewodzi. Dla bardzo silnych pól w złączu dodatkowo zachodzi efekt uwalniania nośników z sieci krystalicznej w wyniku odkształcenia pola wiążącego jony.

Po przekroczeniu napięcia przebicia prąd diody gwałtownie zwiększa się. Pochodna charakterystyki dI_D/dU_D jest w tej części jest bardzo duża.

Dzielnik napięcia z diodą Zenera wykorzystuje się do stabilizacji napięć.

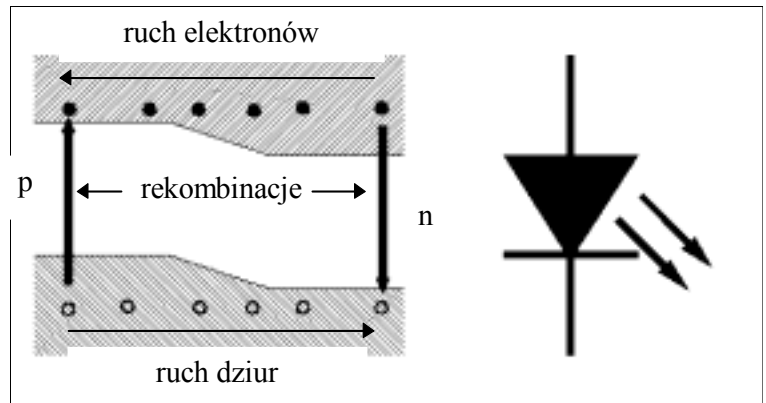


Dla wysokich napięć zaporowych natężenie pola



Dioda świecąca (elektroluminescencyjna).

Gdy złącze pn zostanie spolaryzowane w kierunku przewodzenia, dzięki obniżeniu bariery potencjału dziury wnikają do półprzewodnika typu n, a elektrony do półprzewodnika typu p. W złączu następują intensywne spontaniczne procesy rekombinacyjne. Rekombinacja dziury i elektronu jest związana z emisją kwantu promieniowania o energii równej w przybliżeniu szerokości przerwy energetycznej. W przypadku diod z arsenku galu (GaAs) fotony te nie są reabsorbowane przez kryształ; ich długość fali zawiera się w widzialnej dziedzinie widma. Diody elektroluminescencyjne należą do najwydajniejszych źródeł światła (sprawność ~25 - 30 %). Ostatnio opracowano diody z azotku galu (GaN) emitujące w niebieskiej części widma, a współczesne prace mają na celu opracowanie taniej technologii ich wytwarzania.



reabsorbowane przez kryształ; ich długość fali zawiera się w widzialnej dziedzinie widma. Diody elektroluminescencyjne należą do najwydajniejszych źródeł światła (sprawność ~25 - 30 %). Ostatnio opracowano diody z azotku galu (GaN) emitujące w niebieskiej części widma, a współczesne prace mają na celu opracowanie taniej technologii ich wytwarzania.

Laser półprzewodnikowy (materiał dodatkowy).

Jeżeli odpowiednio przygotowane złącze pn zostanie spolaryzowane bardzo silnym prądem w kierunku przewodzenia może w nim dojść do inwersji obsadzeń nośników, co oznacza że lokalnie w strefie przyłączonej w półprzewodniku typu n koncentracja dziur będzie dominowała nad koncentracją elektronów i analogicznie w półprzewodniku typu p w strefie przyłączonej koncentracja elektronów będzie dominowała nad koncentracją dziur. W tych warunkach może dojść do uspoźnienia procesów rekombinacji, która będzie zachodziła w sposób wymuszony, a złącze będzie emitowało promieniowanie laserowe.

Fotodioda.

W zaporowo spolaryzowanym złączu pn prąd wsteczny jest określony przez prąd generacji I_G . Jeżeli złącze zostanie oświetlone promieniowaniem zdolnym wzbogacać proces generacji nośników (promieniowaniem świetlnym) prąd generacji zwiększy się, co spowoduje zwiększenie prądu wstecznego. **Fotodiody** należą do najszybszych detektorów promieniowania : najszybsze z nich charakteryzują się rozdzielczością czasową dochodzącą do 10 ps.

Zjawisko generacji zachodzące w złączu pn jest wykorzystywane w **ogniwach słonecznych**

Jeżeli odpowiednio zbudowana fotodioda zostanie spolaryzowana wysokim napięciem wstecznym - blisko napięcia Zenera - po oświetleniu złącza może dojść do powielania wygenerowanych par elektron - dziura. W rezultacie zaabsorbowany w wyniku zjawiska fotoelektrycznego wewnętrzny pojedynczy kwant może dać impuls prądu składający się z 10^7 - 10^8 elektronów. W ten sposób działają **fotodiody lawinowe**, detektory zdolne rejestrować pojedyncze kwanty promieniowania świetlnego.

