

Przewodniki, półprzewodniki i izolatory

Według współczesnego poglądu na budowę materii zawiera ona w stanie normalnym albo inaczej - obojętnym, równie ilości elektryczności dodatniej i ujemnej. Jeżeli takie dwa ciała jak szkło i jedwab potrzeć o siebie, pewna niewielka ilość ładunku elektrycznego przejdzie z jednego ciała na drugie i ciała te z obojętnych staną się naładowanymi.

W przewodnikach ładunki elektryczne mogą się swobodnie poruszać wewnątrz przewodnika, natomiast w izolatorach (dielektrykach) ładunki są unieruchomione. Mimo, że w przyrodzie nie ma doskonałych izolatorów, zdolność izolacyjna stopionego kwarcu jest około 10^{25} razy większa od miedzi.

Doświadczenie Halla wskazuje na to, że w metalach mogą swobodnie poruszać się tylko ładunki ujemne. Ładunki dodatnie są nieruchome, podobnie jak w szkle i w każdym innym dielektryku.

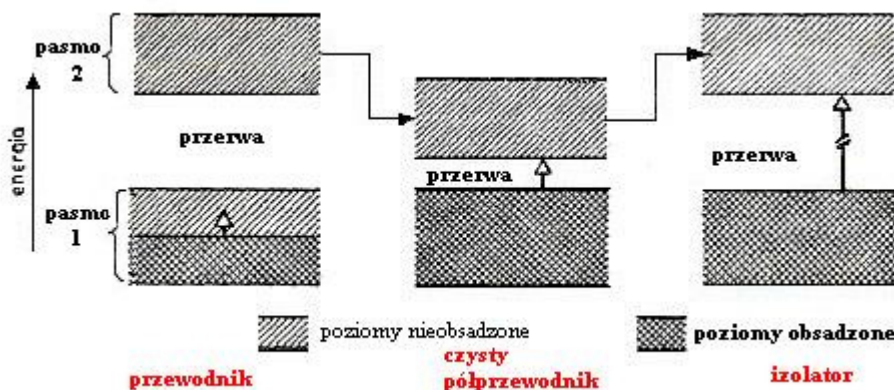
Rzeczywistymi nośnikami ładunku elektrycznego w metalach są elektrony swobodne. Kiedy oddzielne atomy łączą się tworząc metal, najbardziej zewnętrzne elektrony atomów przestają być związane z poszczególnymi atomami i mogą się swobodnie poruszać w całej objętości metalu. W niektórych przewodnikach, takich jak elektrolity, mogą się poruszać zarówno ładunki dodatnie, jak i ujemne.

Istnieje pewna grupa materiałów zwanych *półprzewodnikami*, które pod względem przewodnictwa zajmują miejsce pośrednie pomiędzy przewodnikami a izolatorami. Najbardziej znane to krzem i german.

Pasma przewodnictwa

Z powodu bliskiego sąsiedztwa atomów w sieci krystalicznej ciała stałego na elektrony znajdujące się w powłokach elektronowych poszczególnych atomów działają siły przyciągania nie tylko własnych jąder, lecz także i sąsiednich. W wyniku tego oddziaływania wokół jąder powstają nowe, dozwolone poziomy energetyczne, leżące bardzo blisko siebie, tworząc odpowiednio szerokie *pasma energetyczne*. Pasmom tym odpowiada już nie ściśle określona wartość energii, lecz pewien jej zakres. Ponieważ pasmo jest utworzone z wielu bardzo blisko siebie położonych poziomów energetycznych, więc niewielkie nawet zmiany energii elektronu powodują jego przejście w obrębie pasma z jednego poziomu na drugi.

Pasma energetyczne kolejnych warstw powłoki są tym szersze im większa jest ich odległość od jądra, przy czym są one od siebie oddzielone *przerwaniami energii wzbronionej* dla elektronów.



Rys.1 Schematyczna ilustracja zasadniczych cech różniających przewodniki, półprzewodniki i izolatory.

W ciałach stałych, elektrony mają energie ograniczone do pewnych poziomów, które należą do pewnych pasm. Przecięcia pomiędzy pasmami są zabronione, tzn. że elektrony w ciele stałym nie mogą mieć tych energii. Elektrony są przypisane po dwa do każdego poziomu i nie mogą zwiększyć swojej energii (co znaczy, że nie mogą poruszać się swobodnie poprzez ciało stałe), chyba że są wolne łatwo dostępne poziomy przy wyższych energiach. Wtedy mogą się poruszać.

Na rysunku 1 przedstawiono przewodnik, np. miedź. Pasma 1 jest tylko częściowo zajęte, tak, że elektrony mogą łatwo przejść do wyższych poziomów, a zatem poruszać się przez ciało stałe.

W czystym półprzewodniku, np. krzemie, pasmo 1 jest całkowicie wypełnione, ale pasmo 2 jest tak energetycznie blisko, że elektrony mogą łatwo "przeskoczyć" na niezapełnione poziomy tego pasma (elektrony mogą np. absorbować energię z fluktuacji termicznych).

W przypadku izolatora, np. chlorku sodu, pasmo 1 jest również zajęte, ale pasmo 2 jest energetycznie za wysoko nad pasmem 1, aby pozwolić jakiegokolwiek znaczącej liczbie elektronów pasma 1 przeskoczyć tę przerwę energetyczną.

Metale

W sieci krystalicznej metali w szerokim pasmie zewnętrznym, tzw. **pasmie przewodnictwa** znajdują się wspólne dla wszystkich atomów elektrony swobodne, natomiast wymiana elektronów w wewnętrznym pasmie jest utrudniona. Atomy metali o dobrym przewodnictwie elektrycznym np.: miedzi i srebra mają w zewnętrznej, częściowo wypełnionej warstwie powłoki tylko po jednym elektronie. Elektrony te, tworzące tzw. *gaz elektronowy*, poruszają się swobodnie w utworzonym w sieci krystalicznej metalu pasmie przewodnictwa.

Inne pierwiastki metaliczne np.: żelazo, nikiel, których zewnętrzne warstwy powłok są całkowicie wypełnione elektronami, nie powinny wykazywać przewodnictwa elektrycznego. Okazało się jednak, że w powłoce elektronowej tych pierwiastków są jeszcze wolne miejsca w warstwach bliższych jądra, przy czym w czasie łączenia się ich atomów w ciało stałe poziomy energetyczne warstwy niezapełnionej zbliżają się wskutek oddziaływania sąsiednich jąder, do poziomów warstwy całkowicie zapełnionej tworząc poszerzone, wspólne pasmo przewodnictwa. Elektrony znajdujące się w tym pasmie mogą się swobodnie poruszać, stając się nośnikami prądu.

Okazało się, że liczba elektronów swobodnych jest równa liczbie atomów w metalu i nie zależy od jego wartościowości, czyli od liczby elektronów w zewnętrznej warstwie powłoki elektronowej.

Izolatory

Ciała stałe, w których mimo wzajemnego oddziaływania atomów warstwy zewnętrzne ich powłok elektronowych są całkowicie wypełnione elektronami, a przedziały energii wzbronione są tak duże, że energia cieplna elektronu nie wystarcza do jego przejścia w pasmo przewodnictwa - nie wykazują przewodnictwa elektrycznego, czyli są izolatorami.

Półprzewodniki

Wzajemne oddziaływanie atomów w sieci krystalicznej półprzewodnika wytwarza taki układ zewnętrznych warstw elektronowych, że pasmo przewodnictwa jest niezbyt odległe od pasma podstawowego, zaś siły które wiążą znajdujące się w nich elektrony z jądrami, mają stosunkowo niewielką wartość. Wskutek tego energia cieplna elektronu, zwiększona np. przez zderzenie z sąsiednim atomem, staje się wystarczająca do przerzucenia go do niecałkowicie obsadzonego pasma przewodnictwa. Elektrony znajdujące się w tym pasmie stają się swobodne, uzyskując właściwości prądu. Jednakże ze względu na niewielką liczbę takich uwolnionych elektronów, opór elektryczny półprzewodnika jest wielokrotnie większy od oporu metali, choć znacznie mniejszy od oporu izolatorów.

Zależność oporu elektrycznego substancji od temperatury

Metale

Z punktu widzenia wewnętrznej budowy metali zjawisko oporu elektrycznego polega na tym, że dodatnie jony metalu, tworzące jego sieć krystaliczną, stawiają opór poruszającym się elektronom, które zderzając się z nimi tracą część swojej energii kinetycznej. Liczba zderzeń będzie tym większa, im większe są wychylenia jonów z położenia równowagi, spowodowane ich ruchem cieplnym. **Stąd wniosek, że opór elektryczny przewodników metalowych wzrasta ze wzrostem temperatury.**

Zależność wyrażająca opór przewodnika w temperaturze t :

$$R_t = R_0 [1 + \alpha_R (t - t_0)]$$

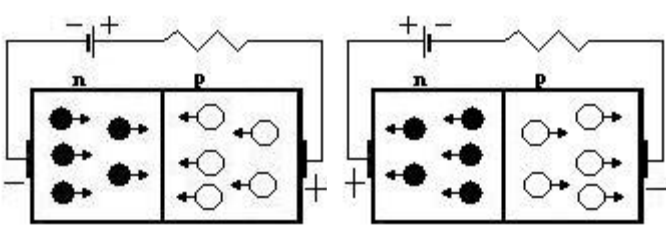
gdzie: R_t - opór w temperaturze t , R_0 - opór początkowy, α_R - termiczny współczynnik oporu (stały dla danego metalu), t - temperatura końcowa, t_0 - temperatura początkowa

Wartość współczynnika α_R dla miedzi w zakresie temperatur od 0 do 100°C wynosi $\alpha_R = 0,004 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

W bardzo niskich temperaturach opór przewodnika staje się bardzo mały. W temperaturach bliskich zera bezwzględnego, występuje dla niektórych przewodników zjawisko gwałtownego spadku oporu właściwego do wartości bliskiej zera. Taka właściwość metali, zwana *nadprzewodnictwem*, umożliwia uzyskanie w zamkniętych obwodach, nadprzewodzących prądów płynących przez bardzo długi okres czasu.

Półprzewodniki

W miarę wzrostu temperatury półprzewodnika zwiększa się energia ruchu cieplnego elektronów, dzięki czemu niektóre z nich mogą uzyskać energię wystarczającą do przejścia do pasma przewodnictwa. **Tym samym, ze wzrostem temperatury**



zwiększa się łączna liczba elektronów swobodnych i maleje opór elektryczny półprzewodnika. Zjawisko ma więc odwrotny charakter niż w przypadku metali, które w tych samych warunkach wykazują wzrost oporu.

Izolatory

W przypadku izolatorów opór elektryczny **nie zmienia się** wraz ze zmianą temperatury.

Półprzewodniki samoistne i domieszkowe.

Półprzewodniki samoistne

Opisane zjawisko przewodzenia prądu przez czysty półprzewodnik pod wpływem ogrzewania lub naświetlania nosi nazwę *przewodnictwa samoistnego*.

Półprzewodniki domieszkowe typu n

Ogromny wpływ na właściwości elektryczne półprzewodnika ma obecność nawet niewielkiej ilości domieszek. Na przykład dodanie do germanu jednej tysięcznej procenta arsenu powoduje około 1000 - krotne zwiększenie jego przewodnictwa. Sieć krystaliczna germanu, którego atomy mają w warstwie zewnętrznej (M) 4 elektrony walencyjne, stanowi typowy przykład wiązania atomowego (kowalentnego), polegającego na tym, że każdy atom germanu w kryształce jest związany, za pośrednictwem tych elektronów, z czterema sąsiednimi atomami. Jeżeli jeden atom germanu w sieci krystalicznej zostanie zastąpiony przez atomy domieszki arsenu, mającego w warstwie zewnętrznej (M) 5 elektronów walencyjnych, to 4 z tych elektronów pozostaną związane z czterema sąsiednimi atomami germanu, piąty zaś, który nie może utworzyć wiązania, staje się elektronem wolnym i przechodzi do pasma przewodnictwa. **Półprzewodnik, w którym występuje nadmiar elektronów nazywa się półprzewodnikiem nadmiarowym lub typu n (ujemnym).**

Półprzewodniki domieszkowe typu p

Zupełnie inny efekt powoduje dodanie do germanu niewielkiej ilości galu, którego atomy mają w warstwie zewnętrznej (M) 3 elektrony walencyjne. Atom taki nie może wytworzyć w sieci krystalicznej germanu pełnego wiązania, bowiem brak mu jednego elektronu. Ten brakujący elektron uzupełniany jest z sąsiedniego atomu germanu, w którym wobec tego pojawia się *dziura*. Po doprowadzeniu napięcia do półprzewodnika dziury będą przemieszczały się w kierunku przeciwnym niż elektrony, zachowując się jak swobodne elementarne ładunki dodatnie. **Opisany półprzewodnik nazywa się półprzewodnikiem niedomiarowym lub typu p (dodatnim).**

Warstwa zaporowa i kierunek przepływu przepustowy.

Rozpatrzmy zjawiska występujące w miejscu styku półprzewodników typu n (o przewodnictwie elektronowym) i typu p (o przewodnictwie dziurowym).

Kierunek przepływu przepustowy

Jeżeli płytkę złożoną z dwóch takich półprzewodników połączymy ze źródłem napięcia w ten sposób, że do półprzewodnika n zostanie doprowadzony potencjał ujemny, a do półprzewodnika p potencjał dodatni, to wskutek przemieszczania się dziur i elektronów w przeciwnych kierunkach - warstwa styku obydwu półprzewodników będzie się wypełniała wzajemnie neutralizującymi się nośnikami prądu, zapewniając jego nieprzerwany przepływ przez płytkę. Ten kierunek nazywamy *przepustowym*.

Warstwa zaporowa

Jeżeli płytkę włączymy w obwód w ten sposób, że do półprzewodnika n doprowadzony zostanie potencjał dodatni, do półprzewodnika p - ujemny, to elektrony i dziury poddane działaniu sił pola elektrycznego oddalają się od siebie, a warstwa styku pozbawiona nośników prądu zahamuje jego przepływ w tym kierunku, stając się *warstwą zaporową*.

Zjawisko powstawania warstwy zaporowej na styku półprzewodników p i n, znalazło zastosowanie w diodach półprzewodnikowych (krystalicznych) i w tranzystorach.

Zadania.

Zadanie 1 (3 pkt) Zadanie maturalne - poziom podstawowy

Metale oraz półprzewodniki przewodzą prąd elektryczny. Wpisz do tabelki zamieszczonej poniżej charakterystyczne cechy związane z przewodnictwem elektrycznym metali i półprzewodników.

METALE

PÓŁPRZEWODNIKI

Rodzaj nośników prądu elektrycznego

Zależność oporu elektrycznego od temperatury

Zadanie 2

Jeżeli ogrzewamy półprzewodnik samoistny, to możemy wnioskować, że rośnie:

- A. liczba elektronów przewodnictwa,
- B. liczba dziur,
- C. liczba elektronów i dziur jednakowo,
- D. liczba elektronów i dziur, ale liczba elektronów szybciej.

Zadanie 3

Które z informacji dotyczących półprzewodnika samoistnego są prawdziwe?

- 1. w półprzewodniku samoistnym nośnikami prądu są swobodne elektrony i swobodne dziury,
 - 2. oporność właściwa półprzewodnika samoistnego nie zależy od temperatury,
 - 3. oporność półprzewodnika samoistnego jest na ogół mniejsza od oporności właściwej półprzewodnika domieszkowego w tej samej temperaturze,
 - 4. w półprzewodniku samoistnym liczba swobodnych elektronów i dziur jest taka sama, natomiast w półprzewodniku domieszkowym różna.
- A. tylko 1 i 2,
 - B. tylko 1 i 3,
 - C. tylko 1 i 4,
 - D. tylko 2 i 4.

Zadanie 4

Która z informacji dotyczących półprzewodnika **nie jest** prawdziwa?

- A. w półprzewodniku samoistnym nośnikami prądu są swobodne elektrony i dziury,
- B. oporność właściwa półprzewodnika samoistnego zależy od temperatury,
- C. w tej samej temperaturze oporność właściwa półprzewodnika samoistnego jest na ogół mniejsza od oporności właściwej półprzewodnika domieszkowego,
- D. w półprzewodniku samoistnym liczba swobodnych elektronów i dziur jest taka sama, natomiast w półprzewodniku domieszkowym różna.

Zadanie 5

Ze wzrostem temperatury rośnie wartość:

- A. ciepło parowania cieczy,
- B. ciśnienie pary nasyconej nad cieczą,
- C. oporu elektrycznego półprzewodników,
- D. oporu elektrycznego roztworów wodnych zasad, soli i kwasów.

Zadanie 6

Czy w obszarze przejściowym na granicy styku półprzewodników typu n i p występuje różnica potencjałów?

- A. tak występuje, przy czym półprzewodnik typu p ma wyższy potencjał niż półprzewodnik typu n ,
- B. tak występuje, przy czym półprzewodnik typu n ma wyższy potencjał niż półprzewodnik typu p ,
- C. nie występuje, ponieważ liczba elektronów jest zawsze równa liczbie dziur,
- D. występuje, ale tylko przy podgrzaniu złącza.

Rozwiązania zadań.**Zadanie 1 (3 pkt)** Zadanie maturalne - poziom podstawowy

	METALE	PÓLPRZEWODN
Rodzaj nośników prądu elektrycznego	<i>elektrony</i>	<i>elektrony, dziury</i>
Zależność oporu elektrycznego od temperatury	<i>rośnie</i>	<i>maleje</i>

Prawidłowe odpowiedzi do zadań 2 - 6:

Zadanie	2	3	4	5	6
Odpowiedź	C	C	C	B	B