

## 2. Półprzewodniki

Technika półprzewodników jest obecnie najbardziej dynamicznie rozwijającą się gałęzią elektroniki. Liczba elementów półprzewodnikowych stale wzrasta. Wypierają one elementy lampowe. Są jednak takie układy elektroniczne, w których zastąpienie lamp elektronowych półprzewodnikami jest niecelowe i niemożliwe, np. w końcowych stopniach nadajników wielkiej częstotliwości i wzmacniaczach akustycznych. W urządzeniach rentgenowskich, miernikach do pomiarów promieniowania (licznik Geigera-Müllera).

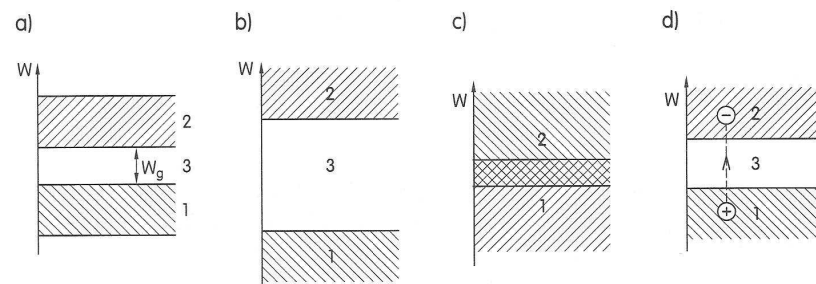
Podstawowym pierwiastkiem, z którego są wytwarzane elementy półprzewodnikowe jest krzem (Si). Duże znaczenie miał wcześniej german (Ge). Obecnie są tworzone półprzewodniki złożone, jako związki pierwiastków, np. arsenek galu (GaAs), antymonek indu (InSb), selenek rtęci (HgSe), tellurek rtęci (HgTe), arsenofosforek indu (InAsP).

### 2.1. Właściwości półprzewodników

W analizie właściwości półprzewodników jest wykorzystywana teoria pasmowa ciał z ich modelem pasmowo-energetycznym. W modelu tym elektrony atomu odosobnionego znajdować się mogą tylko w określonych stanach energetycznych, czyli zajmować odpowiednie poziomy energetyczne.

W kryształach dowolnego ciała, wskutek wzajemnego oddziaływania wielu jednakowych atomów, poziomy energetyczne ulegają rozczepieniu i tworzą strefy zwane pasmami energetycznymi.

Wyróżnia się dwa istotne pasma: **walencyjne** (podstawowe) — odpowiadające wartościom energii elektronów walencyjnych (na ostatnich orbitach atomów), **przewodnictwa** — odpowiadające wartościom energii, przy których elektrony stają się swobodne i mogą brać udział w procesie przewodnictwa elektrycznego. Oba te pasma rozdziela pasmo zabronione (strefa zabroniona), w którym nie mogą występować elektrony. W idealnych dielektrykach strefa zabroniona jest tak szeroka (ok.  $1,6 \cdot 10^{-18}$  J), że żaden elektron z pasma walencyjnego, nawet pod wpływem dostarczonej z zewnątrz energii, nie jest w stanie przejść do pasma przewodnictwa (rys. 2.1b). W idealnych przewodnikach



**Rys. 2.1.** Modele pasmowe ciał: a) ogólny układ pasm, b) idealnego dielektryka (izolatora), c) idealnego przewodnika, d) półprzewodnika samoistnego;

1 – pasmo walencyjne, 2 – pasmo przewodnictwa, 3 – pasmo zabronione,  $W$  – energia,  $W_g$  – szerokość pasma zabronionego

pasma przewodnictwa i walencyjne zachodzą na siebie (rys. 2.1c) i wszystkie elektrony walencyjne są jednocześnie elektronami swobodnymi. W półprzewodnikach strefa zabroniona jest stosunkowo wąska i wynosi dla krzemu ok.  $1,8 \cdot 10^{-19}$  J, dla germanu ok.  $1,1 \cdot 10^{-19}$  J. Półprzewodniki dzieli się na: samoistne i niesamoistne (domieszkowe).

### 2.2. Półprzewodniki samoistne i niesamoistne

**Półprzewodniki samoistne** są doskonałymi monokryształami pierwiastków, np. krzemu. W temperaturze bezwzględnej zera są izolatorami (pasmo przewodnictwa jest całkowicie wolne), ale po dostarczeniu pewnej ilości energii (np. ciepłej) może nastąpić przejście niektórych elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa (rys. 2.1d). Elektrony te stają się swobodnymi nośnikami ładunku elektrycznego. Pozostałe po elektronach wolne miejsca w pasmie walencyjnym są równoważne elementarnym ładunkom dodatnim i nazywają się **dziurami**. Zjawisko takie jest generacją par elektron-dziura. Miejsce dziury w pasmie walencyjnym może zająć elektron z sąsiedniego atomu, tworząc nową dziurę w innym miejscu. W związku z tym można mówić o przemieszczaniu się dziur. Jednocześnie z procesem generacji par elektron-dziura jest możliwe zjawisko odwrotne, zwane **rekombinacją**, polegające na wzajemnej neutralizacji ładunków dziury, tzn. powrotu elektronu ponownie do pasma walencyjnego. W warunkach ustalonych istnieje równowaga między tymi zjawiskami.

**Półprzewodnik niesamoistny**, zwany też **domieszkowym typu N** (ang. *Negative*), otrzymuje się, jeżeli do monokryształu pierwiastka czterowartościowego, przyjętego za podstawowy (najczęściej krzemu) wprowadzi się domieszkę pierwiastka pięciowartościowego, zwaną **donorem** (np. arsen, antymon lub fosfor).

Wprowadzenie domieszki tego typu wywołuje nadmiar elektronów przemieszczanych do pasma przewodnictwa. W normalnych warunkach półprzewodnik typu N ma więcej swobodnych elektronów niż dziur powstających np. wskutek generacji cieplnej par elektron–dziura. Elektrony są tu większościami nośnikami prądu.

**Półprzewodnik domieszkowy typu P** (ang. *Positive*) powstaje przez dodanie do monokryształu pierwiastka podstawowego domieszki pierwiastka trójwartościowego (np. boru, galu, glinu lub indu) zwanego **akceptorem**.

W półprzewodniku typu P dziury (ładunki dodatnie) są większościami nośnikami prądu. Koncentracja nośników nadmiarowych (elektronów w półprzewodniku typu N, a dziur w półprzewodniku typu P) w jednostce objętości jest dużo, dużo większa niż koncentracja nośników samoistnych (par elektron–dziura).

Elektroniczne elementy półprzewodnikowe są budowane jako złączowe i bezzłączowe. **Elementy bezzłączowe** (zwane też jednorodnymi) składają się z półprzewodników tego samego typu, ale o różnej koncentracji nośników swobodnych, np.  $N^+N$  ( $N^+$  oznacza zwiększoną koncentrację nośników N) lub  $P^+P$ . Elementy takie są budowane przez nakładanie warstw o różnej koncentracji nośników ładunku. Do tej grupy zalicza się: termistory, warystory, hallotrony, gaussotrony.

**Elementy złączowe** powstają przez połączenie półprzewodników różnych typów. W powstającym obszarze złącza zachodzi zmiana koncentracji nośników swobodnych o kilka rzędów wielkości. Praktycznie najważniejsze jest złącze PN, w którym zmiana koncentracji towarzyszy także zmiana rodzaju domieszki (akceptor–donor). Charakteryzuje się ono niejednakową zdolnością przewodzenia prądu w obu kierunkach. W zależności od liczby złączy elementy półprzewodnikowe dzieli się na jednozłączowe (diody), dwuzłączowe ( tranzystory), trójzłączowe (tyrystory).

## Pytania i zadania kontrolne

1. Podaj przykłady pierwiastków, z których są wykonywane elementy półprzewodnikowe.
2. Wyjaśnij pojęcia: pasmo walencyjne, pasmo zabronione, pasmo przewodnictwa. Omów ich wzajemne położenie w przewodnikach, izolatorach i w półprzewodnikach prądu elektrycznego.
3. Wyjaśnij zjawisko półprzewodnictwa samoistnego.
4. Jaka jest różnica między półprzewodnikiem typu P i N?
5. Wyjaśnij, jak powstają elementy złączowe i bezzłączowe.