

gdzie:

- I_{t_z} - zastępczy prąd zwarciaowy w miejscu zainstalowania dławika z uwzględnieniem reaktancji dławika włączonej do obwodu zwarciaowego,
- t_z - czas trwania zwarcia.

6. ŁĄCZNIKI PÓŁPRZEWODNIKOWE

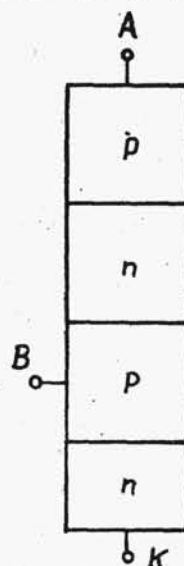
6.1. Wiadomości wstępne

Łączniki półprzewodnikowe mogą być realizowane przy wykorzystaniu, będących od pewnego czasu do dyspozycji, podstawowych półprzewodników przyrządów mocy, tj. tyrystorów i diod krzemowych. Przed przedstawieniem aktualnych możliwości realizacji łączników półprzewodnikowych wydaje się celowe podanie wybranych wiadomości na temat samych elementów, przy czym ze względu na złożoność zjawisk, uwaga będzie skupiona na tyrystorach.

Tyrystor jest przyrządem półprzewodnikowym o strukturze przedstawionej na rys.6.1. Składa się on z czterech warstw półprzewodnikowych p - n - p - n. Do skrajnej warstwy p przyłączona jest anoda (A), a do skrajnej warstwy n katoda tyrystora (K). Z wewnętrznej warstwy p wyprowadzona jest elektroda sterująca, zwana bramką (B). W tyrystorze występują więc trzy przejścia, zwane złączami (J1, J2, J3), pomiędzy warstwami półprzewodnikowymi p i n o różnych właściwościach.

Dla wyjaśnienia zasady działania tyrystora niezbędne jest rozpatrzenie zjawisk występujących w złączu p - n, jak również krótkie przypomnienie podstaw działania półprzewodników.

Do budowy tyrystorów stosuje się krystaliczny krzem (Si), którego atomy posiadają na zewnętrznej



Rys.6.1. Struktura tyrystora

orbicie 4 elektrony walencyjne. Elektrony te łączą się z sąsiednimi atomami siatki krystalicznej, w wyniku czego każdy atom krzemu jest połączony z sąsiednimi atomami dwoma elektronami walencyjnymi. Elektrony walencyjne związane są z siatką krystaliczną i nie są swobodnymi nośnikami prądu. Dla umożliwienia przepływu prądu elektronowego konieczne jest dostarczenie energii dla pokonania sił wiążących elektrony walencyjne z atomami siatki. Zjawisko takie występuje między innymi przy podwyższeniu temperatury półprzewodnika, bądź przy dostarczeniu energii w postaci promieniowania świetlnego. Powstają wówczas pary: elektron i dziura, które są nośnikami prądu.

Tablica 6.1

Wpływ temperatury na przewodność właściwą i krzemu

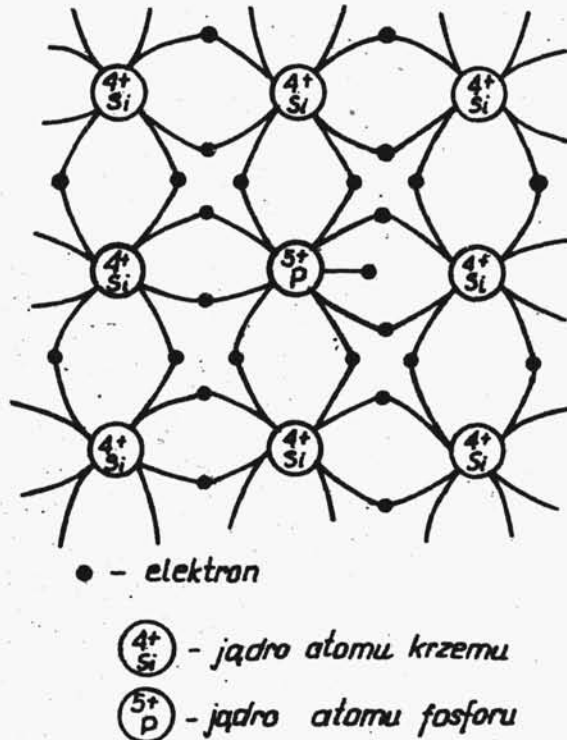
	Przewodność właściwa	
	krzem	miedź
°C	$\Omega \text{ cm}$	$10^{-6} \Omega \text{ cm}$
20	300 000	1,7
100	4 000	2,3
200	100	3,0

Przy niskich temperaturach (np. temp. 20°C) liczba wolnych elektronów i dziur, mogących powodować przepływ prądu, jest znikomą małą i przewodność elektryczna półprzewodnika jest również bardzo mała. Wzrasta ona wydatnie przy wyższych temperaturach.

Wpływ temperatury na przewodność właściwą czystego krzemu ilustruje tablica 6.1.

Dla otrzymania określonej przewodności elektrycznej półprzewodnika, wprowadzane są do struktury czystego krzemu specjalne domieszki. Przez wprowadzenie do siatki krystalicznej krzemu atomów 5-wartościowego fosforu otrzymuje się z każdego atomu domieszki jeden wolny elektron (rys.6.2) - 4 pozostałe elektrony wchodzą w związek z sąsiednimi atomami siatki. Tak

więc, już w temperaturze normalnej istnieją wolne elektrony zdolne przewodzić prąd, co powiększa przewodność elektryczną półprzewodnika. Domieszki, które wprowadzają do struktury kryształu krzemu wolne elektrony, nazywane są donorami, a struktura, w której nośnikami większościowymi (tj. będącymi w liczbowej przewadze) są elektrony, nazywana jest strukturą n (od negative (ang.) - tj. ujemnego - w domyśle ładunku).

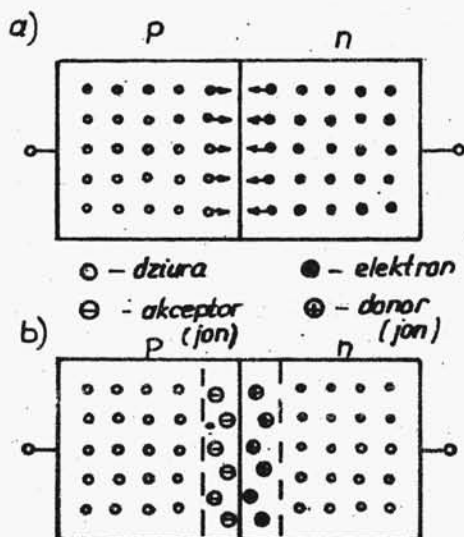


Rys.6.2. Struktura siatki krystalicznej krzemu z donorami

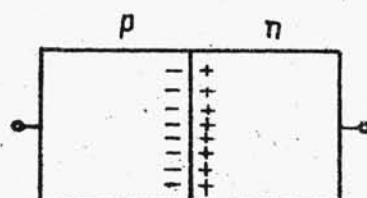
Wprowadzając do struktury krzemu 3-wartościowe atomy, np. aluminium, zwane akceptorami, otrzymuje się strukturę z przewagą dziur, nazywaną strukturą p (positive).

Stopień domieszkowania krzemu może być różny; przy silnym domieszkowaniu jeden atom domieszki przypada na $10^2 \dots 10^3$ atomów krzemu, przy domieszkowaniu słabym stosunek ten wynosi: $1: 10^6 \dots 10^9$.

Przy połączeniu dwóch struktur o różnym charakterze przewodzenia (p i n) powstaje złącze (ang. junction). Rozważmy na wstępie zjawiska występujące w złączu bez wpływu napięcia zewnętrznego (rys.6.3a). W wyniku dyfuzji elektrony przechodzą z obszaru n do p i odwrotnie, dodatnie dziury przemieszczają się od p do n. Przepływ dyfuzyjny ustaje w wyniku oddziaływania kulombowskiego od pozostałych w strukturze p - ujemnie naładowanych atomów akceptorów - na odpływające dodatnie dziury, jak również od pozostałych w strukturze n - dodatnio naładowanych atomów donorów - na elektrony przemieszczające się do obszaru p. Wytwarza się wówczas stan



Rys.6.3. Złącze p - n bez polaryzacji zewnętrznej a) schemat złącza, b) rozkład ładunku



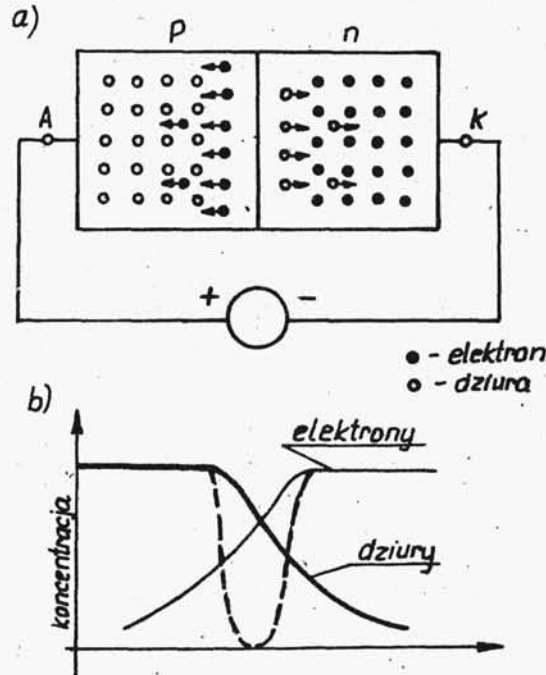
Rys.6.4. Idealizowany rozkład ładunków w złączu p - n bez polaryzacji zewnętrznej

równowagi, pokazany na rys. 6.3b. Po stronie p złącza powstaje ładunek przestrzenny o znaku ujemnym (akceptory), a po stronie n ładunek dodatni (donory). Idealizując zjawisko jak na rys.6.4, złącze można traktować jako na-

ładowany kondensator, na którym występuje określone napięcie, nazywane napięciem dyfuzyjnym. Dla złącza krzemowego napięcie dyfuzyjne wynosi około 0,8 V.

Jeśli do złącza p-n zostanie doprowadzone napięcie zewnętrzne o polaryzacji jak na rys.6.5, następuje przejście do stanu przewodzenia. Jednakże przy bardzo małej wartości napięcia zewnętrznego (mniejszej od napięcia dyfuzyjnego), strefa ładunku przestrzennego w złączu ma nadal dużą wartość opo-

ru elektrycznego i prąd płynący przez złącze jest bardzo mały. Przy napięciu zewnętrznym wyższym od napięcia dyfuzyjnego, przewodność elektryczna strefy ładunku przestrzennego wydatnie wzrasta i złącze przechodzi w stan przewodzenia. Dodat-

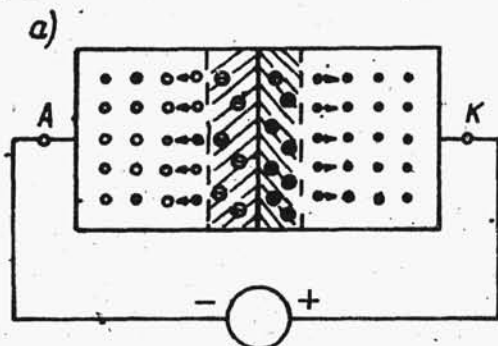


Rys.6.5. Złącze p - n przy polaryzacji w kierunku przewodzenia

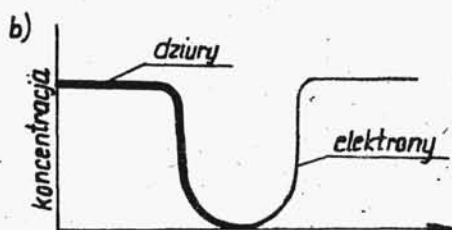
ni potencjał napięcia zewnętrznego, doprowadzony do warstwy p, powoduje przeciąganie elektronów z warstwy n do p (przez złącze), a ujemny potencjał warstwy n wywołuje przepływ dodatnich dziur z warstwy p do n (rys.6.5a). Przez złącze przepływają zatem ładunki obu znaków, tak że efekt zaporowy warstwy ładunków przestrzennych złącza zostaje zlikwidowany. Dla ilustracji na rys.6.5b przedstawiono rozkład koncentracji elektronów i dziur po obu stronach złącza (linią przerywaną zaznaczono rozkład ładunków bez wpływu napięcia zewnętrznego).

Przy przeciwnej polaryzacji napięcia zewnętrznego elektrony i dziury przyciągane przez anodę i katodę będą jednocześnie odsuwane od złącza (rys.6.6). Powoduje to rozszerzenie warstwy ładunku przestrzennego i wzrost wytrzymałości elek-

trycznej złącza. Złącze znajduje się wówczas w stanie polaryzacji wstecznej (zaworowej). W tym stanie przez złącze przepływa bardzo niewielki prąd, nazywany prądem upływu. Jest on



wywołany ruchem par ładunków: dziura-elektron, powstałych w złączu w wyniku jonizacji termicznej (dla przykładu przy $T = 25^{\circ}\text{C}$ w krzemie istnieje około 10^{10} par elektron-dziura w 1 cm^3). Proces ten silnie wzrasta wraz ze wzrostem temperatury.



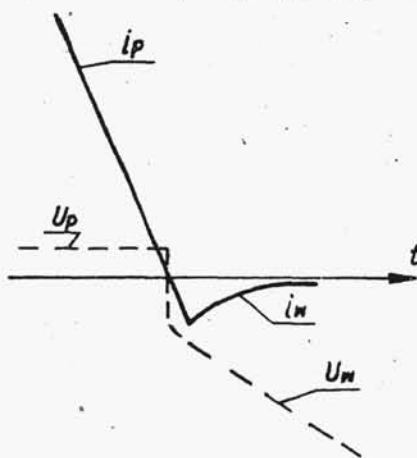
Wraz ze wzrostem napięcia doprowadzonego do złącza w stanie zaworowym wzrasta natężenie pola elektrycznego w złączu. Z uwagi na ograniczoną wytrzymałość dielektryczną materiału półprzewodnikowego (krzem), natężenie (a pośrednio i napięcie

Rys.6.6. Złącze p - n przy polaryzacji zaworowej

doprowadzone do złącza w stanie zaworowym) nie może przekroczyć określonej wartości powodującej przebicie elektryczne materiału (dla krzemu około 25 kV/mm).

Przy przechodzeniu od polaryzacji przewodzenia do polaryzacji wstecznej (zaworowej) złącza występuje stan przejściowy, z którym związany jest krótkotrwały przepływ prądu w kierunku zaworowym. W chwili gdy prąd przepływający przez złącze (które było w stanie przewodzenia) przechodzi przez zero, w złączu znajdują się jeszcze nośniki obu znaków (elektrony i dziury). Na odprowadzenie tych nośników z obszaru złącza niezbędny jest określony czas. Dlatego też złącze nie przechodzi w stan zaworowy natychmiast po przejściu prądu przez zero, ale po krótkotrwałym przepływie prądu w kierunku zaworowym. Zjawisko powyższe ilustruje rys.6.7.

W dotychczasowych rozważaniach rozpatrywano złącza p-n symetryczne, w których obie warstwy półprzewodnikowe (p i n) były domieszkowane jednakowo. W tyrystorach występują złącza niesymetryczne, tj. takie, w których stopień domieszkowania obu warstw jest różny. Jeśli np. w warstwie n złącza występuje koncentracja donorów 100-krotnie wyższa niż koncentracja akceptorów w warstwie p, to przez złącze p-n przepływa jedynie jedna dziura na 100 elektronów. Oznacza to, że z obszaru n do p przepływa znacznie więcej elektronów niż dziur z obszaru p do n. Takie złącze niesymetryczne może być traktowane jako emiter elektronów. Odwrotnie, złącze, w którym warstwa p jest silniej domieszkowana niż warstwa n, będzie emitorem dziur.



Rys.6.7. Zmiana polaryzacji złącza i_p - prąd przewodzenia i_w - prąd wsteczny; u_p - napięcie w stanie przewodzenia; u_w - napięcie polaryzacji wstecznej

6.2. Zasada działania tyrystora

Na rys.6.8 przedstawiono ideowo strukturę tyrystora. Zewnętrzne warstwy półprzewodnikowe są znacznie silniej domieszkowane niż warstwy wewnętrzne tak, że zewnętrzna warstwa n może być traktowana jako emiter elektronów, a zewnętrzna warstwa p - jako emiter dziur.

W tyrystorze można rozróżnić trzy stany:

- polaryzacji wstecznej,
- blokowania przy polaryzacji w kierunku przewodzenia,
- przewodzenia.

Charakterystykę prądowo-napięciową dla wszystkich trzech stanów tyrystora przedstawiono na rys.6.9.

W stanie polaryzacji wstecznej (praca zaworowa) złącza J1 i J3 są spolaryzowane zaworowo, a złącze J2 w kierunku przewo-