

### 3. ZŁĄCZE p-n

#### 3.1. BUDOWA ZŁĄCZA

**Złącze p-n** jest to obszar półprzewodnika monokrystalicznego utworzony przez dwie graniczące ze sobą warstwy jedną typu p i drugą typu n.

Na rysunku 3.1 przedstawiono uproszczony płaski model rozkładu ładunków w złączu.

W półprzewodniku typu n istnieją dodatnie nieruchome ładunki zjonizowanych atomów domieszki donorowej i ujemne ładunki ruchomych elektronów - nośników większościowych. Ponadto istnieje niewielka liczba dziur - nośników mniejszościowych. W półprzewodniku typu p istnieją ujemne nieruchome ładunki zjonizowanych atomów domieszki akceptorowej oraz dodatnie ładunki ruchomych dziur - nośników większościowych. Jest tam jeszcze niewielka liczba elektronów - nośników mniejszościowych.

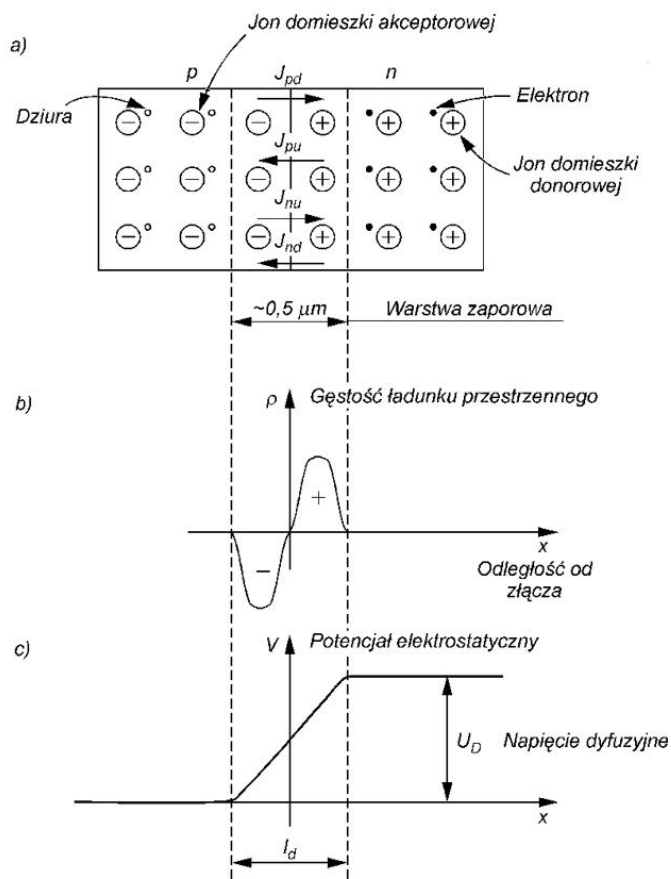
W momencie utworzenia złącza (dzieje się to w specjalnym procesie technologicznym) wskutek dużej koncentracji ruchomych nośników ładunku, nastąpi proces dyfuzji elektronów z materiału n do p oraz dziur z materiału p do n. Powstaną dwa strumienie prądu dyfuzyjnego  $J_{pd}$  i  $J_{nd}$  (rys.3.1a). Proces ten ma na celu wyrównanie koncentracji nośników ładunku.

Gdyby dziury i elektrony były cząstkami obojętnymi elektrycznie, doszłoby do całkowitego wyrównania koncentracji w obu materiałach p i n. Jednakże wskutek dyfuzyjnego przepływu elektronów w obszarze granicznym półprzewodnika n pozostają nieskompensowane ładunki dodatnie nieruchomych jonów donorowych. Analogicznie wskutek dyfuzyjnego przepływu dziur w obszarze granicznym półprzewodnika p pozostają nieskompensowane ładunki ujemne nieruchomych jonów akceptorowych. Nieskompensowane jony po obu stronach złącza tworzą dipolową warstwę ładunku wytwarzającą pole przeciwdziałające dalszej dyfuzji nośników większościowych. Skutkiem działania tego pola jest unoszenie elektronów i dziur w kierunkach przeciwnych. W ten sposób powstają dwa strumienie prądów unoszenia nośników (dziur z obszaru n do p - prąd  $J_{pu}$  i elektronów z obszaru p do n - prąd  $J_{nu}$ ) skierowane przeciwnie do odpowiednich strumieni prądów dyfuzyjnych. Wymienione cztery składowe prądu przedstawiono na rys. 3.1a.

W złączu dochodzi do równowagi dynamicznej, tzn. sumaryczny prąd płynący przez złącze musi mieć wartość zero, a ładunek przestrzenny wartość ustaloną. Te dwa warunki są spełnione, gdy prąd dyfuzyjny jest równy prądowi unoszenia, oddzielnie dla dziur i elektronów:

$$J_{pd} = J_{pu} \qquad J_{nd} = J_{nu} \qquad (3.1)$$

przy czym:  $J_{pd}$  - gęstość prądu dyfuzyjnego dziur,  $J_{pu}$  - gęstość prądu unoszenia dziur,  $J_{nd}$  - gęstość prądu dyfuzyjnego elektronów,  $J_{nu}$  - gęstość prądu unoszenia elektronów.



Rys. 3.1. Obraz złącza p-n: a) utworzone złącze z zaznaczeniem prądów dyfuzyjnych i unoszenia, b) rozkład ładunku przestrzennego, c) rozkład potencjału

Skutkiem tej **równowagi dynamicznej** jest zachowanie istnienia na złączu dipolowej warstwy ładunków (rys. 3.1b), którą nazywa się warstwą zaporową lub warstwą ładunku przestrzennego. Napięcie wytworzone w obszarze granicznym złącza nosi nazwę bariery potencjału lub napięcia dyfuzyjnego  $U_D$  (rys.3.1c). W temperaturze pokojowej przy umiarkowanych koncentracjach domieszek dla złącza krzemowego  $U_D=0,7\text{V}$ , a dla złącza germanowego  $U_D=0,3\text{V}$ .

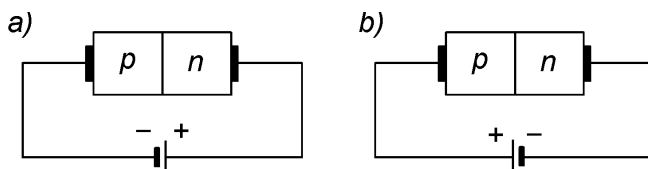
### 3.2. POLARYZACJA ZŁĄCZA

Złącze p-n można polaryzować w kierunku zaporowym lub przewodzenia.

**Polaryzacja złącza p-n w kierunku zaporowym** ma miejsce wtedy, gdy zewnętrzne źródło napięcia jest połączone biegunem dodatnim z obszarem typu n, a biegunem ujemnym z obszarem typu p (rys.3.2a). W tym przypadku polaryzacja zewnętrzna jest zgodna z biegunowością napięcia dyfuzyjnego. Bariera potencjału złącza zwiększa się o wartość napięcia zewnętrznego. Maleją składowe dyfuzyjne prądu elektronowego i dziurowego, pozostają natomiast niezależne od napięcia składowe prądu unoszenia nośników mniejszościowych. Niezależność od napięcia prądu unoszenia wyjaśnia się tym, że napięcie zewnętrzne praktycznie odkłada się tylko na warstwie zaporowej złącza, a w obszarach sąsiednich nie ma pola elektrycznego. Ruch nośników w tych obszarach jest chaotyczny i

pozbawiony składowej unoszenia. Dostarczanie zatem nośników do krawędzi złącza, gdzie jest pole elektryczne, nie zależy od napięcia zewnętrznego.

Uogólniając można stwierdzić, że przy polaryzacji złącza p-n w kierunku zaporowym płynie prąd nośników mniejszościowych (prąd unoszenia) w dużym zakresie niezależny od przyłożonego napięcia. Prąd ten jest nazywany **prądem nasycenia** i oznaczany  $I_s$ .

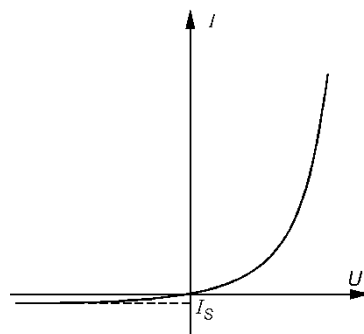


Rys. 3.2. Złącze p-n spolaryzowane w kierunku: a) zaporowym, b) przewodzenia

1

**Polaryzacja złącza p-n w kierunku przewodzenia** ma miejsce wtedy, gdy źródło zewnętrzne jest połączone biegunem dodatnim z obszarem typu p półprzewodnika, a biegunem ujemnym z obszarem typu n (rys. 3.2b). W tym przypadku polaryzacja zewnętrzna jest przeciwna w stosunku do biegunowości napięcia dyfuzyjnego. Bariera potencjału złącza maleje o wartość napięcia zewnętrznego. Wzrastają składowe prądów dyfuzyjnych elektronów z obszaru n do p i dziur z obszaru p do n. Składowe prądu unoszenia pozostają na nie zmienionym, małym poziomie. Przy odpowiednio dużych wartościach polaryzacji złącza prąd dyfuzyjny zdecydowanie przeważa nad prądem unoszenia, a jego wartość zwiększa się wraz ze wzrostem napięcia polaryzacji.

Uogólniając można stwierdzić, że przy polaryzacji złącza p-n w kierunku przewodzenia płynie prąd nośników większościowych (prąd dyfuzyjny), którego wartość silnie zależy od przyłożonego napięcia zewnętrznego.



Rys. 3.3. Charakterystyka prądowo napięciowa złącza p-n

Trzeba podkreślić, że zarówno przy polaryzacji złącza p-n w kierunku zaporowym, jak i w kierunku przewodzenia spadek napięcia na złączu (napięcie dyfuzyjne) zachowuje taką biegunowość, jak w przypadku złącza niespolaryzowanego. Przyłożone napięcie zewnętrzne powoduje jedynie wzrost bariery potencjału (polaryzacja w kierunku zaporowym) lub zmniejszenie się tej bariery (polaryzacja w kierunku przewodzenia).

Zależność prądu złącza od napięcia opisuje się funkcją wykładniczą:

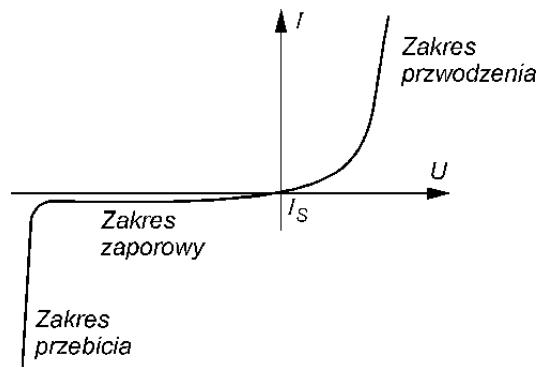
$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{U}{\varphi_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

gdzie:  $I_s$  - prąd nasycenia złącza,  $\varphi_T$  - potencjał termiczny elektronu (dla  $T=300K$   $\varphi_T = 26mV$ )

Równanie (3.2) zwane jest równaniem Shockley'a. Odzworowuje ono podstawową zależność prądu od napięcia w złączu p-n (rys.3.3), jednak nie uwzględnia szeregu zjawisk mających miejsce w elementach rzeczywistych lub specjalnie konstruowanych celem wykorzystania specyficznych właściwości złącza p-n. Będzie o tym mowa w dalszej części tekstu przy okazji omawiania różnych rodzajów diod.

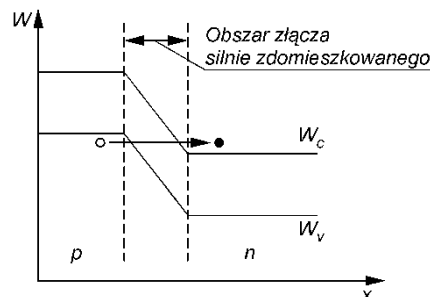
### 3.3. PRZEBICIE ZŁĄCZA

**Przebicciem złącza p-n** nazywamy zjawisko gwałtownego przyrostu prądu przy polaryzacji w kierunku zaporowym napięciem o wartości wyższej niż pewna charakterystyczna dla danego złącza wartość, nazywana napięciem przebicia (rys.3.4). Wyróżnia się dwie podstawowe przyczyny gwałtownego wzrostu prądu, tj. przebicie Zenera i przebicie lawinowe.

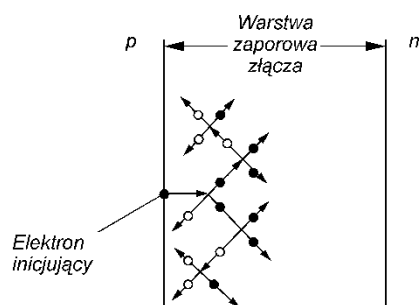


Rys 3.4. Charakterystyka złącza p-n z uwzględnieniem zakresu przebicia

**Przebicie Zenera** (zjawisko Zenera, zjawisko tunelowe) występuje w złączach o cienkiej warstwie zaporowej. Przy polaryzacji złącza w kierunku zaporowym natężenie pola w cienkiej warstwie zaporowej może osiągnąć takie wartości, że jest możliwe wyrwanie elektronów z wiązania kowalencyjnego atomów w sieci krystalicznej. W rezultacie zerwania wiązania powstaje para nośników elektron - dziura.



Rys.3.5. Ilustracja przebicia Zenera w modelu pasmowym złącza



Rys.3.6. Ilustracja zjawiska lawinowej jonizacji zderzeniowej

W energetycznym modelu pasmowym akt jonizacji można zinterpretować jako tunelowe przejście elektronów z pasma walencyjnego przez barierę potencjału (pasmo zabronione) do pasma przewodnictwa (rys.3.5). Dzieje się to bez konieczności pobierania energii. Prawdopodobieństwo przejścia elektronu jest tym większe, im węższa jest bariera. Szerokość bariery, tj. szerokość warstwy zaporowej złącza maleje w miarę wzrostu koncentracji domieszek po obu stronach złącza. Zatem przebicie Zenera może wystąpić w złączach silnie domieszkowanych, gdy warstwa zaporowa jest cienka. Zjawisko Zenera charakteryzuje mała wartość napięcia przebicia  $U < 5V$ .

**Przebiecie lawinowe.** Jeśli złącze ulega przebiciu przy napięciu w kierunku zaporowym wyższym, tj.  $U > 7V$ , oznacza to, że gwałtowny wzrost prądu spowodowany był zjawiskiem lawinowej jonizacji zderzeniowej. Zjawisko to polega na rozerwaniu wiązań w sieci krystalicznej na skutek dostarczania energii przez swobodny nośnik ładunku rozpędzony w silnym polu elektrycznym. Swobodny nośnik poruszając się ruchem przyspieszonym w polu elektrycznym może uzyskać energię kinetyczną wystarczającą do jonizacji zderzeniowej. Rozrywa on wiązanie atomów w sieci i powstaje w ten sposób para nośników elektron dziura. Te z kolei uzyskując wystarczającą energię kinetyczną kontynuują proces jonizacji.

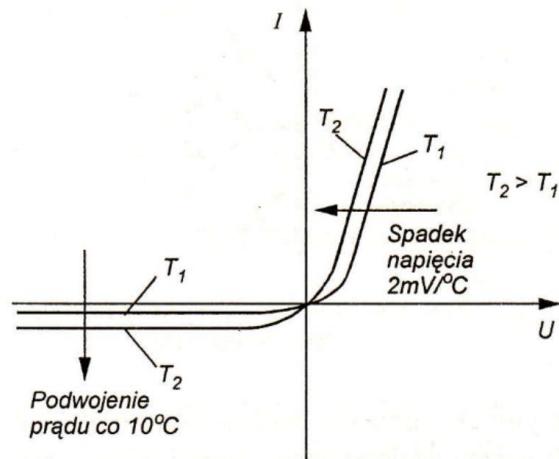
W ten sposób następuje powielanie liczby nośników w obszarze o silnym polu elektrycznym, tj. w warstwie zaporowej. Jeżeli szerokość warstwy zaporowej jest znacznie większa od drogi swobodnej nośnika (drogi między dwoma kolejnymi zderzeniami), można mówić o lawinowym powielaniu liczby nośników (rys.3.6). Wzrost liczby nośników w polu elektrycznym powoduje wzrost wartości prądu.

Przy napięciu polaryzacji zaporowej z zakresu 5-7 V występują oba zjawiska jednocześnie.

### 3.4. WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI ZŁĄCZA

**Wpływ temperatury na charakterystykę napięciowo - prądową złącza p-n.** W zakresie przewodzenia wpływ zmian temperatury określany jest przez wielkość dryftu temperaturowego napięcia na złączu p-n przy stałym prądzie przewodzenia. Otóż w miarę wzrostu temperatury napięcie na złączu maleje w tempie ok.  $2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ , zatem dryft temperaturowy jest ujemny i wynosi właśnie  $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  (rys. 3.7).

W zakresie zaporowym ze wzrostem temperatury rośnie wartość prądu nasycenia złącza. Dla szacunkowych obliczeń inżynierskich można przyjąć, że prąd ten zwiększa się dwukrotnie przy wzroście temperatury o ok.  $10^\circ\text{C}$  (rys.3.7).



Rys.3.7. Wpływ temperatury na charakterystykę prądowo napięciową złącza

**Zmiany szerokości warstwy zaporowej przy zmianie napięcia polaryzacji złącza.** Szerokość warstwy zaporowej  $l_d$  (rys.3.1) ulega zmianie przy polaryzacji złącza. Szerokość ta jest proporcjonalna do pierwiastka z wartości przyłożonego napięcia:

$$l_d \sim \sqrt{|U_D - U|} \quad (3.3)$$

Napięcie  $U$  we wzorze (3.3) należy podstawić ze znakiem minus dla kierunku zaporowego, a ze znakiem plus dla kierunku przewodzenia. Jak widać, przy polaryzacji w kierunku zaporowym warstwa zaporowa rozszerza się. W przypadku złącza niesymetrycznego (tj. takiego złącza, w którym istnieje duża różnica w koncentracji domieszek po obu jego stronach) większe jest wnikanie warstwy zaporowej w obszar o mniejszej koncentracji.

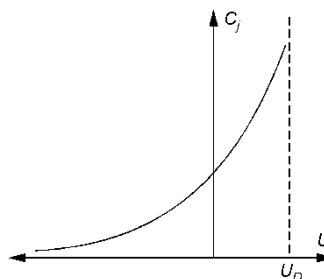
**Pojemności występujące w złączu.** W złączu ładunek jest magazynowany w warstwie zaporowej oraz w obszarach materiału typu p i n.

*Pojemność warstwy zaporowej*, zwana też pojemnością złączową  $C_j$  jest pojemnością jakby kondensatora utworzonego z dipolowych warstw ładunków oddalonych od siebie na odległość równą szerokości warstwy zaporowej.

Uwzględniając wcześniej wspomnianą zależność szerokości warstwy zaporowej od polaryzacji złącza, a więc jakby odległości pomiędzy okładkami kondensatora od wielkości napięcia, można stwierdzić, że:

$$C_j \sim \frac{1}{\sqrt{|U_D - U|}} \quad (3.4)$$

co zilustrowano na wykresie (rys. 3.8).



Rys.3.8. Zależność pojemności złącza  $C_j$  od napięcia

*Pojemność dyfuzyjna*  $C_d$  jest znacznie trudniejszym pojęciem niż pojemność złączowa. Przy polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia następuje wstrzykiwanie nośników mniejszościowych do obszarów półprzewodnika po obu stronach złącza. Największa koncentracja tych nośników jest tuż przy granicy złącza, a w miarę oddalania w głąb materiału typu p i typu n koncentracja maleje. Istnieje zatem proces gromadzenia ładunków w obszarach półprzewodnika po obu stronach złącza p-n. Odzwierciedleniem tego procesu jest właśnie pojemność dyfuzyjna.