



Politechnika Lubelska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Katedra Urządzeń Elektrycznych i TWN
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
www.kueitwn.pollub.pl

LABORATORIUM INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

Podstawy teoretyczne do ćwiczenia **nr 10**

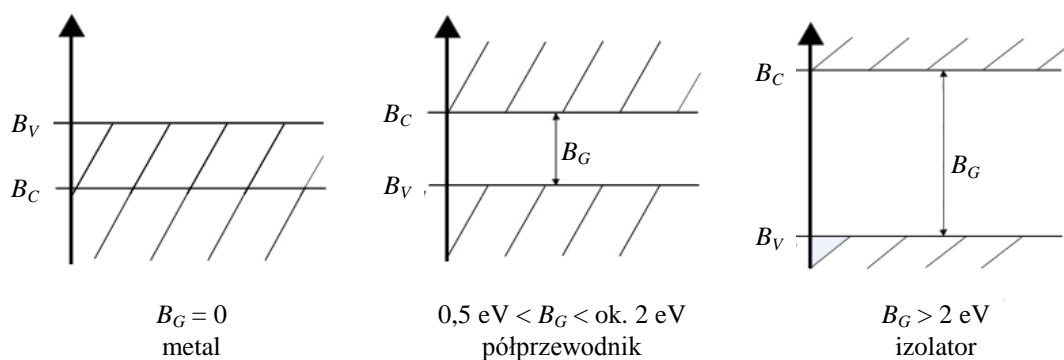
Wyznaczanie charakterystyk prądowo - napięciowych
złącza p - n wykonanego z różnych materiałów
półprzewodnikowych

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie i analiza podstawowych własności elektrycznych złączy p - n, wykonanych z różnych materiałów półprzewodnikowych.

2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

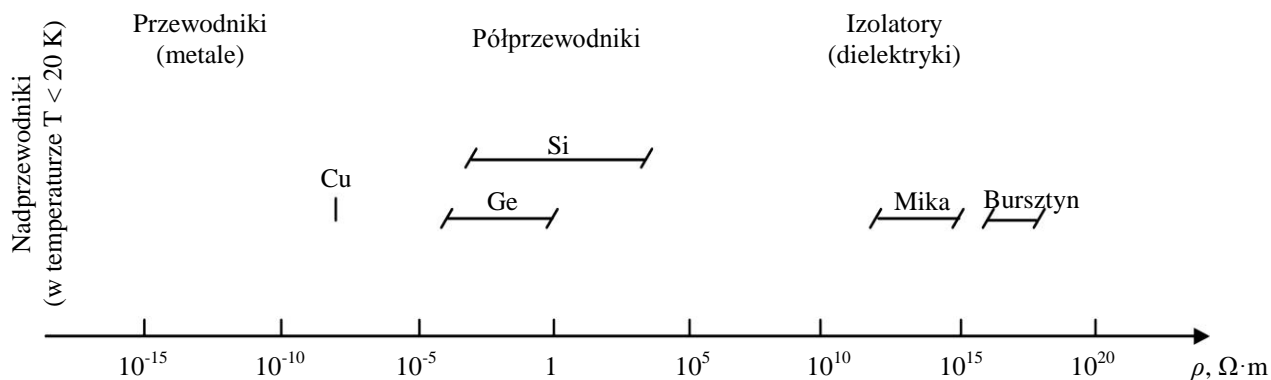
Półprzewodniki są to ciała stałe o budowie krystalicznej, których szerokość pasma wzbronionego w modelu pasmowym, określającym energetyczne stany elektronów jest zawarta w granicach od 0,5 eV do 2,0 eV.



Rys. 1. Uproszczony model energetyczny ciała stałego, gdzie: B_C - pasmo przewodnictwa (conduction band), B_G - przerwa zabroniona (band gap), B_V - pasmo walencyjne (valence band)

Rezystywność tych materiałów jest większa niż rezystywność przewodników oraz mniejsza niż rezystywność izolatorów, na przykład:

- miedź (przewodnik) ma rezystywność $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$,
- krzem (półprzewodnik) ma rezystywność ok. $2 \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{m}$,
- mika (izolator) ma rezystywność rzędu $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$.



Rys. 2. Podział materiałów ze względu na ich rezystywność

2.1. Półprzewodniki samoistne

Przewodnictwo chemiczne czystych (bezdopirowanych) półprzewodników nazywamy przewodnictwem samoistnym, zaś same półprzewodniki - półprzewodnikami samoistnymi.

Podstawową właściwością półprzewodników samoistnych jest to, że dla ich przewodnictwa elektrycznego potrzebny jest czynnik aktywizujący:

- temperatura,
- napromieniowanie,
- silne pole elektryczne.

Przewodnictwo pojawia się tylko pod wpływem zewnętrznego czynnika jonizującego, który jest w stanie przenieść elektrony z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Do pasma przewodnictwa trafia stosunkowo niewielka liczba elektronów z pasma walencyjnego. Elektrony, które dostały się do pasma przewodnictwa zajmują przede wszystkim najniższe poziomy, położone na dnie tego pasma.

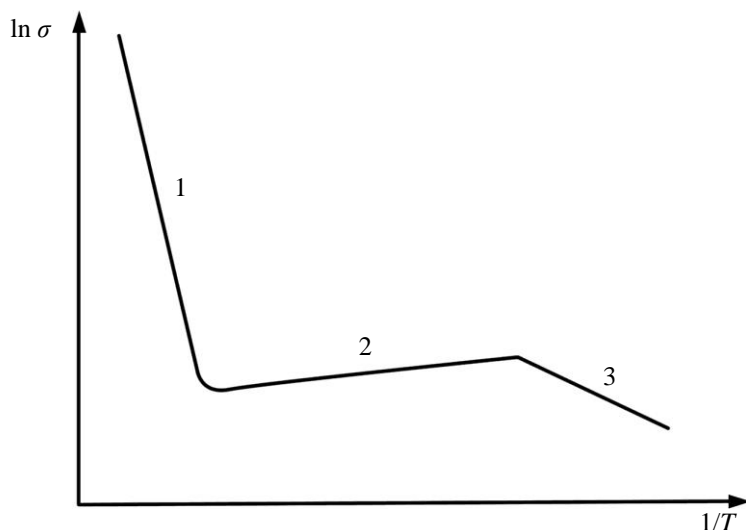
W temperaturze zera bezwzględnego takie ciała powinny posiadać zerowe przewodnictwo elektryczne, tzn. powinny być izolatorami. Jednakże ze wzrostem temperatury, wskutek termicznego wzbudzenia elektronów pasma walencyjnego, mogą uzyskać energię wystarczającą do przejścia do pasma przewodnictwa. Pasma przewodnictwa będzie wówczas częściowo wypełnione, natomiast w paśmie walencyjnym, dotąd całkowicie obsadzonym, pojawiają się poziomy nieobsadzone i ruch elektronów staje się w nim możliwy. Im mniejsza jest szerokość pasma wzbronionego i im wyższa temperatura kryształu, tym więcej elektronów przechodzi do pasma przewodnictwa i tym więcej nieobsadzonych poziomów tworzy się w paśmie walencyjnym.

Pojawienie się pustych (nieobsadzonych) poziomów w paśmie walencyjnym umożliwia powstanie kolektywnego ruchu elektronów tego pasma pod wpływem pola zewnętrznego. Nieobsadzone miejsca w paśmie walencyjnym nazywane są dziurami. Dziury w polu elektrycznym zachowują się jak ładunki dodatnie.

Zachowanie się dziur i elektronów najwygodniej jest opisywać za pomocą pojęcia stanu, przypisując elektronom stany obsadzone w paśmie, natomiast dziurom stany nieobsadzone. W paśmie przewodnictwa stany obsadzone przemieszczają się na tle stanów nieobsadzonych, zaś w paśmie walencyjnym stany nieobsadzone przemieszczają się na tle stanów obsadzonych.

Koncentracja elektronów i dziur w półprzewodniku samoistnym jest związana zależnością:

$$p_i = n_i \sim \exp \frac{-E_G}{2kT} \quad (1)$$



Rys. 3. Zależność konduktywności od temperatury, gdzie: 1 - zakres generacji samoistnej, 2 - zakres stałej koncentracji nośników, 3 - zakres jonizacji domieszek

2.2. Półprzewodniki domieszkowane

Domieszkowaniem nazywamy proces wprowadzania domieszek do kryształu półprzewodnika samoistnego.

W odróżnieniu od półprzewodników samoistnych, w których przewodnictwo odbywa się jednocześnie za pośrednictwem elektronów i dziur, w półprzewodnikach domieszkowanych przewodnictwo jest uwarunkowane głównie przez nośniki o jednakowym znaku: w półprzewodnikach donorowych (półprzewodnikach typu n) przez elektrony, w półprzewodnikach akceptorowych (półprzewodnikach typu p) przez dziury. Nośniki te noszą nazwę większościowych.

Oprócz nośników większościowych w półprzewodnikach znajdują się także nośniki mniejszościowe: w półprzewodniku elektronowym - dziury, w półprzewodniku dziurowym - elektrony.

Równania opisujące koncentrację elektronów i dziur:

$$p = N_V e^{-(E_F - E_V)/kT} \quad (2)$$

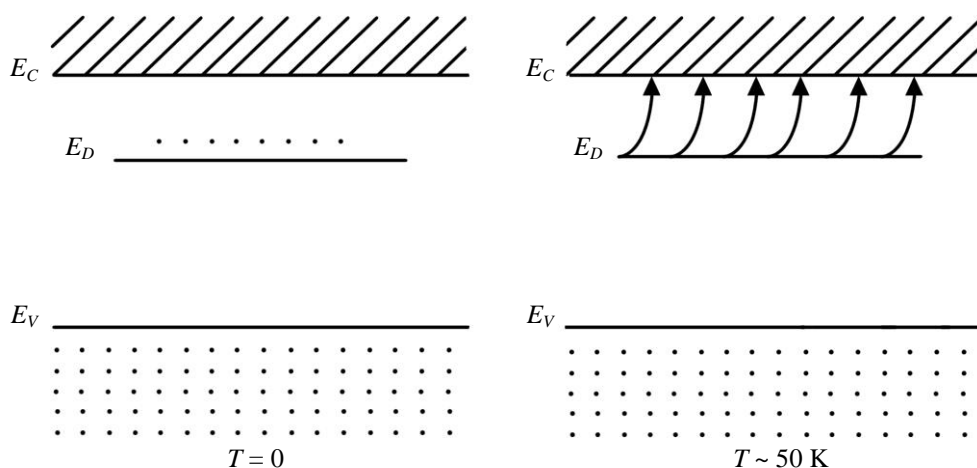
$$n = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT} \quad (3)$$

Domieszki powodują powstanie dodatkowych poziomów energetycznych w strukturze pasmowej, zwykle w przerwie wzbronionej między pasmem walencyjnym i pasmem przewodnictwa.

Domieszka donorów, tzn. atomów, które mają nadmiar elektronów w porównaniu z atomami sieci krystalicznej, wprowadza poziomy w pobliżu dna pasma przewodnictwa. Są to na przykład pierwiastki z V grupy układu okresowego (P, As, Sb) w Si i Ge.

Poziomy te są w temperaturze 0 K wypełnione elektronami. Niewielka energia cieplna wystarcza, aby przeszły one do pasma przewodnictwa (rys. 4). Zatem w temperaturze od 50 do 100 K praktycznie wszystkie elektrony z poziomów domieszkowych przechodzą do pasma przewodnictwa. Takie poziomy

domieszkowe nazywają się poziomami donorowymi, a domieszki z grupy V nazywane są donorami. Jest to materiał typu n.



Rys. 4. Przechodzenie elektronów z poziomu donorowego do pasma przewodnictwa

Energia przejścia z poziomu donorowego do pasma przewodnictwa jest dużo mniejsza niż energia pasma zabronionego ($E_D \ll E_G$).

Tabela 1. Wartości energii E_D oraz E_G dla poszczególnych domieszek

	$E_D, \text{ eV}$			$E_G, \text{ eV}$	
	P	As	Sb	Si	
Si	0,0045	0,049	0,039	Si	1,1
Ge	0,012	0,013	0,0096	Ge	0,7

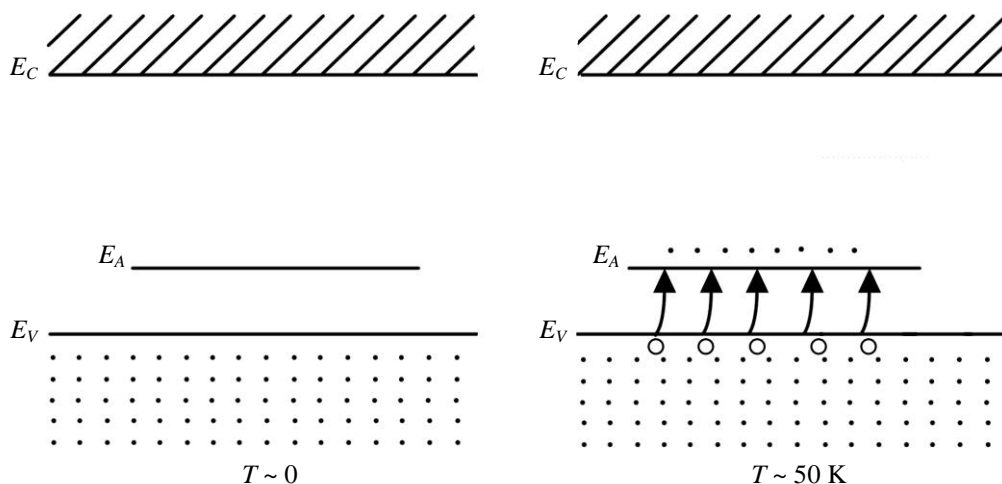
Natomiast domieszka akceptorów, tzn. atomów, które mają mniej elektronów niż atomy sieci krystalicznej, wprowadza poziomy w pobliżu wierzchołka pasma walencyjnego. Są to na przykład pierwiastki z III grupy układu okresowego (B, Al, Ga, In). W niskich temperaturach energia cieplna wystarcza do pobudzenia elektronów z pasma walencyjnego do przejścia na poziomy domieszkowe i pozostawienia za sobą dziur w paśmie walencyjnym. Ponieważ te poziomy przyjmują (akceptują) elektrony z pasma walencyjnego, są nazywane poziomami akceptorowymi, a domieszki z grupy III są dla Ge i Si domieszkami akceptorowymi.

Domieszkowanie akceptorami tworzy półprzewodnik, w którym gęstość dziur jest znacznie większa niż gęstość elektronów w paśmie przewodnictwa. Jest to materiał typu p.

Dla półprzewodników domieszkowanych akceptorami koncentrację nośników wyrażają równania:

$$p \cong B(T) \sqrt{N_A} e^{\left(-\frac{E_A}{2kT}\right)} \quad (4)$$

$$n \cong B(T) \sqrt{N_D} e^{\left(-\frac{E_D}{2kT}\right)} \quad (5)$$



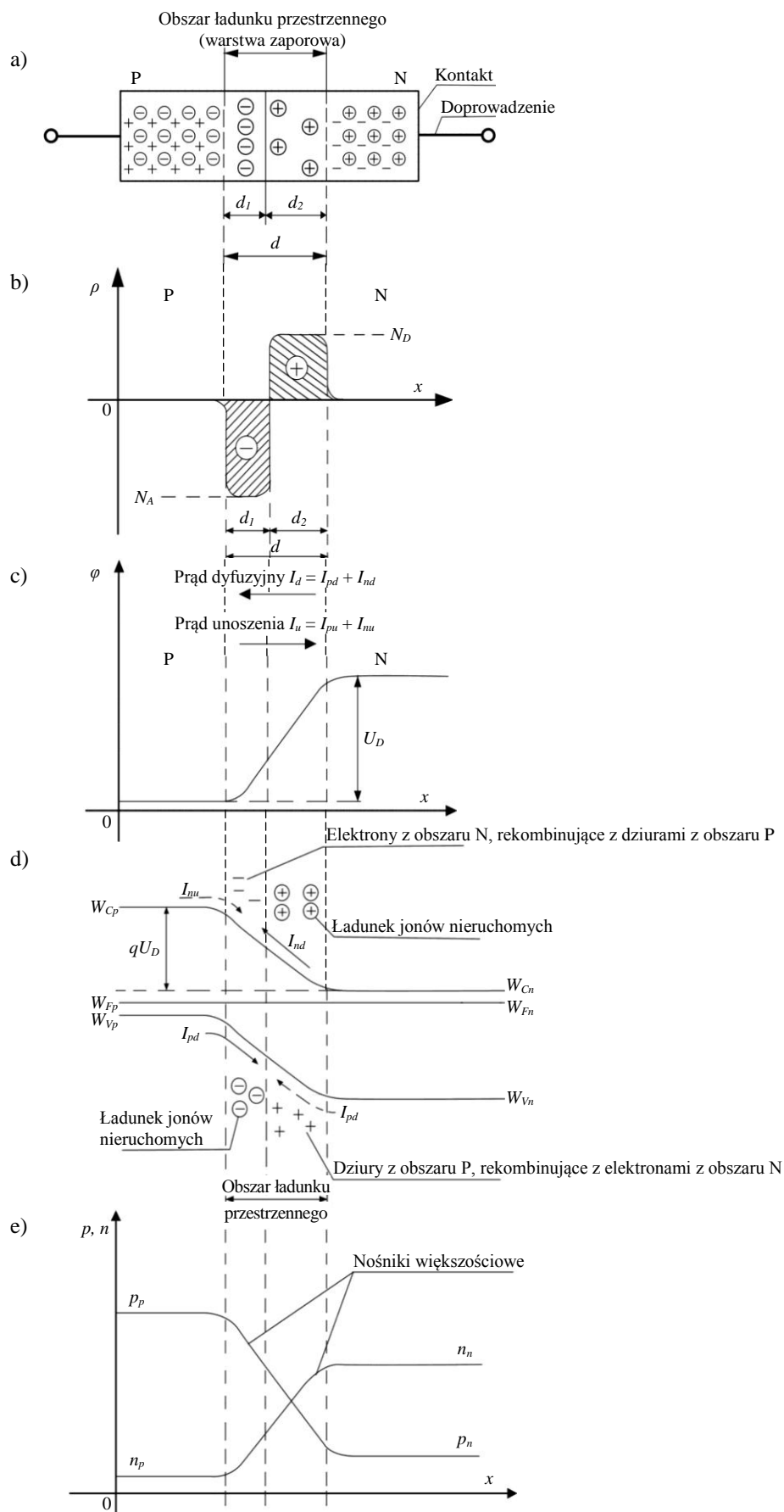
Rys. 5. Wychwytywanie elektronów z pasma walencyjnego przez poziom akceptorowy, powodujący powstawanie dziur w paśmie podstawowym

2.3. Złącze p - n

Złączeniem p - n nazywamy styk obszarów o różnym typie przewodnictwa, wytworzony w obrębie tego samego materiału półprzewodnikowego. Złącze takie otrzymuje się przez odpowiednie rozmieszczenie domieszek. Domieszki powodują powstanie dodatkowych poziomów energetycznych w strukturze pasmowej, zwykle w przerwie wzbronionej między pasmem podstawowym i pasmem przewodnictwa.

W obszarze domieszkowanym akceptorami, zwanym obszarem typu p, koncentracja swobodnych dziur przewyższa koncentrację elektronów. W materiale donorowym (typ n) koncentracja elektronów przewyższa koncentrację dziur. Na granicy obszarów n i p powstaje dipolowa warstwa ładunku przestrzennego, zwana warstwą zubożoną lub warstwą zaporową. Siły elektrostatyczne wytwarzane przez ładunki jonów utrudniają dalszy ruch dyfuzyjny nośników większościowych, natomiast na nośniki mniejszościowe powstałe pole elektryczne działa przyspieszająco. Przez złącze płyną przeciwnie skierowane prądy dyfuzji oraz prądy unoszenia dziur i elektronów.

Ćw. 10. Wyznaczanie charakterystyk prądowo - napięciowych złącza p - n



Rys. 6. Złącze p - n bez polaryzacji: a) nośniki w obszarach p i n, b) gęstość ładunku przestrzennego w warstwie zaporowej, c) rozkład potencjału, d) model pasmowy, e) gęstość nośników

Oznaczenia do rysunku 6:

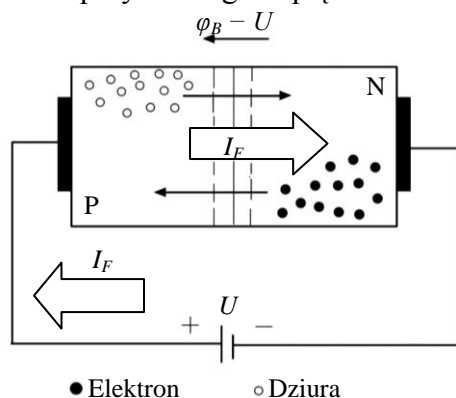
- ⊕ - jony domieszki donorowej,
- +
- ⊖ - jony domieszki akceptorowej,
-

W_{Cp}, W_{Cn} - dolna krawędź pasma przewodnictwa w obszarach P i N,

W_{Vp}, W_{Vn} - górna krawędź pasma walencyjnego w obszarach P i N,

W_{Fp}, W_{Fn} - poziom Fermiego w obszarach P i N.

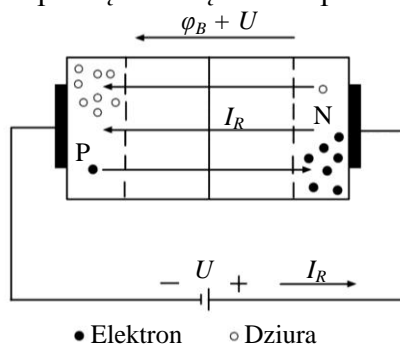
Zewnętrzne pole elektryczne może być przyłożone zgodnie lub przeciwnie z polem powstałym w złączu. Jeżeli zewnętrzne pole elektryczne przyłożone jest przeciwnie do pola złącza niespolaryzowanego, wówczas wysokość bariery potencjału obniża się, zwęża się obszar zubożony w nośniki. Jest to polaryzacja w kierunku przewodzenia. Prąd dyfuzji nośników większościowych gwałtownie wzrasta, wraz ze wzrostem przyłożonego napięcia.



Rys. 7. Polaryzacja złącza p - n w kierunku przewodzenia

Elektrony półprzewodnika typu p są odpychane przez biegun ujemny źródła w kierunku warstwy zaporowej i mogą łatwo przekroczyć barierę potencjału. Natomiast dziury półprzewodnika typu n są odpychane przez biegun dodatni źródła w kierunku złącza.

Jeżeli zewnętrzne pole elektryczne zostanie przyłożone zgodnie z polem, powstałym w złączu (plus napięcia źródła zasilającego dołączony do obszaru typu n, minus do obszaru typu p, napięcie traktujemy jako ujemne), to wówczas powiększa się bariera potencjału na złączu.



Rys. 8. Polaryzacja złącza p - n w kierunku zaporowym

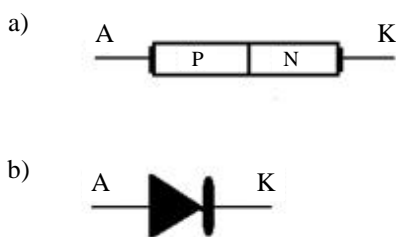
Zjawisko to można wytłumaczyć w ten sposób, że biegun dodatni źródła odciąga elektrony obszaru n od złącza, a biegun ujemny odciąga dziury obszaru p od złącza, wobec czego w strefie złącza jest bardzo mało nośników ładunku elektrycznego, pozostają tylko jony nie przenoszące ładunku. Mówimy, że przy takim połączeniu złącze działa zaporowo.

W kierunku zaporowym może płynąć minimalny prąd, zwany prądem wstecznym. Prąd wsteczny spowodowany jest przepływem przez złącze tzw. nośników mniejszościowych, które powstają na skutek przejść elektronów pod wpływem temperatury z pasma walencyjnego do pasma przewodzenia. Jest to podobne do powstawania nośników swobodnych w półprzewodniku samoistnym. W taki sposób w obszarze typu n pojawia się niewielka liczba dziur, a w obszarze typu p niewielka liczba elektronów. Nośniki mniejszościowe mogą swobodnie przechodzić przez złącze p - n, spolaryzowane w kierunku zaporowym.

Natężenie prądu w kierunku zaporowym z dużym przybliżeniem jest tyle razy mniejsze od natężenia prądu przewodzenia, ile razy mniejsza jest koncentracja nośników mniejszościowych w stosunku do nośników większościowych. Ponieważ powstawanie nośników mniejszościowych jest związane z przejściami elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodzenia, wymuszonymi energią cieplną, natężenie prądu wstecznego wzrasta wraz ze wzrostem temperatury.

2.4. Rodzaje złączy półprzewodnikowych i ich zastosowanie

Dioda półprzewodnikowa to dwukońcówkowy element półprzewodnikowy, zbudowany z dwóch warstw półprzewodnika, odmiennie domieszkowanych - typu p i typu n, tworzących razem złącze p - n.



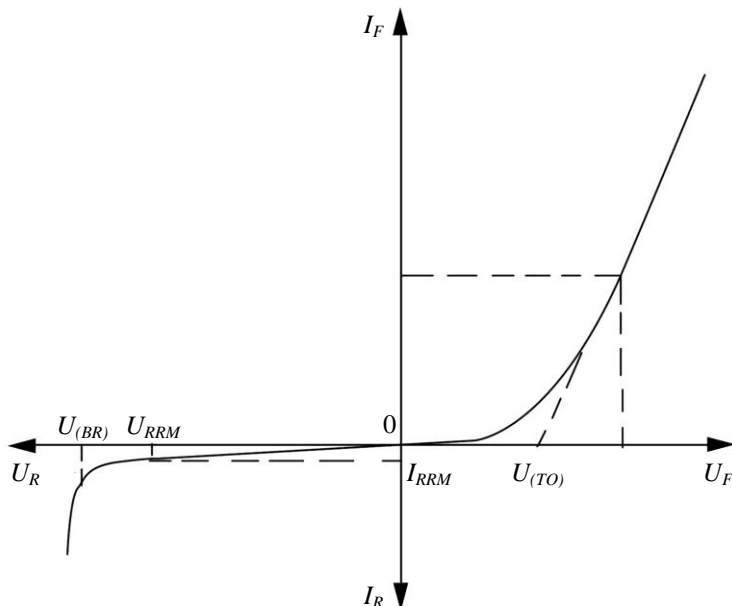
Rys. 9. Schemat blokowy (a) oraz symbol (b) diody półprzewodnikowej

Klasyfikacja diod półprzewodnikowych:

- prostownicze,
- stabilizacyjne (diody Zenera),
- impulsowe,
- pojemnościowe (warikapy),
- tunelowe,
- mikrofalowe,
- uniwersalne.

2.5. Dioda prostownicza

Na poniższym rysunku przedstawiono zależność natężenia prądu I złącza p - n od przyłożonego napięcia U , czyli jego charakterystykę prądowo - napięciową. Przebieg tej charakterystyki wynika ze zjawisk opisanych powyżej.



Rys. 10. Charakterystyka prądowo - napięciowa diody prostowniczej, gdzie: $U_{(TO)}$ - napięcie progowe, $U_{(BR)}$ - napięcie przebicia, I_F , U_F - prąd i napięcie przewodzenia, I_R , U_R - prąd i napięcie wsteczne, U_{RRM} - powtarzalne szczytowe napięcie wsteczne

Widać, że złącze p - n umożliwia przepływ prądu tylko w jednym kierunku, w kierunku przewodzenia, po przekroczeniu tzw. napięcia progowego $U_{(TO)}$. Napięcie progowe możemy wyznaczyć z charakterystyki prądowo - napięciowej diody dla kierunku przewodzenia. W tym celu aproksymujemy odcinek liniowy do osi napięć, tak jak przedstawiono na rysunku 10. Wartość napięcia progowego zależy od rodzaju materiału półprzewodnikowego, z którego zostało wykonane złącze. Z dobrym przybliżeniem napięcie progowe możemy obliczyć z szerokości pasma zabronionego materiału złącza:

$$U_{(TO)} \approx \frac{E_G}{2} \quad (6)$$

Po przekroczeniu wartości $U_{(TO)}$ prąd przewodzenia zwiększa się bardzo szybko. Natomiast przy polaryzacji w kierunku zaporowym prąd jest bardzo mały - wiele tysięcy razy mniejszy niż w kierunku przewodzenia. Mówimy, że złącze p - n ma wartości prostownicze. Przy dużym napięciu wstecznym (po przekroczeniu tzw. napięcia przebicia $U_{(BR)}$) rozpoczyna się zjawisko przebicia lawinowego, a więc szybkie narastanie prądu przy prawie stałym napięciu na diodzie.

Może to spowodować zniszczenie diody, jeżeli nie ograniczy się prądu przez włączenie szeregowo dodatkowej rezystancji. Charakterystyka prądowo - napięciowa diody opisywana jest wzorem:

$$i = C \exp\left(-\frac{\Delta E_G}{2kT}\right) \cdot \left\{ \exp\left(-\frac{q \cdot V}{kT}\right) - 1 \right\}, \quad (7)$$

gdzie: i , V ze znakiem (+) dla kierunku przewodzenia oraz i , V ze znakiem (-) dla kierunku zaporowego.

Charakterystyki złącza p - n znacznie zależą od temperatury. Przede wszystkim ze zmianami temperatury zmienia się prąd wsteczny. W przybliżeniu zwiększa się on około dwukrotnie, przy wzroście temperatury o 10 K.

2.6. Dioda Zenera

Diody Zenera są to diody przeznaczone do stabilizacji lub ograniczania napięć. Diody te pracują przy polaryzacji w kierunku zaporowym, charakteryzując się niewielkimi zmianami napięcia pod wpływem dużych zmian prądu. Dioda Zenera wykorzystuje tę właściwość złącza p - n, która w przypadku zwykłych diod jest zgubna, a mianowicie przekroczenie maksymalnego napięcia wstecznego, przy którym prąd bardzo szybko wzrasta. W przypadku diod Zenera napięcie to jest dokładnie określone i nazywane jest napięciem Zenera U_Z . Diody te zbudowane są z krzemu.

Stosuje się je do stabilizacji napięć stałych. Produkuje się diody na napięcia od 1,5 V do 200 V, ale trzeba pamiętać, że im mniejsze jest to napięcie tym gorsza jest stabilizacja.

Parametry diod:

- napięcie stabilizacji U_Z ,
- prąd stabilizacji I_Z ,
- napięcie przewodzenia U_F , przy określonym prądzie przewodzenia,
- prąd wsteczny diody I_R , przy określonym napięciu wstecznym,
- rezystancja dynamiczna R_Z , której wartość zmienia się w zależności od napięcia stabilizacji,
- temperaturowy współczynnik napięcia stabilizacji aU_Z .

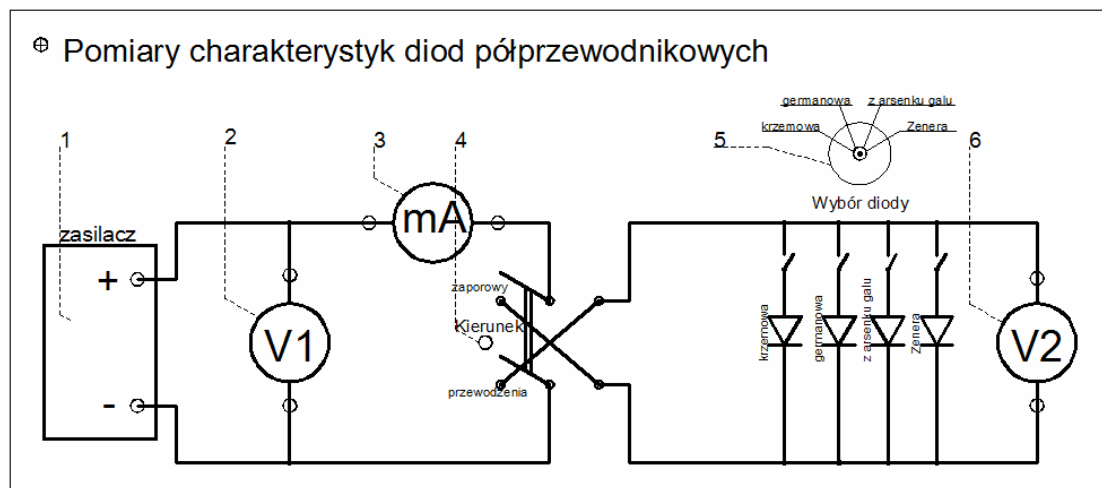
3. PROGRAM ĆWICZENIA

3.1. Stanowisko laboratoryjne

Stanowisko laboratoryjne składa się z trzech segmentów. W tym ćwiczeniu wykorzystujemy segment pierwszy, przedstawiony na rysunku 11.

Pierwszy segment *Pomiary charakterystyk diod półprzewodnikowych* umożliwia wyznaczenie zależności $I = f(U)$ w kierunku przewodzenia oraz w kierunku zaporowym dla czterech rodzajów diod półprzewodnikowych: krzemowej, germanowej, z arsenku galu i diody Zenera.

Urządzenie to składa się z zasilacza prądu stałego z regulacją wartości napięcia oraz układu pomiarowego, za pomocą którego możliwe jest wyznaczenie charakterystyki prądowo - napięciowej danego rodzaju diody.



Rys. 11. Widok płyty czołowej stanowiska laboratoryjnego do pomiaru charakterystyk diod półprzewodnikowych z uwzględnieniem przełączników, wykorzystywanych podczas pomiarów

Oznaczenia do rysunku 11:

- 1 - miejsce przyłączenia zasilacza prądu stałego,
- 2 - miejsce przyłączenia woltomierza V1, mierzącego napięcie przy włączeniu diody w kierunku zaporowym,
- 3 - miejsce przyłączenia miliamperomierza, mierzącego prąd przepływający przez diodę,
- 4 - przełącznik kierunku pracy diody (przewodzenia / zaporowy),
- 5 - przełącznik wyboru diody,
- 6 - miejsce przyłączenia woltomierza V2, mierzącego napięcie przy włączeniu diody w kierunku przewodzenia.

Wybór danego rodzaju diody sygnalizowany jest zapaleniem się lampki obok nazwy elementu, którego charakterystykę będziemy wyznaczać.

3.2. Wyznaczanie charakterystyk prądowo - napięciowych diod półprzewodnikowych

Sposób wykonania ćwiczenia:

- podłączyć stanowisko laboratoryjne do gniazda zasilającego i włączyć zasilanie przyciskiem na przedniej ściance stanowiska *Zasilanie 230V*,
- za pomocą przełącznika obrotowego, znajdującego się na przedniej ściance stanowiska wybrać opcję *Charakterystyki*,

- w miejscu (1), oznaczonym na rysunku 11, podłączyć zasilacz laboratoryjny Cobrabid KB 60-01 (kanał A),
- przed włączeniem zasilacza sprawdzić ustawienie potencjometru regulacji napięcia na 0,
- ustawić zakres regulacji napięcia Volts na pozycję 0 (zakres od 0 V do 10 V) oraz ograniczenie prądowe Current limit na 1 A,
- podłączyć mierniki w odpowiednie gniazda (2, 3, 6), oznaczone na rysunku 11,
- przełącznikiem (5) dokonać wyboru diody do pomiaru,
- przełącznikiem (4) ustawić kierunek pracy diody (przewodzenie / zaporowy),
- pomiarów dokonujemy ustawiając wartość napięcia na diodzie (woltomierz V2), zgodnie z wartościami podanymi w tabeli 1 i odczytując wskazania miliamperomierza.

Nie wolno przekraczać wartości 0,7 A prądu przepływającego przez diodę. Wszelkich operacji przełączania, zmiany kierunku pracy diody, itp. należy dokonywać w stanie bezprądowym (potencjometr regulacji napięcia ustawiony na wartość 0).

Tabela 2. Wyniki pomiarów diod półprzewodnikowych z krzemu i germanu

Krzem				German			
Kierunek przewodzenia		Kierunek zaporowy		Kierunek przewodzenia		Kierunek zaporowy	
U_2	I	U_2	I	U_2	I	U_2	I
V	mA	V	μ A	V	mA	V	μ A
0,10		0,5		0,05		0,5	
0,20		1,0		0,10		1,0	
0,30		2,0		0,15		2,0	
0,40		3,0		0,20		3,0	
0,50		4,0		0,25		4,0	
0,60		5,0		0,30		5,0	
0,65		5,8		0,35		5,8	
0,70				0,40			
0,75				0,45			
0,80				0,50			
0,90				0,55			
1,00				0,60			
1,10							

Tabela 3. Wyniki pomiarów diody z arsenku galu i diody Zenera

Arsenek galu				Dioda Zenera (krzem)			
Kierunek przewodzenia		Kierunek zaporowy		Kierunek przewodzenia		Kierunek zaporowy	
U_2	I	U_2	I	U_2	I	U_2	I
V	mA	V	μA	V	mA	V	mA
0,10		0,5		0,10		0,5	
0,20		1,0		0,20		1,0	
0,30		2,0		0,30		2,0	
0,40		3,0		0,40		3,0	
0,50		4,0		0,50		4,0	
0,60		5,0		0,60		5,0	
0,70		5,8		0,70		5,5	
0,75				0,80		5,6	
0,80				0,90		5,7	
0,85						5,8	
0,90							
0,95							
1,00							
1,10							
1,20							

4. OPRACOWANIE SPRAWOZDANIA

Na podstawie uzyskanych wyników należy wykreślić charakterystyki prądowo - napięciowe zbadanych diod półprzewodnikowych. Z charakterystyk diod należy odczytać napięcia progowe, przy których dana dioda zaczyna przewodzić (punkt przecięcia stycznej do charakterystyki z osią X, jak na rysunku 10) i porównać uzyskane wartości z szerokościami pasma zabronionego dla materiałów, z których zostały wykonane. Następnie należy opracować wnioski z wykonanego ćwiczenia.

5. PYTANIA KONTROLNE

- Charakterystyki i parametry diod prostowniczych.
- Właściwości diody Zenera.
- Właściwości złącza p - n.
- Półprzewodnik samoistny i domieszkowany, rodzaje domieszkowania.
- Model pasmowy półprzewodnika.
- Rozpatrz złącze p - n spolaryzowane w kierunku przewodzenia i zaporowym. Omawiając zachodzące zjawiska fizyczne wykaż, że ma ono właściwości prostownicze.