

**Piotr Janas**  
**Zakład Fizyki, Uniwersytet Rolniczy**

Do użytku wewnętrznego

## **ĆWICZENIE 39**

### **WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYKI DIODY PÓLPRZEWODNIKOWEJ**

Kraków 2019

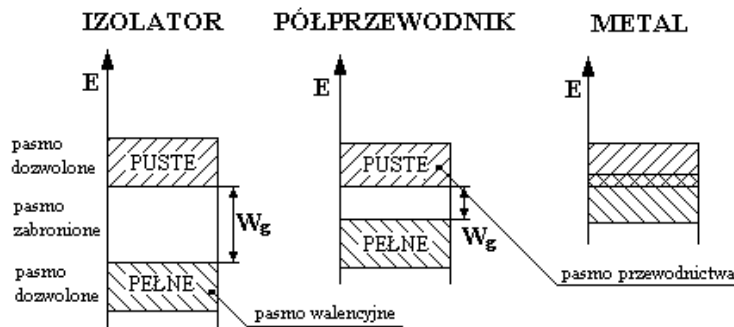
#### **ZAKRES WYMAGANYCH WIADOMOŚCI ZE SZKOŁY ŚREDNIEJ:**

Ładunki elektryczne. Pole elektryczne. Napięcie, natężenie, opór elektryczny. Prawa Coulomba, Ohma, Kirchhoffa. Prąd elektryczny w metalach.

## I. CZĘŚĆ TEORETYCZNA

### 1. Elementy pasmowej teorii budowy ciał stałych

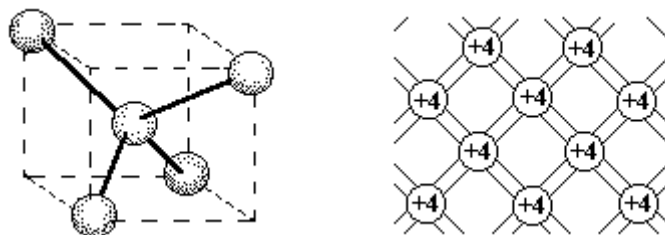
Struktura elektronowa krystalicznych ciał stałych decyduje o ich własnościach elektronowych. **Ciała krystaliczne** stanowią przestrzenny zbiór atomów lub cząsteczek (jonów) w postaci pewnego rodzaju elementarnych komórek regularnie powtarzających się w przestrzeni trójwymiarowej. W każdym atomie elektrony zajmują pewne dozwolone orbity, którym zgodnie z regułami mechaniki kwantowej odpowiadają dyskretne **poziomy energetyczne**. Najwyższym obsadzonym poziomem jest **poziom walencyjny**, od jego obsadzenia zależą optyczne, chemiczne i elektryczne własności atomu. Na skutek oddziaływania elektronów z sąsiadujących atomów, każdy z poziomów energetycznych atomu rozszczepia się, tworząc całe pasmo dozwolonych i obsadzonych poziomów: dolna i górna granica pasma pozostają przy tym niezależne od wielkości próbki. Powyżej **pasma walencyjnego** występuje **pasmo zabronione**: żaden elektron nie może mieć energii zawierającej się w jego granicach. Jeszcze wyżej energetycznie usytuowane jest **pasmo przewodnictwa**, w którym mogą się znaleźć elektrony nie związane już praktycznie z żadnym z atomów. Ponieważ wszystkie pasma poniżej walencyjnego są w pełni obsadzone, a elektrony nie mogą ich opuszczać, w schematycznych rysunkach pasmowej budowy kryształów przedstawia się jedynie położenie pasm walencyjnych, zabronionego i przewodnictwa. Przyjmując czysto formalny warunek klasyfikacji - szerokość energetycznego pasma zabronionego, kryształy można podzielić na trzy klasy: **izolatory** o szerokości pasma zabronionego  $W_g = 10\text{eV}$  ( $1.6 \cdot 10^{-18}$  J), **półprzewodniki**  $W_g < 5\text{eV}$  ( $8 \cdot 10^{-19}$  J) i **metale**, w których pasmo walencyjne i przewodnictwa nakładają się wzajemnie. Schematyczny obraz pasmowej budowy kryształów ilustruje Rys. 1.



Rys.1. Schematyczny obraz pasmowej budowy kryształów.

## 2. Półprzewodniki samoistne

Materiał krystaliczny będzie wykazywał przewodność różną od zera jedynie gdy wśród pasm energetycznych co najmniej jedno będzie niecałkowicie wypełnione. Warunek ten spełniają półprzewodniki, w których (w odróżnieniu od izolatorów) istnieją mechanizmy sprawiające, że pasma w innych warunkach wypełnione są jedynie częściowo obsadzone lub pasma puste zostają częściowo wypełnione. Do półprzewodników zaliczane są materiały wielce różnorodne pod względem budowy chemicznej, a więc zarówno czyste pierwiastki jak german, krzem czy pewne odmiany węgla, tlenki i siarczki niektórych metali np. CuO, ZnO, PbS, związki międzymetaliczne jak InSb, GaAs i wiele innych. W układzie okresowym Si i Ge znajdują się w IV grupie i każdy z nich może być czterowartościowy, mając cztery elektrony walencyjne mogące tworzyć wiązanie chemiczne. W formie krystalicznej pierwiastki te mają strukturę diamentu (pokazaną na Rys. 2), dla której każdy atom powiązany jest ze swymi czterema sąsiadami parami elektronów. Wiązanie takie nazywane jest **kowalencyjnym (atomowym)**. Jest ono trwałe i trzeba znacznej energii, równej szerokości pasma zabronionego, aby uwolnić elektron.

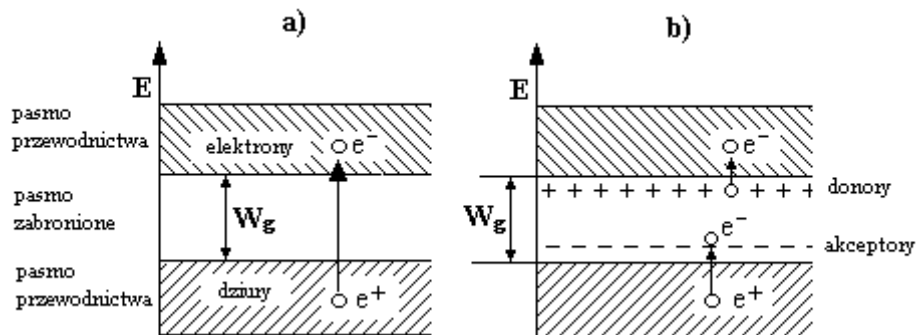


Rys. 2. Budowa krystaliczna diamentu ( Si, Ge ). Dwuwymiarowy model sieci o wiązaniach kowalencyjnych.

W półprzewodnikach pasmo walencyjne jest całkowicie wypełnione jedynie w temperaturze zera bezwzględnego, w każdej wyższej temperaturze pewna część elektronów jest termicznie wzbudzana do wyższego, pustego pasma przewodnictwa. Uwolnione elektrony pozostawiają w sieci krystalicznej naładowane dodatnio jony. Równoważny im ładunek dodatni może również poruszać się w kryształach od atomu do atomu, dzięki przeskokom elektronów walencyjnych między sąsiednimi atomami. Ten typ przepływu prądu w paśmie walencyjnym nazywany jest **prądem dziurowym**. W sumie, w półprzewodnikach możliwe są dwa mechanizmy przepływu prądu elektrycznego: ruch elektronów w paśmie przewodnictwa i ruch dziur w paśmie walencyjnym. W półprzewodnikach samoistnych, liczba dziur i elektronów z pasma przewodnictwa jest jednakowa, a prąd wypadkowy jest sumą porównywalnych natężeń prądów dziur i elektronów.

### 3. Półprzewodniki domieszkowe

Możliwe jest jednak sztuczne tworzenie materiałów o dominującym przewodnictwie elektronowym (**półprzewodniki typu „n”**, zwane również **donorowymi**) lub przewodnictwie dziur (**półprzewodniki typu „p”**, zwane **akceptorowymi**). Przykładowo, mechanizm uzyskiwanie materiału donorowego może być następujący. Wprowadzając do czystego germanu lub krzemu arsen, który ma pięć elektronów walencyjnych, zostaje on wbudowany w istniejącą strukturę krystaliczną. Cztery elektrony tworzą z sąsiednimi atomami wiązania kowalencyjne, piąty elektron pozostaje luźno związany ze swym atomem arsenu tworząc nowe pasmo (tzw. donorowe), leżące bardzo blisko pasma przewodnictwa (słabo związany elektron ma energię niemal równą elektronom swobodnym).

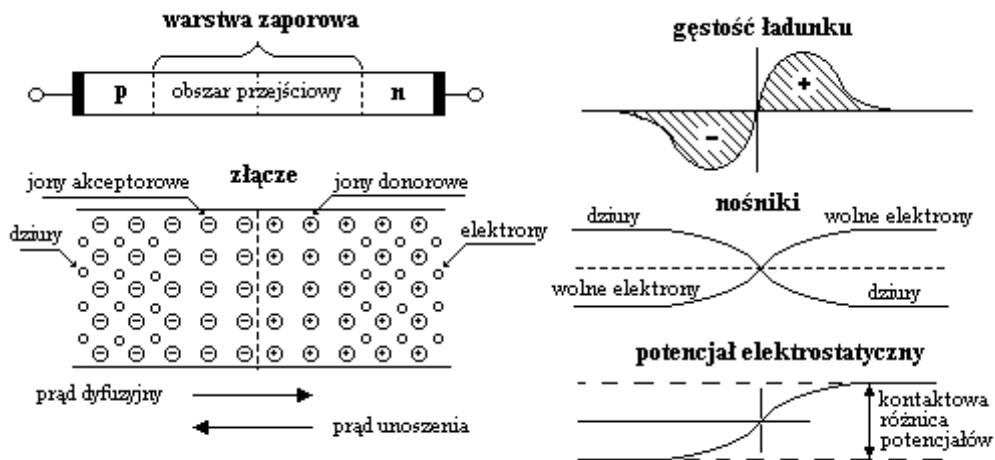


Rys.3. Rozkład poziomów energetycznych w półprzewodniku: a) samoistnym, b) domieszkowym.

W temperaturze pokojowej energia termiczna elektronów jest wystarczająca do przeniesienia ich z pasma donorowego do pustego pasma przewodnictwa. Pozbawiony elektronu atom domieszki (As) staje się natomiast jonem dodatnim, sztywno umiejscowionym w sieci krystalicznej. Duża energia pasma donorowego stanowi dla elektronów walencyjnych zbyt wysoką barierę aby w paśmie mogły pojawić się dziury przewodzące prąd elektryczny. W materiale typu „n” **nośnikami większościowymi** są zatem elektrony z pasma przewodnictwa, a koncentracja i rodzaj atomów domieszki decyduje o własnościach półprzewodnika. W półprzewodnikach typu „p” nośnikami większościowymi są dziury. Materiał taki powstaje w wyniku domieszkowania atomami trójwartościowymi np. glinu (Al) czy indu (In). W efekcie jedno z wiązań kowalencyjnych atomu domieszki jest niekompletne i może przyjąć elektron z pasma walencyjnego. W poziomie tym powstaje zatem dziura o ładunku dodatnim, mogąca poruszać się pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. Poziom akceptorowy leży nieco ponad pasmem walencyjnym.

## 4. Złącza p-n

O praktycznym wykorzystaniu półprzewodników zadecydowały własności układu stanowiącego połączenie półprzewodnika typu „n” z półprzewodnikiem typu „p”, a ściślej mówiąc cienkiej warstwy granicznej zwanej **złączem p-n**. Duża różnica koncentracji nośników większościowych i mniejszościowych wywołuje **dyfuzję** w obu kierunkach złącza. Dziury z obszaru „p” dyfundują do materiału typu „n” o dużej koncentracji elektronów i tam ulegają **rekombinacji** z elektronami przewodnictwa. W materiale „p” powstają niezrównoważone elektrycznie, ujemne jony akceptorowe. W podobny sposób elektrony z materiału typu „n” dyfundują do „p” i tam rekombinują z dziurami pozostawiając w obszarze „n” dodatnio naładowane jony donorowe. Niezrównoważone elektrycznie jony donorowe i akceptorowe tworzą **dipolową** warstwę ładunku przestrzennego, która w warunkach równowagi wstrzymuje dalszy proces dyfuzji. Ściśle rzecz biorąc, dyfuzja zostaje ograniczona do poziomu, przy którym prąd dyfuzji jest zrównoważony przez tzw. prąd unoszenia nośników mniejszościowych (elektronów z materiału „p” do materiału „n”, dziur z „n” do „p”). Pomiędzy półprzewodnikami typu „n” i „p” tworzy się różnica potencjału zwana **napięciem kontaktowym**, skierowana w poprzek złącza ( Rys. 4).



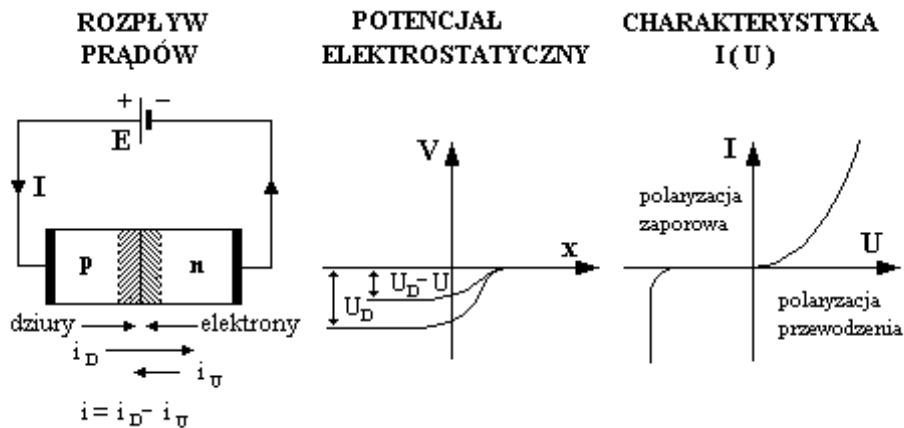
Rys. 4. Złącze p-n. Rozkład ładunku i potencjału w warstwie zaporowej:

- obszar warstwy zaporowej, rozptyw prądów,
- gęstość ładunku,
- gęstość nośników,
- potencjał elektrostatyczny.

## 5. Polaryzacja złącza p-n

Złącze p-n można spolaryzować przez przyłożenie zewnętrznego pola elektrycznego. Jeżeli do elektrody połączonej z półprzewodnikiem typu „p” dołączy się dodatni zacisk źródła

napięcia, a ujemny z materiałem typu „n”, złącze p-n zostanie spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Zewnętrzne pole powoduje wzrost liczby nośników większościowych w okolicy złącza, neutralizujących ładunek nieruchomych jonów akceptorowych i donorowych w **warstwie zaporowej**. W efekcie maleje ładunek warstwy zaporowej oraz zmniejsza się napięcie kontaktowe. Zmniejszenie **bariery potencjału** powoduje wzrost liczby elektronów przechodzących z materiału typu „n” do „p” i dziur z materiału „p” do „n”. Ten właśnie prąd (niezrównoważony tym razem przez prąd unoszenia) decyduje o trwałym przepływie prądu przez złącze. Podobnie można przeanalizować sytuację polaryzacji złącza w kierunku zaporowym. Przyłożone pole elektryczne obniża liczbę nośników większościowych w pobliżu złącza, rośnie gęstość ładunków związanych z nieruchomymi jonami donorowymi i akceptorowymi i w efekcie wzrasta bariera potencjału. Zmniejsza się liczba nośników większościowych i za przepływ prądu przez złącze odpowiadają nośniki mniejszościowe. Prąd ten, zwany prądem zaporowym, jest mniejszy od prądu przewodzenia o kilka rzędów wielkości i w pierwszym przybliżeniu jego udział może być pominięty.



Rys. 5. Złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia:

- złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia,
- rozkład potencjału elektrostatycznego,
- charakterystyka prądowo-napięciowa.

Złącze dwóch półprzewodników typu „n” i „p” lub metalu z półprzewodnikiem może tworzyć **diode półprzewodnikową**. W zależności od rodzaju użytych półprzewodników, sposobu domieszkania i konstrukcji złącza diody mogą pełnić różne funkcje.

## 6. Prądowo-napięciowa charakterystyka diody półprzewodnikowej

Pod względem właściwości elektrycznych dioda jest jednym z wielu nieliniowych elementów, dla których zależność natężenia prądu od napięcia nie jest zgodna z prawem Ohma.

Teoretyczną postać charakterystyki prądowo napięciowej idealnej diody półprzewodnikowej opisuje równanie wykładnicze:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

gdzie:  $I_0$  - natężenie **prądu nasycenia (prądu wstecznego)**,

$q$  - ładunek elektronu ( $1.6 \cdot 10^{-19}$  C ),

$k$  - stała Boltzmana ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K ),

$T$  - temperatura bezwzględna.

Dla diody spolaryzowanej w **kierunku przewodzenia** ( $U > 0$ ), natężenie prądu narasta wykładniczo w funkcji przyłożonego napięcia, dla **polaryzacji zaporowej** ( $U < 0$ ) przez diodę przepływa niewielki prąd wsteczny  $I = -I_0$  niezależny od napięcia. Równanie (1), zwane niekiedy eksponencjalnym modelem diody, dobrze opisuje charakterystyki większości typów diod (zwłaszcza prostowniczych), ale doświadczalne wartości stałych  $I_0$  i  $q/kT$  znacznie odbiegają od wartości teoretycznych. Ze względu na bardzo małą wartość prądu  $I_0$ , na ogół niemierzalną przy pomocy typowych amperomierzy, pomiar charakterystyk diod rozpoczyna się dla napięć przewodzenia, dla których czynnik  $\exp(qU/kT)$  jest znacznie większy od jedności. Można wówczas uprościć równanie (1) do postaci ułatwiającej graficzną analizę danych doświadczalnych:

$$I = I_0 e^{\frac{qU}{kT}} \quad (2)$$

Po zlogarytmowaniu równania (2) uzyskuje się wówczas liniową zależność między  $\ln I$  i napięciem  $U$ :

$$\ln I = \ln I_0 + qU/kT \quad (3)$$

Przedstawiając dane doświadczalne w tzw. półlogarytmicznym układzie współrzędnych, jako zależność  $\ln I$  od napięcia  $U$ , otrzymuje się linię prostą o współczynniku nachylenia równym  $q/kT$  i wyrazie wolnym  $\ln I_0$ . W najprostszych zastosowaniach, do opisu charakterystyki prądowo-napięciowej diody, często stosuje się odcinkami liniową funkcję, określoną następująco:

$$\begin{aligned} U &= U_D + I R_D && \text{dla } U > U_D && (4) \\ I &= 0 && \text{dla } U < U_D \end{aligned}$$

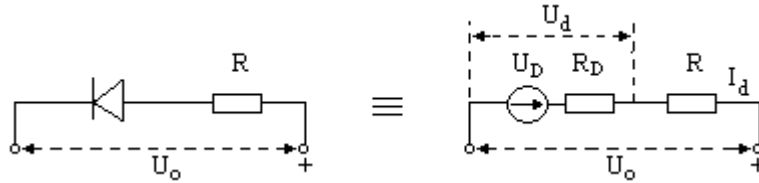
gdzie  $U_D$  - progowe napięcie przewodzenia diody,  $R_D = \Delta U / \Delta I$  - średni **opór dynamiczny (przyrostowy)** diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia.

Taki sposób opisu charakterystyki diody jest równoznaczny z przyjęciem pewnego myślowego modelu, zwanego **modelem liniowym**, w którym przewodzącą diodę można w

obwodzie elektrycznym zastąpić źródłem stałego napięcia o wartości  $U_D$  połączonego szeregowo z oporem  $R_D$ . Pomimo swej prostoty model ten jest niezwykle użyteczny w praktycznej analizie warunków pracy obwodów elektrycznych zawierających diody prostownicze.

## 7. Dioda w obwodzie elektrycznym.

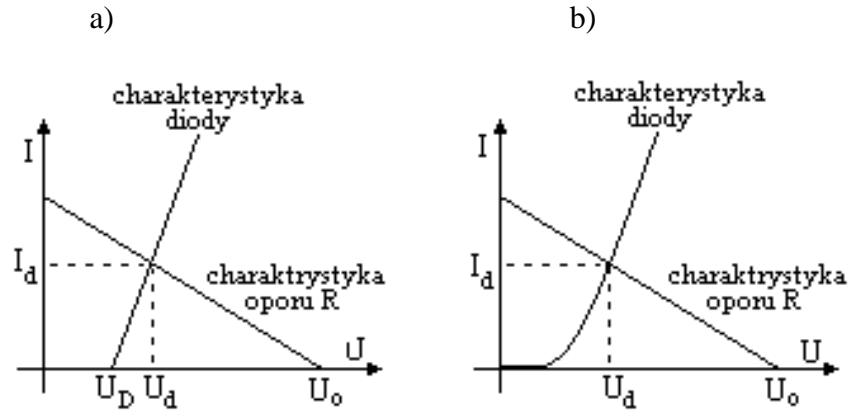
Znajomość charakterystyki prądowo-napięciowej diody pozwala przewidzieć jej wpływ na przepływ prądu w dowolnie złożonym obwodzie elektrycznym opisywanym przez równania Kirchhoffa i Ohma. W najprostszym przypadku, wykorzystując model liniowy (równanie 4), diodę spolaryzowaną w kierunku przewodzenia można w obwodzie przedstawić jako szeregowe połączenie źródła napięciowego o stałym napięciu  $U_D$  i oporu  $R_D$ . Przykładowo, analizując przedstawiony na Rys.6 szeregowy układ diody i oporu  $R$  podłączonych do źródła napięcia  $U_o$ , zgodnie z II prawem Kirchhoffa uzyskuje się równanie:  $U_o = U_D + I_d R_D + I_d R$ . Jego rozwiązanie, określające natężenie prądu  $I_d$  płynącego w obwodzie, ma następującą postać:  $I_d = (U_o - U_D)/(R_D + R)$ . Spadek napięcia  $U_d$  na diodzie wynosi:  $U_d = U_D + I_d R_D$ . Wielkości  $I_d$  i  $U_d$  określają tzw. **punkt pracy** diody w obwodzie elektrycznym.



Rys.6. Szeregowe połączenie diody (model liniowy) i oporu  $R$  podłączonych do źródła napięcia  $U_o$ .

Dysponując doświadczalną charakterystyką prądowo-napięciową diody przedstawioną na wykresie, wyznaczenie punktu pracy diody można również przeprowadzić graficznie (Rys.7). Współrzędne  $I_d$  i  $U_d$  wyznacza punkt przecięcia charakterystyki diody i prostej obciążenia opisaną równaniem  $I = (U_o - U)/R$ . Jest to równanie prostej o współczynniku kierunkowym  $-1/R$  przechodzącej przez punkt  $(U_o, 0)$ . Zaletą analizy graficznej jest możliwość wyznaczenia punktu pracy nie tylko dla modelu liniowego, ale i dla rzeczywistej charakterystyki diody (rys.7b).





Rys.7. Graficzna analiza punktu pracy diody w obwodzie elektrycznym: a) dla modelu liniowego, b) dla rzeczywistej charakterystyki  $I(U)$ .

## 8. Funkcje diody półprzewodnikowej

Własności złącza p-n spowodowały, że diody półprzewodnikowe przejęły wszystkie funkcje spełnione poprzednio przez diody lampowe. Do funkcji tych zaliczyć można przede wszystkim prostowanie prądów przemiennych, ich generację, wykrywanie (detekcję) sygnałów elektromagnetycznych w niemal całym zakresie widmowym, mieszanie sygnałów o różnych częstotliwościach, przełączanie (kluczowanie) sygnałów itp. Pojedyncze złącze p-n znalazło również zupełnie nowe zastosowania jako stabilizator napięcia, detektor naprężeń mechanicznych, czujnik temperatury, kondensator o regulowanej pojemności czy jako skomplikowany przetwornik funkcji matematycznych. Konstrukcja diod będących detektorami lub emiterami energii promienistej (w tym promieniowania spójnego w diodach laserowych) umożliwiła poprzez znaczne zwiększenie gęstości zapisu informacji na trwałych nośnikach danych rozwój technik multimedialnych.

## LITERATURA

1. Encyklopedia Fizyki, PWN, W-wa 1974
2. Encyklopedia Techniki, Tom Elektronika, WNT, W-wa 1983
3. Grey P.E., Searle C.L., Podstawy elektroniki, PWN, W-wa 1972
4. Jaworski B., Dietłof A., Miłkowska L. Elektryczność i magnetyzm, Kurs Fizyki T II, PWN, W-wa 1971
5. Oldenberg O., Rasmussen N.C., Fizyka współczesna, PWN, W-wa 1970
6. Orear J., Fizyka T 2, WNT, W-wa 1993

7. Seely S., Układy elektroniczne, W-wa 1972
8. Słownik Fizyczny, Wiedza Powszechna, W-wa 1984
9. Strugalski Z., Struktura wewnętrzna materiałów, WNT, W-wa 1981
10. Szalimowa K.W., Fizyka półprzewodników, PWN, W-wa 1974
11. Wert Ch.A., Thomson R.M., Fizyka ciała stałego, PWN, W-wa 1974

# 39

## CHARAKTERYSTYKA DIODY PÓLPRZEWODNIKOWEJ

### I WSTĘP

Teoretyczną postać charakterystyki prądowo-napięciowej  $I(U)$  idealnej diody półprzewodnikowej opisuje następujące równanie:

$$I = I_0 (\exp(qU/kT) - 1) \quad 1)$$

gdzie:  $I_0$  - natężenie prądu nasycenia,  $q$  - ładunek elektronu ( $1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ),  $k$  - stała Boltzmana ( $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $T$  - temperatura w skali bezwzględnej. Dla diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia ( $U > 0$ ) natężenie prądu narasta wykładniczo w funkcji przyłożonego napięcia, dla polaryzacji zaporowej ( $U < 0$ ) przez diodę przepływa niewielki prąd wsteczny  $I \cong -I_0$ , słabo zależny od napięcia. Zazwyczaj pomiar charakterystyk diod rozpoczyna się dla napięć przewodzenia, dla których czynnik  $\exp(qU/kT)$  jest znacznie większy od jedności. Można wówczas uprościć równanie (1) do postaci ułatwiającej graficzną analizę danych doświadczalnych:

$$I = I_0 \exp(qU/kT). \quad 2)$$

W najprostszych zastosowaniach, do opisu charakterystyki diody często stosuje się odcinkami liniową funkcję, określoną następująco:

$$U = U_D + I R_D \quad \text{dla } U > U_D, \quad I = 0 \quad \text{dla } U < U_D, \quad 3)$$

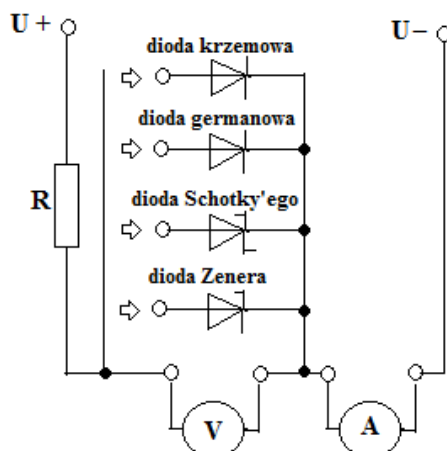
gdzie  $U_D$  - progowe napięcie przewodzenia diody,  $R_D = \Delta U / \Delta I$  - średni opór dynamiczny (przyrostowy) diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia. Taki sposób opisu charakterystyki diody jest równoznaczny z przyjęciem tzw. liniowego modelu diody. Zakłada on, że przewodzącą diodę można w obwodzie zastąpić źródłem napięcia stałego  $U_D$  z szeregowo połączonym oporem  $R_D$ .

### II CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zastosowanie liniowego (**wersja A**) lub eksponencjalnego (**wersja B**) równania do opisu charakterystyk prądowo-napięciowych dwóch wybranych diod półprzewodnikowych.

### III WYKONANIE ĆWICZENIA

- Zestawić obwód pomiarowy według schematu przedstawionego na Rys.1. Jako przyrządy pomiarowe wykorzystać multimetry cyfrowe. Amperomierz ustawić na zakresie 200 mA, a woltomierz na 2000 mV napięcia stałego (DC). Wybór diody możliwy przy pomocy wtyku bananowego. Zanotować typ badanej diody. Pokrętła VOLTEGE (COARSE i FINE) zasilacza skrócić do oporu w lewo.
- Po sprawdzeniu obwodu przez prowadzącego zajęcia** włączyć zasilacz przyciskiem POWER i zmieniając napięcie zasilacza pokrętłami COARSE (zgrubne) i FINE (precyzyjne) wprowadzić diodę w zakres przewodzenia ( $U > U_D$ ) ustalając natężenie prądu na poziomie ok. 5mA. Zarejestrować wskazania obu multimetrów.



Rys.1 Schemat obwodu pomiarowego.

3. Zwiększając stopniowo napięcie tak, aby natężenie prądu wzrastało o ok. 5mA, rejestrować kolejne punkty charakterystyki diody. Pomiar zakończyć dla natężenia ok.100mA.

4. Wyniki pomiarów zapisać w tabeli:

Typ diody:		Typ diody:	
U (mV)	I (mA)	U (mV)	I (mA)

5. Powtórzyć pomiar charakterystyki dla drugiej diody.

#### IV OPRACOWANIE WYNIKÓW (wyboru wersji dokonuje prowadzący zajęcia)

**WERSJA A** (dopasowanie równania liniowego  $I=f(U)$ ). Opracowanie w arkuszu EXCEL.

1. Wprowadzić zgromadzone w tabeli dane pomiarowe do arkusza EXCEL.
2. Przedstawić dane na wykresie (Wstawianie – punktowy xy).
3. Opisać osie wykresu (symbol wielkości mierzonej i jej jednostka) (Układ – Tytuły osi).
4. Znać przedział danych, w którym charakterystyka diody jest praktycznie liniowa i utworzyć kolejny wykres.
5. Opisać wykres równaniem liniowym (Układ – linia trendu – więcej opcji – wyświetl równanie).
6. Z uzyskanego równania  $I = aU+b$  obliczyć wartości progowego napięcia przewodzenia  $U_D = -b/a$  i oporu dynamicznego diody  $R_D = 1/a$ . Wartość oporu wyrazić w  $\Omega$ .

**WERSJA B** (dopasowanie równania eksponentialnego  $I=f(U)$ ).

1. Wprowadzić zgromadzone dane pomiarowe w tabeli do arkusza EXCEL. (**napięcie w V, natężenie w A**).
2. Przedstawić dane pomiarowe na wykresie (Wstawianie – punktowy xy).
3. Opisać osie wykresu (sybole wielkości mierzonej i jej jednostka) (Układ – Tytuły osi).
4. Opisać wykres równaniem eksponentialnym (Układ – linia trendu – więcej opcji – wyświetl równanie).
5. Korzystając z danych tablicowych i przyjmując jako wartość temperatury  $T = 300$  K obliczyć teoretyczną wartość stałej  $q/kT$  i porównać ją z wyznaczonymi dla badanych diod wartościami doświadczalnymi.