



Politechnika Wroclawska

Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki



LABORATORIUM
ELEMENTÓW i UKŁADÓW
ELEKTRONICZNYCH

Opracował zespół: Marek Panek, Waldemar Oleszkiewicz, Iwona Zborowska-Lindert, Bogdan Paszkiewicz, Małgorzata Kramkowska, Beata Ściana, Zdzisław Synowiec, Bogusław Boratyński

Ćwiczenie nr 2

Charakterystyki $I = f(U)$ złącza p-n.

I. Zagadnienia do samodzielnego przygotowania

- Budowa złącza p-n, rozkład koncentracji domieszek w złączu p-n.
- Model pasmowy złącza p-n dla różnych polaryzacji.
- Charakterystyka I-U oraz wzór Shockleya – interpretacja.
- Zjawiska w rzeczywistym złączu p-n, model rzeczywistego złącza p-n.

II. Program zajęć

- Pomiar charakterystyk I-U diod półprzewodnikowych
- Wyznaczenie charakterystycznych parametrów diody półprzewodnikowej: rezystancji szeregowej - R_s , prądu nasycenia złącza - I_s .
- Pomiar charakterystyk I-U diod wykonanych z różnych półprzewodników

III. Literatura

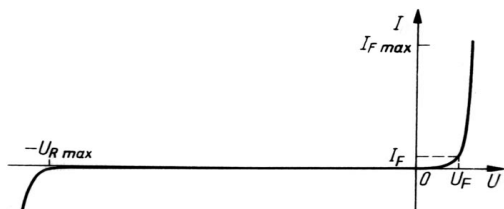
1. Notatki z WYKŁADU
2. W. Marciniak, Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone
3. A. Świt, J. Pułtorak, Przyrządy półprzewodnikowe

Wykonując pomiary **PRZESTRZEGAJ** przepisów BHP związanych z obsługą urządzeń elektrycznych.

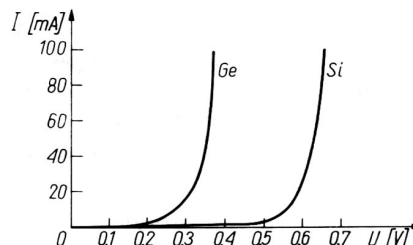
1 Wiadomości wstępne

1.1 Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza p-n

Typowe charakterystyki prądowo-napięciowe diod półprzewodnikowych przedstawiono na Rys.1 i 2.



Rys. 1. Charakterystyka I-U diody przy polaryzacji przewodzenia i zaporowej



Rys. 2. Charakterystyki I-U diody germanowej i krzemowej przy polaryzacji przewodzenia

W ćwiczeniu zajmiemy się dokładniejszą analizą ich przebiegu oraz pomiarami wybranych parametrów diod.

Natężenie prądu płynącego przez **idealne złącze p-n** w funkcji napięcia polaryzacji złącza definiuje wzór Shockleya, opisujący dyfuzyjny mechanizm przepływu nośników prądu:

$$I = I_S \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) \quad \text{czyli} \quad I = I_S \exp \frac{qU}{kT} - I_S \quad (1)$$

$$\text{gdzie: } I_S = qS \left(\frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p} \right) \quad - \text{ stała, tzw. prąd nasycenia złącza} \quad (2)$$

U – napięcie polaryzacji złącza, $kT/q=26\text{mV}$ (w 300K) – potencjał termiczny

D_p, D_n – stałe dyfuzji dziur i elektronów, L_n, L_p – drogi dyfuzji elektronów i dziur,

n_p, p_n – koncentracje nośników mniejszościowych, S – powierzchnia przekroju złącza

$k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ – stała Boltzmanna, T – temperatura [K], $q=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ – ładunek elementarny

W przypadku **rzeczywistych złącz p-n (w diodach i tranzystorach)** wartość przepływającego prądu zależy dodatkowo od:

- rezystancji szeregowej - R_s
- zjawisk rekombinacyjno-generacyjnych w obszarze złącza
- zjawisk powierzchniowych

Przy polaryzacji złącza rzeczywistego w kierunku przewodzenia oprócz prądu dyfuzyjnego należy uwzględnić prąd rekombinacji (związany z rekombinacją nośników prądu w obszarze ładunku przestrzennego) oraz – szczególnie przy dużych wartościach prądu – spadek napięcia, na rezystancji półprzewodnika poza obszarem ładunku przestrzennego i na innych elementach konstrukcyjnych diody (kontakt metal-półprzewodnik, doprowadzenia).

Prąd rekombinacji I_{rek} zależy od koncentracji centrów rekombinacji w obszarze ładunku przestrzennego i może być przedstawiony w postaci:

$$I_{rek} = I' \left(\exp \frac{qU}{2kT} - 1 \right) \quad (3)$$

gdzie I' jest analogicznym czynnikiem jak I_S w zależności (1).

Prąd ten dodaje się do prądu dyfuzyjnego złącza p-n (ze wzoru Shockley'a). Wypadkowy prąd złącza w kierunku przewodzenia I_F („F” – ang. „forward”) daje się przedstawić za pomocą wzoru:

$$I_F = I + I_{rek} = I_S \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) + I' \left(\exp \frac{qU}{2kT} - 1 \right) \quad (4)$$

Wzór ten jest podstawą modelu dwu-diodowego złącza p-n, w którym złącze to modelowane jest przez dwie diody połączone równolegle, opisane charakterystykami $I = f(U)$ odpowiednio do składników równania (4).

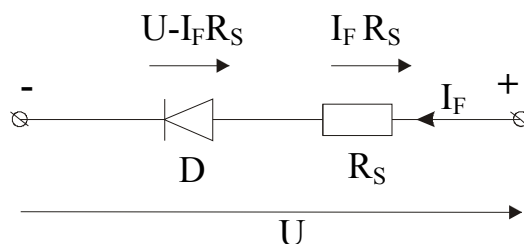
Po przekształceniu równania (4), prąd I_F można obliczyć ze wzoru przybliżonego:

$$I_F = I'_S \left(\exp \frac{qU}{nkT} - 1 \right) \quad (5) \quad \text{ i upraszczając dalej dla } U > 100 \text{ mV: } I_F \cong I'_S \left(\exp \frac{qU}{nkT} \right) \quad (6)$$

Prąd I'_S jest stałą określającą „zastępczy prąd nasycenia”, a wartość współczynnika doskonałości złącza n zależy od udziału składowej dyfuzyjnej i rekombinacyjnej w prądzie I_F płynącym przez złącze. Teoretycznie n powinno się zawierać między 1 (tylko prąd dyfuzji) i 2 (tylko prąd rekombinacji). Współczynnik n w nieznacznym sposób zmienia przebieg ch.I-U.

Analiza efektu rezystancji szeregowej w diodzie rzeczywistej:

Aby uwzględnić spadek napięcia na elementach diody poza obszarem ładunku przestrzennego zwykle wprowadza się pojęcie rezystancji szeregowej. Wiąże się to z założeniem, że ten spadek napięcia ($I_F R_S$) jest proporcjonalny do prądu płynącego przez złącze. Tak więc najprostszy model diody słuszny dla prądu stałego w kierunku przewodzenia wygląda jak na Rys.3.



Rys. 3. Model diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia

Dioda idealna D ma charakterystykę opisaną wzorem 5 lub 6, w którym zamiast napięcia U należy podstawić wartość $(U - I_F R_S)$. Tak więc, wypadkowa charakterystyka diody rzeczywistej może być opisana wzorem:

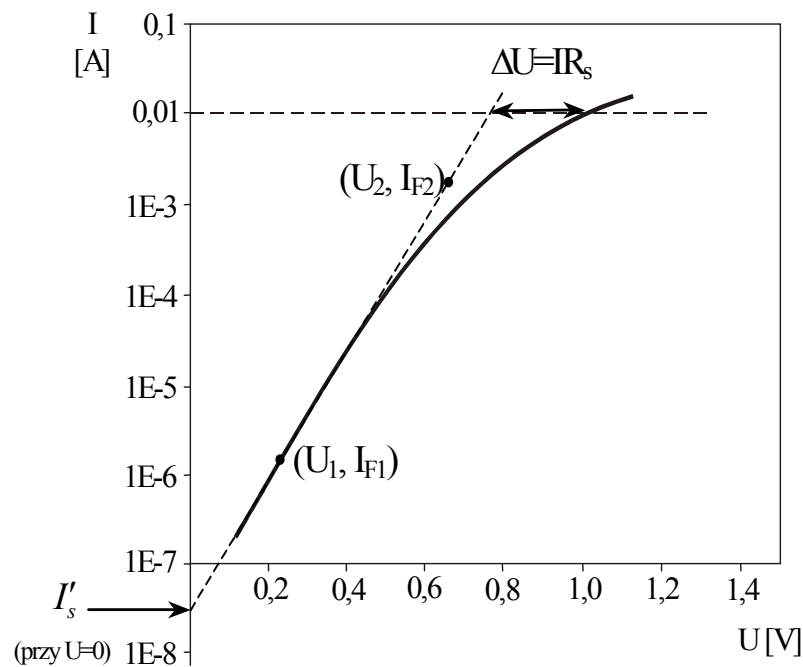
$$I_F = I'_S \left(\exp \frac{q(U - I_F R_S)}{nkT} - 1 \right) \quad (7)$$

lub upraszczając dla większych wartości napięć polaryzacji, $U > 100 \text{ mV}$:

$$I_F = I'_S \left(\exp \frac{q(U - I_F R_S)}{nkT} \right) \quad (8)$$

Jeśli tę ostatnią charakterystykę (8) narysować w układzie współrzędnych, gdzie oś prądu (I_F) ma skalę logarytmiczną, a oś napięcia (U) jest liniowa (układ współrzędnych log-lin), otrzymamy wykres $\log I = f(U)$, jak na rysunku 4.

Charakterystyka diody rzeczywistej, uwzględniająca prąd dyfuzji i rekombinacji jest w tym układzie współrzędnych linią prostą, co wynika z charakteru równania (6). Odstępstwo charakterystyki od liniowości świadczy o istnieniu rezystancji szeregowej R_s . Przecięcie liniowej części charakterystyki z osią prądową (dla $U=0$) pozwala wyznaczyć wartość I'_s .



Rys. 4. Charakterystyka prądowo-napięciowa $I=f(U)$ diody półprzewodnikowej w układzie współrzędnych log-lin przy polaryzacji w kierunku przewodzenia

Z nachylenia prostoliniowej charakterystyki (Rys.4). można wyznaczyć współczynnik doskonałości złącza n . W tym celu korzystamy z układu dwóch równań:

$$I_{F1} = I'_s \left(\exp \frac{qU_1}{nkT} \right) \quad (9)$$

$$I_{F2} = I'_s \left(\exp \frac{qU_2}{nkT} \right)$$

Po zlogarytmowaniu obu równań uzyskamy:

$$\ln I_{F1} = \ln I'_s + \frac{q}{nkT} \cdot U_1 \quad (10)$$

$$\ln I_{F2} = \ln I'_s + \frac{q}{nkT} \cdot U_2$$

Po odjęciu równań (10) stronami:

$$\ln \frac{I_{F2}}{I_{F1}} = \frac{q}{nkT} (U_2 - U_1) \quad (11)$$

W celu łatwiejszego wyznaczenia współczynnika n warto przeliczyć skalę \ln na \log , ponieważ charakterystyka diody będzie narysowana wtedy w układzie $\log I = f(U)$.

Wiadomo, że $(\log a = (\log e) (\ln a) = 0,434 \ln a)$. Zatem $\log I_F = 0,434 \ln I_F$.

Po przekształceniach uzyskamy:

$$\log \frac{I_{F2}}{I_{F1}} = 0,434 \frac{q}{nkT} (U_2 - U_1) \quad \log \frac{I_{F2}}{I_{F1}} = \frac{0,434}{0,026n} (U_2 - U_1) \quad (12)$$

Wstawiamy wartość kT/q równą 0,026V (dla temperatury pokojowej). Odczytując z prostoliniowego odcinka wykresu $\log I = f(U)$ wartości I_{F1} , I_{F2} , (najlepiej różniące się o dekadę, wówczas lewa strona równania równa jest równa 1) i odpowiadające im wartości U_1 i U_2 można ze wzoru (12) wyznaczyć wartość współczynnika n .

Przy polaryzacji zaporowej złącza p-n oprócz prądu I_S wynikającego ze wzoru (1) należy uwzględnić prąd generacji (prąd związany z generacją nośników w obszarze ładunku przestrzennego), prąd upływu oraz ewentualnie zjawisko przebicia.

Rozpatrując wzór (1) lub (5) dla polaryzacji zaporowej zauważymy, że dla napięć $U < -0,1V$ całkowity prąd płynący przez złącze równy jest praktycznie prądowi nasycenia złącza. Jest to unoszenie nośników mniejszościowych w polu elektrycznym złącza. Prąd dyfuzyjny jest zablokowany.

$$I = I_S \left(\exp \frac{U}{0,026n} - 1 \right) \cong -I_S \quad (9)$$

Prąd generacji, I_{gen} zależy od szerokości obszaru ładunku przestrzennego i od koncentracji centrów generacyjno - rekombinacyjnych. W przeciwieństwie do prądu I_S , który nie zależy od polaryzacji, wartość prądu generacji rośnie w miarę zwiększania napięcia na złączu spolaryzowanym w kierunku zaporowym. Dla złącz p-n wykonanych z materiału o średniej i dużej wartości przerwy zabronionej (krzem, arsenek galu) prąd generacji, I_{gen} dominuje i jest nawet o kilka rzędów większy od prądu nasycenia, I_S .

Trzecia składowa prądu w kierunku zaporowym związana jest ze zjawiskiem upływu po powierzchni złącza i po defektach wewnątrz złącza. Ta składowa, I_{leak} („leak” – ang. leakage – upływ) zwykle jest proporcjonalna do przyłożonego napięcia i modelowana jest rezystancją równoległą złącza (rezystancją upływu).

Podsumowując, prąd diody spolaryzowanej zaporowo (ale nie w zakresie przebicia), I_R („R” – ang. „reverse”) składa się z trzech składowych:

$$I_R = I_S + I_{gen} + I_{leak} \quad (10)$$

gdzie: I_S – prąd nasycenia, I_{gen} – prąd generacji, I_{leak} – prąd upływu.

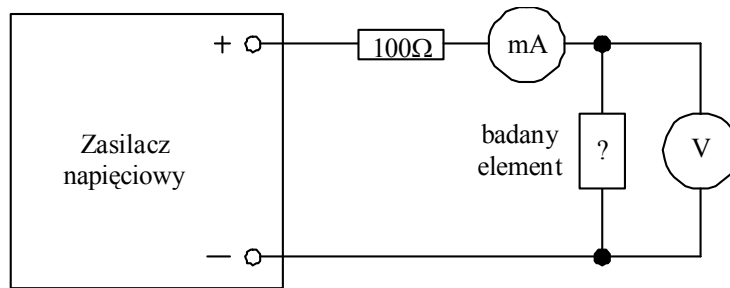
Wartość prądu I_R rośnie więc nieznacznie ze wzrostem polaryzacji diody w kierunku zaporowym.

2 Wykorzystywane metody pomiarowe

2.1 Metoda techniczna pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych

Podstawową metodą wykorzystywaną do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych jest metoda techniczna. Polega ona na wykonaniu szeregu pomiarów prądów i napięć w kolejnych punktach charakterystyki, a następnie naniesieniu wyników tych pomiarów na wykres.

Jako źródło zasilania układu pomiarowego używa się zasilacza laboratoryjnego z regulowanym napięciem wyjściowym, z możliwością ustawienia ograniczenia prądowego. Schemat układu pomiarowego, stosowanego w tej metodzie, przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5 Schemat układu pomiarowego przy pomiarze charakterystyki I-U metodą techniczną

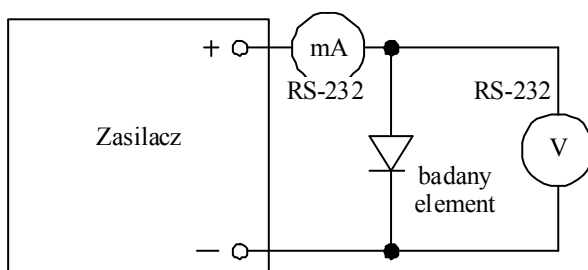
Rezystor 100Ω ułatwia wymuszenie przepływu prądu o wymaganym natężeniu przez element badany, spełnia też rolę ogranicznika prądu w obwodzie co zmniejsza prawdopodobieństwo przypadkowych uszkodzeń wynikających z nieprawidłowo zestawionego układu pomiarowego.

Uwaga: Należy obliczyć dopuszczalny prąd w obwodzie wynikający z nominalnej mocy rezystora, a także z maksymalnego prądu elementu badanego.

Charakterystykę I-U dla zakresów małych prądów (do 10mA) należy mierzyć przy użyciu zasilacza w trybie stabilizacji napięcia (CV-constant voltage), ustawiając wcześniej ograniczenie prądu zasilacza. Układ pomiarowy do pomiaru charakterystyki dla zakresu większych prądów $10\text{mA} \div 0,5I_{F\text{max}}$ modyfikujemy (jak na rys.6) usuwając rezystor szeregowy, na którym występowałby duży spadek napięcia. Charakterystyki I-U należy teraz mierzyć przy użyciu zasilacza pracującego w trybie ograniczenia prądowego (CC- constant current). **Nie należy przekraczać 50% wartości prądu przewodzenia dopuszczalnego dla danej diody, ze względu na możliwość wydzielania dużej mocy w diodzie.**

2.2 Metoda pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych z wykorzystaniem programu „Rejestrator”

Program „Rejestrator” służy do obsługi układu pomiarowego z multimetrami komunikującymi się łączem RS-232 z komputerem. Układ pomiarowy przedstawiony jest na Rys.6.



Rys.6. Schemat układu do pomiaru charakterystyki I-U diody w kierunku przewodzenia za pomocą programu „Rejestrator”.

Zapoznaj się z instrukcją dotyczącą użycia programu „Rejestrator”.

3 Pomiary

Pomiar charakterystyk I-U diod przy polaryzacji w kierunku przewodzenia

Do pomiarów wybrać diody (p-n z półprzewodników: Ge, Si, GaAs oraz krzemową diodę Schottky'ego) wskazane przez prowadzącego. Odczytać z danych katalogowych maksymalny dopuszczalny prąd, I_{Fmax} oraz napięcie charakterystyczne dla kierunku przewodzenia, U_F dla każdej diody. Odczytać także dopuszczalne napięcie w kierunku zaporowym. Dane zestawić w formie tabeli.

Charakterystykę I-U w zakresie małych prądów (do 30mA) mierzyć przy użyciu multimetrów cyfrowych i zasilacza z zastosowaniem programu REJESTRATOR jak przedstawiono na Rys.6 w punkcie 2.2. **Nie przekraczać 70% wartości prądu przewodzenia dopuszczalnego dla danej diody, gdyż powoduje to wzrost temperatury diody i zmianę przebiegu jej charakterystyki.**

Pomiary rozpocząć od diody o spodziewanym największym napięciu charakterystycznym (kolana charakterystyki).

Wydrukować zestaw charakterystyk I-U dla wszystkich mierzonych diod na jednym wykresie (nr 1).

Zmieniść układ wykresu na $\lg(I)-U$ i wydrukować (wykres nr 2) charakterystyki dla diody krzemowej p-n oraz diody Schottky'ego w celu przeprowadzenia dalszych obliczeń ich parametrów.

4 Opracowanie wyników

Na wykresie nr 1 zaznaczyć spadek napięcia na każdej diodzie dla prądu $I_F = 10\text{mA}$. Zestawić wyniki w tabeli 1.

Tabela 1

Dioda, symbol:				
Materiał, złącze:	Ge, p-n	Si, p-n	Si, Schottky	GaAs, p-n	
U_F [V] dla $I_F=10\text{mA}$					
Przerwa zabron. W_g [eV]					

Wytłumaczyć występujące różnice spadków napięć na diodach.

Na wykresie nr 2 (log-lin) wyznaczyć (jak pokazano na rys. 4):

- rezystancję szeregową diody, R_S ,
- wartość prądu nasycenia, I_S'