

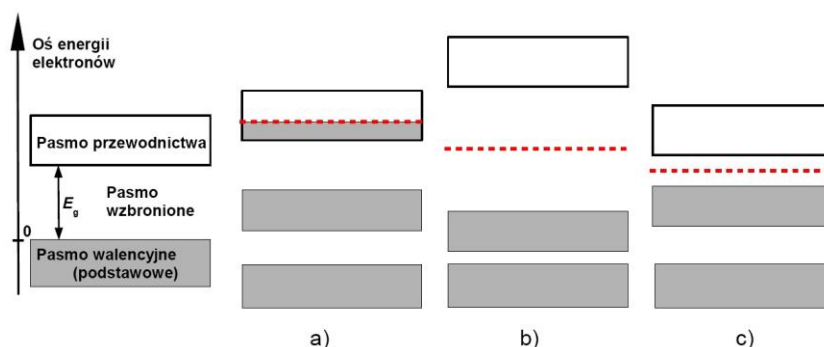
Ćw. 39. Wyznaczanie charakterystyk diod półprzewodnikowych

Wprowadzenie

Substancje w przyrodzie mają dużą rozpiętość wartości oporu właściwego – od najmniejszej $10^{-6} \Omega \cdot m$ w przypadku metali do skrajnie dużej $10^{20} \Omega \cdot m$ dla izolatorów. W tym ogromnym zakresie wartości ρ wyróżnia się przedział $10^{-6} < \rho \leq 10^9$, który tworzą półprzewodniki. Wśród nich duże znaczenie w technice mają m.in. krzem (Si), german (Ge), arsenek galu (GaAs) czy azotek galu (GaN). Z takich materiałów wytwarza się diody, tranzystory, procesory komputerów, źródła światła LED czy lasery półprzewodnikowe.

Liczne techniczne zastosowania półprzewodników wynikają ze specyficznego układu dozwolonych poziomów energetycznych elektronów w tych materiałach. Taki poziom może zająć maksymalnie tylko jeden elektron. W każdej z grup ciał stałych (metale, półprzewodniki, izolatory) dozwolone poziomy są w pewnych przedziałach energii tak liczne i blisko siebie położone, że tworzą continuum stanów dozwolonych: pasmo przewodnictwa i niżej położone pasmo walencyjne (podstawowe), co ilustruje rys. 1. W innych zakresach energii nie ma żadnych dozwolonych poziomów i jest to pasmo wzbronione; jego szerokość jest określana mianem przerwy energetycznej E_g . W temperaturze 0 K obsadzenie poziomów poniżej poziomu Fermiego (rys. 1) jest pełne, a zerowe powyżej. Dlatego każdy poziom w pasmie walencyjnym jest zajęty i elektrony nie mają tu możliwości ruchu. Natomiast elektrony w pasmie przewodnictwa, jeśli się tylko tam znajdują w temperaturze $T > 0$ K, mogą przechodzić bez problemów na wyższe, puste poziomy uzyskując energię po przemieszczeniu w przyłożonym polu elektrycznym – wtedy takie materiały przewodzą prąd.

Poziomy energetyczne elektronów w trzech grupach ciał stałych różnią się szerokością przerwy energetycznej E_g (patrz rys. 1a-c). W metalach $E_g = 0$ eV, więc są one dobrymi przewodnikami. Z kolei w izolatorach jak diament czy kwarc (SiO_2) $E_g \geq$ ok. 5 eV. Natomiast w półprzewodnikach, gdzie $0 \text{ eV} < E_g \leq$ ok. 3 eV, wartość przerwy energetycznej jest na tyle mała (często mniej niż 1 eV), że niektóre elektrony mogą ją pokonać nawet w temperaturze pokojowej dzięki swojej energii kinetycznej ruchu termicznego o średniej wartości $E_k = 3kT/2$.



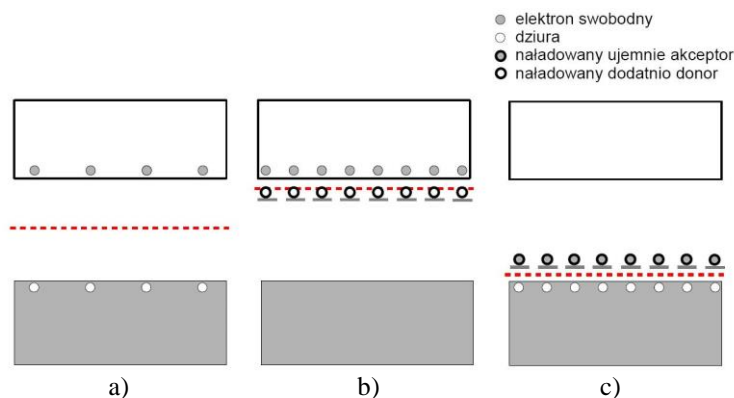
Rys. 1. Pasma energetyczne w ciele stałym: a) metal, b) izolator, c) półprzewodnik. Linia przerywana oznacza położenie poziomu Fermiego. Po lewej stronie uproszczony model struktury pasmowej ze wskazaniem jej podstawowych części.

Wraz z przejściem elektronu z pasma walencyjnego półprzewodnika do pasma przewodnictwa, w pasmie walencyjnym pojawia się tzw. dziura, czyli nieobsadzony poziom zajmowany wcześniej przez ten elektron. Ilustruje to rys. 2 w postaci niewypełnionych kół w pasmie walencyjnym. Dziura ma własności nośnika dodatniego ładunku o wartości $+e$, gdzie e to ładunek elektronu. Porusza się ona w obszarze półprzewodnika pod wpływem pola elektrycznego, gdyż kolejne elektrony zapełniają ten nieobsadzony poziom, a zwalniają dotychczas przez siebie obsadzony. Jej ruch zachodzi w kierunku przeciwnym do ruchu elektronów z pasma przewodnictwa. Tworzenie się ruchliwej dziury zawsze w parze z pojawieniem się swobodnego elektronu w pasmie przewodnictwa jest cechą półprzewodników samoistnych. Ilość nośnika każdego rodzaju na jednostkę objętości materiału, czyli koncentracja elektronów n i koncentracja dziur p jest zależna od temperatury i przerwy energetycznej w postaci:

$$n = p = CT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (1)$$

gdzie C jest stałą zależną od rodzaju półprzewodnika. Dla krzemu wynosi ona $C = 3,9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, natomiast $E_g = 1,14 \text{ eV}$. Większa koncentracja nośników decyduje o wyższej przewodności elektrycznej materiału półprzewodnika, które jest cechą pożądaną w zastosowaniach technicznych. Ze wzoru (1) wynika, że na koncentrację nośników ma wpływ wzrost temperatury T oraz zmniejszenie wartości przerwy energetycznej E_g . Jednak w temperaturze pokojowej półprzewodniki o nieco większej przerwie energetycznej mają niewystarczającą koncentrację nośników.

Koncentrację nośników w danym półprzewodniku możemy zwiększyć w bardziej praktyczny sposób niż przez zwiększenie temperatury. Możemy wprowadzić dodatkowe nośniki do półprzewodnika poprzez wprowadzenie domieszek, czyli atomów pierwiastka różnego od atomów półprzewodnika. Na przykład dodanie fosforu do krzemu w proporcji liczby atomów zaledwie 1 do 5 mln skutkuje niemal tysiącrotnym wzrostem liczby swobodnych elektronów w temperaturze pokojowej. Wynika to z faktu, że prawie każdy atom fosforu uwalnia jeden elektron, z których niewielka część rekombinuje z samoistnymi dziurami, reszta zaś przechodzi do pasma przewodnictwa. Atomy pierwiastków, które po domieszkowaniu nimi półprzewodnika łatwo oddają swój elektron nazywamy donorami. W półprzewodnikach zbudowanych z atomów pierwiastka czterowartościowego jak krzem czy german, taką rolę pełnią pierwiastki pięciowartościowe jak fosfor (P), arsen (As) czy antymon (Sb). Wynika to z faktu, że każdy atom takiego półprzewodnika tworzy wiązania kowalencyjne z czterema sąsiednimi atomami, przy czym w każde wiązanie angażuje się jeden jego elektron walencyjny i jeden elektron atomu sąsiedniego. Krzem i german mają cztery takie elektrony na ostatniej powłóce, więc związane zostają wszystkie. W przypadku atomu domieszki pięciowartościowej, ma on pięć elektronów na ostatniej powłóce i dlatego, po związaniu się z czterema atomami półprzewodnika, jeden elektron pozostaje wolny. Jest na tyle słabo związany z macierzystym atomem, że łatwo uwalnia się już w temperaturze pokojowej i staje się swobodnym elektronem z pasma przewodnictwa. Na przykład w krzemie taki elektron jest związany z atomem fosforu energią wynoszącą tylko $E_d = 0,045 \text{ eV}$.



Rys. 2. Struktura pasmowa półprzewodnika: a) samoistnego, b) typu n, c) typu p. Pokazane jest położenie elektronów swobodnych (symbol ●) i dziur (symbol ○) na poziomach energetycznych oraz poziomu Fermiego (czerwona linia przerywana).

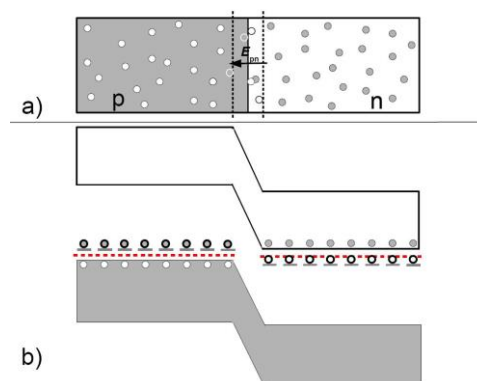
Półprzewodnik może być też domieszkowany atomami takiego pierwiastka, który jest źródłem swobodnych nośników dodatnich w pasmie walencyjnym czyli dziur. W przypadku cztero-wartościowego krzemu i germanu wystarczy wprowadzić do kryształu półprzewodnika atomy pierwiastka trójwartościowego, np. bor, glin, gal lub ind. Mając na ostatniej powłoce trzy elektrony, potrzebują dodatkowego elektronu, aby utworzyć pełne wiązanie z czterema sąsiednimi atomami Si lub Ge. Taki elektron może przejść z górnej części pasma walencyjnego do atomu domieszki (rys. 2c), która go wiąże – stąd jej nazwa akceptor. Energia E_a potrzebna do przyłączenia elektronu do domieszki jest niewielka, np. $E_a = 0,045$ eV dla boru w krzemie, więc większość domieszek jest w stanie wytworzyć dziury już w temperaturze pokojowej.

W każdym półprzewodniku typu n obok sporej koncentracji swobodnych elektronów n , występuje niezerowa, choć znacznie mniejsza, koncentracja dziur p . Mówimy, że elektrony są tu większościowym nośnikiem ładunku, a dziury mniejszościowym. Gdy elektron swobodny i dziura znajdują się blisko siebie, może dojść do rekombinacji, czyli zajęcia poziomu energetycznego dziury przez elektron swobodny z poziomu przewodnictwa. Nie oznacza to jednak, że wszystkie dziury znikną. Zachodzi bowiem stale również proces odwrotny – generacji dziur poprzez przeniesienie elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. W danej temperaturze T ustala się stan równowagi termodynamicznej, w której koncentracja nośników osiąga taką wartość, że ilość przypadków rekombinacji jest równa ilości generacji nowych par elektron-dziura. We wszystkich półprzewodnikach, niezależnie czy są one samoistnymi czy domieszkowanymi typu n lub p, istnieje ścisła zależność między koncentracją nośników swobodnych w postaci:

$$n \cdot p = C^2 T^3 \exp(-E_g / kT), \quad (2)$$

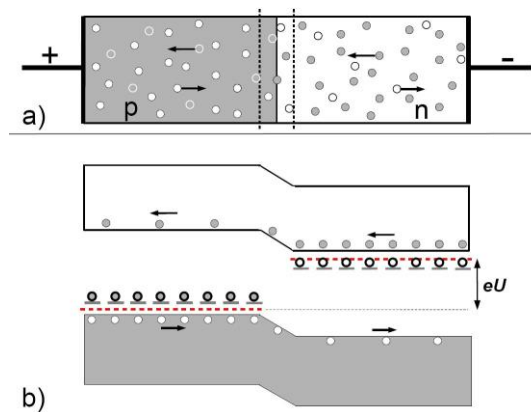
gdzie znaczenie parametrów C i E_g było już podane pod równaniem (1). Równanie (2) mówi więc, że dla danego półprzewodnika stała jest wartość iloczynu koncentracji swobodnych elektronów i dziur $n \cdot p$, a nie ich ilości $n + p$. Oznacza to, że wprowadzenie do półprzewodnika nośnika mniejszościowego może bardzo zmniejszyć jego przewodność, gdyż spowoduje to drastyczne zmniejszenie ilości nośnika większościowego. Taka sytuacja ma miejsce na granicy złącza p-n.

Złącze takie tworzy się przez takie zespolenie dwóch półprzewodników o różnym domieszkowaniu, że przez granicę kontaktu możliwy jest swobodny przepływ nośników prądu. Zachodzi on dzięki zjawisku dyfuzji tych nośników, czyli przemieszczaniu się ich z obszarów o większej koncentracji do obszarów, gdzie jest ich mniej. Na granicy złącza p-n prowadzi to do ruchu dziur w kierunku półprzewodnika n i elektronów swobodnych w kierunku półprzewodnika p (rys. 3). Oznacza to stopniowe ładowanie się ładunkiem dodatnim półprzewodnika n, gdyż traci on ujemnie naładowane elektrony, a zyskuje dodatnie dziury. Z kolei, półprzewodnik p ładuje się ujemnie, gdyż traci dodatnie dziury i przyjmuje elektrony. Taki proces wymiany ładunku na granicy p-n jest szybko zatrzymany przez pole elektryczne o natężeniu E_{pn} , które powstaje na skutek przemieszczenia się ładunku. W efekcie, w pobliżu granicy p-n powstanie obszar przejściowy o maksymalnej grubości $1 \mu\text{m}$, w którym koncentracja elektronów swobodnych i dziur z powodu zjawiska rekombinacji spadnie do tak niskiego poziomu jak w przewodniku samoistnym.



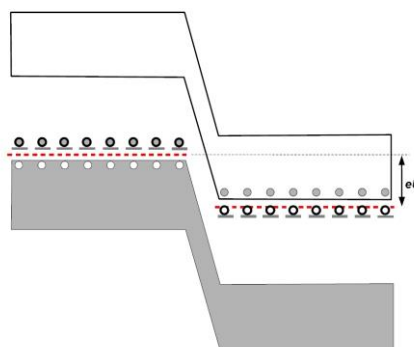
Rys. 3. (a) Rozmieszczenie nośników swobodnych w obrębie złącza p-n. W obszarze przejściowym, ograniczonym liniami przerywanymi, dochodzi do rekombinacji par dziura-elektron i pojawia się pole elektryczne wstrzymujące ruch dyfuzyjny nośników. (b) Przesunięcie poziomów energetycznych w wyniku przemieszczenia się nośników swobodnych.

Podłączenie do złącza p-n napięcia U o takiej polaryzacji, że półprzewodnik typu p będzie miał potencjał wyższy niż typu n (patrz rys. 4a) powoduje istotną zmianę sytuacji nośników. Poziomy energetyczne w półprzewodnikach p i n przesuwają się względem siebie tak, że różnica ich poziomów Fermiego wynosi $e \cdot U$ (rys. 4b). Wskutek tego bariera energetyczna dla nośników w obszarze przejściowym maleje, więc zarówno elektrony jak i dziury stosunkowo łatwo i w krótkim czasie są w stanie ją pokonać. Przebywając krótko w obszarze przejściowym, zmniejszają znacznie prawdopodobieństwo rekombinacji par elektron-dziura. Dlatego też te nośniki swobodne pojawiają się w większych ilościach po drugiej stronie obszaru przejściowego – dziury w obszarze półprzewodnika typu n a elektrony swobodne w obszarze typu p. Działa tam na nie zewnętrzne pole elektryczne powodując ich szybkie przemieszczanie się: dziur do kontaktu „-” i elektronów do „+”. Przez złącze płynie więc prąd.



Rys. 4. a) Polaryzacja złącza p-n w kierunku przewodzenia powoduje uporządkowany ruch nośników. b) Zmniejszenie różnicy energii pasm czyli bariery energetycznej w półprzewodnikach p i n tworzących złącze w wyniku przyłożenia zewnętrznego napięcia U .

Podłączenie do złącza p-n wyższego potencjału do półprzewodnika typu n i niższego do typu p powoduje, że przepływ prądu przez złącze praktycznie ustaje. Wynika to z faktu obniżenia się poziomów energetycznych w obrębie półprzewodnika typu n i podwyższenia się takich poziomów dla typu p. W efekcie bariera energetyczna wzrasta o dodatkową wartość $e \cdot U$ (porównaj rys. 3b i 5) i maleje liczba elektronów swobodnych o takiej energii termicznej, by mogły pokonać barierę na drodze do obszaru p oraz dziur, które przeszłyby do obszaru n. W takiej sytuacji, prąd nośników mniejszościowych – dziur w obszarze n i elektronów w obszarze p – zaczyna przeważać, gdyż dla nich przebycie obszaru przejściowego wiąże się z zyskiem energetycznym. Przy odpowiednio dużym napięciu zaporowym U mamy do czynienia niemal wyłącznie z prądem ładunków mniejszościowych, który osiąga stałą wartość I_n nazywaną prądem nasycenia.

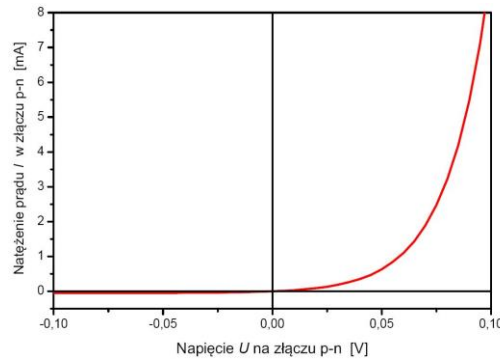


Rys. 5. Polaryzacja złącza p-n w kierunku zaporowym.

Wartość natężenia prądu płynącego przez diodę półprzewodnikową po podłączeniu do niej napięcia spolaryzowanego w kierunku przewodzenia ($U > 0$) jak i w kierunku zaporowym ($U < 0$) dobrze opisuje wzór Shockley'a:

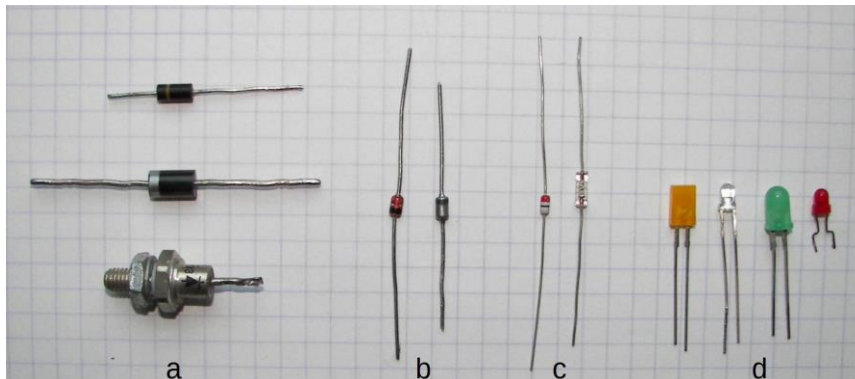
$$I = I_n \cdot [\exp(eU / kT) - 1] \quad (3)$$

Widać z niego, że dla dodatnich wartości napięcia U , natężenie prądu I rośnie eksponencjalnie począwszy od wartości zerowej dla $U = 0$. Natomiast dla ujemnych wartości U , wartość bezwzględna prądu $|I|$ początkowo rośnie, ale szybko stabilizuje się na wartości I_n . Takie cechy charakterystyki prądowo-napięciowej diody, czyli zależności $I(U)$, widać dobrze na rys. 6. Warto porównać ilościowo natężenie prądu tej diody: $I = I_n = 0,1$ mA dla $U = -0,1$ V (kierunek zaporowy) i $I = 18,5$ mA dla $U = 0,1$ V (kierunek przewodzenia). Natężenie prądu jest więc w tym przypadku 185 razy większe dla dodatniej polaryzacji złącza p-n. W przypadku innych diod półprzewodnikowych taki stosunek prądów może osiągać wielkości znacznie większe, nawet rzędu $10^3 - 10^4$.



Rys. 6. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody uzyskana ze wzoru (3).

Ponieważ każde złącze p-n przepuszcza prąd praktycznie w jednym kierunku, jest ono nazywane też złączem prostującym. Ta cecha stanowi podstawowy powód licznych zastosowań diod półprzewodnikowych w technice jako niezbędnego elementu układu prostowniczego. Inne cechy użyteczne różnych typów diod to zdolność do pracy z prądem zmiennym o dużej częstotliwości (diody sygnałowe) czy możliwość emisji światła w wyniku zachodzenia procesów rekombinacji (diody LED). Wygląd niektórych diod półprzewodnikowych dostępnych w handlu pokazuje rys. 7.



Rys. 7. Niektóre typy popularnych diod półprzewodnikowych: a) prostownicze, b) stabilizacyjne (diody Zenera), c) detekcyjne, d) świecące (LED).

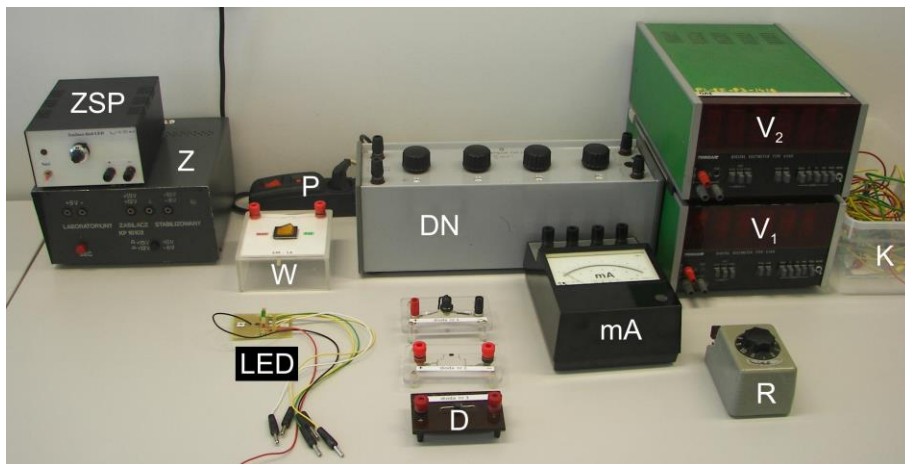
Metoda pomiaru

W ćwiczeniu wyznacza się charakterystykę prądowo-napięciową diody wykonując pomiary natężenia prądu dla 10-15 różnych wartości U : a) w kierunku przewodzenia i zaporowym diody prostowniczey, b) w kierunku przewodzenia diody LED. Należy przy tym uważać, aby nie przekroczyć dopuszczalnego przedziału napięć lub natężenia prądu dla danej diody, gdyż mogłoby to spowodować jej uszkodzenie. Jak widać na rys. 6, w żadnym przedziale wartości napięcia U zależność $I(U)$ diody półprzewodnikowej nie jest funkcją liniową. Dlatego dioda półprzewodnikowa klasyfikowana jest jako nieliniowy element układu. Oznacza to, że jej opór elektryczny

$$R_d = \frac{U}{I} \quad (4)$$

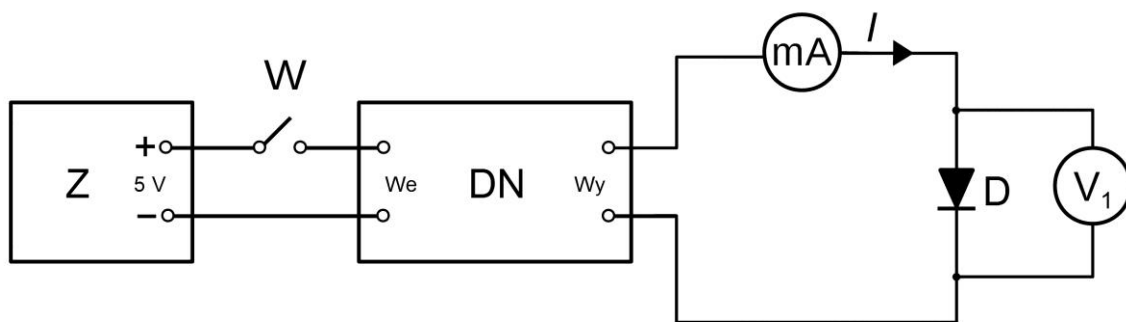
jest wartością zmienną, tzn. $R_d = f(U)$. Ta cecha różni ją od np. oporników omowych, których wartość oporu jest stała.

Wykonanie ćwiczenia



Rys. 8. Zestaw przyrządów potrzebnych do sporządzenia charakterystyki diody półprzewodnikowej: Z – zasilacz stabilizowanego napięcia, ZSP – zasilacz stabilizowanego prądu, W – wyłącznik, DN – dzielnik napięcia, V₁ i V₂ – woltomierze cyfrowe, mA – miliamperomierz, R – opornik dekadowy, D – diody prostownicze, LED – diody świecące, K – kable połączeniowe, P – przedłużacz.

a) Polaryzacja diody w kierunku przewodzenia



Rys. 9. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia charakterystyki diody półprzewodnikowej w kierunku przewodzenia.

1. Korzystając z przyrządów pokazanych na rys. 8 zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem z rys. 9. W zasilaczu wykorzystujemy wyjście napięcia $U_z = 5 \text{ V}$. Numer badanej diody podaje prowadzący zajęcia. Dopuszczalne napięcie pracy diod badanych w kierunku przewodzenia są następujące:

nr 1 $U_{\max} = 0,25 \text{ V}$,

nr 2 $U_{\max} = 0,35 \text{ V}$,

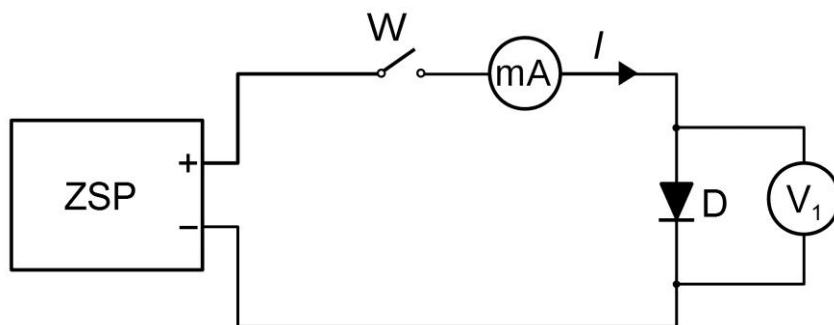
nr 3 $U_{\max} = 0,75 \text{ V}$.

2. Po sprawdzeniu obwodu przez prowadzącego, rozpocząć pomiary włączając przedłużacz P i zasilacz Z przyciskiem „SIEĆ” oraz zamykając wyłącznik W (pozycja ZAŁ). Następnie dobieramy takie ustawienie pokręteł dekad dzielnika napięcia, aby uzyskać pożądaną wartość napięcia na jego wyjściu (działanie dzielnika napięcia opisane jest w załączniku).
3. Dla wybranej wartości napięcia polaryzacji U , dokonać pomiaru natężenia prądu I płynącego przez miliamperomierz. Zalecanie jest utrzymanie stałej zmiany wartości napięcia w celu uzyskania od 10 do 15 równomiernie rozłożonych punktów na wykresie w przedziale $(0 \text{ V}; U_{\max})$. Zapisać wyniki pomiarów do tabeli 1.

Uwaga: w przypadku diody nr 3 zaleca się rozpocząć pomiary dopiero od napięcia 0,5 V, a nie od 0 V, z powodu znikomej wartości natężenia prądu dla napięcia $U < 0,5 \text{ V}$.

- Opór diody R_d obliczyć ze wzoru (4). Sporządzić wykres charakterystyki prądowo-napięciowej diody $I = f(U)$ oraz zależności oporu diody od napięcia $R_d = g(U)$ dla wszystkich punktów pomiarowych.
- W dyskusji niepewności pomiaru R_d zastosować metodę różniczkową lub, najprościej, metodę logarymiczną dla wzoru (4) przyjmując, że R_d jest funkcją dwóch wielkości obarczonych niepewnością pomiarową, tj. U oraz I . Niepewność maksymalną ΔI dla miliamperomierza przyjąć jako sumę niepewności $\Delta I'$ wynikającej z klasy miernika 0,5 i niepewności odczytu $\Delta I''$ ze skali miernika. Dane potrzebne do obliczenia niepewności maksymalnej pomiaru ΔU podane są w Instrukcji Technicznej w załączniku.

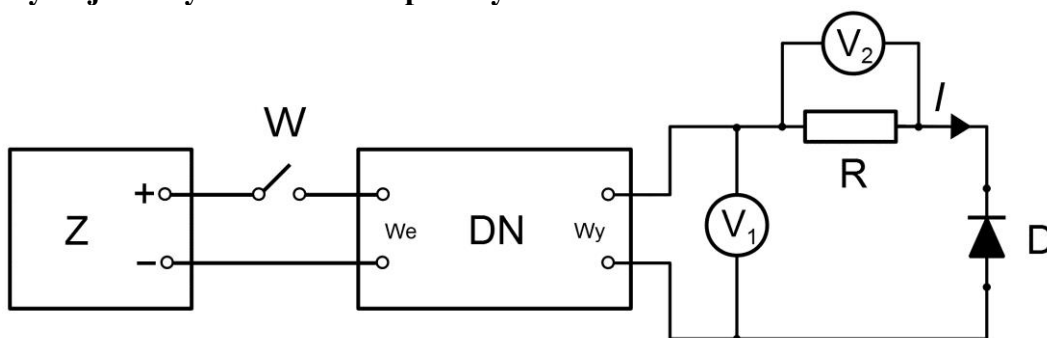
Pomiary diody LED w kierunku przewodzenia



Rys. 10. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia charakterystyki diody LED w kierunku przewodzenia.

- Odpowiednie przyrządy z rys. 8 połączyć za pomocą kabli połączeniowych zgodnie ze schematem z rys. 10. Numer badanej diody LED podaje prowadzący zajęcia.
- Po sprawdzeniu obwodu przez prowadzącego, włączyć przedłużacz P, zasilacz stabilizowanego prądu ZSP oraz woltomierz V_1 . Na zasilaczu ZSP pokrętko potencjometru wieloobrotowego, służące do regulacji natężenia prądu, ustawić w skrajnym lewym położeniu. **Uwaga:** Niedopuszczalne jest użycie zasilacza Z do zasilania diod LED ze względu na niebezpieczeństwo ich uszkodzenia przez przepływ zbyt dużego prądu.
- Rozpocząć pomiary przełączając wyłącznik W w pozycję ZAŁ. Zmieniając położenie pokrętki regulacji natężenia prądu, wybrać od 10 do 15 możliwie równomiernie oddalonych od siebie wartości natężenia prądu I płynącego przez miliamperomierz i odczytać na woltomierzu odpowiadające im napięcia polaryzacji U diody. Zapisać wyniki pomiarów do tabeli 1. **Uwaga:** 1) Dopuszczalne natężenie prądu przepływającego przez każdą z badanych diod LED wynosi 20 mA.
- Opracować wyniki pomiarów zgodnie z zaleceniami z punktów 4 i 5 powyżej.

b) Polaryzacja diody w kierunku zaporowym



Rys. 11. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia charakterystyki diody półprzewodnikowej w kierunku zaporowym.

1. Zbudować układ pomiarowy zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 11. Na oporniku dekadowym R ustawić wartość $R = 1 \text{ k}\Omega$ dla diody nr 1 i 2, a $10 \text{ k}\Omega$ dla diody nr 3. Podłączony równolegle do niego woltomierz cyfrowy V_2 pełni rolę mikroamperomierza poprzez pomiar spadku napięcia U_2 na tym oporze. W celu określenia wartości natężenia prądu I płynącego przez ten opór należy dokonać przeliczenia:

$$I = U_2 / R \quad (5)$$

Przyjmujemy, że taki właśnie prąd płynie przez badaną diodę. To założenie jest słuszne gdy opór wewnętrzny woltomierza V_2 jest dużo większy od R czyli $R \ll R_{V2}$, co jest spełnione w tym doświadczeniu.

2. Po sprawdzeniu obwodu przez prowadzącego, rozpocząć pomiary włączając zasilacz Z przyciskiem „SIEĆ”, zamykając klucz W (pozycja ZAL) oraz dobierając takie ustawienie pokręteł dekad dzielnika napięcia, żeby uzyskać pożądaną wartość napięcia na jego wyjściu. Dla poszczególnych diod napięcie polaryzacji U w kierunku zaporowym nie może przekroczyć wartości:

$$\text{nr 1} \quad U_{\max} = 30,0 \text{ V},$$

$$\text{nr 2} \quad U_{\max} = 0,8 \text{ V},$$

$$\text{nr 3} \quad U_{\max} = 30,0 \text{ V}.$$

3. Dla wybranej wartości napięcia U_1 wskazywanej przez woltomierz V_1 , dokonać odczytu napięcia U_2 . Należy przyjąć, że napięcie polaryzacji diody $U = U_1$ (słuszne gdy $R \ll R_d$, gdzie R_d jest oporem diody w kierunku zaporowym). Zalecanie jest utrzymanie w przybliżeniu jednakowej wartości zmiany napięcia U w celu uzyskania od 10 do 15 równomiernie rozłożonych punktów na wykresie. Zapisać wyniki pomiarów do tabeli 2.
4. Wartość oporu diody R_d obliczyć z zależności:

$$R_d = \frac{UR}{U_2}, \quad (6)$$

który wynika z połączenia wzorów 4 i 5. Sporządzić wykres charakterystyki prądowo-napięciowej diody $I = f(U)$ oraz zależności oporu diody od napięcia $R_d = g(U)$ dla wszystkich punktów pomiarowych.

5. W dyskusji niepewności pomiarowej R_d zastosować metodę różniczkową lub, najprościej, metodę logarymiczną dla wzoru (6) przyjmując, że R_d jest funkcją trzech wielkości obarczonych niepewnością pomiarową, tj. U , U_2 oraz R . Dane potrzebne do obliczenia ich niepewności maksymalnych ΔU , ΔU_2 i ΔR dla przyrządów aktualnie używanych do wykonania ćwiczenia są podane w Instrukcji Technicznej w załączniku.

Tabele pomiarowe

Tab. 1. Dane pomiarowe diody nr spolaryzowanej w kierunku przewodzenia.

Nr diody	Nr pomiaru	U [V]	I [mA]	R_d [Ω]

Tab. 2. Dane pomiarowe diody nr spolaryzowanej w kierunku zaporowym.

Nr diody	Nr pomiaru	U [V]	U_2 [mV]	I [μ A]	R_d [Ω]

Zagadnienia do kolokwium:

1. Poziomy energetyczne elektronów w półprzewodniku - model pasmowy i jego parametry.
2. Półprzewodniki samoistne i ich nośniki swobodne prądu.
3. Sposób wytwarzania i własności półprzewodników typu n i p .
4. Położenie pasm energetycznych i przepływ ładunków swobodnych przez złącze p - n spolaryzowane w kierunku: a) przewodzenia, b) zaporowym.
5. Rodzaje diod półprzewodnikowych i typowa charakterystyka przepływu prądu przez diodę.
6. Cel ćwiczenia i schemat układu pomiarowego.

Literatura:

1. S. J. Ling, J. Sanny, W. Moebs, *Fizyka dla szkół wyższych*, tom 3, rozdz. 9 (OpenStax Poland, 2018). Darmowy dostęp: <https://openstax.org/details/books/fizyka-dla-szkół-wyższych-tom-3>.
2. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy fizyki*, tom 3 (Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2003).
3. C. Kittel, *Wstęp do fizyki ciała stałego* (PWN, Warszawa, 1976).
4. M. N. Rudden, J. Wilson, *Elementy fizyki ciała stałego* (PWN, Warszawa, 1975).
5. H. Szydłowski, *Pracownia fizyczna*, (Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1997).

Opiekun ćwiczenia: dr hab. Wiesław Polak

Załączniki: Instrukcja techniczna

INSTRUKCJA TECHNICZNA DO ĆW. 10

Woltomierz V_1 – woltomierz cyfrowy V 540

- Podłączyć przewody do zacisków HI i LO oraz wcisnąć klawisze AUTO i FILTER,
- Wybrać dopuszczalną wartość mierzonego napięcia, tj. zakres pracy, wciskając jeden z klawiszy od 100 mV do 100 V oznaczonych napisem RANGE,
- Niepewność pomiaru napięcia oszacować mnożąc klasę miernika 0,05% przez wartość zmierzoną i dodając niepewność odczytu napięcia odpowiadającą jedynce na ostatnim miejscu wyświetlacza.

Woltomierz V_2 – woltomierz cyfrowy V 540, czyli identyczny jak woltomierz V_1 .

Opornik dekadowy R

- Niepewność wartości oporu R oszacować mnożąc klasę przyrządu 0,1% przez nastawioną wartość R .

Dekadowy dzielnik napięcia DN – typ DN4a-18

- Przewody z napięciem wejściowym U_{we} z zasilacza podłączamy do zacisków oznaczonych na obudowie jako U_1 . Napięcie wyjściowe U_{wy} uzyskujemy na zaciskach (górnym i dolnym) wskazanych przez linię z oznaczeniem U_2 .
- Znak napięcia na wyjściu (+ lub –) jest zgodny z tym jaki jest na wejściu, tzn. taki sam znak jest na górnych zaciskach dzielnika napięcia.
- Ustawienie pokręteł czterech dekad dzielnika napięcia, odczytywane w postaci liczby czterocyfrowej N w okienkach pod pokrętłami, powoduje zmniejszenie napięcia na wyjściu do wartości:

$$U_{wy} = \frac{N}{10000} U_{we}.$$