

Charakterystyki diody półprzewodnikowej

Wymagania do ćwiczenia:

1. Rodzaje półprzewodników i ich właściwości.
2. Model pasmowy półprzewodników, energia Fermiego.
3. Przewodnictwo samoistne i domieszkowe półprzewodników.
4. Działanie złącza p-n.

Literatura:

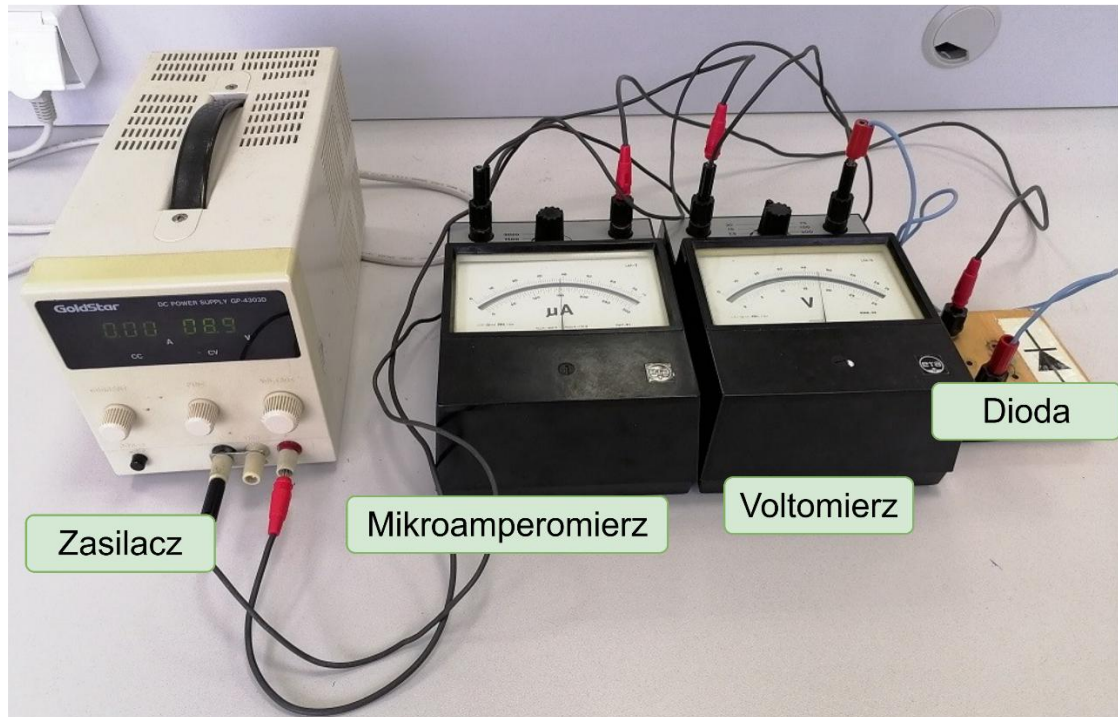
1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker - Podstawy fizyki, t.5, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003, str. 114 – 125.
2. W. Sawieliew, Wykłady z fizyki, t.3, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1994, str. 234 - 243, 263 – 267.
3. OpenStax, Fizyka dla szkół wyższych. Tom 3, Rozdział 9.7: [Przyrządy półprzewodnikowe](#).

Przykładowe pytania:

1. Jakie są rodzaje półprzewodników?
2. Opisz model pasmowy półprzewodników?
3. Co to jest energia Fermiego?
4. Jakie nośniki większościowe znajdują się w półprzewodniku typu n, a jakie w półprzewodniku typu p?
5. Dlaczego w stanie równowagi poziom Fermiego jest stały w całym złączu p-n?
6. Na czym polega rekombinacja nośników i jakie ma znaczenie w diodzie LED?
7. Co się dzieje ze złączem p-n po przyłożeniu napięcia w kierunku zaporowym?
8. Jakie prądy występują w stanie równowagi w złączu p-n i dlaczego się znoszą?
9. Gdzie stosuje się diody?
10. Kiedy należy zastosować układ poprawnie mierzonego prądu a kiedy napięcia?

Przyrządy pomiarowe:

1. Dioda
2. Zasilacz
3. Woltomierz, miliamperomierz , mikroamperomierz



WPROWADZENIE DO TEMATYKI ĆWICZENIA



Wstęp

Przewodnictwo elektryczne materiałów zależy od kilku kluczowych czynników, takich jak struktura pasm energetycznych, temperatura, domieszki, struktura krystaliczna oraz obecność defektów. Pasma energetyczne to dozwolone zakresy energii elektronów w materiale, które odgrywają istotną rolę w określaniu jego właściwości elektrycznych.

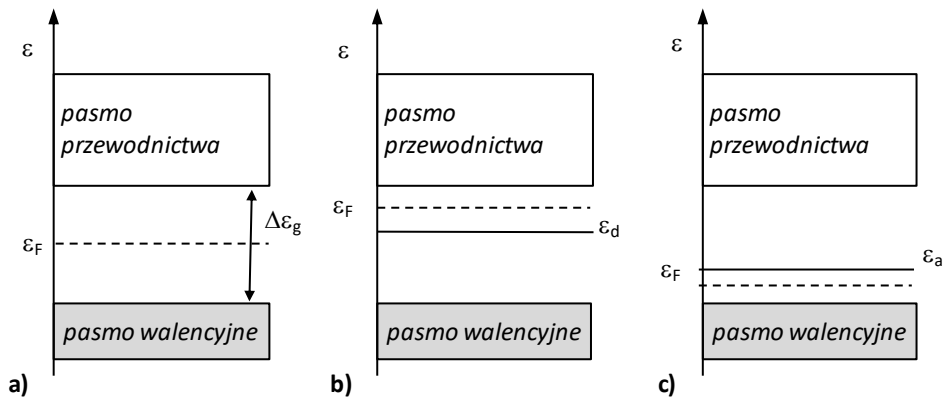
W kontekście fizyki ciała stałego, pasma energetyczne dzielą się na dwa główne typy: pasmo walencyjne oraz pasmo przewodnictwa. Pasma walencyjne zawiera elektrony związane z atomami, które nie uczestniczą w przewodzeniu prądu, natomiast pasmo przewodnictwa składa się z wolnych elektronów, które mogą swobodnie poruszać się i przewodzić prąd.

Między pasmami energetycznymi występuje przerwa energetyczna, określająca zakres energii, jakiej elektrony nie mogą posiadać. Szerokość tej przerwy ma kluczowe znaczenie dla przewodnictwa materiału: mała przerwa energetyczna wskazuje na dobry przewodnik, niewielka przerwa sugeruje półprzewodnik, natomiast duża przerwa oznacza, że materiał jest izolatorem i nie przewodzi prądu. To właśnie struktura tych pasm decyduje o tym, czy dany materiał jest przewodnikiem, izolatorem, czy półprzewodnikiem.

Wyróżniamy trzy rodzaje półprzewodników: półprzewodnik samoistny oraz półprzewodniki typu n i p. Schemat pasm energetycznych w tych półprzewodnikach przedstawiono na Rys. 1.

W półprzewodniku typu n dodaje się domieszki donorowe, co prowadzi do powstania poziomu donorowego tuż pod pasmem przewodnictwa. Elektrony łatwo przechodzą do pasma przewodnictwa, co sprawia, że dominuje przewodnictwo elektronowe.

Półprzewodnik typu p powstaje w wyniku domieszkowania akceptorami, co skutkuje utworzeniem poziomu akceptorowego tuż nad pasmem walencyjnym. Elektrony z pasma walencyjnego „przeskakują” do poziomu akceptorowego, pozostawiając w paśmie walencyjnym tzw. dziury. W tym przypadku mamy do czynienia z przewodnictwem dziurowym.

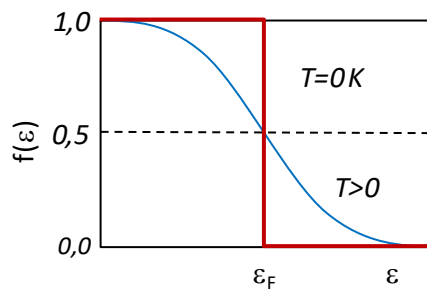


Rys. 1 Schematy pasm energetycznych półprzewodników: a) samoistny, b) typu n, c) typu p.

Elektrony są fermionami, tzn. cząstkami o spinie połówkowym. W celu określenia prawdopodobieństwa obsadzenia stanu o energii ε w temperaturze T należy zastosować funkcję rozkładu Fermiego-Diraca.:

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - \mu}{k_B T}\right)} \quad (1)$$

gdzie: k_B - stała Boltzmanna, μ - potencjał chemiczny.



Rys. 2 Funkcja rozkładu Fermiego-Diraca

Zależność $f(\varepsilon)$ dla ustalonej temperatury w funkcji ε przedstawiono na Rys. 2. Zauważmy, że jeśli $\varepsilon \approx \mu$ to

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{1 + e^0} = \frac{1}{2} \quad (2)$$

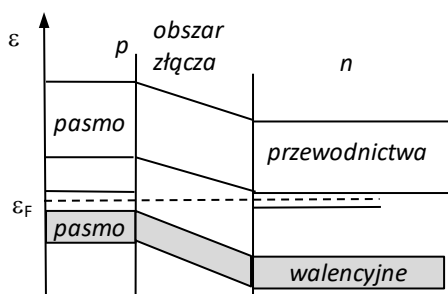
Energia poziomu Fermiego ε_F dla danego materiału jest energią stanu kwantowego, który jest obsadzony przez elektron z prawdopodobieństwem 0,5.

W temperaturze $T = 0$ K prawdopodobieństwo obsadzenia stanów o energii $\varepsilon < \varepsilon_F$ jest równe jedności, dla $\varepsilon > \varepsilon_F$ – jest równe zero. Poziom Fermiego oddziela stany całkowicie zajęte od stanów całkowicie pustych. W półprzewodniku samoistnym poziom Fermiego leży w połowie pasma wzbronionego. Poziom Fermiego w półprzewodnik typu n leży w górnej połowie pasma wzbronionego, w półprzewodnikach typu p – w dolnej połowie pasma wzbronionego co przedstawiono na Rys. 1 Wraz ze wzrostem temperatury poziom Fermiego w obu typach półprzewodników przesuwają się do środka pasma wzbronionego.



Złącze p-n

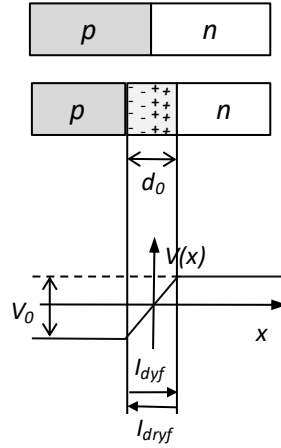
Obszar graniczny rozdzielający obszary o przewodnictwie dziurowym i elektronowym nazywamy złączem dziurowo-elektronowym lub złączem *p-n*. Złącze *p-n* wytwarza się podczas hodowania kryształu poprzez wprowadzenie domieszek, drogą dyfuzji termicznej lub poprzez wstrzykiwanie jonów domieszek do sieci krystalicznej. Na granicy półprzewodników o różnym typie przewodnictwa następuje dyfuzja nośników ładunku elektrycznego. Elektrony i dziury dyfundują przez powierzchnię rozgraniczającą dążąc do wyrównania koncentracji.



Rys. 3. Schemat pasm energetycznych w złączu p-n.

Elektrony z półprzewodnika typu *n* dyfundują do półprzewodnika typu *p*, gdzie koncentracja elektronów jest mniejsza. Powstają wówczas w monokryształe o przewodnictwie elektronowym, w pobliżu granicy różnych półprzewodników, niezobojętnione jony donorowe. W monokryształe typu *p* mamy niezobojętnione ujemne jony domieszek akceptorowych. Dyfuzja dziur następuje w kierunku przeciwnym i zwiększa niezobojętnione ładunki na granicy półprzewodników. Taki ruch elektronów i dziur tworzy **prąd dyfuzji** o natężeniu I_{dyf} . Dodatkowo naładowany obszar półprzewodnika o przewodnictwie elektronowym posiada wyższy potencjał od ujemnie naładowanego półprzewodnika typu *p*. Powstaje obszar ładunku przestrzennego o szerokości d_0 i związana z nim kontaktowa różnica potencjałów V_0 .

Pole to ma taki kierunek, że przeciwdziała dyfuzji większościowych ładunków przez złącze – zarówno elektronów jak i dziur. W obszarze o przewodnictwie typu *n* oprócz nośników większościowych, którymi są elektrony pochodzące od domieszek donorowych, znajdują się również nośniki mniejszościowe – dziury. Również w obszarze półprzewodnika typu *p* znajduje się pewna ilość nośników mniejszościowych – elektronów. Różnica potencjałów V_0 , która stanowi barierę dla nośników większościowych „wciąga” nośniki mniejszościowe do obszaru złącza. Przepływ nośników mniejszościowych przez płaszczyznę złącza prowadzi do powstania **prądu unoszenia** (dryfu) o natężeniu I_{dryf} .



Rys. 4. Model potencjału i prądów w obszarze złącza p-n.

Przez złącze przepływają więc prądy. Pierwszy, związany z dyfuzją nośników większościowych, zwany prądem dyfuzyjnym; drugi, związany z dryfem nośników mniejszościowych, nazywamy prądem dryfu. Postępując się modelem pasmowym półprzewodnika można obliczyć natężenie prądu całkowitego płynącego przez złącze. Natężenie prądu dyfuzyjnego

$$I_{dyf} = A \exp\left(\frac{-\varepsilon - eV_0}{k_B T}\right). \quad (3)$$

W warunkach równowagi przy braku zewnętrznego pola, $E_{zew} = 0$, suma tych prądów jest równa zero, więc $|I_{dyf}| = |I_{dryf}|$. Natężenie prądu dryfu:

$$I_{dryf} = -A \exp\left(\frac{-\varepsilon - eV_0}{k_B T}\right). \quad (4)$$

Przyłożenie zewnętrznej różnicy potencjałów U do złącza powoduje zakłócenie tego stanu równowagi – przede wszystkim zmienia się wysokość bariery. Zmiana wysokości bariery praktycznie nie wpływa na prąd unoszenia, natomiast istotnie zmienia prąd dyfuzyjny:

$$I_{dyf} = A \exp\left(\frac{-\varepsilon - eV_0 - eU}{k_B T}\right) = I_{dryf} \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right), \quad (5)$$

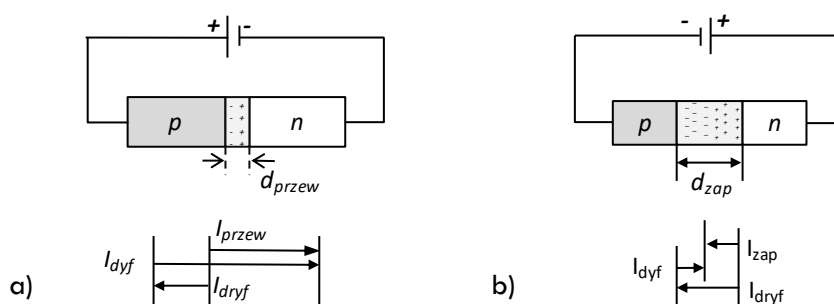
gdzie przyjęto dodatni znak U dla takiego kierunku, w którym następuje obniżenie bariery. Całkowity prąd I płynący przez złącze:

$$I = I_{dyf} + I_{dryf} = I_{dryf} \left[\exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right]. \quad (6)$$



Polaryzacja złącza p-n

Jeśli do złącza p-n przyłożymy napięcie zewnętrzne U , tak że elektroda dodatnia źródła połączona jest z obszarem p złącza (rys. 5a), to obszar typu p będzie miał wyższy potencjał niż przed podłączeniem do źródła prądu, obszar typu n będzie bardziej ujemny. Spowoduje to obniżenie bariery potencjału – więcej nośników większościowych może pokonać tę barierę, natężenie prądu dyfuzyjnego I_{dyf} znacznie się zwiększy.



Rys. 5. Polaryzacja złącza p-n w kierunku: a) przewodzenia, b) zaporowym.

Nie wpłynie to jednak na natężenie prądu nośników mniejszościowych. Równowaga prądów unoszenia i dyfuzji istniejąca w złączu bez zewnętrznej polaryzacji załamuje się i w obwodzie pojawia się duży prąd przewodzenia I_{przew} . Złącze zostało spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Efektem takiej polaryzacji jest również zmniejszenie szerokości obszaru złącza z wartości d_0 do wartości d_{przew} . Zmniejszenie bariery potencjału zmniejsza wartość ładunku przestrzennego.

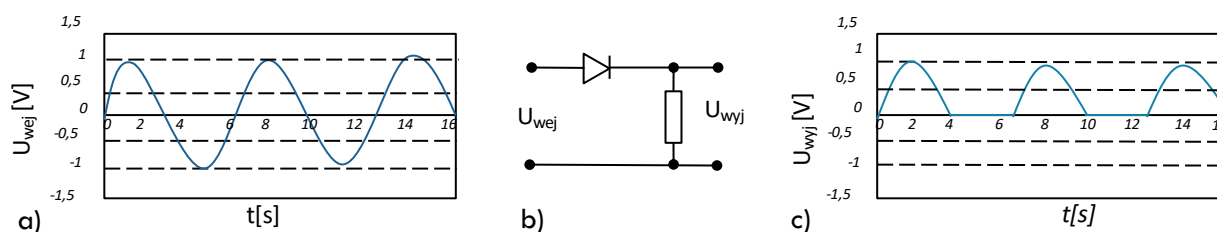
Jeśli ujemną elektrodę połączymy z obszarem typu p (rys. 5b), wówczas złącze p-n zostanie spolaryzowane w kierunku zaporowym. Teraz przyłożona różnica potencjałów powoduje wzrost kontaktowej różnicy potencjałów. W skutek tego natężenie prądu dyfuzji I_{dyf} znacznie się zmniejszy, prąd dryfu pozostanie niezmienny. Wypadkowe natężenie prądu zaporowego będzie stosunkowo małe. Ponieważ wartość ładunku przestrzennego zwiększy się, to zwiększy się również szerokość obszaru złącza do wartości d_{zap} .



Zastosowanie złącza p-n

Złącze *p-n* (dioda półprzewodnikowa) jest najprostszym elementem półprzewodnikowym. Znajduje szerokie zastosowanie w układach elektronicznych.

Najczęściej diody stosowane są w układach zasilających jako elementy prostujące – sinusoidalne napięcie wejściowe jest przekształcane w dodatnie napięcie pulsujące. Złącze działa jak przełącznik, który dla dodatniej wartości napięcia wejściowego jest otwarty, natomiast dla ujemnej – zamknięty. Na rys. 6 przedstawiono schemat układu prostującego oraz zależność napięcia wejściowego i wyjściowego od czasu.



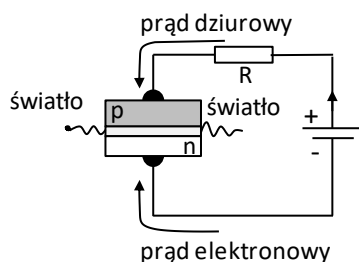
Rys. 6) Przedstawia: a) przebieg napięcia wejściowego, b) schemat układu, c) przebieg napięcia wyjściowego.

Złącze *p-n* może również działać jako dioda świecąca LED (Light Emitting Diode). Podczas rekombinacji elektronu z pasma przewodnictwa z dziurą z pasma walencyjnego uwalniana jest energia równa szerokości pasma wzbronionego. Energia ta może zostać przekazana drganiom termicznych sieci krystalicznej (np. w germanie i krzemie) lub zostać wyemitowana w postaci fotonu (np. w arsenku galu GaAs) o energii $h\nu$ i długości fali:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{\Delta\varepsilon_g} \quad (7)$$

W celu zapewnienia odpowiedniego natężenia światła (ilości fotonów) należy używać materiałów o dużej liczbie elektronów w paśmie przewodnictwa i dziur w paśmie walencyjnym. Taki efekt uzyskuje się przez polaryzację w kierunku przewodzenia złącza *p-n* silnie domieszkowanego. W zależności od zastosowanych

materiałów (różniących się wartością przerwy energetycznej $\Delta\varepsilon_g$), uzyskuje się różne barwy od czerwieni do fioletu.



Rys. 7. Model działania diody LED (ang. Light Emitting Diode)

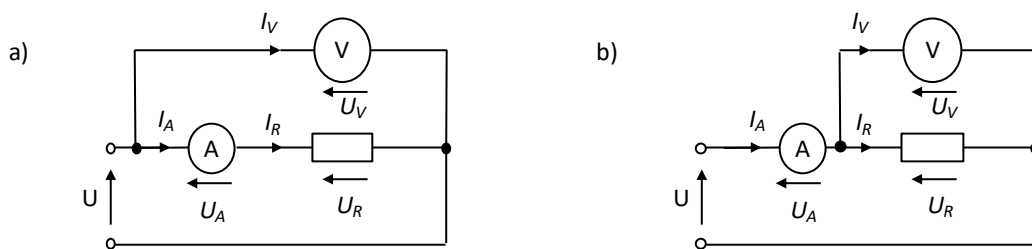
W silnie domieszkowanym złączu p - n spolaryzowanym w kierunku zaporowym zachodzi zjawisko Zenera przy pewnej wartości przyłożonego napięcia (napięcie Zenera) natężenie płynącego prądu gwałtownie wzrasta, nie powodując uszkodzenia diody. Przy napięciu polaryzacji większym od napięcia Zenera górna krawędź pasma walencyjnego obszaru p znajdzie się wyżej niż dolna krawędź pasma przewodzenia obszaru typu n . Elektrony znajdujące się na poziomie walencyjnym w obszarze typu p tunelują przez obszar ładunku przestrzennego do obszaru typu n bez zmiany energii. Pojawienie się swobodnych nośników w obszarze n powoduje zwiększenie prądu płynącego w obwodzie. Nawet niewielki wzrost napięcia polaryzującego (przekraczającego napięcie Zenera) daje bardzo duży przyrost prądu – jest to obszar pracy diody Zenera. Diody Zenera wykorzystuje się do stabilizacji napięcia.



Metodologia wykonywania ćwiczenia

Amperomierz i woltomierz w obwodzie prądu

Wykonując pomiar rezystancji metodą pośrednią wykorzystujemy dwa układy pomiarowe. Na Rys. 8a przedstawiony jest układ poprawnie mierzonego prądu a Rys. 8b układ poprawnie mierzonego napięcia. Wybór odpowiedniego układu jest uzależniony od wartości mierzonej rezystancji i spowodowany tym, że parametry mierników rzeczywistych znacznie odbiegają od parametrów przyrządów idealnych. Dla idealnego woltomierza rezystancja wewnętrzna $R_V \rightarrow \infty$, a więc natężenie prądu płynącego przez woltomierz $I_V \rightarrow 0$. W rzeczywistym woltomierzu R_V może mieć wartość od kilku $k\Omega$ do kilkunastu $M\Omega$ dla mierników elektronicznych, a więc $I_V \neq 0$. Rezystancja idealnego amperomierza $R_A \rightarrow 0$, a więc $U_A \rightarrow 0$. Rezystancja rzeczywistego amperomierza R_A może mieć wartość nawet kilkunastu omów dlatego $U_A \neq 0$. Na rysunku poniżej zaznaczono spadki napięć oraz rozptyw prądów w przykładowych obwodach elektrycznych.



Rys. 8. Układy pomiarowe poprawnie mierzonego: a) prądu, b) napięcia.

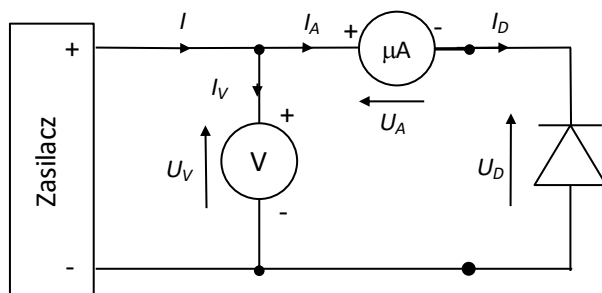
Dla układu poprawnie mierzonego prądu (a) widać wyraźnie, że natężenie prądu płynącego przez amperomierz i opornik $I_A = I_R$, natomiast woltomierz mierzy sumę spadków napięcia na oporniku i amperomierzu $U_V = U_A + U_R$. Taki układ wykorzystywany jest do pomiaru dużych rezystancji, tzn. gdy $R \gg R_A$. Wówczas natężenie prądu płynącego przez opornik (lub inny badany element) jest bardzo małe, a mierzone napięcie stosunkowo duże – przypadek taki mamy podczas wyznaczania charakterystyki diody w kierunku zaporowym.

Dla układu poprawnie mierzonego napięcia (b), mierzony spadek napięcia $U_R = U_V$ natomiast natężenie prądu mierzone przez amperomierz jest sumą natężeń prądów przepływających przez opornik i woltomierz $I_A = I_R + I_V$. Taki układ stosowany jest do pomiaru małych rezystancji gdy $R \ll R_V$, a spadek napięcia na badanym elemencie jest mały, mimo iż płynie przez niego duży prąd. W takim wypadku możliwe jest zaniedbanie niepewności pomiaru natężenia prądu. Przypadek taki mamy podczas wyznaczania charakterystyki diody w kierunku przewodzenia.

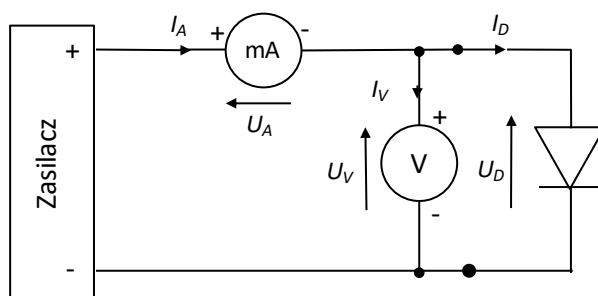


Pomiary

1. Połączyć obwód według schematu (polaryzacja w kierunku zaporowym)



2. Zmieniać wartość napięcia od 0 do 9V i odczytywać natężenie prądu elektrycznego. Przyjąć $\Delta U = 0,05V$ dla napięcia $U < 0,2V$ i $\Delta U = 1V$ dla napięcia $U > 0,2V$.



3. Połączyć obwód według schematu (polaryzacja w kierunku przewodzenia)
4. Zmieniając napięcie od 0 do 0,5 V w odstępach co 0,1 V odczytać odpowiednie wartości natężenia prądu przewodzenia.
5. Wyznaczyć niepewności pomiaru napięcia $u(U)$ i natężenia prądu $u(I)$.
6. Przeprowadzić pomiary dla diody Zenera:
 - a. w kierunku przewodzenia zmieniać napięcie co 0,1 V, dopóki natężenie prądu nie przekroczy wartości 30 mA,
 - b. w kierunku zaporowym $\Delta U = 0,5 V$ dla napięcia $0 < U < 3,5 V$,
 - c. w kierunku zaporowym $\Delta U = 0,1 V$ dopóki natężenie prądu nie przekroczy wartości 30 mA
7. Przeprowadzić pomiary dla diody LED:
 - a. w kierunku przewodzenia ustalić maksymalną wartość napięcia tak, aby natężenie prądu nie przekraczało wartości 30 mA. Wyznaczyć charakterystykę diody LED zmniejszając napięcia co $\Delta U = 0,1V$. Znaleźć wartość napięcia, przy której dioda przestaje (zaczyna) świecić.

Uwaga: maksymalne wartości prądów zależą od typu zastosowanego elementu półprzewodnikowego, dlatego każdorazowo należy uzgadniać te wartości z prowadzącym ćwiczenia.

8. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli.



Tabela pomiarowa

Dioda półprzewodnikowa											
Kierunek zaporowy	U [V]										
	I [uA]										
Kierunek przewodzenia	U [V]										
	I [mA]										
Dioda Zenera											
Kierunek zaporowy	U [V]										
	I [uA]										
Kierunek przewodzenia	U [V]										
	I [mA]										
Dioda LED											
Kierunek przewodzenia	U [V]										
	I [mA]										



Obliczenia

1. Policzyc niepewności $u(U)$ i $u(I)$ metodą typu B.
2. Sporządzić wykresy $I = f(U)$ dla kierunku zaporowego i kierunku przewodzenia dla badanych diod.
3. Na wykresach zaznaczyć niepewności pomiarowe.
4. Dla diody Zenera wyznaczyć z wykresu wartość napięcia Zenera U_z oraz niepewność $u(U_z)$. Napięcie Zenera wyznaczone jest przez punkt przecięcia stycznej do charakterystyki w obszarze pracy z osią napięcia.