

Wyznaczanie stałej Plancka na podstawie charakterystyk prądowo-napięciowych diod elektroluminescencyjnych

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest doświadczalne wyznaczenie wartości stałej Plancka na podstawie pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych kilku diod elektroluminescencyjnych (LED) emitujących promieniowanie o różnych długościach fali.

2. Podstawy teoretyczne

2.1. Promieniowanie ciał

W 1900 roku Max Planck przedstawił teoretyczny opis promieniowania ciała doskonale czarnego, wprowadzając założenie, że energia wymieniana przez oscylatory materii jest skwantowana. Energia pojedynczego kwantu jest proporcjonalna do częstotliwości promieniowania, a współczynnikiem proporcjonalności między energią i częstotliwością jest stała Plancka h . Możemy więc zapisać:

$$E_F = hf \quad (1)$$

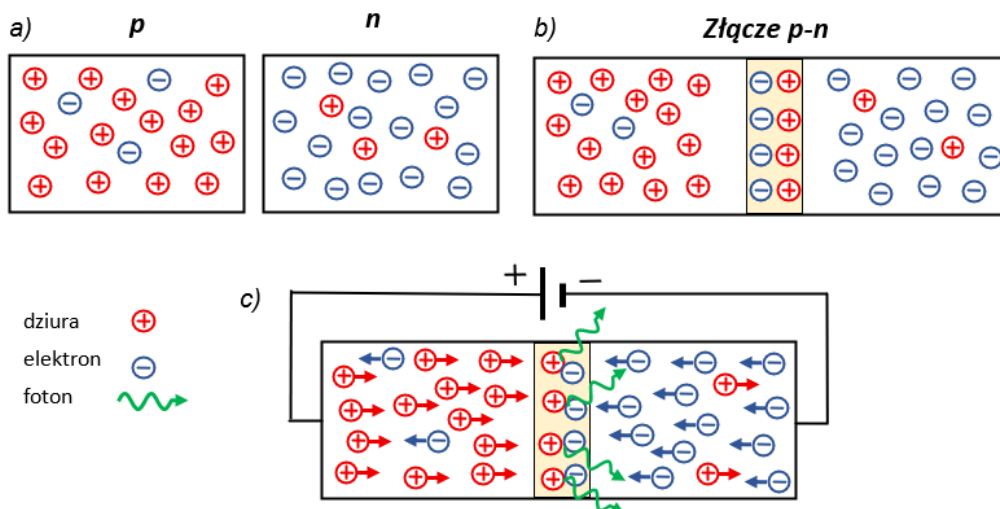
gdzie: E_F – energia kwantu promieniowania, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ – stała Plancka, f – częstotliwość promieniowania elektromagnetycznego.

W późniejszych latach Albert Einstein rozwinął koncepcję kwantowania energii, przedstawiając hipotezę kwantową światła, zgodnie z którą promieniowanie elektromagnetyczne może być traktowane jako strumień kwantów energii. Kwant promieniowania elektromagnetycznego zaczęto z czasem nazywać fotonem. Stała Plancka stała się jedną z podstawowych stałych fizycznych wykorzystywanych w mechanice kwantowej, która opisuje zachowanie materii i promieniowania w skali atomowej.

2.2. Dioda elektroluminescencyjna

Diody elektroluminescencyjne, nazywane w skrócie diodami LED (ang. Light Emitting Diode), są powszechnie stosowanymi źródłami światła. Ich działanie opiera się na zjawisku elektroluminescencji, które polega na emisji promieniowania elektromagnetycznego przez materiał pod wpływem przepływu prądu elektrycznego.

Dioda LED jest wykonana z materiału półprzewodnikowego tworzącego złącze p - n . Obszary typu p i n powstają w wyniku odpowiedniego domieszkowania półprzewodnika. W półprzewodniku typu p większościami nośnikami ładunku są dziury, natomiast w półprzewodniku typu n elektrony (rys. 1a).



Rys. 1 a) półprzewodniki typu p i n , b) złącze p - n , c) dioda LED spolaryzowana w kierunku przewodzenia

Po połączeniu obszarów typu p i n następuje dyfuzja nośników ładunku przez granicę złącza. Elektrony przemieszczają się z obszaru n do obszaru p , a dziury z obszaru p do obszaru n . W wyniku rekombinacji części elektronów i dziur w pobliżu złącza powstaje obszar pozbawiony swobodnych nośników ładunku, nazywany warstwą zubożoną lub warstwą zaporową. W obszarze tym powstaje wewnętrzne pole elektryczne oraz związana z nim bariera potencjału U_B , która przeciwdziała dalszej dyfuzji nośników (rys. 1b).

Po przyłożeniu do diody napięcia w kierunku przewodzenia, czyli po połączeniu obszaru typu p z dodatnim biegunem źródła napięcia, a obszaru typu n z biegunem ujemnym, bariera potencjału zostaje zmniejszona. Umożliwia to zwiększenie przepływu nośników ładunku przez złącze (rys. 1c). W obszarze złącza dochodzi do rekombinacji elektronów i dziur czyli połączenia elektronów i dziur. W przypadku diody elektroluminescencyjnej energia związana z rekombinacją może zostać wypromieniowana w postaci fotonu. Zwiększanie przyłożonego napięcia będzie powodowało obniżanie bariery potencjału, powodując wzrost liczby rekombinujących par elektron-dziura.

2.3. Częstotliwość promieniowania emitowanego przez diodę LED

W uproszczonym modelu działania diody LED możemy założyć, że energia emitowanego fotonu jest w przybliżeniu równa

$$E_F \approx eU_B \quad (2)$$

gdzie: E_F – energia fotonu, $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$ – ładunek elementarny, U_B – napięcie odpowiadające barierze potencjału.

Z wzorów (1) i (2) wynika, że częstotliwość emitowanego światła przez diodę LED jest bezpośrednio powiązana z wartością bariery potencjału na złączu p - n

$$f \approx \frac{eU_B}{h}. \quad (3)$$

Musimy mieć świadomość, że światło emitowane przez diodę LED nie jest monochromatyczne (nie ma jednej częstotliwości). Częstotliwość wyznaczona ze wzoru (3) odpowiada orientacyjnie maksimum widma światła emitowanego przez diodę LED.

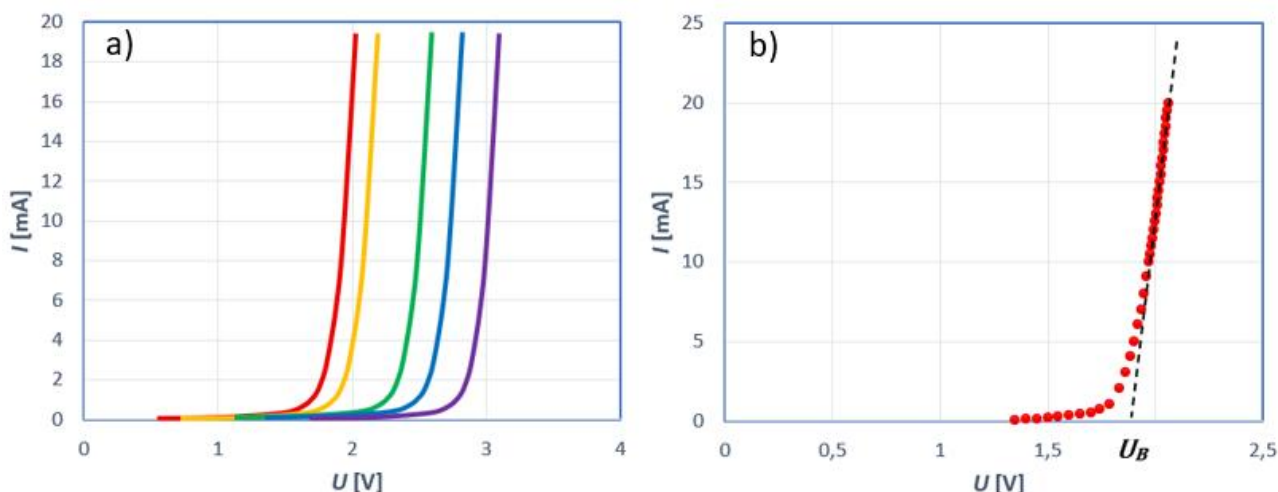
Z wzoru (3) wynika, że znając napięcie bariery potencjału U_B oraz częstotliwość światła emitowanego przez diodę f można z pewnym przybliżeniem wyznaczyć stałą Plancka. Przybliżoną wartość bariery potencjału można wyznaczyć z charakterystyki prądowo-napięciowej diody, natomiast częstotliwość promieniowania świetlnego można wyliczyć ze wzoru

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

gdzie: $c = 3 \cdot 10^8 m/s$ – prędkość światła w próżni, λ – długość fali świetlnej. Długość fali odpowiadającej maksimum widma emisji diody elektroluminescencyjnej można odczytać w specyfikacji podanej przez producenta lub zmierzyć przy pomocy spektrometru.

3. Wyznaczanie przybliżonej wartości napięcia U_B metodą ekstrapolacji charakterystyki prądowo-napięciowej diody LED

Charakterystykę prądowo-napięciową diody LED wyznacza się poprzez pomiar natężenia prądu I płynącego przez diodę oraz napięcia U na diodzie. Typowe charakterystyki $I = f(U)$ dla kilku diod LED emitujących światło o różnych barwach przedstawiono na rysunku 2a. W kierunku przewodzenia początkowo natężenie prądu jest bardzo małe. Po przekroczeniu pewnego zakresu napięcia natężenie prądu zaczyna szybko wzrastać. W celu wyznaczenia przybliżonej wartości napięcia bariery potencjału U_B można wykorzystać prostoliniowy, szybko narastający fragment charakterystyki (rys. 2b).



Rys. 2 a) Przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe diod LED różniących się barwą emitowanego światła, b) metoda wyznaczenia przybliżonej wartości napięcia bariery potencjału U_B z zależności $I = f(U)$

Korzystając z metody regresji liniowej należy wyznaczyć parametry prostej dla możliwie liniowego fragmentu charakterystyki:

$$I = A \cdot U + B \quad (5)$$

gdzie A jest współczynnikiem kierunkowym prostej, a B - wyrazem wolnym liniowego fragmentu charakterystyki $I = f(U)$.

Następnie prostą należy ekstrapolować do wartości $I = 0$.

Napięcie odpowiadające punktowi przecięcia dopasowanej prostej z osią napięcia przyjmuje się jako przybliżenie napięcia U_B .

Z równania

$$0 = A \cdot U_B + B \quad (6)$$

otrzymujemy:

$$U_B = -\frac{B}{A} \quad (7)$$

4. Wyznaczenie stałej Plancka z zależności $U_B = f(f)$

W celu zwiększenia dokładności pomiarów stałej Plancka wykorzystuje się pomiary zależności prądowo-napięciowych dla kilku diod o różnych barwach (różnych częstotliwościach emitowanego światła). Dla badanych diod LED należy wyznaczyć pary wartości:

$$(f_1, U_{B1}), (f_2, U_{B2}), \dots, (f_n, U_{Bn}).$$

Następnie należy przedstawić je na wykresie, przyjmując częstotliwość f na osi poziomej, a napięcie U_B na osi pionowej.

Przekształcając wzór (3) i zastępując znak przybliżenia znakiem równości możemy napisać:

$$U_B = \frac{h}{e} f. \quad (8)$$

W rzeczywistym doświadczeniu, ze względu na czynniki nieuwzględnione w prostym modelu, punkty pomiarowe nie muszą leżeć dokładnie na prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych. Dlatego do punktów należy dopasować prostą metodą regresji liniowej:

$$U_B = af + b, \quad (9)$$

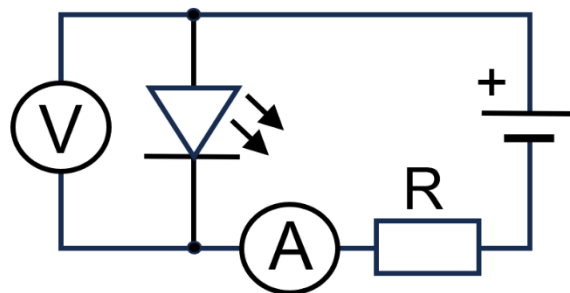
gdzie: a - współczynnik kierunkowy prostej, b - wyraz wolny.

Porównując zależności (8) i (9) otrzymujemy $a = \frac{h}{e}$ a więc stałą Plancka możemy wyznaczyć ze wzoru

$$h = ea. \quad (10)$$

5. Układ pomiarowy

Do pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych wykorzystano układ złożony z regulowanego zasilacza prądu stałego, woltomierza, amperomierza, rezystora oraz siedmiu diod LED emitujących fale świetlne o różnych barwach. Rezystor (R) ogranicza prąd płynący przez diodę i chroni ją przed przekroczeniem dopuszczalnej wartości prądu. Uproszczony schemat układu pomiarowego zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3 Uproszczony schemat układu pomiarowego

6. Przebieg ćwiczenia

1. Przed włączeniem zasilacza ustawić jego napięcie wyjściowe na minimum. Włączyć zasilacz, woltomierz i amperomierz, a następnie podłączyć diodę LED nr 1.
2. Wykonać pomiary napięcia na diodzie dla kolejnych wartości natężenia prądu w zakresie od 1 mA do 20 mA, zwiększając natężenie prądu co około 1 mA. Nie należy przekraczać natężenia prądu 20 mA, aby nie uszkodzić diody.
3. Pomiary z pkt. 2 powtórzyć dla kolejnych sześciu diod.
4. Wykreślić zależności $I = f(U)$ dla wszystkich siedmiu diod na jednym wspólnym układzie współrzędnych.
5. Dla każdej zależności $I = f(U)$ wyznaczyć parametry A i B prostej, korzystając z metody regresji liniowej. Regresję liniową należy zastosować dla wybranego zakresu danych odpowiadającego możliwie liniowemu fragmentowi charakterystyki. W niniejszym ćwiczeniu jako przybliżenie liniowego fragmentu charakterystyki przyjmuje się zakres prądu od 10 mA do 20 mA.
6. Wyliczyć wartości napięć bariery potencjału U_B dla badanych diod LED korzystając ze wzoru (7).
7. Korzystając ze wzoru (4) oraz wartości długości fal podanych na stanowisku pomiarowym dla poszczególnych diod wykorzystanych w doświadczeniu, wyznaczyć częstotliwości fal świetlnych emitowanych przez diody LED.
8. Wykreślić zależność napięcia bariery potencjału od częstotliwości ($U_B = f(f)$).
9. Korzystając z metody regresji liniowej do równania (9) wyliczyć współczynnik kierunkowy prostej a oraz jego niepewność pomiarową.
10. Wyliczyć ze wzoru (10) wartość stałej Plancka a następnie jej jednostkę oraz niepewność pomiarową.
11. Zapisać wnioski do ćwiczenia.