

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:

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

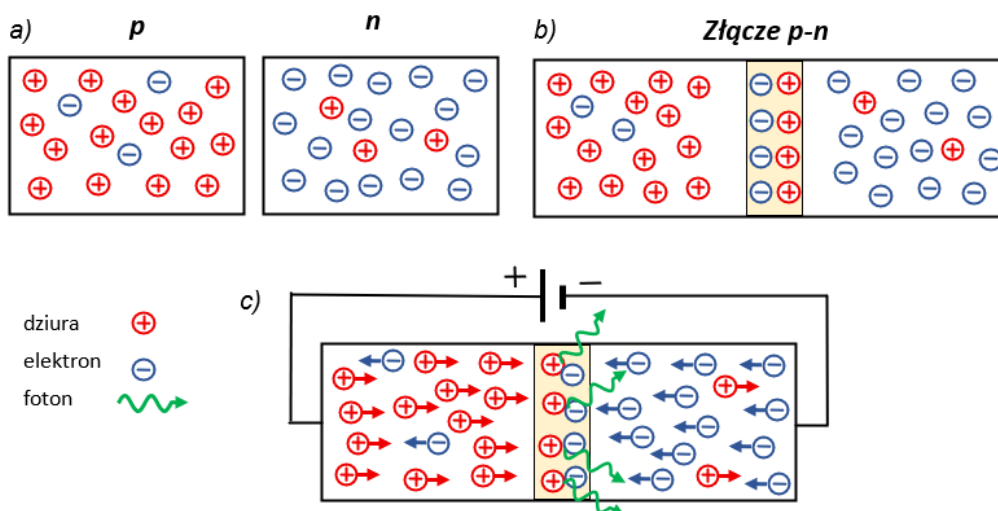
gdzie: E_F - energia kwantu promieniowania, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ – stała Plancka, f – częstotliwość promieniowania elektromagnetycznego.

W późniejszych latach Albert Einstein rozwinął koncepcję kwantowania energii, przedstawiając hipotezę kwantową światła, zgodnie z którą promieniowanie elektromagnetyczne (m.in. światło) 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 typu p - n . Obszary typu n i p powstają w wyniku odpowiedniego domieszkowania półprzewodnika. W półprzewodniku typu n większościami nośnikami ładunku są elektrony, natomiast w półprzewodniku typu p dziury (rys. 1a).



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

Po połączeniu obszarów typu n i p 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.

2.3. Częstotliwość promieniowania emitowanego przez LED

Maksimum zdolności emisyjnej diody elektroluminescencyjnej przypada na częstotliwość fali odpowiadającej wartości przerwy energetycznej złącza p - n . Zakładając, że energia emitowanego fotonu E_F jest w przybliżeniu równa wartości przerwy energetycznej E_G oraz korzystając z równania (1) można zapisać wzór na częstotliwość fali elektromagnetycznej emitowanej przez diodę LED

$$f = \frac{E_F}{h} \approx \frac{E_G}{h} . \quad (2)$$

Wartość przerwy energetycznej E_G zależy od zastosowanych półprzewodników i ich domieszkowania. Dzięki odpowiedniemu doborowi materiałów z których jest wykonana dioda LED, można więc uzyskać diody świecące na czerwono, zielono, niebiesko i w wielu innych kolorach. Istnieją również diody LED emitujące promieniowanie niewidzialne dla ludzkiego oka, na przykład w podczerwieni lub nadfiolecie.

W uproszczonym modelu działania diody LED można przyjąć, że energia odpowiadająca przerwie energetycznej jest związana z napięciem bariery potencjału zależnością

$$E_G \approx eU_B , \quad (3)$$

gdzie: U_B – napięcie odpowiadające barierze potencjału, $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C – ładunek elementarny.

Z wzorów (2) i (3) wynika, że częstotliwość emitowanego światła przez diodę LED jest bezpośrednio powiązana z wartością bariery potencjału na złączu p - n

$$f \approx \frac{eU_B}{h} . \quad (4)$$

Z powyższego równania wynika, że znając napięcie bariery potencjału U_B oraz częstotliwość światła emitowanego przez diodę f można z pewnym przybliżeniem wyznaczyć stałą Plancka. Bariere potencjału można wyznaczyć z charakterystyki prądowo-napięciowej diody, natomiast częstotliwość promieniowania świetlnego można wyliczyć z wzoru

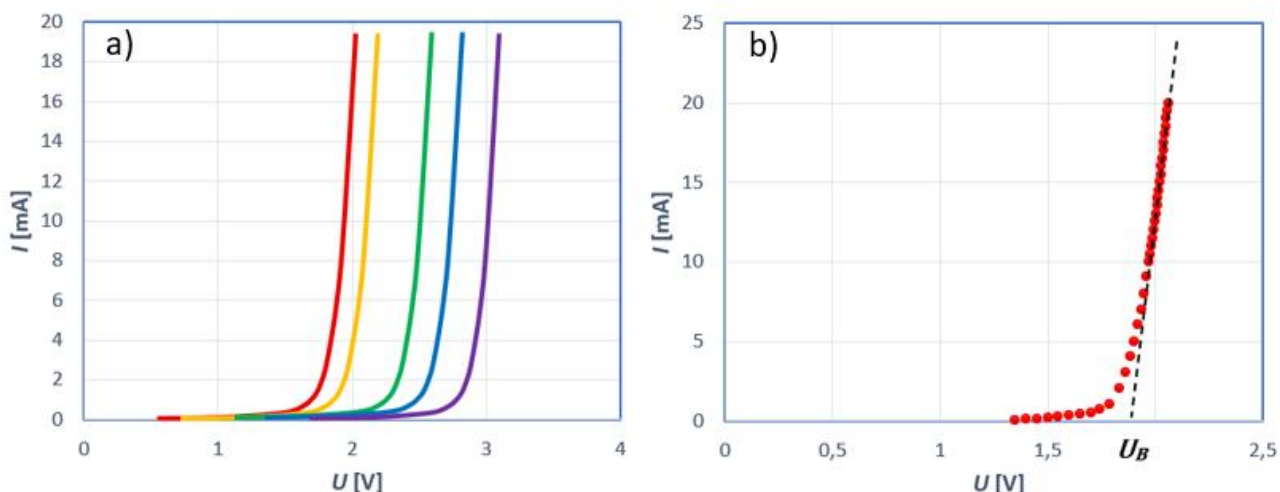
$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (5)$$

gdzie: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s – prędkość światła w próżni a λ – długość fali świetlnej.

Długość fali diody elektroluminescencyjnej można odczytać w specyfikacji podanej przez producenta lub zmierzyć przy pomocy spektrometru.

3. Wyznaczanie napięcia U_B z charakterystyki prądowo-napięciowej diody

Charakterystykę prądowo-napięciową diody LED wyznacza się poprzez pomiar prądu I płynącego przez diodę oraz napięcia U na diodzie. Typowe charakterystyki $I = f(U)$ dla kilku diod różniących się częstotliwością (barwą) emitowanego światła przedstawiono na rysunku 2a. W kierunku przewodzenia początkowo prąd jest bardzo mały. Po przekroczeniu pewnego zakresu napięcia prąd zaczyna szybko wzrastać. W celu wyznaczenia napięcia bariery potencjału U_B należy 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 $I = f(U)$

Jedną z możliwych metod jest dopasowanie prostej do wybranego, możliwie liniowego fragmentu charakterystyki:

$$I = A \cdot U + B \quad (6)$$

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

$$0 = A \cdot U_B + B \quad (7)$$

otrzymujemy:

$$U_B = -\frac{B}{A} \quad (8)$$

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, odkładając: na osi poziomej – częstotliwość f a na osi pionowej – napięcie U_B .

Przekształcając wzór (4) i zastępując znak przybliżenia znakiem równości możemy napisać:

$$U_B = \frac{h}{e} f. \quad (9)$$

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:

$$U_B = af + b, \quad (10)$$

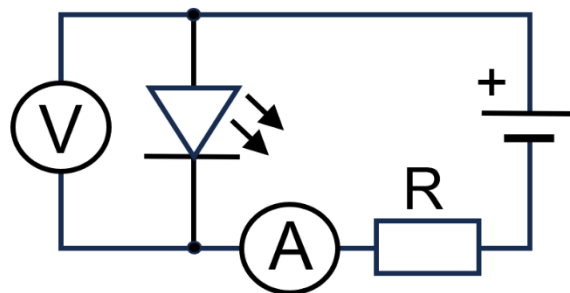
gdzie: a - współczynnik kierunkowy prostej, b - wyraz wolny.

Porównując zależności (9) i (10) otrzymujemy $a = h/e$ a więc stałą Plancka możemy wyznaczyć ze wzoru

$$h = ea. \quad (11)$$

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 częstotliwościach. 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. Włączyć zasilacz, woltomierz i amperomierz a następnie podłączyć diodę LED nr 1.
2. Wykonać pomiary zależności natężenia prądu płynącego przez diodę w funkcji napięcia w zakresie prądu 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 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 praktyce odpowiada to wartościom natężeń prądów w zakresie od 10 mA do 20 mA.
6. Wyliczyć wartości napięć bariery potencjału U_B dla badanych diod LED korzystając z wzoru (8).
7. Korzystając z wzoru (5) oraz wartości długości fal podanych na stanowisku dla poszczególnych diod wykorzystanych w doświadczeniu, wyznaczyć częstotliwości fal świetlnych emitowanych przez diody LED.
8. Wykreślić zależność $U_B = f(f)$.
9. Korzystając z metody regresji liniowej do równania (10) wyznaczyć współczynnik nachylenia prostej a oraz jego niepewność pomiarową.
10. Wyliczyć z wzoru (11) stałą Plancka a następnie jej jednostkę oraz niepewność pomiarową.
11. Zapisać wnioski do ćwiczenia.