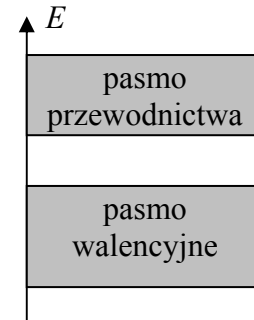


LVI OLIMPIADA FIZYCZNA
2006/2007
Zawody II stopnia

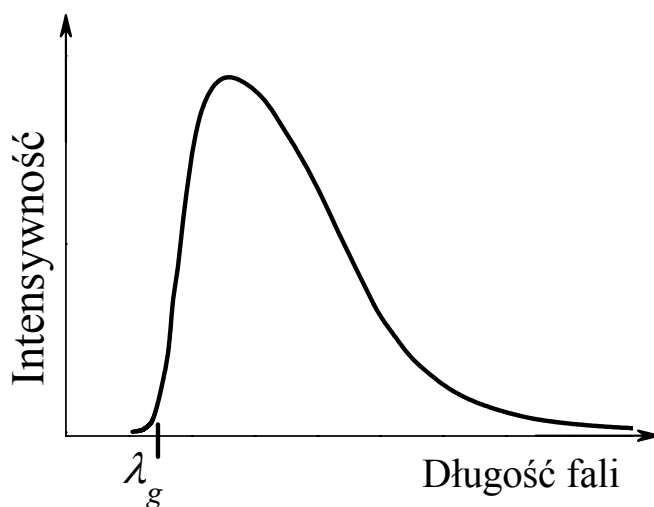
Zadanie doświadczalne

Energia elektronów w półprzewodniku może przybierać wartości należące do dwóch przedziałów: dolnego (tzw. pasmo walencyjne) i górnego (pasmo przewodnictwa), natomiast wykluczone są energie leżące w przerwie między tymi pasmami. Odkładając energię na osi pionowej otrzymujemy schemat przedstawiony na rysunku. Jeśli elektron przeskoczy z pasma przewodnictwa do pasma walencyjnego, to utraconą energię może emitować w postaci kwantu promieniowania. Na tej zasadzie działa dioda elektroluminescencyjna (LED).



Wymaga ona zasilania takim napięciem, aby przepływający przez diodę elektron uzyskał energię równą co najmniej szerokości przerwy wzbronionej. Największa energia kwantu wysłanego przez diodę (krótkofalowa granica widma emitowanego światła, zob. przedstawione poniżej przykładowe widmo dla pewnej diody) odpowiada przetworzeniu w kwant światła całej energii pobranej przez jeden elektron ze źródła zasilania.

Podany powyżej opis jest skrajnie uproszczony. Dioda składa się z dwóch stykających się warstw półprzewodnika: jednej (typu n), w której elektrony zajmują wszystkie stany w obrębie pasma walencyjnego, a ponadto występuje pewna liczba elektronów w paśmie przewodnictwa oraz drugiej (typu p), w której nie ma elektronów w paśmie przewodnictwa, a także nie wszystkie stany należące do pasma walencyjnego pozostają zajęte. Emitowanie światła przez diodę wymaga przyłożenia ujemnego bieguna napięcia zasilającego diodę do warstwy n , a dodatniego do warstwy p . Światło jest emitowane z obszaru złącza (zestknięcia dwóch warstw).



Masz do dyspozycji:

- trzy różnokolorowe diody elektroluminescencyjne,
- płytę CD,
- linijkę,
- zasilacz prądu stałego o regulowanym napięciu,
- woltomierz,
- opornik o rezystancji $460\ \Omega$,
- przewody, zaciski itp. elementy umożliwiające zestawienie obwodu elektrycznego,
- statyw,
- papierową taśmę klejącą,
- papier milimetrowy.

A) Wyznacz długość fali światła odpowiadającą krótkofalowej granicy widma emitowanego przez poszczególne diody. Przyjmij, że dane na płycie CD zapisywane są na spiralnej ścieżce, a odległość pomiędzy kolejnymi „nawinięciami” spirali wynosi $1,55 \pm 0,05\ \mu\text{m}$. Pomiary wykonaj dla kilku wartości natężenia prądu płynącego przez diody, w zakresie od 3 mA do 10 mA.

B) Wyznacz stałą Plancka.

Przyjmij, że prędkość światła wynosi $2,998 \cdot 10^8\ \text{m/s}$, natomiast ładunek elektronu $1,602 \cdot 10^{-19}\ \text{C}$. Możesz też przyjąć, że w przypadku będących do Twojej dyspozycji diod, przy wartościach prądu powyżej 3mA, napięcie na złączu *p-n* nie zmienia się. Wzrost napięcia na końcówkach diody przy prądzie wzrastającym powyżej 3mA, wynika z niezerowego (stałego) oporu doprowadzeń do obszaru złącza.

Uwaga!

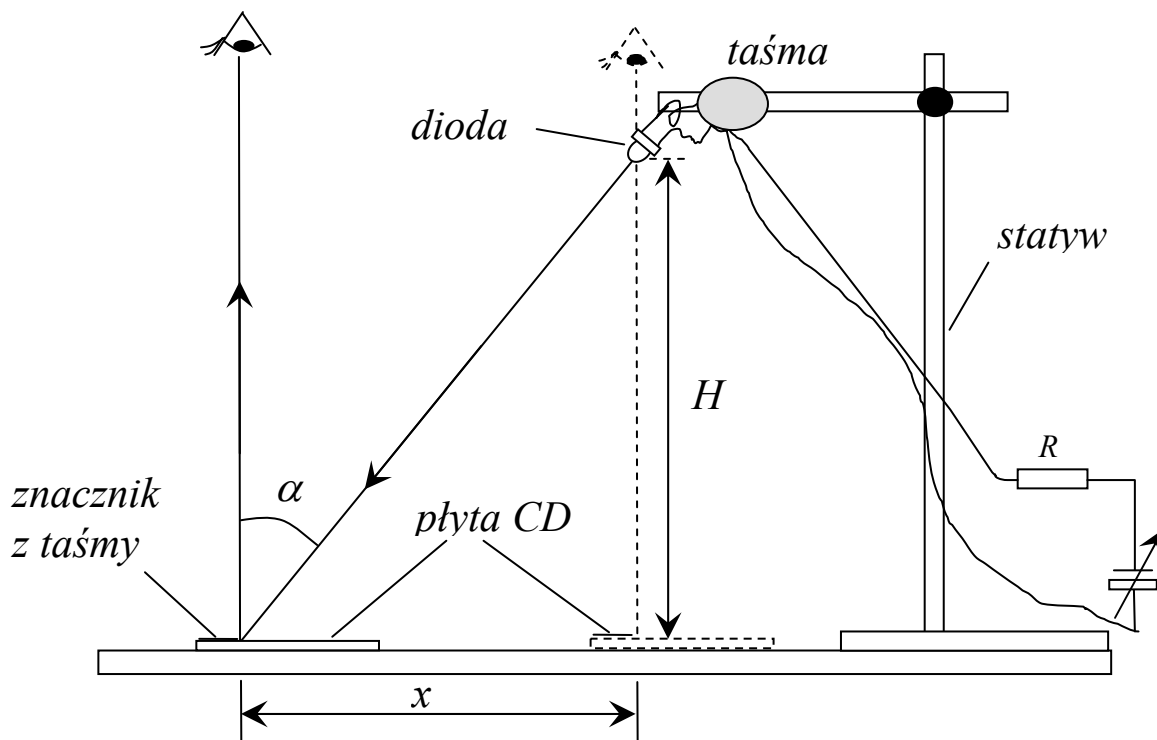
Diode można łatwo uszkodzić przepuszczając przez nią prąd o natężeniu przekraczającym 10 mA. Dla bezpieczeństwa, diode należy podłączyć do źródła napięcia szeregowo z opornikiem. Dioda będzie świecić pod warunkiem, że jej dłuższą nóżkę podłączy się do bieguna dodatniego, a krótszą do bieguna ujemnego źródła prądu.

Rozwiązanie

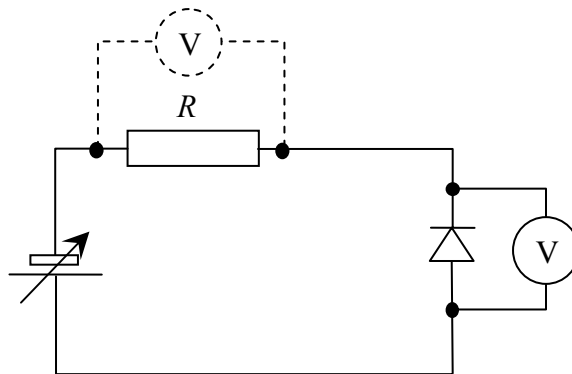
Część A

Długość fali światła emitowanego przez diody można wyznaczyć wykorzystując płytę CD jako siatkę dyfrakcyjną. Odpowiednie eksperymenty można wykonać w układzie przedstawionym na rys. 1. Zamocowaną na statywie diodę należy podłączyć do źródła napięcia i zasilić odpowiednim prądem. Ponieważ w układzie nie jest dostępny amperomierz, wartość natężenia prądu płynącego przez diodę można kontrolować mierząc napięcie na połączonym z nią szeregowo oporniku, w układzie przedstawionym na rys. 2. Biorąc pod uwagę, że opornik ma oporność 460Ω , maksymalne napięcie na diodzie, odpowiadające prądowi 10mA wynosi $4,6\text{V}$, zaś prądowi 3mA odpowiada napięcie $1,38\text{V}$.

Przed rozpoczęciem eksperymentu, w pewnym miejscu na powierzchni płyty należy przykleić kawałek taśmy klejącej. Na taśmie należy zaznaczyć kreskę (znacznik) biegnący radialnie do środka płyty (prostopadle do ścieżek zapisu). Patrząc z góry na płytę ustawiamy oko tak, aby jego obraz (odbity od płyty) znalazł się w pobliżu końca znacznika. Taki sposób patrzenia pozwala obserwować światło biegnące prostopadle do powierzchni płyty, dokładnie z obszaru płyty w pobliżu znacznika. Przesuwając płytę pod diodę zamocowaną na statywie, możemy znaleźć takie położenie płyty i oka, że w pobliżu znacznika, na tle oka ujrzymy lustrzane odbicie diody. Odpowiada to zerowemu rzędowi dyfrakcji, czyli prostemu odbiciu światła od płyty (linie przerywane na rys. 1). Wysuwając płytę spod diody i ciągle patrząc na nią prostopadle, można doprowadzić do sytuacji, w której w pobliżu znacznika ujrzymy kolorowy obraz odpowiadający pierwszemu rzędowi dyfrakcji światła diody. Należy zwrócić uwagę na to, aby płytę przesuwając po stole równoległe do znacznika (kreski) na płycie. Wtedy niewielki obszar płyty w okolicy znacznika można traktować jak siatkę dyfrakcyjną, której „rysy” ułożone są prostopadle do płaszczyzny wyznaczonej przez oko, znacznik na płycie i diodę.



Rys. 1



Rys. 2

Warunek, przy którym patrząc prostopadłe na powierzchnię płyty zauważymy pierwszy rząd ugięcia światła o długości fali λ ma postać:

$$d \sin(\alpha) = \lambda, \quad (1)$$

gdzie d – odległość pomiędzy ścieżkami zapisu na płycie, α - kąt padania światła na płytę. Jeśli odległość pomiędzy położeniami płyty, dla których widać zerowy i pierwszy rząd odbicia (dyfrakcji) światła diody oznaczymy przez x , a dioda zawieszona jest na wysokości H nad powierzchnią stołu, to warunek obserwacji dla pierwszego maksimum dyfrakcyjnego można zapisać w postaci:

$$\lambda = d \frac{x}{\sqrt{x^2 + H^2}}. \quad (2)$$

Mierząc linijką odległości x pomiędzy położeniami, dla których widoczny jest zerowy i pierwszy rząd dyfrakcji, można wyznaczyć graniczne długości fali odpowiadające krótkofalowej granicy części widma dla poszczególnych diod. Podstawiając wyznaczone eksperymentalnie odległości x oraz H do wzoru (2) i uśredniając wyniki otrzymujemy: $\lambda_{gr}=(643\pm 23)$ nm dla diody czerwonej, $\lambda_{gr}=(573 \pm 23)$ nm dla diody zielonej, $\lambda_{gr}=(474\pm 20)$ nm dla diody niebieskiej.

Część B

Energia E fotonu o długości fali λ wynosi:

$$E=hc/\lambda, \quad (3)$$

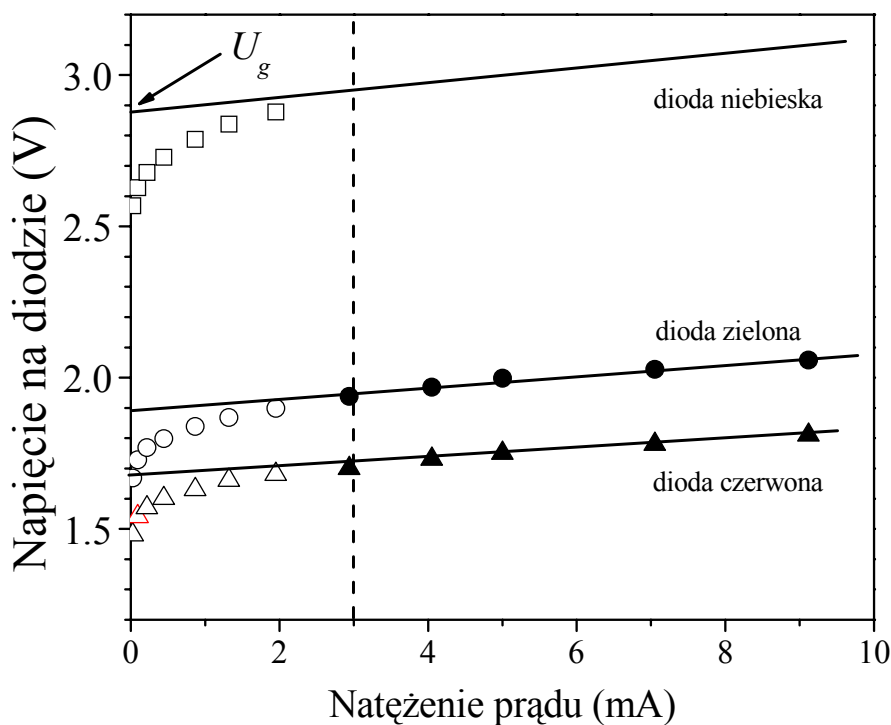
gdzie c – prędkość światła, h – stała Plancka.

Zatem jeśli niezależnie wyznaczyć długość fali fotonu oraz jego energię, to znając prędkość światła można wyliczyć stałą Plancka. Długości fali odpowiadające granicy krótkofalowej widma emitowanego przez różne diody zostały wyznaczone w części A doświadczenia. Zgodnie z treścią zadania krótkofalowej granicy widma, odpowiada energia fotonów bliska przerwie energetycznej E_g . Energię tę można wyznaczyć badając, przy jakiej wartości napięcia przyłożonego do złącza dioda zaczyna świecić. Dla granicznej wartości napięcia spełniona jest równość $E_g=eU_g$. Korzystając z niej możemy zapisać związek (3) w postaci:

$$U_g = \frac{hc}{e} \frac{1}{\lambda_{gr}} \quad (4)$$

Zatem wyznaczając doświadczalnie wartość współczynnika proporcjonalności $\beta=hc/e$ pomiędzy napięciem granicznym U_g a odwrotnością długości fali $1/\lambda_{gr}$ można znaleźć wartość stałej Plancka.

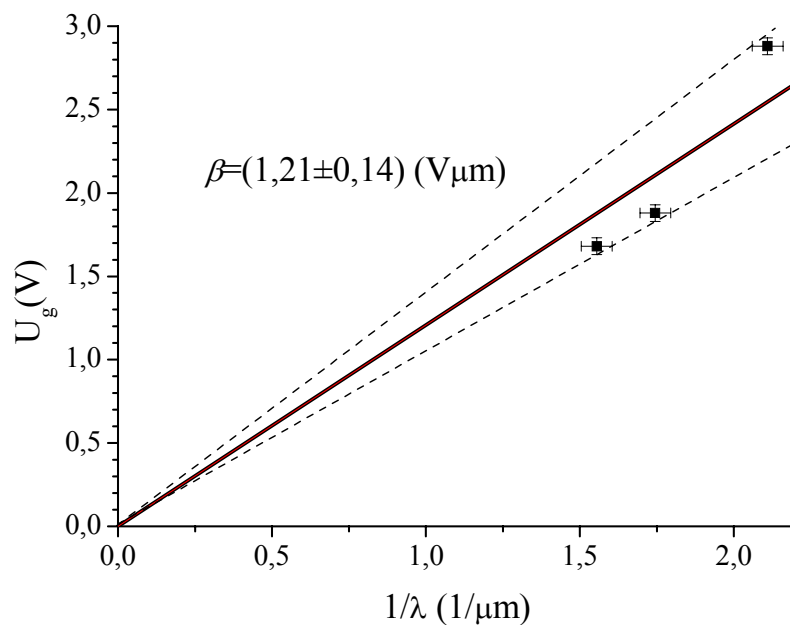
W treści zadania ograniczono zakres prądów płynących przez diodę do sytuacji, w której napięcie na złączu jest ustalone, a obserwowane zmiany napięcia na końcówkach diody można przypisać zmianom napięcia na kontaktach i doprowadzeniach. Pomiary napięcia na końcówkach diody, dla różnych prądów w zakresie 3-10 mA, wykonano w układzie, którego schemat elektryczny przedstawiono na rys. 2. Regulując napięcie zasilające i odpowiednio przyłączając do układu woltomierz, mierzymy napięcie na oporniku i diodzie. Znając wartość napięcia na oporniku U_R oraz rezystancję opornika R można wyznaczyć prąd płynący przez diodę $I = U_R/R$. Uzyskane w ten sposób wyniki dla różnych diod przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3

(Wyniki dla prądów poniżej 3mA przedstawiono jedynie dla porządku, gdyż zawodnicy powinni wykonać pomiary dla prądów od 3 do 10mA).

Z uzyskanych danych doświadczalnych przedstawionych na rys. 3 wynika, że dla prądów z zakresu 3-10mA, napięcia na diodach można opisać zależnościami liniowymi. Dla wyznaczenia napięcia progowego na złączu, wystarczy ekstrapolować otrzymane zależności do wartości odpowiadającej zerowemu natężeniu prądu. Wyznaczone w ten sposób wartości napięcia progowego wynoszą dla różnych diod odpowiednio: $U_g = (2,88 \pm 0,05)$ V (dioda niebieska), $U_g = (1,88 \pm 0,05)$ V (dioda zielona), $U_g = (1,68 \pm 0,05)$ V (dioda czerwona). Wykres zależności napięcia progowego U_g od odwrotności granicznej długości fali λ_{gr} dla różnych diod przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4

Z graficznego dopasowania prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych, otrzymano współczynnik $\beta = (1,21 \pm 0,14) \text{ V}\mu\text{m}$, co odpowiada wartości stałej Plancka $h = \beta e / c = (6,5 \pm 0,9) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ (niepewność wyniku oceniono graficznie). Biorąc pod uwagę niepewność pomiarową wynik ten jest zgodny z wartością tablicową stałej Plancka. Rozrzut danych eksperymentalnych wynika w dużej mierze z bardzo uproszczonego modelu diody.