

Wyznaczanie stałej Plancka

1. Podstawy fizyczne

Wśród wielkości fizycznych znaczną rolę odgrywają stałe, a szczególną rolę należy przypisać stałym uniwersalnym. Dokładna znajomość tych stałych jest niezbędna do rozumienia podstaw fizyki. Jest ich zaledwie kilka; jako najważniejsze należy wymienić: prędkość światła w próżni $c=2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, stałą powszechnej grawitacji $G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$, ładunek elementarny $e=1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, stałą Plancka h , której wyznaczenie jest celem ćwiczenia.

Stałą Plancka można wyznaczać różnymi metodami biorąc za podstawę takie zjawiska jak: zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne (światło widzialne i bliski nadfiolet), graniczna długość fali (promienie rentgenowskie), widma liniowe promieniowania wodoru i wiele innych. Ćwiczenia takie znajdują się w zestawie ćwiczeń laboratorium.

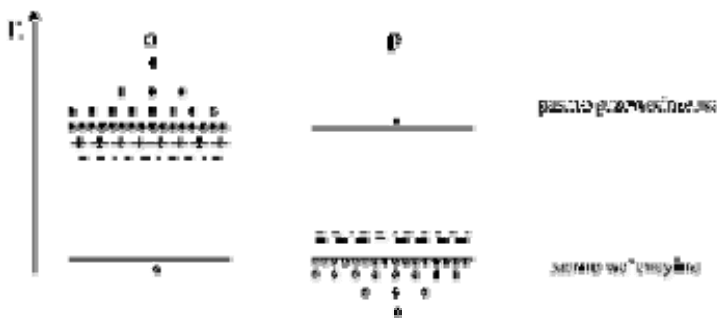
W niniejszym ćwiczeniu stała Plancka wyznaczana jest na podstawie charakterystyki prąd-napięcie diody elektroluminescencyjnej. Choć fizyczny opis podstaw zjawiska świecenia diody elektroluminescencyjnej nie należy do najprostszych, to metoda pomiarowa jest stosunkowo prosta i pozwala na dość dokładne wyznaczenie stałej Plancka.

W niniejszym ćwiczeniu stała Plancka wyznaczana jest na podstawie charakterystyki prąd-napięcie diody elektroluminescencyjnej. Choć fizyczny opis podstaw zjawiska świecenia diody elektroluminescencyjnej nie należy do najprostszych, to metoda pomiarowa jest stosunkowo prosta i pozwala na dość dokładne wyznaczenie stałej Plancka.

Dioda elektroluminescencyjna.

Dioda elektroluminescencyjna jest miniaturowym urządzeniem półprzewodnikowym, które pod wpływem przepływającego przez nie prądu emituje światło. Najczęściej można spotkać diody emitujące światło podczerwone, czerwone, żółte, zielone a ostatnio i niebieskie. Diody luminescencyjne mają wiele zastosowań. Jednym z nich jest zastosowanie diody jako wskaźnika świetlnego do sygnalizacji stanu urządzenia elektrycznego lub elektronicznego.

Dioda zbudowana jest z dwu warstw: półprzewodnika typu „n” i półprzewodnika typu „p” (patrz rys. 1).



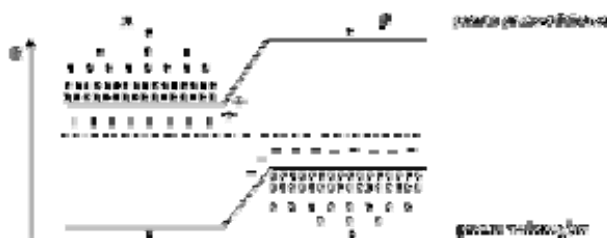
Rys.1. Półprzewodniki typu „n” i typu „p” przed zetknięciem.

Półprzewodnik typu „n” jest silnie domieszkowany donorami, które w temperaturze pokojowej są zjonizowane dodatnio wskutek przejść termicznych elektronów do pasma przewodnictwa.

Dlatego w paśmie przewodnictwa jest duża koncentracja elektronów, a w paśmie walencyjnym bardzo niewielka ilość dziur o ładunku dodatnim.

Półprzewodnik typu „p” jest silnie domieszkowany akceptorami, które w temperaturze pokojowej przyłączyły elektrony z pasma walencyjnego; w paśmie walencyjnym jest duża koncentracja dziur, a w paśmie przewodnictwa nieznaczna ilość elektronów. Tak jest w półprzewodnikach typu „n” i typu „p” nie będących w kontakcie.

Na rys. 2. pokazano schemat energetyczny półprzewodników typu „n” i typu „p” będących w kontakcie w stanie równowagi termodynamicznej. Po zetknięciu półprzewodników sytuacja zmienia się. Między półprzewodnikami istnieją różnice koncentracji elektronów i dziur.



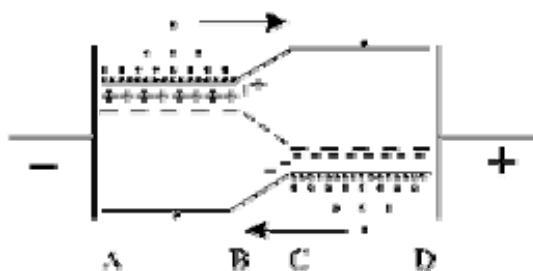
Rys.2 Półprzewodniki typu „n” i typu „p” po zetknięciu

Różnica koncentracji nośników w półprzewodnikach prowadzi do dyfuzji elektronów z obszaru „n” do obszaru „p” oraz dyfuzji dziur z obszaru „p” do obszaru „n”. Wskutek dyfuzji ładunków obszar „n” ładuje się dodatnio, a obszar „p” ujemnie. Powoduje to obniżenie poziomów energetycznych elektronów w półprzewodniku typu „n” i podwyższenie energii dziur w półprzewodniku typu „p”.

W wąskim obszarze BC tuż przy granicy obu półprzewodników pojawia się nieskompensowany przez elektrony dodatni ładunek atomów donorowych oraz nieskompensowany przez dziury ujemny ładunek atomów akceptorowych. W obszarze B-C istnieje pole elektryczne skierowane od „n” do „p”. Półprzewodnik typu „n” ma potencjał wyższy od potencjału półprzewodnika typu „p”. Dyfuzja obu rodzajów nośników trwa dopóty, dopóki nie ustali się równowaga termodynamiczna.

Dalej obszar B-C będziemy nazywać barierą, a obszary A-B i C-D podłożem. Dla właściwości elektrycznych diody istotna jest przede wszystkim bariera, gdyż ona decyduje o zależności prądu od napięcia przyłożonego z zewnątrz do diody.

Jeśli do diody przyłożone jest napięcie tak, że biegun ujemny źródła prądu jest przyłączony do półprzewodnika typu „n”, a dodatni do półprzewodnika typu „p”, to taką sytuację nazywamy spolaryzowaniem diody w kierunku przewodzenia. Taki rodzaj polaryzacji powoduje zwiększenie energii elektronów w paśmie przewodnictwa półprzewodnika typu „n” oraz zmniejszenie energii dziur w paśmie walencyjnym półprzewodnika typu „p” (rys.3.). Wysokość bariery ulega obniżeniu.



Rys 3. Dioda spolaryzowana w kierunku przewodzenia

Teraz elektrony z półprzewodnika typu „n” mogą przechodzić przez barierę od „n” do „p”. Podobnie dziury z półprzewodnika typu „p” mogą przechodzić w kierunku od „p” do „n”; przez diodę płynie prąd elektryczny. W miarę zwiększania napięcia zewnętrznego wysokość bariery ulega coraz to większemu obniżeniu i coraz większa liczba elektronów i dziur może brać udział w przewodzeniu prądu poprzez barierę.

Zależność natężenia tego prądu od zewnętrznego napięcia polaryzującego U spełniającego warunek $U < U_g$ przedstawia wzór:

$$I_1 = I_0(\exp(eU/kT)-1) \quad (1)$$

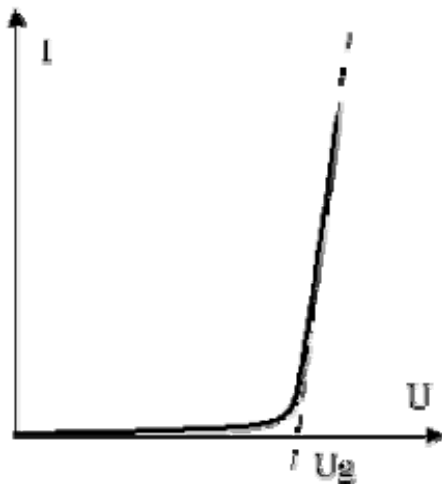
Przy napięciu zewnętrznym U równym pewnemu napięciu charakterystycznemu dla danej diody, nazywanym napięciem granicznym U_g , sytuacja zmienia się. Teraz dalsze zwiększanie napięcia nie powoduje już wzrostu liczby elektronów i dziur biorących udział w przewodzeniu prądu poprzez

barierę, ponieważ powyżej napięcia U_g wszystkie elektrony z pasma przewodnictwa i wszystkie dziury z pasma walencyjnego mogą przenikać przez obszar bariery, tak jakby bariera nie istniała. Dla napięcia polaryzującego $U > U_g$ prąd płynący przez diodę wyraża się wzorem:

$$I_2 = (U - U_g) / R_p \quad (2)$$

gdzie R_p jest oporem podłoża.

Charakterystykę elektryczną diody w całym zakresie zmienności napięcia przy polaryzacji w kierunku przewodzenia diody (rys. 4) można podzielić na dwa obszary: obszar napięć mniejszych od napięcia granicznego U_g , oraz obszar napięć większych od U_g .



Rys. 4. Charakterystyka prąd-napięcie diody półprzewodnikowej.

W ćwiczeniu interesuje nas najbardziej liniowa część charakterystyki, położona z prawej strony wykresu, ponieważ przy jej pomocy można wyznaczyć napięcie graniczne U_g związane z wielkością przerwy energetycznej następującym wzorem:

$$U_g \cdot e = E_g \quad (3)$$

Na rysunku 4. pokazano jeden ze sposobów wyznaczenia napięcia U_g polegający na określeniu punktu przecięcia stycznej do prostoliniowej części charakterystyki z osią odciętych.

Podczas przepływu prądu przez diodę elektrony i dziury (elektrony z półprzewodnika typu „n” w kierunku bariery - dziury z obszaru półprzewodnika typu „p”) rekombinują w obszarze bariery.

Z aktem rekombinacji związana jest emisja fotonu. Im większe natężenie prądu płynącego przez diodę, tym więcej nośników rekombinuje i tym większe natężenie światła o długości fali

$$\lambda = hc / eU_g \quad (4)$$

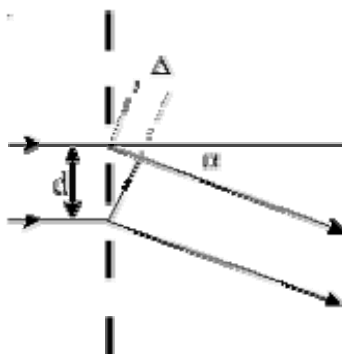
emitowanego ze złącza n-p.

Siatka dyfrakcyjna

Siatka dyfrakcyjna to przezroczysta (lub odbijająca falę) struktura zawierająca elementy uginające światło (inną falę) ułożone ściśle periodycznie. Przestrzenny okres tej struktury nazywa się stałą siatki. Zwykle siatka dyfrakcyjna dla światła widzialnego wykonana jest w postaci płytki szklanej lub kliszy z równoległymi rysami uginającymi światło.

Odległość między rysami jest równa stałej siatki. Jeśli na siatkę dyfrakcyjną pada wiązka światła, to dzięki zjawiskom dyfrakcji i interferencji po przejściu przez siatkę światło ulega ugięciu tworząc prążki dyfrakcyjne rzędu 1., 2. itd. Elementarna teoria interferencji pozwala na wyprowadzenie wzoru wiążącego kąty ugięcia prążków dyfrakcyjnych α z długością fali światła λ , rzędem ugięcia m , i stałą siatki d . Jeśli równoległa wiązka światła pada prostopadłe na siatkę to maksymalne wzmocnienie interferencyjne następuje w przypadku, gdy różnica dróg optycznych dwu fal wynosi $\Delta = m\lambda$; z prostych zależności trygonometrycznych (patrz rys.5) wynika $\Delta = d \cdot \sin \alpha$, a więc

$$d \cdot \sin \alpha = m\lambda \quad (5)$$



Rys.5. Ugięcie światła na siatce dyfrakcyjnej.

Jeśli znamy stałą siatki d możemy poprzez pomiar kąta ugięcia α wyznaczyć długość fali λ użytego światła, albo znając długość fali można poprzez pomiar kąta ugięcia α zmierzyć stałą siatki d ; nazywa się to cechowaniem siatki.

Pytania kontrolne

1. Uszereguj według długości fali od najmniejszej do największej następujące „barwy” światła: podczerwień, fiolet, żółta, zielona, nadfiolet, niebieska, czerwona, pomarańczowa.
2. Co to jest interferencja fali?
3. Co to jest stała siatki dyfrakcyjnej?
4. Wyprowadź wzór dla siatki dyfrakcyjnej.
5. Światło jakiej barwy po przejściu przez siatkę dyfrakcyjną ulegnie ugięciu o większy kąt: czerwone, czy zielone?
6. Dlaczego przy pomocy siatki dyfrakcyjnej o stałej siatki $< 0,4 \mu m$ nie można oglądać widma światła białego?
7. Sformułuj prawo Ohma. Czy dioda elektroluminescencyjna spełnia prawo Ohma?
8. Dlaczego woltomierz na schemacie rys. 6. powinien mieć opór znacznie większy niż opór diody elektroluminescencyjnej?
9. Podaj związek pomiędzy długością fali elektromagnetycznej a jej częstotliwością oraz wzór wiążący długość fali elektromagnetycznej z energią kwantu.
10. Wyprowadź wzór na stałą Plancka zawierający wielkości mierzone w doświadczeniu λ_g , U_g oraz stałe e i c .

Literatura

1. Podręcznik fizyki dla klasy III; WSiP, Warszawa 1998r.
2. Podręcznik fizyki dla klasy IV; WSiP, Warszawa 1998r.
3. Szczepan Szczeniowski; „Fizyka doświadczalna” cz.IV; optyka; str 311, PWN Warszawa, 1983r.
4. D.Halliday, R.Resnick; „Fizyka” t.II; optyka; str. 128, WNT, Warszawa 1983r.