



**ĆWICZENIE  
48**

**WYZNACZENIE STAŁEJ PLANCKA NA PODSTAWIE  
CHARAKTERYSTYKI DIODY ELEKTROLUMINESCENCYJNEJ**

**Cel ćwiczenia:** Wyznaczenie stałej Plancka na podstawie pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej diody elektroluminescencyjnej.

**Zagadnienia:** Stała Plancka, prawa promieniowania ciała doskonale czarnego, efekt fotoelektryczny, widmo fal elektromagnetycznych, półprzewodniki samoistne i domieszkowane, złącze p-n, dioda elektroluminescencyjna, charakterystyka prądowo-napięciowa diody elektroluminescencyjnej.

### 1. Wprowadzenie

Stała Plancka jest jedną z podstawowych stałych fizycznych, która pojawia się w matematycznym opisie mechaniki kwantowej, przedstawiającej zachowanie cząstek i fal w skali pojedynczych atomów. Stała Plancka została wprowadzona w roku 1900 przez Maxa Plancka, co pozwoliło mu na teoretyczną interpretację praw promieniowania cieplnego ciała doskonale czarnego. Wcześniejsze próby opisu promieniowania ciała doskonale czarnego doprowadziły do sformułowania prawa Rayleigha-Jeansa, w którym radiancja spektralna częstotliwościowa (moc wypromieniowywana przez jednostkę powierzchni na jednostkę częstotliwości) przyjmowała postać:

$$I = 2 \frac{k}{c^2} \nu^2 T, \quad (1)$$

gdzie  $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K jest stałą Boltzmanna,  $c = 299\,792\,458$  m/s prędkością światła w próżni,  $\nu$  jest częstotliwością emitowanej fali elektromagnetycznej, natomiast  $T$  oznacza temperaturę ciała doskonale czarnego. Prawo to nie opisywało jednak dobrze promieniowania w obszarze ultrafioletu (wysokich częstotliwości). Inną próbą opisu było drugie prawo Wiena:

$$I = C_1 \nu^3 \frac{1}{\exp(C_2 \frac{\nu}{T})}, \quad (2)$$

gdzie  $C_1$  i  $C_2$  były stałymi wyznaczanymi doświadczalnie. Z kolei to prawo nie sprawdzało się w obszarze niskich częstotliwości. Planck założył, że ścianki ciała doskonale czarnego emitują lub absorbują energię fali elektromagnetycznej w postaci kwantów (porcji) o energii proporcjonalnej do częstotliwości, a stała Plancka  $h$  jest współczynnikiem proporcjonalności. Wartość kwantu energii wynosi  $E = h\nu$  i jest związana z długością fali elektromagnetycznej zależnością  $\lambda = c/\nu$  (np. dla światła zielonego  $\lambda = 550$  nm). Przyjęcie kwantowej natury światła pozwoliło Planckowi na sformułowanie poprawnego prawa opisującego promieniowanie ciała doskonale czarnego:

$$I = 2 \frac{h}{c^2} \nu^3 \frac{1}{\exp(\frac{h\nu}{kT}) - 1}. \quad (3)$$

Wymiarem stałej Plancka jest iloczyn energii i czasu, a jej przybliżona wartość wynosi  $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s. Wartość stałej Plancka w 1916 roku wyznaczył z dużą dokładnością Robert A. Millikan, wykorzystując efekt fotoelektryczny. Polega on na emisji elektronów z materiału oświetlanego falą elektromagnetyczną, która absorbowana jest w postaci kwantów energii.

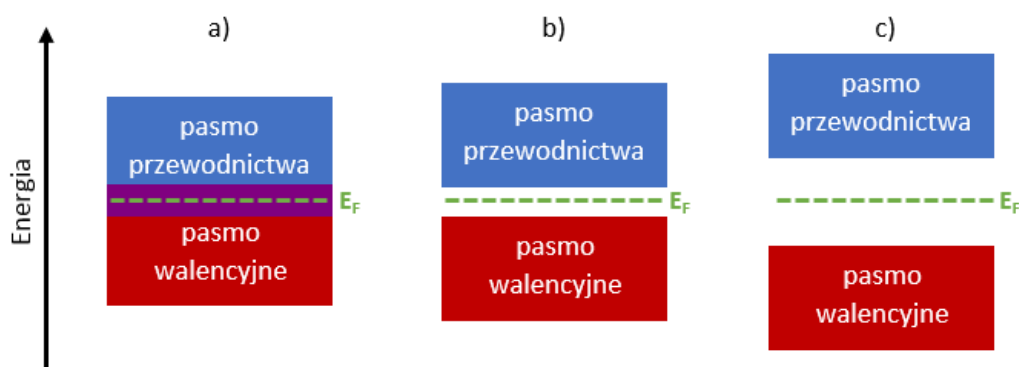
Zostają one wykorzystane na pracę wyjścia (potrzebną do opuszczenia materiału przez elektron) oraz na energię kinetyczną wyemitowanych elektronów. Energia tych elektronów zależy jedynie od energii zaabsorbowanych kwantów światła – nie wpływa na nią intensywność padającego promieniowania, która zwiększa jedynie liczbę emitowanych elektronów.

Wartość stałej Plancka w niniejszym ćwiczeniu wyznaczana jest na podstawie charakterystyki prądowo-napięciowej diody elektroluminescencyjnej (ang. *light-emitting diode*, LED), będącej urządzeniem półprzewodnikowym, emitującym promieniowanie elektromagnetyczne o określonej długości fali. Pierwsza dioda elektroluminescencyjna została zademonstrowana w 1961 roku przez Jamesa R. Biarda. Dioda ta emitowała w obszarze podczerwieni, zatem emisja nie była widoczna dla ludzkiego oka. Za powstanie pierwszej diody emitującej w zakresie widzialnym odpowiedzialny był Nick Holonyak, Jr. – w roku 1962 zaprezentował on czerwoną diodę elektroluminescencyjną. W 1972 roku M. George Craford wytworzył żółtą diodę elektroluminescencyjną, a w roku 1993 Shuji Nakamura zademonstrował diodę emitującą barwę niebieską, za co w roku 2014 został uhonorowany Nagrodą Nobla. Dostępność podstawowych barw pozwoliła na wytworzenie białych diod elektroluminescencyjnych. Najbardziej wydajnym, ale jednocześnie skomplikowanym i drogim rozwiązaniem, jest połączenie trzech diod: czerwonej, zielonej i niebieskiej. Częściej wykorzystywanym podejściem jest pokrycie diody luminoforem, który pobudzany jest do świecenia za pomocą diody emitującej na niebiesko lub w obszarze ultrafioletu.

Diody elektroluminescencyjne posiadają szereg zalet, w porównaniu z tradycyjnymi żarówkami. Są znacznie bardziej energooszczędne (mniejszy pobór prądu), charakteryzują się długim czasem pracy, mają dużą odporność mechaniczną, małe rozmiary oraz posiadają dużą wydajność (emitowana jest jedynie pożądana długość fali bez np. promieniowania w podczerwieni). Te cechy diod elektroluminescencyjnych powodują, że znajdują one wiele różnych zastosowań – na przykład:

- oświetlenie domowe i uliczne,
- sygnalizowanie stanu urządzeń elektronicznych,
- latarki,
- sygnalizacja uliczna,
- oświetlenie samochodowe,
- oświetlenie w medycynie (m.in. sondy, stomatologia),
- piloty zdalnego sterowania (diody podczerwone),
- wielkoformatowe wyświetlacze LED,
- podświetlenie w ekranach LCD.

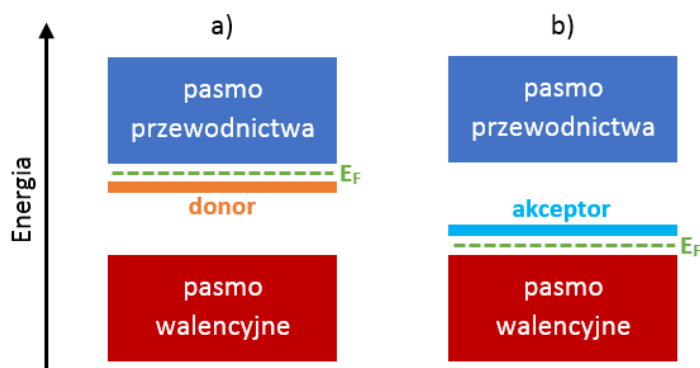
Rysunek 1 przedstawia schematycznie układ pasm dla metalu, półprzewodnika oraz izolatora.



**Rys. 1.** Schemat układu pasm w metalu (a), półprzewodniku (b) oraz izolatorze (c).

Pasmo walencyjne jest najwyższym pasmem wypełnionym elektronami, natomiast pasmo przewodnictwa jest zwykle puste. W przewodzeniu biorą udział jedynie elektrony znajdujące się w paśmie przewodnictwa. Metal charakteryzuje się przekryciem pasm walencyjnego i przewodnictwa, co powoduje, że zawsze dostępne są elektrony umożliwiające przewodzenie. W przypadku półprzewodnika oraz izolatora, między pasmem walencyjnym i przewodnictwa pojawia się przerwa energetyczna i bez wzbudzenia elektronów do pasma przewodnictwa, przewodzenie nie występuje. Różnicą między półprzewodnikiem i izolatorem jest jedynie umowna wartość przerwy energetycznej, która zwykle wynosi  $10^{-18} \text{ J} \approx 6 \text{ eV}$ . Materiały o większej wartości przerwy energetycznej traktowane są jako izolatory. Na rysunku 1 dodatkowo zaznaczony został poziom Fermiego, określający energię, poniżej której wszystkie stany są zajęte przez elektrony, a wszystkie stany wyższe są puste (w warunkach równowagi oraz w temperaturze zera bezwzględnego  $T = 0 \text{ K}$ ).

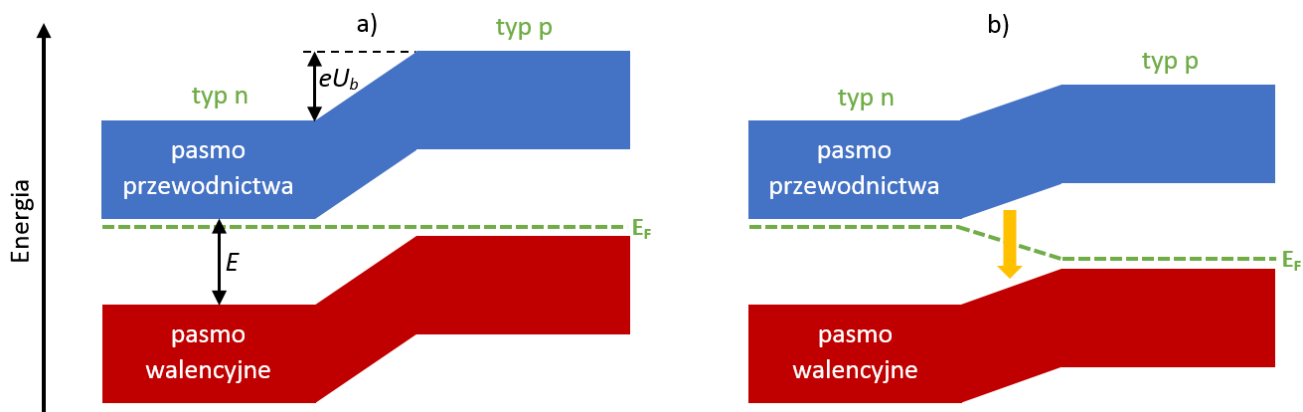
Półprzewodnik może być domieszkowany dodatkowymi atomami (np. GaAs domieszkowany atomami S), co pozwala na otrzymanie dwóch rodzajów półprzewodników: typu n (o przewodze elektronów) oraz typu p (o przewodze dziur). Dziurą nazywany jest brak jednego elektronu w paśmie wypełnionym elektronami i można ją traktować jako elektron o dodatnim ładunku. Wpływ domieszkowania na model pasmowy przedstawiony jest schematycznie na rys. 2.



**Rys. 2.** Schemat układu pasm dla półprzewodnika typu n (a) oraz typu p (b).

Domieszkowanie na typ n prowadzi do powstania poziomu donorowego w pobliżu pasma przewodnictwa, z kolei w półprzewodniku typu p pojawia się pusty poziom akceptorowy w sąsiedztwie pasma walencyjnego. Pojawieniu się dodatkowego poziomu donorowego lub akceptorowego, towarzyszy również przesunięcie poziomu Fermiego. Jeżeli połączymy ze sobą półprzewodnik typu n oraz typu p, to otrzymamy złącze p-n. Ponieważ poziom Fermiego dla takiej struktury musi być wspólny, prowadzi to do układu pasm ukazanego schematycznie na rys. 3 (dla uproszczenia pominięto zaznaczenie poziomów donorowego i akceptorowego).

Jeżeli złącze p-n zostanie spolaryzowane w kierunku przewodzenia za pomocą przyłożonego do struktury napięcia, to zakrzywienie pasm ulegnie zmniejszeniu, a dostarczane z zewnątrz elektrony i dziury będą rekombinowały w obszarze złącza, emitując promieniowanie o energii równej przerwie energetycznej półprzewodnika. Emisja fali elektromagnetycznej następuje w wyniku rekombinacji promienistej, którą można rozumieć jako połączenie elektronu i dziury, w trakcie którego nadmiar energii elektronu (z pasma przewodnictwa) jest wypromieniowany pod postacią kwantu promieniowania elektromagnetycznego (światła). Zwiększanie przyłożonego napięcia będzie powodowało obniżanie bariery potencjału, powodując wzrost liczby rekombinujących par elektron-dziura.



**Rys. 3.** Schemat złącza p-n przy braku polaryzacji (a) oraz przy polaryzacji w kierunku przewodzenia (b).

Na rysunku 3 oznaczone zostało również napięcie odpowiadające barierze potencjału  $U_b$ . Jeżeli przyłożone napięcie będzie z nim porównywalne, to pasma będą płaskie (brak bariery) i nastąpi wzmożona rekombinacja nośników, co spowoduje zwiększenie intensywności emisji promieniowania przez diodę. Zatem dobór odpowiedniego półprzewodnika pozwala na otrzymanie emisji z diody elektroluminescencyjnej o pożądanej energii (czyli długości fali).

Podczas rekombinacji promienistej w diodzie elektroluminescencyjnej, promieniowanie emitowane jest w postaci kwantów fali elektromagnetycznej (światła), zwanych fotonami. Jak wspomniano wcześniej, energia pojedynczego fotonu jest postaci

$$E = h\nu, \quad (4)$$

gdzie  $E$  odpowiada energii przerwy energetycznej półprzewodnika. Korzystając ze związku długości fali z częstotliwością promieniowania

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

otrzymujemy

$$E = h \frac{c}{\lambda}. \quad (6)$$

W diodach elektroluminescencyjnych oba obszary (typu n oraz typu p) są silnie domieszkowane, co oznacza, że poziom Fermiego znajduje się bardzo blisko pasma przewodnictwa (typ n) oraz pasma walencyjnego (typ p). Zgodnie ze schematem na rys. 3, możemy wówczas dokonać przybliżenia

$$eU_b \approx E. \quad (7)$$

Zatem

$$eU_b = h \frac{c}{\lambda} \quad (8)$$

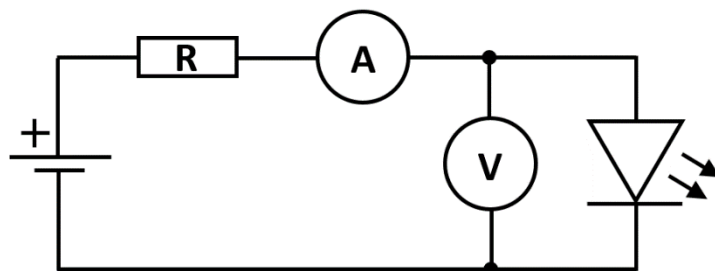
i końcowa zależność ma postać

$$h = \frac{e}{c} \lambda U_b. \quad (9)$$

Korzystając z powyższej relacji można obliczyć wartość stałej Plancka, wyznaczając wcześniej wartość napięcia  $U_b$  odpowiadającego barierze potencjału oraz długość fali  $\lambda$  promieniowania emitowanego przez diodę elektroluminescencyjną.

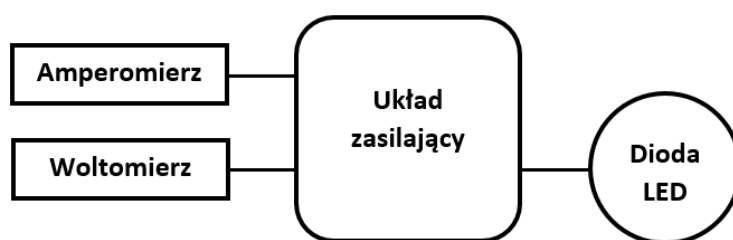
## 2. Zasada pomiaru i układ pomiarowy

W celu obliczenia stałej Plancka, konieczne jest wcześniejsze wyznaczenie napięcia  $U_b$  odpowiadającego barierze potencjału. Wartość tego napięcia otrzymywana jest na podstawie charakterystyki prądowo-napięciowej badanej diody. Do pomiaru charakterystyki w kierunku przewodzenia wykorzystywany jest układ przedstawiony na rys. 4.



**Rys. 4.** Schemat elektryczny układu do pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej diody elektroluminescencyjnej w kierunku przewodzenia.

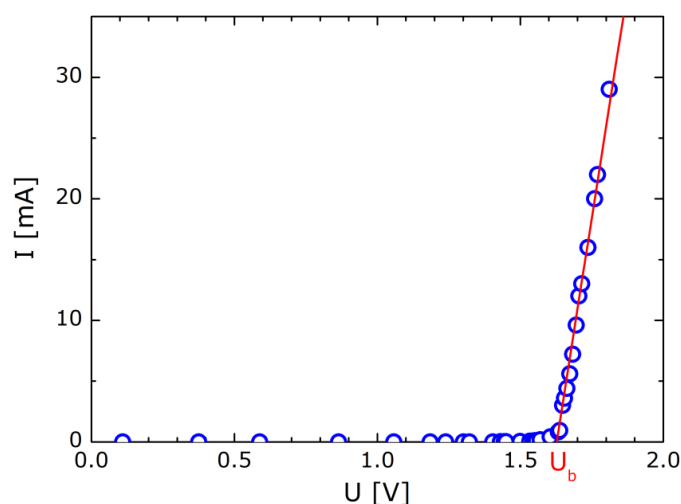
Jest to standardowy układ, pozwalający na pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych elementów elektronicznych charakteryzujących się małym oporem. Dioda elektroluminescencyjna spolaryzowana w kierunku przewodzenia (wówczas zachodzi emisja) jest właśnie takim elementem. Dodatkowy opornik zabezpiecza diodę przed nagłym wzrostem natężenia prądu (mogącym prowadzić do jej uszkodzenia) po przekroczeniu napięcia progowego emisji. Pomiar wykonywany jest na układzie, który został blokowo przedstawiony na rys. 5.



**Rys. 5.** Schemat blokowy układu do pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej diody elektroluminescencyjnej.

Układ zasilający zawiera w sobie źródło zasilania, opornik, potencjometr, pozwalający na płynną regulację napięcia, oraz przełącznik, który umożliwia pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej diody zarówno w kierunku przewodzenia, jak i w kierunku zaporowym. Do układu zasilającego podłączone są multimetry cyfrowe, pełniące rolę amperomierza i woltomierza, oraz badana dioda elektroluminescencyjna. Przy ustawieniu przełącznika na układzie zasilającym na kierunek przewodzenia, otrzymamy konfigurację przedstawioną na rys. 4. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej diody elektroluminescencyjnej polega na stopniowym zwiększaniu napięcia zasilającego i notowaniu spadku napięcia na diodzie oraz wartości natężenia płynącego przez nią prądu. Napięcie odpowiadające barierze potencjału wyznaczone jest poprzez ekstrapolowanie prostoliniowej części charakterystyki w kierunku przewodzenia do

przecięcia z osią napięcia. Przykład charakterystyki prądowo-napięciowej diody elektroluminescencyjnej, wraz z zaznaczoną wartością napięcia  $U_b$  odpowiadającego barierze potencjału, przedstawiony jest na rys. 6.



**Rys. 6.** Przykładowa charakterystyka prądowo-napięciowa diody elektroluminescencyjnej w kierunku przewodzenia.

Do wyznaczenia stałej Plancka konieczna jest również znajomość długości fali emitowanej przez diodę elektroluminescencyjną. W tym celu świecąca dioda umieszczana jest przed monochromatorem – urządzeniem rozszczepiającym światło i pozwalającym zmierzyć długość jego fali. Następnie za pomocą obrotu elementu dyspersyjnego (rozszczepiającego światło) wewnątrz monochromatora, szukane jest takie położenie, dla którego intensywność światła emitowanego przez diodę będzie największa na wyjściu monochromatora. Pomiar intensywności może być dokonany za pomocą oka lub detektora fotooporowego. Ponieważ monochromator jest odpowiednio wyskalowany (położenie elementu dyspersyjnego odpowiada konkretnym długościom fal), można odczytać długość fali emitowanej przez diodę elektroluminescencyjną.

### 3. a) Zadania do wykonania

- Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej diody elektroluminescencyjnej w kierunku przewodzenia.
- Pomiar długości fali promieniowania emitowanego przez diodę.
- Wyznaczenie napięcia odpowiadającego barierze potencjału z charakterystyki prądowo-napięciowej, z wykorzystaniem metody regresji liniowej.
- Wyznaczenie stałej Plancka na podstawie wykonanych pomiarów.
- Oszacowanie niepewności wyznaczonej wartości stałej Plancka.

### b) Opracowanie wyników pomiarów

Wyniki pomiarów, obliczeń oraz odpowiadające im niepewności należy zebrać w tabeli i na tej podstawie dokonać w sprawozdaniu rzetelnej analizy niepewności pomiarowych. Należy porównać otrzymany wynik (co do rzędu wielkości) z danymi tablicowymi oraz sformułować wnioski dotyczące przebiegu pomiarów.

**Szczegółowa instrukcja wykonania ćwiczenia oraz opracowania wyników została przedstawiona w instrukcji wykonawczej ćwiczenia.**

#### 4. Pytania:

- Scharakteryzuj widmo fal elektromagnetycznych.
- Przedstaw prawa promieniowania ciała doskonale czarnego.
- Jeżeli radiancja spektralna częstotliwościowa dana jest wzorem  $I = 2(k/c^2)v^2T$ , to jaka jest jednostka miary tej wielkości?
- Wymień przykładowe zastosowania diod elektroluminescencyjnych.
- Opisz model pasmowy metalu, półprzewodnika i izolatora oraz przedstaw znaczenie przerwy energetycznej.
- Jaki jest wpływ domieszkowania na pasmową strukturę energetyczną półprzewodników?
- Opisz powstanie bariery potencjału w niespolaryzowanym złączu p-n.
- Jak zmienia się wysokość bariery potencjału w złączu p-n spolaryzowanym w kierunku przewodzenia?
- Jak działa dioda elektroluminescencyjna?
- Od czego zależy długość fali promieniowania emitowanego przez diodę elektroluminescencyjną?
- Omów charakterystykę prądowo-napięciową diody elektroluminescencyjnej.
- Przedstaw sposób wyznaczenia stałej Plancka.
- Przedstaw metody szacowania niepewności wykorzystywane przy wyznaczaniu wartości stałej Plancka.

opracował Paweł Podemski