

E9. BADANIE ZJAWISKA TERMOEMISJI ELEKTRONÓW

opracowała Bożena Janowska-Dmoch

Zjawisko termicznej emisji elektronów polega na uwalnianiu elektronów z powierzchni nagrzanego ciała stałego lub ciekłego. Klasycznym przykładem termoemisji jest emisja elektronów z nagrzanego metalu. Jest ona wykorzystywana w lampach elektronowych oraz w wielu urządzeniach z żarzoną katodą.

W temperaturach wyższych od zera bezwzględnego (-273°C) każdy metal w sposób ciągły emituje elektrony. Liczba elektronów, oraz prędkość z jaką są emitowane, wzrasta silnie wraz ze wzrostem temperatury. Mechanizm termoemisji można wyjaśnić wykorzystując model gazu elektronowego. Model ten jest wielkim uproszczeniem rzeczywistości, ale w wielu przypadkach zdumiewająco dobrze opisuje właściwości metali.

Metale mają budowę polikrystaliczną, tzn. składają się z wielu małych kryształów o przypadkowej orientacji przestrzennej. Pewna liczba elektronów walencyjnych w sieci krystalicznej metalu jest wspólna dla wszystkich atomów i mogą się one swobodnie przemieszczać się w materiale z prędkościami zależnymi od temperatury. Poruszające się bezładnie elektrony zderzają się z dodatnimi jonami sieci krystalicznej. Elektron, który dociera do powierzchni metalu nie może go opuścić, ponieważ podlega działaniu silnie przyciągającej siły jonów. Gdy rośnie temperatura metalu elektrony poruszają się coraz szybciej. Niektóre z nich mogą uzyskać tak dużą prędkość, która pozwoli pokonać przyciąganie jonów i umożliwi ucieczkę z metalu. W temperaturze pokojowej liczba takich elektronów jest znikomo mała. W przypadku emisji elektronów z metalu do próżni strumień elektronów zaczyna być znaczący dopiero dla temperatur powyżej 1000 K. Najmniejsza energia, jaką musi posiadać elektron aby móc opuścić metal, jest nazywana **pracą wyjścia**. Wartość pracy wyjścia zależy od rodzaju materiału katody i czystości jego powierzchni.

Katody dawniejszych lamp elektronowych były wykonane z wolframu. Praca wyjścia elektronów z wolframu jest wysoka i wynosi 4,52 eV. Szereg metali ma mniejszą pracę wyjścia np. dla cezu wynosi ona tylko 1,6 eV. Przewagą wolframu jest wysoka temperatura topnienia. Włókno wolframowe pracuje w temperaturze około 3000 K. Inne metale szybciej ulegną stopieniu niż dadzą odpowiednią emisję.

Dodanie do wolframu niewielkiej ilości, ok. 1%, toru zmniejsza pracę wyjścia do 2,63 eV i temperaturę pracy do ok. 1700 K. Większość bezpośrednio żarzonych lamp ma katody torowane.

Jeszcze mniejszą pracą wyjścia, wynoszącą ok. 1,5 eV, charakteryzują się katody tlenkowe, bo powierzchnia metalu (najczęściej niklu) pokrytego tlenkiem baru, lub strontu, jest warstwą półprzewodnikową typu n, tzn. posiadającą nadmiar elektronów. Katody tlenkowe pracują w temperaturze ok. 1000 K.

Lampy elektronowe zostały już niemal całkowicie wyparte przez elementy półprzewodnikowe, ale niektóre typy lamp są nadal stosowane w generatorach i wzmacniaczach sygnałów o bardzo wysokiej częstotliwości lub dużej mocy.

Cel

Celem ćwiczenia jest zbadanie zjawiska termoemisji elektronów przez:

- wyznaczenie charakterystyki prądowo-napięciowej diody próżniowej z katodą tlenkową;
- zastosowanie wzoru Richardsona do wyznaczenia temperatury pracy katody tlenkowej;
- wyznaczenie napięcia kontaktowego;

- sprawdzenie wzoru Langmuira.

Wymagania

Przewodnictwo elektryczne metali: gęstość prądu, prędkość unoszenia. Prawo Ohma i prawa Kirchhoffa. Mikroskopowa postać prawa Ohma. Rodzaje emisji elektronowej, praca wyjścia elektronu z metalu. Zjawisko Richardсона. Budowa diody próżniowej, charakterystyka prądowo-napięciowa diody, wzór Langmuira, napięcie kontaktowe między anodą i katodą. Potencjał hamowania elektronów.

Literatura

A.J. Pointon, D. Elwell, Fizyka dla inżynierów, PWN
 C. Kittel, Wstęp do fizyki ciała stałego, PWN
 H. Ibach, H. Lüth, Fizyka ciała stałego, PWN
 K. Zboiński, Laboratorium z fizyki, Liber
 S. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, tom III, PWN

Opis układu

Dioda jest najprostszą lampą elektronową. W bańce szklanej (lub pojemniku metalowym), w której wytworzono wysoką próżnię, zatopione są dwie elektrody – katoda i anoda. Katoda pełni rolę emitera elektronów, zaś anoda służy do zbierania wyemitowanych przez katodę elektronów. Aby wywołać termoemisję katodę podgrzewa się elektrycznie. Katoda lampy może być żarzona bezpośrednio lub pośrednio. W katodach żarzonych bezpośrednio drucik katody rozżarza się po przepuszczeniu przez niego prądu elektrycznego. Katoda żarzona pośrednio jest metalową rurką, najczęściej pokrytą warstwą tlenku, podgrzewaną za pomocą umieszczonego wewnątrz i odizolowanego od niej grzejnika.

Liczbę elektronów emitowanych z metalu pod wpływem ciepła w jednostce czasu, przypadających na jednostkę powierzchni nazywamy gęstością prądu termoemisji. Gęstość tego prądu opisuje wzór Richardсона:

$$j_s = CT^2 \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) \quad (1)$$

gdzie C jest stałą zależną od rodzaju materiału i od geometrii emitującej powierzchni, T jest temperaturą metalu w skali Kelwina, W jest pracą wyjścia elektronów z metalu, k_B jest stałą Boltzmanna. Równanie to wskazuje na bardzo szybki wzrost gęstości prądu termoemisji wraz ze wzrostem temperatury.

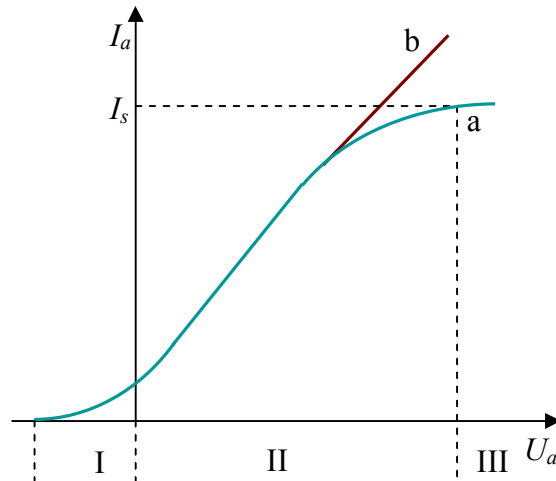
Pod nieobecność zewnętrznego pola elektrycznego w otoczeniu rozgrzanej katody tworzy się ładunek przestrzenny w postaci chmury elektronowej, która jest w stanie równowagi termodynamicznej z katodą. Elektrony są cały czas emitowane z katody, ale część elektronów jest zwracana z powrotem do katody przez dodatni potencjał katody względem chmury. Część elektronów, o odpowiednim kierunku i energii, dociera do anody i wówczas w obwodzie anodowym diody płynie niewielki prąd. Liczba elektronów w ładunku przestrzennym jest praktycznie stała w danej temperaturze.

Napięcie anodowe przyłożone do elektrod lampy ma ogromny wpływ na przebieg prądu anodowego. Zależność natężenia prądu termoemisji od napięcia między anodą i katodą nazywamy charakterystyką diody. Typowe kształty charakterystyk przedstawia rys.1.

Na charakterystyce diody można wyróżnić trzy obszary.

Obszar I, czyli prądu początkowego, obejmuje część krzywej dla ujemnych napięć anodowych. Ujemne napięcie hamuje elektrony i zwiększa barierę energetyczną, którą muszą pokonać emitowane z katody elektrony od wartości W dla $U_a = 0$ do $W' = W - eU_a$ dla $U_a < 0$.

Dla lamp z katodą tlenkową, w których anoda i katoda są wykonane z materiałów o różnej pracy wyjścia, między elektrodami pojawia się dodatkowa różnica potencjałów zwana, kontaktową różnicą potencjałów U_k



Rys.1 Charakterystyka prądowo-napięciowa diody: a) z katodą z czystego metalu, b) z katodą tlenkową

$$U_k = \frac{W_k - W_a}{e} \quad (2)$$

gdzie W_k jest pracą wyjścia elektronów z katody, zaś W_a jest pracą wyjścia elektronów z anody. Ponieważ $W_k < W_a$, to $U_k < 0$ i bariera energetyczna wzrasta $W' = W - e(U_a + U_k)$, bo rzeczywista wartość napięcia między anodą i katodą jest wtedy równa sumie napięcia przyłożonego U_a i napięcia kontaktowego U_k .

Natężenie prądu anodowego w tym obszarze opisuje równanie Richardsona:

$$I_a = j_a \cdot S = CT^2 S \exp\left(-\frac{W'}{k_B T}\right) = CT^2 S \exp\left(-\frac{W - e(U_a + U_k)}{k_B T}\right) = I_s \exp\left(\frac{eU_a}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{eU_k}{k_B T}\right) \quad (3)$$

gdzie S jest powierzchnią katody, C jest stałą materiałową, zaś $I_s = CT^2 S \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right)$ jest prądem nasycenia, a zarówno U_a , jak i U_k , są mniejsze od zera. Gdy napięcie anodowe $U_a = 0$, to natężenie prądu anodowego jest równe

$$I_a(0) = I_s \exp\left(\frac{eU_k}{k_B T}\right) \quad (4)$$

i wzór Richardsona można zapisać w postaci:

$$I_a = I_a(0) \exp\left(\frac{eU_a}{k_B T}\right) \quad (5)$$

W obszarze I, jak wynika ze wzoru Richardsona, natężenie prądu anodowego I_a narasta eksponencjalnie ze wzrostem napięcia anodowego.

Logarytmując równanie (4) otrzymujemy liniową funkcję napięcia anodowego U_a , czyli

$$\ln \frac{I_a}{I_a(0)} = \frac{e}{k_B T} U_a, \quad (6)$$

którą wykorzystamy do wyznaczenia temperatury katody.

W obszarze II natężenie prądu anodowego jest ograniczone ładunkiem przestrzennym. Gęstość objętościowa ładunku przestrzennego nie jest stała – im bliżej powierzchni katody tym większa jest gęstość elektronów w ładunku przestrzennym. Gdy napięcie $U_a > 0$ jest małe, to działa tylko na zewnętrzną warstwę ładunku o małej gęstości elektronów i prąd anodowy rośnie powoli. Zwiększenie napięcia powoduje przyspieszanie elektronów z coraz głębszych warstw ładunku przestrzennego i coraz więcej elektronów dociera do anody. Natężenie prądu anodowego w tym obszarze opisuje równanie Langmuira, zwane również prawem trzech drugich

$$I_a = C_p \cdot U_a^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

gdzie C_p jest zwane perweancją i jest stałą dla danej diody zależną od geometrii elektrod.

Zauważmy, że w tym obszarze natężenie prądu anodowego wzrasta potęgowo w miarę wzrostu napięcia anodowego. W większości zastosowań ten obszar jest zakresem, w którym pracują lampy elektronowe.

III obszar jest obszarem nasycenia. Przy pewnym napięciu wszystkie elektrony z ładunku przestrzennego są przyspieszane i zbierane przez anodę. Natężenie prądu anodowego przestaje wtedy wzrastać przy wzroście napięcia anodowego i osiąga wartość nasycenia I_s

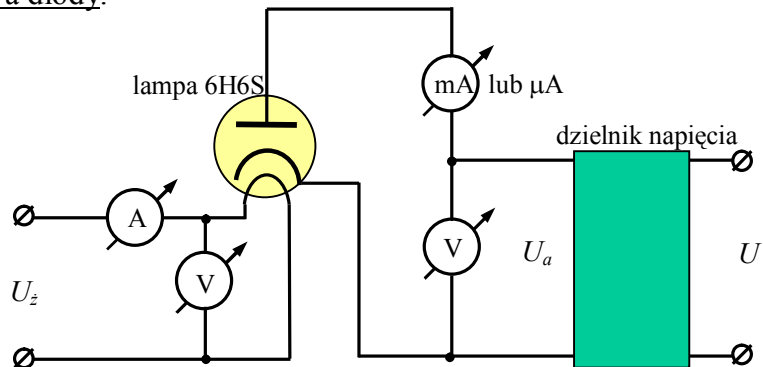
$$I_s = CT^2 S \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right). \quad (8)$$

Dalsze zwiększanie napięcia nie może zwiększyć prądu, bo katoda nie może wyemitować większej liczby elektronów (temperatura katody jest dla całej charakterystyki stała).

W lampach z katodą tlenkową nie osiąga się nasycenia prądu anodowego, ponieważ wypada ono dla bardzo dużych napięć niedopuszczalnych dla lampy.

Charakterystyka prądowo-napięciowa diody.

Układ pomiarowy przedstawiony jest na rys. 2. Lampa z katodą żarzoną pośrednio jest zasilana z dwóch zasilaczy. Zasilacz stabilizowany typu ZT-980-2M zasila obwód żarzenia napięciem U_z . Napięcie U z zasilacza stabilizowanego typu IZS 5/71 jest podane na wejście dzielnika napięcia. Napięcie wyjściowe dzielnika zasila obwód anodowy napięciem U_a .



Rys. 2 Schemat układu do badania diody

Do pomiaru natężenia prądu anodowego służą: miliamperomierz cyfrowy, gdy anoda jest na wyższym potencjale względem katody, lub mikroamperomierz zwierciadlany przy przeciwnej polaryzacji elektrod.

Napięcie żarzenia i napięcie anodowe mierzymy woltomierzami cyfrowymi o zakresie 40 V, a natężenie prądu żarzenia multimetrem na zakresie 10 A.

Wykonanie ćwiczenia

Wyniki wszystkich pomiarów muszą być zapisane w sprawozdaniu, opatrzone odpowiednimi jednostkami i podpisane przez asystenta.

Charakterystyka prądowo-napięciowa diody

Uwaga: napięcie zasilania włącza asystent.

- a) Wszystkie zakresy dzielnika napięcia ustawiamy na zero.
- b) Korzystając z płytki montażowej łączymy za pomocą kabli obwód diody według schematu na rys. 2. Do obwodu włączamy mikroamperomierz zwierciadlany. Napięcie zasilania U podajemy na dzielnik tak, aby anoda była zasilana z minusa zasilacza. Takie napięcie będzie hamowało uwolnione z katody elektrony. Ustawiamy zakres zasilacza IZS 5/7 na **20V**.
- c) Odaretowujemy mikroamperomierz i sprawdzamy czy przy zerowym napięciu zasilania i zimnej katodzie miernik wskazuje zero na różnych zakresach i pozostawiamy miernik na zakresie **20 μ A**.
- d) Po sprawdzeniu obwodu asystent włącza zasilacze i ustawia napięcie żarzenia na jedną wartość z zakresu **4,1 V ÷ 4,5 V**. Należy sprawdzić czy plamka mikroamperomierza wychyla się we właściwą stronę. Jeśli plamka wychyla się w lewo, to należy zmienić kolejność doprowadzeń prądu do miernika. Czekamy ok. 5 min. na ustalenie się temperatury katody. Zapisujemy wartości napięcia i natężenia prądu żarzenia.
- e) Gdy dzielnik jest ustawiony na zero wybieramy czulszy zakres mikroamperomierza czyli taki, aby plamka pozostała na ekranie poza połową skali. Notujemy wskazania mikroamperomierza i woltomierza anodowego. (Uwaga: zapisujemy ujemne wartości napięcia anodowego).
- f) Zmieniamy ustawienia dzielnika co jeden w zakresie napięć anodowych (0 ; - 0,25V), a następnie o tyle jednostek, aby prąd anodowy malał o jedną podziałkę. (Uwaga: pomiary kończymy, gdy I_a osiągnie minimum). Dla każdego ustawienia notujemy wskazania mikroamperomierza oraz woltomierza anodowego.
- g) Ustawiamy dzielnik napięcia na zero. Aretujemy mikroamperomierz i dokonujemy następujących zmian w **obwodzie anodowym**: zakres zasilacza ustawiamy na **100V**, zmieniamy miernik prądu anodowego na miliamperomierz i polaryzację zasilania tak, aby anoda była zasilana z plusa zasilacza.
- h) Odczytujemy i notujemy wskazania miliamperomierza zmieniając dzielnikiem napięcie anodowe co ok. 0,5V do ~10V. Pamiętajmy o zaznaczeniu w protokole **zakresów i klas przyrządów pomiarowych**.
- i) Skręcamy dzielnik napięcia do zera. Ustawiamy napięcie żarzenia na **6,3 V** i czekamy ok. 3 min. na ustalenie się temperatury katody. Zapisujemy nowe wartości napięcia i natężenia prądu żarzenia.
- j) Gdy dzielnik jest ustawiony na zero zmieniamy napięcie zasilania na **50 V** i napięcie zasilania podajemy na dzielnik tak, aby anoda była ponownie zasilana z **minusa** zasilacza. Do obwodu włączamy **mikroamperomierz** ustawiony zakres na **100 μ A**. Notujemy wskazania mikroamperomierza i woltomierza anodowego. (Uwaga: zapisujemy ujemne wartości napięcia anodowego).
- k) Dalsze pomiary prowadzimy tak, jak w punktach f), g) i h).

Propozycja zapisu wyników:

$$U_z = \dots\dots\dots I_z = \dots\dots\dots$$

$$\Delta U_z = \dots\dots\dots \Delta I_z = \dots\dots\dots$$

Napięcie anodowe U_a [jednostka] $\Delta U_a = \dots\dots$	Natężenie prądu I_a [jednostka] $\Delta I_a = \dots\dots$

gdzie ΔU_z , ΔI_z , ΔU_a i ΔI_a są błędami systematycznymi wynikającym z dokładności (klasy) przyrządów.

Opracowanie wyników

Charakterystyka prądowo-napięciowa diody

- a) Na jednym papierze milimetrowym sporządzamy charakterystyki prądowo-napięciowe diody, czyli wykresy $I_a(U_a)$, dla różnych warunków żarzenia (temperatur katody). W kilku punktach każdego z wykresów, szczególnie przy zmianie zakresów, zaznaczamy błędy ΔI_a i ΔU_a . Wykresy można sporządzać wykorzystując program komputerowy.

Sprawdzanie wzoru Richardsona

- b) Dla pomiarów przeprowadzonych przy napięciu **hamującym** ($U_a < 0$) obliczamy stosunki $\frac{I_a}{I_a(0)}$, gdzie $I_a(0)$ jest natężeniem prądu przy $U_a = 0$, oraz $\ln\left(\frac{I_a}{I_a(0)}\right)$. Sporządzamy

wykres odkładając na osi pionowej $\ln\left(\frac{I_a}{I_a(0)}\right)$ w funkcji napięcia anodowego U_a dla różnych warunków żarzenia.

- c) Metodą regresji liniowej wyznaczamy współczynniki a i b prostych najlepiej dopasowanych do punktów pomiarowych i ich niepewności Δa i Δb . Nanosimy te proste na wykres.

Temperaturę katody obliczamy z nachylenia prostej, bowiem jak wynika ze wzoru (5)

$$a = \frac{e}{kT} \quad \Rightarrow \quad T = \frac{e}{a \cdot k}$$

Niepewność pomiarową ΔT obliczamy metodą propagacji niepewności pomiarowych.

Wyznaczanie napięcia kontaktowego

- d) Wiedząc, że prąd nasycenia $I_s = 200$ mA ze wzoru (4) wyznaczamy napięcie kontaktowe.

Sprawdzanie wzoru Langmuira

e) Podnosząc obie strony wzoru Langmuira (7) do potęgi $\frac{2}{3}$ otrzymamy liniową zależność

opisaną równaniem: $I_a^{\frac{2}{3}} = C'_p \cdot U_a$, gdzie $C'_p = C_p^{\frac{2}{3}}$ jest nową stałą.

Dla dodatnich napięć anodowych ($U_a > 0$) obliczamy wartości I_a do potęgi $\frac{2}{3}$. Na

papierze milimetrowym sporządzamy wykres funkcji $I_a^{\frac{2}{3}}(U_a)$. Metodą regresji liniowej znajdujemy współczynniki prostych najlepiej dopasowanych do punktów pomiarowych, gdzie współczynnik nachylenia $a = C'_p$. Nanosimy te proste na wykres. Obliczamy również niepewności współczynników Δa i Δb .

f) Obliczamy perweancję diody, czyli $C_p = (C'_p)^{\frac{3}{2}} = a^{\frac{3}{2}}$. Niepewność pomiarową ΔC_p obliczamy metodą propagacji niepewności pomiarowych.

We wnioskach spróbujmy ocenić:

- czy, w zakresie ujemnych napięć, przeprowadzone pomiary potwierdzają eksponencjalną zależność prądu anodowego od napięcia (wzór Richardsona)?
- czy wyznaczony potencjał kontaktowy należy do przedziału (-0,5 V, -1,5 V), typowego dla diod z katodą tlenkową?
- czy, w zakresie dodatnich napięć, przeprowadzone pomiary potwierdzają prawo trzech drugich (wzór Langmuira)?