Ćwiczenie 38

BADANIE EFEKTU FOTOELEKTRYCZNEGO

38.1. Wiadomości ogólne

Efekt fotoelektryczny zewnętrzny polega na emisji elektronów z powierzchni ciał stałych pod wpływem padającego na nie promieniowania. Emitowane w tym procesie elektrony nazywamy fotoelektronami, a związany z nimi prąd elektryczny – fotoprądem.

Badając to zjawisko, zaobserwować można następujące prawidłowości:

— natężenie prądu jest proporcjonalne do natężenia oświetlenia powierzchni metalu (katody),
— dla każdego materiału istnieje pewna progowa częstotliwość padającego promieniowania, poniżej której efekt nie zachodzi,
— energia fotoelektronów jest proporcjonalna do częstotliwości padającego promieniowania, nie zależy natomiast od natężenia oświetlenia katody.

Zależności tych nie udało się wytłumaczyć, korzystając z istniejącego pod koniec XIX wieku klasycznego modelu falowego. Przewidywał on bowiem, że gdy natężenie padającego promieniowania rośnie, to amplituda i energia fali będzie również rosła, co spowoduje, że wybijane będą elektrony o coraz większej energii. Dopiero podane w 1900 roku przez Maksa Plancka założenia kwantowego modelu promieniowania, rozwinięte w 1905 roku przez Einsteina, pozwoliły opisać i zinterpretować efekt fotoelektryczny. Według modelu kwantowego:

— światło traktować można jako strumień kwantów energii (fotonów) o wartości $E_{fot} = h\nu$, gdzie ν jest częstotliwością padającego promieniowania, h – stałą Plancka ($h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Js),
— aby wyrwać elektron z powierzchni katody, należy dostarczyć mu odpowiednią, charakterystyczną dla danego metalu energię (pracę wyjścia W); jakakolwiek nadwyżka energii zostanie uniesiona przez elektron jako jego energia kinetyczna $E_{k\,max}$.

Zależność pomiędzy energią kinetyczną wybijanych elektronów a energią kwantu padającego promieniowania przedstawia wzór Einsteina

$$E_{fot} = h\nu = W + E_{k\,max} \,. \qquad (38.1)$$

Emitowane z katody elektrony docierają do anody i są rejestrowane jako prąd fotoelektryczny. Przyłożenie przeciwnego napięcia U_h pomiędzy anodę i katodę powoduje hamowanie ruchu elektronów i spadek wartości prądu fotoelektrycznego. Wartość energii E_{kmax} można wyznaczyć poprzez pomiar minimalnej wartości napięcia hamowania, które obniży wartość natężenia prądu fotoelektrycznego do zera. Relację pomiędzy energią kinetyczną elektronu i napięciem hamującym przedstawia równanie

$$E_{k\,max} = eU_h \,, \qquad (38.2)$$

a więc wzór Einsteina (38.1) można zapisać w postaci

$$h\nu = W + eU_h \,. \qquad (38.3)$$

38.2. Zadania

38.2.1. Zbadać zależność napięcia hamowania od względnego natężenia oświetlenia fotokatody.

38.2.2. Zbadać zależność napięcia hamowania od częstotliwości fal światła padającego na fotokatodę dla widma I i II rzędu.

38.2.3. Wykonać wykresy zależności $U_h = f(I_{wzg})$ i $U_h = f(\nu)$ wraz z niepewnościami pomiarowymi i wyznaczyć wartość stałej Plancka oraz pracy wyjścia W.

38.3. Zasada i przebieg pomiaru

Układ doświadczalny składa się z lampy rtęciowej, modułu pomiarowego umieszczonego na ruchomym statywie, woltomierza, siatki dyfrakcyjnej.

Światło lampy rtęciowej stanowi mieszaninę różnej długości fal z zakresu widzialnego i bliskiego ultrafioletu. Za pomocą siatki dyfrakcyjnej można otrzymać widmo promieniowania, w skład którego wchodzi 5 prążków interferencyjnych (prążek ultrafioletowy jest także widoczny na ekranie ponieważ ekran pokryty jest substancją fluoryzującą). Rozkład otrzymanych linii widmowych oraz odpowiadające im częstotliwości ν i długości fal światła λ zamieszczone są na planszy przy stanowisku pomiarowym. Przed przystąpieniem do wykonania ćwiczenia musimy odpowiednio przygotować układ pomiarowy.

1. Po włączeniu lampy rtęciowej, przesuwając siatkę dyfrakcyjną wzdłuż prętów podtrzymujących na obudowie lampy, zogniskować wstępnie wiązkę światła tak, aby obraz jednej z wybranych linii widmowych trafiał na szczelinę w białym ekranie modułu pomiarowego.
2. Odchylić czarny cylinder osłaniający okienko fotodiody w obudowie modułu pomiarowego (za białym ekranem) i obracając modułem ustawić go liniowo tak, aby światło przechodzące przez szczelinę w ekranie dawało ostry obraz szczeliny na widocznej w głębi okienka białej, cylindrycznej osłonie fotodiody. Po ustawieniu liniowości zamocować moduł pomiarowy, przykręcając go do podstawy.
3. W razie potrzeby skorygować ustawienie ostrości obrazu linii widmowej na osłonie fotodiody przesuwając odpowiednio siatkę dyfrakcyjną wzdłuż prętów podtrzymujących, a następnie przesłonić okienko fotodiody cylindrem osłaniającym.
4. Dołączyć woltomierz do odpowiednich zacisków OUTPUT na ściance modułu pomiarowego.
5. Przed pomiarem napięcia hamowania U_h nacisnąć przyciski PUSH TO ZERO na ściance modułu pomiarowego. Spowoduje to odprowadzenie ładunków z elektrod fotodiody i wstępne wyzerowanie układu. Po oświetleniu fotodiody, anoda i dołączone do niej elementy elektroniczne zaczynają się ładować ujemnie dzięki przepływowi prądu fotoelektrycznego. Kiedy różnica potencjałów między fotokatodą i anodą osiągnie wartość równą napięciu hamowania, natężenie fotoprądu spadnie do zera i napięcie ustabilizuje się. Tę ustaloną wartość napięcia między elektrodami fotodiody odczytujemy z woltomierza jako napięcie hamowania U_h.

38.3.1. Badanie zależności energii kinetycznej fotoelektronów od natężenia oświetlenia fotokatody

W pierwszej części ćwiczenia badamy zależność energii kinetycznej fotoelektronów od natężenia oświetlenia fotokatody. W tym celu należy:

1) ustawić moduł pomiarowy pod takim kątem, żeby jedna z wybranych linii widmowych oświetlała okienko fotodiody. Dla linii żółtej i zielonej należy dodatkowo wprowadzić odpowiednie filtry. Filtry te ograniczają wpływ linii widmowych wyższych rzędów, które mogą się nakładać na żółte i zielone linie niższych rzędów (rozkład linii widmowych na planszy). Filtry zaopatrzone są w uchwyty magnetyczne umożliwiające bezpośrednie ich mocowanie na powierzchni białego ekranu;
2) umieścić filtr o zmiennym współczynniku transmisji na szczelinie białego ekranu, korzystając z jego magnetycznego uchwytu. Jeżeli używany jest dodatkowy filtr żółty lub zielony, należy filtr o zmiennym współczynniku transmisji nałożyć na filtr barwny;
3) odczytać z woltomierza ustalone wartości napięcia hamowania U_h dla różnych pozycji filtra odpowiadających różnym wartościom współczynnika transmisji;
4) pomiary przeprowadzić dla co najmniej dwóch wybranych linii widmowych;
5) narysować wykresy przedstawiające zależność napięcia hamowania U_h od względnego natężenia oświetlenia fotokatody (współczynnika transmisji filtra) i podać ich interpretację.

38.3.2. Badanie zależności energii kinetycznej fotoelektronów od częstotliwości fal świetlnych padających na fotokatodę

W drugiej części ćwiczenia badamy zależność energii kinetycznej fotoelektronów od częstotliwości padających na fotokatodę fal świetlnych. W tym celu należy:

1) zmierzyć wartości napięcia hamowania U_h dla poszczególnych linii widmowych widma pierwszego rzędu. Dla linii żółtej i zielonej użyć odpowiednich filtrów;
2) odczytać z tabeli na stanowisku pomiarowym częstotliwości odpowiadające poszczególnym liniom widmowym;
3) powtórzyć pomiary dla linii widmowych drugiego rzędu;
4) narysować wykres przedstawiający zależność $U_h = f(\nu)$;
5) metodą najmniejszych kwadratów wyznaczyć wartość stałej Plancka h oraz pracy wyjścia W.

W celu wyznaczenia wartości stałej Plancka i pracy wyjścia W, równanie (38.3) przedstawiamy w postaci:

$$U_h = \frac{h\nu}{e} - \frac{W}{e} \qquad (38.4)$$

co, po podstawieniu $y = U_h$, $x = \nu$, $h/e = a$, $-W/e = b$ stanowi równanie linii prostej

$$y = ax + b\,. \qquad (38.5)$$

Parametry a i b prostej mogą być wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów (Wstęp, wzór (38))

$$a = \frac{\overline{xy} - \overline{x}\cdot\overline{y}}{\overline{x^2} - \left(\overline{x}\right)^2}\,, \qquad (38.6)$$

$$b = \overline{y} - a\,\overline{x}\,, \qquad (38.7)$$

gdzie: $\overline{xy} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\nu_i U_{hi}$, $\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\nu_i$, $\overline{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}U_{hi}$, $\overline{x^2} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\nu_i^2$,

n – liczba punktów pomiarowych.

Szukane wartości stałej Plancka h oraz pracy wyjścia W wyznaczamy z zależności

$$h = e\,a$$

oraz

$$W = -e\,b \text{ (w dżulach) lub } W = -b \text{ (w elektronowoltach)},$$

gdzie: e – ładunek elektronu.

38.4. Ocena niepewności pomiarów

Niepewność systematyczna pomiaru napięcia hamowania ΔU oceniamy na podstawie podziałki i klasy użytego woltomierza zgodnie ze wzorem (3) – Wstęp.

Niepewność standardową pomiaru stałej Plancka h oraz pracy wyjścia W oceniamy metodą najmniejszych kwadratów (Wstęp, wzór (39)):

$$u(a) = \sqrt{\frac{1}{n-2}\cdot\left(\frac{\overline{y^2} - a\overline{xy} - b\overline{y}}{\overline{x^2} - \left(\overline{x}\right)^2}\right)}\,, \qquad (38.8)$$

$$u(b) = u(a)\,\sqrt{\overline{x^2}}$$

skąd

$$u(h) = e\,u(a)$$

oraz $\quad u(W) = e\,u(b)$ (w dżulach)

lub $\quad u(W) = u(b)$ (w elektronowoltach), $\qquad (38.9)$

gdzie: $\overline{y^2} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} U_{hi}^2$,

e – ładunek elektronu,

n – liczba punktów pomiarowych.

Literatura

[1] Szczeniowski Sz.: Fizyka doświadczalna, cz. V. Warszawa: PWN 1974.

[2] Jaworski B., Dietłaf A.: Kurs fizyki, t. 3.