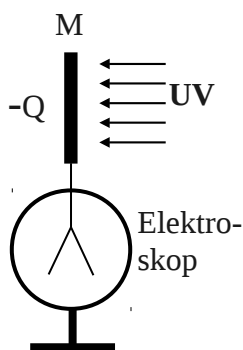


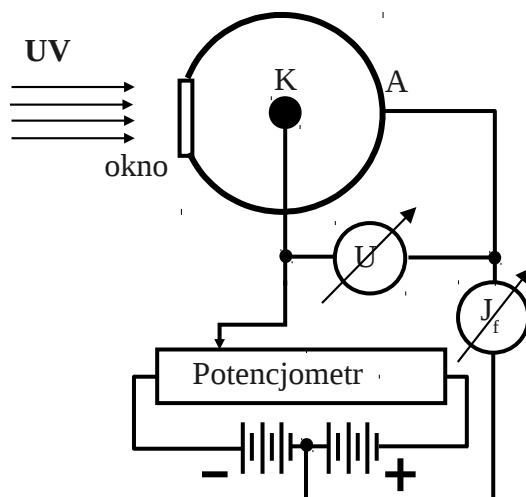
# BADANIE ZJAWISKA FOTOELEKTRYCZNEGO 69

## I WYZNACZANIE STAŁEJ PLANCKA

Zjawisko fotoemisji elektronów z metali, jest jednym z doświadczalnych fundamentów mechaniki kwantowej. Efekt został odkryty przez H. Hertza w r. 1887, przy okazji badań nad generacją i detekcją fal elektromagnetycznych (Hertz jako pierwszy wytworzył i znalazł sposób detekcji fal elektromagnetycznych, których istnienie przewidywała teoria Maxwella). Gdy na kulki dipola odbiorczego takich fal padało dodatkowo promieniowanie ultrafioletowe (UV), czułość detektora fal zwiększała się. Dalsze badania wykazały, że pod wpływem promieniowania UV naładowana ujemnie płyta metalowa ulega rozładowaniu (patrz Rys. 1), podczas gdy płyta naładowana dodatnio, nie reaguje na promieniowanie. Oznacza to, że w tym zjawisku metal mogą opuścić tylko ładunki ujemne. Pomiary wartości stosunku ładunku do masy emitowanych cząstek, (czyli ich  $Q/m$ ) wykazały, że cząstkami tymi są elektrony. Dalsze badania fotoemisji elektronów z metali prowadzono wykorzystując fotokomórki próżniowe zawierające dwie elektrody: katodę K i anodę A. Najkorzystniejsza okazała się taka konfiguracja elektrod, przy której mała kulista katoda była otoczona sferyczną anodą z oknem, przez które przechodziło promieniowanie oświetlające katodę (Rys. 2). Sferyczna geometria fotokomórki umożliwia wszystkim elektronom startującym z centralnie położonej katody K, ruch w kierunku anody wzdłuż linii sił radialnego pola elektrycznego pomiędzy tymi elektrodami.



Rys. 1 Najprostszy układ do wykazania fotoemisji elektronów z metalu M.



Rys. 2. Układ do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych

Następnie przebadano zależność natężenia fotoprądu  $J_f$  od napięcia pomiędzy fotokatodą i anodą (charakterystyki prądowo – napięciowe), dla różnych natężeń światła. Przykład takich charakterystyk pokazano na Rys. 3. Przy dodatnim potencjale anody ( $+U$ ) natężenie fotoprądu  $J_f$  jest prawie stałe, ale zależy od natężenia padającego światła  $E$ . Natomiast, gdy anoda jest spolaryzowana ujemnie ( $-U$ ), natężenie fotoprądu maleje i spada do zera, gdy napięcie osiąga pewną krytyczną wartość  $U_H$ , zwaną napięciem odcięcia.

Stwierdzono ponadto, że:

1. wartość  $U_H$  zależy liniowo od częstości drgań  $\nu$  fali świetlnej.
2. wartość  $U_H$  nie zależy od natężenia padającego światła.
3. dla danego metalu istnieje graniczna, minimalna częstość światła  $\nu_{gr}$ , poniżej której fotoemisja elektronów nie występuje.
4. emisja elektronów zachodzi w czasie krótszym od  $10^{-9}$  s.

Opisanych wyżej faktów nie dało się wytłumaczyć w ramach falowej teorii światła obowiązującej w fizyce klasycznej i należało szukać nowego podejścia do mechanizmu oddziaływania światła z powierzchnią metalu. Wyjaśnienie mechanizmu zjawiska fotoelektrycznego zawdzięczamy Einsteinowi (za prace nad tym zjawiskiem otrzymał on w 1921 nagrodę Nobla z fizyki). Założył on, że światło w oddziaływaniu z elektronami metalu zachowuje się jak cząstka – foton, a nie jak fala. Energia fotonu  $\epsilon_{fot}$ , czyli kwantu promieniowania elektromagnetycznego, wynosi zgodnie z hipotezą Plancka  $\epsilon_{fot} = h\nu$ , gdzie  **$h$  jest stałą Plancka**<sup>1</sup>,  $\nu$  częstością drgań elektromagnetycznych. Foton w zderzeniu z elektronem przekazuje mu całą swoją energię.

**Bilans energii** w tym zjawisku ma postać:

$$\epsilon_{fot} = h\nu = \frac{1}{2}mv_{max}^2 + \Phi \quad (1)$$

gdzie  $\frac{1}{2}mv_{max}^2$  jest maksymalną wartością energii kinetycznej elektronu wychodzącego na zewnątrz, a  $\Phi$  jest tzw. pracą wyjścia elektronu z metalu.  $\Phi$  to dodatkowa energia, którą musimy dostarczyć elektronowi, aby mógł pokonać siły elektryczne utrzymujące go wewnątrz metalu. Widzimy więc, że w modelu Einsteina część energii którą niesie padający foton zostaje zużyta na pokonanie pracy wyjścia elektronu z metalu, a pozostała część przekazana elektronowi w postaci energii kinetycznej. Nie wszystkie elektrony opuszczają metal z maksymalną energią kinetyczną. Fotony mogą bowiem wnikać także pod powierzchnię metalu i tam przekazywać swoją energię. Elektrony, które uzyskały energię od fotonów w warstwach głębszych, stracą w zderzeniach po drodze do powierzchni część uzyskanej energii kinetycznej. Dlatego emitowane fotoelektrony nie są monoenergetyczne, lecz ich widmo energii tworzy węższe, lub szersze pasmo, w zależności od energii wzbudzających fotonów. Wysokoenergetyczna krawędź pasma spełnia równanie (1).

Aby zmierzyć prędkość i energię kinetyczną emitowanych elektronów wykorzystujemy metodę pola hamującego. Wiadomo, że elektron rozpędzany różnicą potencjałów (napięciem)  $U$ , uzyskuje energię kinetyczną

$$\epsilon_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = eU \quad (2)$$

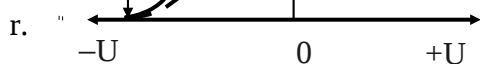
gdzie  $e$  jest ładunkiem elementarnym (ładunkiem elektronu)<sup>2</sup>. I odwrotnie, wzbudzone promieniowaniem fotoelektrony, posiadające energię kinetyczną różną od zera, możemy wyhamować polem elektrycznym o kierunku przeciwnym niż przy rozpędzaniu. Zwiększając natężenie pola hamującego zmniejszamy ilość elektronów dochodzących z fotokatody do anody. Realizujemy to poprzez zwiększanie napięcia pomiędzy tymi elektrodami. W rezultacie otrzymujemy charakterystykę prądowo – napięciową taką, jak pokazano na Rys. 3.

Przy pewnej krytycznej wartości napięcia  $U_H$  (napięcie odcięcia) przyłożonego pomiędzy fotokatodą i anodą, wszystkie fotoelektrony zostaną zahamowane i nie dotrą do anody, zaś wartość fotoprądu spadnie do zera. Wtedy spełniona będzie równość

$$eU_H = \frac{1}{2}mv_{max}^2 \quad (3)$$

<sup>1</sup> Aktualnie przyjmuje się, że wartość stałej Plancka wynosi  $h = 6,6260755 \times 10^{-34}$  J s (dżul × sekunda)

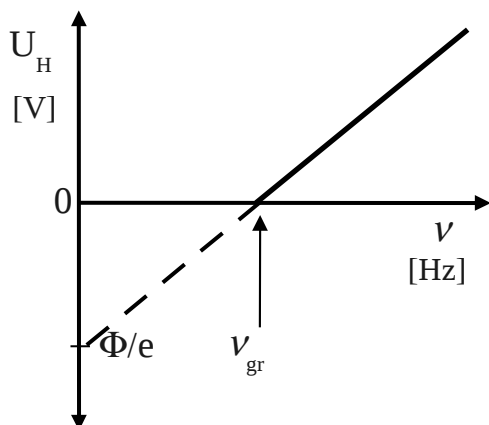
<sup>2</sup> Wartość ładunku elektronu wynosi w przybliżeniu  $e = 1,60 \times 10^{-19}$  C



Rys. 3. Charakterystyki prądowo – napięciowe fotokomórki  
 $E_1 < E_2$  – natężenia światła

Oczywiście w zależności od energii fotonów zmierzone wartości  $U_H$  powinny być różne: im większa energia fotonów, tym większe będzie napięcie odcięcia. Zmierzone wartości  $U_H$  dla różnych wartości  $h\nu$  podstawimy do równania (1) i otrzymamy:

$$eU_H = h\nu - \Phi, \text{ lub } U_H = \frac{h}{e}\nu - \frac{\Phi}{e} \quad (4)$$



Rys. 4. Wykres zależności napięcia odcięcia  $U_H$  od częstotliwości  $\nu$  fali.

Wykresem zależności napięcia odcięcia  $U_H$  od częstotliwości drgań promieniowania  $\nu$  jest prosta, pokazana na Rys. 4. Współczynnik kierunkowy tej prostej jest równy  $h/e$ , zaś punkt przecięcia ekstrapolowanego odcinka prostej z osią rzędnych (dla  $h\nu = 0$ ) wyznacza wartość  $\Phi/e$ .

Jak widać z Rys. 4. fotony o częstotliwościach mniejszych od wartości oznaczonej jako  $\nu_{gr}$  nie powodują zjawiska fotoemisji, zaś z równania (4) wynika, że wtedy  $h\nu_{gr} = \Phi$ .

Zatem, na podstawie pomiarów zależności wartości napięcia odcięcia  $U_H$  od energii fotonów, możemy wyznaczyć zarówno wartość stałej Plancka  $h$ , jak i pracy wyjścia elektronów z fotokatody. Opisaną metodę wykorzystamy w niniejszym ćwiczeniu.

### Metoda pomiarowa

Dokładne pomiary stałej Plancka wymagają użycia specjalistycznej aparatury. Głównym jej elementem powinna być specjalna fotokomórka o geometrii sferycznej, z fotokatodą wykonaną z czystego metalu, zaś ciśnienie gazów resztkowych wewnątrz bańki nie powinno przekraczać  $10^{-7}$  paskala. Jest to urządzenie drogie, wymagające częstego poprawiania próżni wewnątrz fotokomórki. Drugim istotnym urządzeniem jest monochromator, który powinien zapewnić precyzyjne określenie częstotliwości fal świetlnych, padających na fotokatodę.

Wartość  $h$  zmierzono wielokrotnie z bardzo wysoką precyzją (do ósmego miejsca po przecinku), stosując opisaną wyżej metodę, a także innymi metodami, wykorzystując fakt, że stała Plancka występuje w opisie szeregu innych zjawisk kwantowych, m.in. krótkofalowej granicy widma ciągłego promieniowania rentgenowskiego. Mniej dokładne pomiary zapoznające z teorią fotoefektu i z metodami pomiaru, można zrealizować także w pracowni studenckiej. Poniżej przedstawiamy prosty zestaw aparaturowy, umożliwiający poznanie podstawowych praw zjawiska fotoelektrycznego i wyznaczenie przybliżonej wartości stałej Plancka  $h$ .

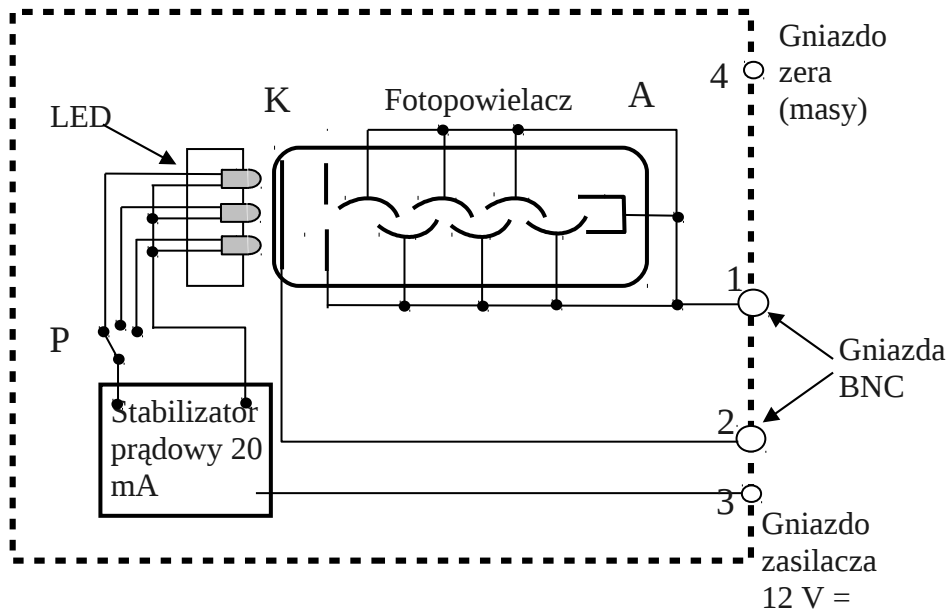
1. Zamiast specjalnej fotokomórki o geometrii sferycznej wykorzystamy łatwo dostępny w handlu fotopowielacz<sup>3</sup> z fotokatodą SbCs i połączonymi ze sobą pozostałymi elektrodami. Te połączone elektrody spełniają rolę anody fotokomórki. Geometria układu fotokatoda – anoda niestety nie jest sferyczna, w przybliżeniu może być uznana za płasko – równoległą. Dodatkowo należy uwzględnić fakt, że w wyniku technologii wytwarzania fotopowielaczy fotoczułe są również elektrody połączone w charakterze anody. Fotoprąd z anody może pojawić się przy napięciach hamujących elektrony z katody i wpłynąć na wartość napięcia odcięcia. Problem taki istnieje także w przypadku stosowania innych, nie specjalnych fotokomórek.

2. Jako źródła światła o różnych energiach fotonów wykorzystamy diody elektroluminescencyjne, które emitują nie wąskie linie, lecz nieco szersze pasma.

<sup>3</sup> Fotopowielacz jest bardzo czułym detektorem światła, szeroko stosowanym w pomiarach. Oprócz fotoemisji elektronów wykorzystuje zjawisko wtórnej emisji elektronów z tzw. dynod, dzięki czemu prąd fotokatody może być wzmocniony nawet milion razy.

## Aparatura

W światłoszczelnej, metalowej obudowie umieszczono fotopowielacz, 6 diod elektroluminescencyjnych, które można włączać kolejno poprzez przełącznik P, oraz stabilizator prądu przewodzenia diod. Uproszczony schemat urządzenia pokazano na Rys. 5. Łączymy go przy pomocy przewodów z miernikiem natężenia fotoprądu, miernikiem napięcia hamowania i z regulowanym zasilaczem napięcia hamującego elektrony. Schemat połączeń pokazano na Rys. 6. Połączenia fotokatody i anody realizujemy przewodami ekranowanymi, wykorzystując fakt, że wyprowadzono je poprzez gniazda koncentryczne typu BNC. Jest to konieczne ze względu na dużą czułość miernika fotoprądu i jego wrażliwość na zewnętrzne pola elektryczne



Rys. 5. Uproszczony schemat urządzenia pomiarowego: Linia przerywana oznacza obudowę przyrządu. LED – diody elektroluminescencyjne, K – fotokatoda powielacza elektronowego, A – wspólna anoda