

## BADANIE EFEKTU FOTOELEKTRYCZNEGO ZEWNĘTRZNEGO

### 1. Podstawy fizyczne

Efekt fotoelektryczny zewnętrzny jest jednym ze sposobów oddziaływania fali elektromagnetycznej, a więc i światła z materią. Zjawisko to polega na wybijaniu elektronów z powierzchni metalu przez padającą wiązkę światła o odpowiedniej częstotliwości.

Badanie tego zjawiska odegrało wielką rolę w procesie poznawania praw fizyki rządzących mikroświatem i znacznie przyczyniło się do powstania na początku XX w. fizyki kwantowej.

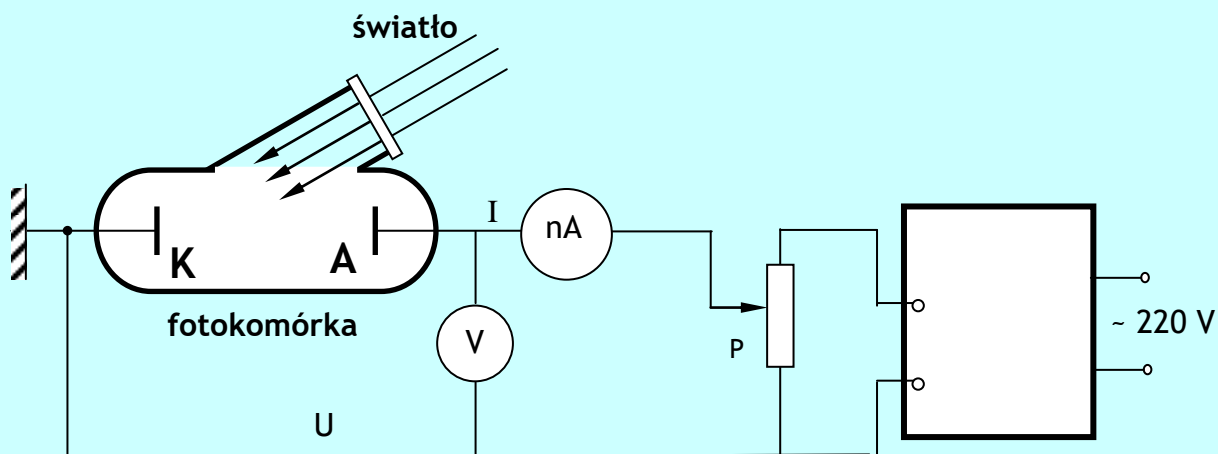
W 1887 r. H.G.Hertz, a w 1899 r. P.Leonard jako pierwsi wykazali, że promieniowanie świetlne powoduje emisję elektronów z metali i od tej pory zjawisko to - zwane później efektem fotoelektrycznym zewnętrznym - było szczegółowo badane nie tylko z powodu zastosowań, ale głównie z uwagi na jego cechy, których nie można było wytłumaczyć na gruncie fizyki klasycznej. Próby wyjaśnienia tego zjawiska wymagały zrewidowania poglądów na naturę światła traktowanego wyłącznie jako fala elektromagnetyczna.

Zadaniem niniejszego ćwiczenia jest zapoznanie studentów z podstawowymi własnościami efektu fotoelektrycznego, oraz wyznaczenie stałej Plancka, niezwykle ważnej wielkości w fizyce kwantowej.

#### 1.1 Opis zjawiska fotoelektrycznego

Jeden z prostszych sposobów badania zjawiska fotoelektrycznego opiera się na wykorzystaniu fotokomórki, czyli próżniowej bańki szklanej z dwoma elektrodami. Jedna z elektrod jest cienką warstwą metalu zwana czasami fotokatodą, natomiast druga elektroda zwana elektrodą zbierającą, lub anoda może mieć kształt cienkiego pierścienia z drutu.

Schemat układu pomiarowego do badania efektu fotoelektrycznego przedstawiony jest na rysunku 1.

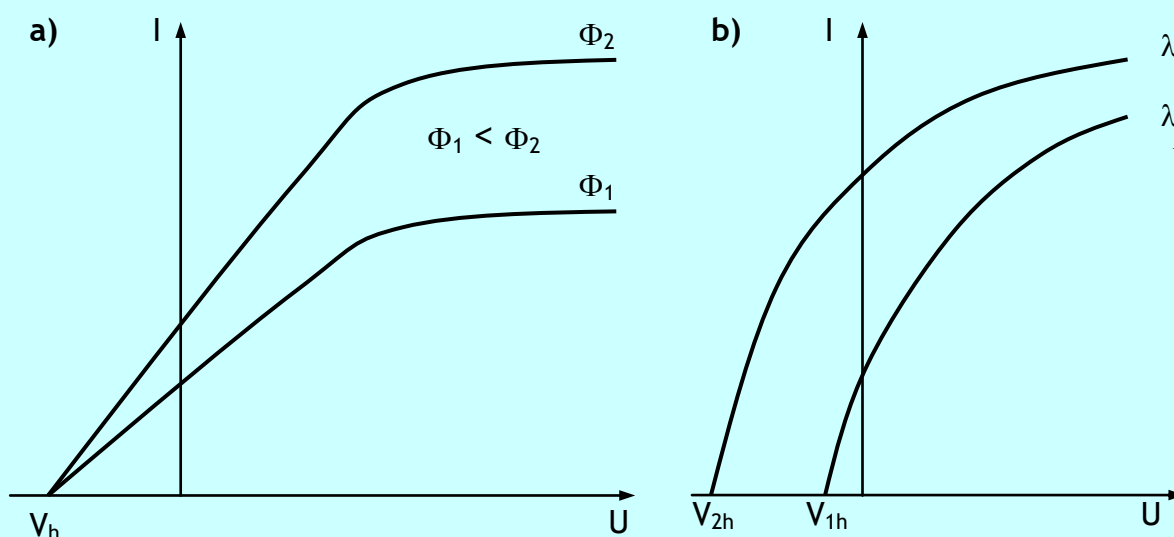


Rys. 1 Schemat układu pomiarowego do badania efektu fotoelektrycznego gdzie:  
K- katoda, A - anoda, P - potencjometr, U - napięcie mierzone woltomierzem V,  
I - natężenie prądu mierzone nanoamperomierzem nA.

Szkló fotokomórki FK powinno swobodnie przepuszczać światło (w zakresie widzialnym i nadfioletem), którego natężenie oraz częstotliwość może być zmieniana. Obwód elektryczny pozwala na przyłożenie między elektrody napięcia U regulowanego za pomocą potencjometru P, oraz na mierzenie natężenia prądu I przepływającego między nimi.

Po przyłożeniu do anody potencjału dodatniego względem fotokatody i przy braku oświetlenia fotokatody nie obserwuje się przepływu prądu. Pojawia się on natychmiast gdy oświetlimy fotokatodę światłem o dostatecznie dużej częstotliwości. Zwiększając dodatni potencjał anody obserwuje się początkowo liniowe narastanie natężenia prądu, ale od pewnej wartości napięcia  $U$  osiąga się stan nasycenia i natężenie prądu nie ulega już zmianie.

Jeśli przy tych samych warunkach oświetlenia fotokatody zmienimy polaryzację potencjału na anodzie na ujemną, to idąc od zerowej wartości napięcia aż do coraz bardziej ujemnych, obserwuje się praktycznie liniowy zanik natężenia prądu, tak że przy pewnej charakterystycznej wartości  $V_h$  zwanej **potencjałem hamowania** będzie ono równe zero (rys.2a). Powtarzając taką charakterystykę prądowo - napięciową przy większym natężeniu światła ( $\Phi_2 > \Phi_1$ ) zaobserwujemy szybszy wzrost natężenia prądu w miarę wzrostu napięcia między anodą a katodą oraz wzrost natężenia prądu nasycenia, lecz nie zaobserwujemy zmiany potencjału hamowania. Można wykonać też innego typu pomiary w których utrzymywane jest stałe natężenie światła  $\Phi$ , a zmienna jego częstotliwość przy pewnym dodatnim potencjale anody (rys.2b). Wtedy okazuje się, że w miarę obniżania częstotliwości prąd fotoelektryczny maleje, aby zniknąć przy pewnej wartości charakterystycznej dla danego materiału fotokatody. Ta charakterystyczna częstotliwość, to tak zwana **częstotliwość progowa**  $\nu_0$ . Odpowiadająca jej długość fali zwana jest progową długością fali  $\lambda_0$  ( $\lambda = c/\nu_0$ ). Dla światła o długości fali większej niż  $\lambda_0$  (częstotliwości mniejszej niż  $\nu_0$ ) elektrony nie są emitowane.



**Rys. 2** Charakterystyki prądowo-napięciowe fotokomórki:

a) dla dwóch różnych natężeń światła  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$  (gdzie  $V_h$  jest potencjałem hamującym)

b) dla dwóch różnych długości fal padających na fotokatodę.

Część energii, którą wybity z fotokatody elektron otrzymał od światła musi zostać zużyta na wykonanie tzw. pracy wyjścia  $W$ , a reszta może zamienić się w energię kinetyczną. Maksymalna energia kinetyczna  $E_{\max}$  jest równa pracy pola elektrycznego (między anodą i katodą) potrzebnej do całkowitego zahamowania elektronu w fotokomórce, a więc:

$$E_{\max} = eV_h$$

(1)

gdzie  $e$  oznacza ładunek elektronu.

Podsumowując wyniki badań możemy wyróżnić trzy zasadnicze cechy efektu fotoelektrycznego:

1. **Potencjał hamujący**, a co zatem idzie maksymalna energia kinetyczna fotoelektronów  $E_{\max}$ . **nie zależy od natężenia światła**. Patrz rys.2a i równanie (1).
2. Dla każdej fotokatody istnieje charakterystyczna częstotliwość graniczna  $\nu_0$  (zależna od materiału fotokatody). Dla częstotliwości mniejszych od  $\nu_0$  efekt fotoelektryczny **nie występuje**, niezależnie od tego jak silne jest natężenie światła.
3. Ponadto nie występuje **opóźnienie** w czasie pomiędzy padaniem światła na fotokatodę a pojawieniem się fotoprądu nawet dla małych natężeń światła.

### 1.2 Interpretacja efektu fotoelektrycznego

Próba zinterpretowania efektu fotoelektrycznego na gruncie falowej teorii światła nie jest możliwa, gdyż według tej teorii **energia fali zależy od natężenia światła (czyli od kwadratu amplitudy fali)**. W tej sytuacji nie jest zrozumiała niezależność maksymalnej energii kinetycznej fotoelektronów od natężenia światła, jak również występowanie częstotliwości granicznej, gdyż dla dostatecznie dużego natężenia światła efekt fotoelektryczny powinien zawsze wystąpić. Podobnie niezrozumiałą (z punktu widzenia teorii falowej) jest brak mierzalnego opóźnienia w czasie między padaniem światła na powierzchnię fotokatody a emisją fotoelektronu, gdyż wydaje się, że elektron powinien przez pewien czas magazynować energię z wiązki światła dopóki nie zbierze dostatecznej ilości potrzebnej do wyrwania się z materiału.

Zgodną z wynikami eksperymentalnymi interpretację zjawiska fotoelektrycznego podał dopiero w roku 1905 A. Einstein proponując tzw. **fotonową teorię zjawiska fotoelektrycznego**. Według tej teorii należy traktować światło jak strumień cząstek (**fotonów**). Każdy foton posiada energię  $h\nu$ , gdzie  $h$  - stała Plancka,  $\nu$  - częstotliwość światła. Przy takim założeniu efekt fotoelektryczny jest zjawiskiem zderzenia dwóch cząstek: fotonu z elektronem uwięzionym w metalu. Dla takiego zderzenia Einstein napisał zasadę zachowania energii w postaci:

$$h\nu = W + E_{\max}$$

(2)

gdzie  $h\nu$  - jest **energiami fotonu** padającego na fotokatodę,  $W$  - **pracą wyjścia**, natomiast  $E_{\max}$  - jest **maksymalną energią kinetyczną elektronu** jaką może on uzyskać po wyrwaniu się z fotokatody. W większości przypadków na skutek strat wewnątrz metalu, będzie on miał energię mniejszą od  $E_{\max}$ .

Korpuskularna teoria światła jest w stanie wytłumaczyć wszystkie zasadnicze cechy zjawiska fotoelektrycznego. A więc:

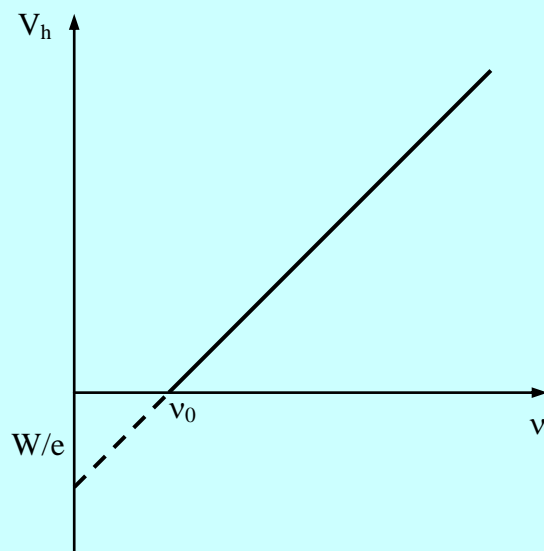
1. **Niezależność  $E_{\max}$  od natężenia światła** wynika z tego, że zwiększając natężenie zwiększamy tylko liczbę fotonów a nie ich energię, natomiast energia  $E_{\max}$  zależy tylko od energii pojedynczego fotonu  $h\nu$  (równanie (2)).
2. **Istnienie częstości granicznej** wynika natomiast z faktu, że najmniejsza energia fotonu potrzebna do wywołania efektu fotoelektrycznego musi być co najmniej równa pracy wyjścia, czyli  $h\nu_0 \geq W$  a fotony o mniejszej energii nie są w stanie wybić elektronu z danego materiału.
3. **Brak opóźnienia w czasie** wynika natomiast z teorii fotonowej, ponieważ potrzebna energia jest dostarczona w postaci skończonych porcji.

Jeśli przepiszemy równanie (2) podstawiając za  $E_{\max}$  wielkość  $eV_h$  z równania (1) to po uporządkowaniu otrzymamy:

$$V_h = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e}$$

(3)

Tak więc teoria Einsteina przewiduje liniowy związek między potencjałem hamowania  $V_h$  a częstotliwością padającego światła  $\nu$  co jest całkowicie zgodne z doświadczeniem (rys.3).



**Rys. 3. Zależność potencjału hamowania  $V_h$  od częstotliwości  $\nu$  padającego światła. ( $\nu_0$  jest częstotliwością graniczną charakterystyczną dla konkretnego materiału fotokatody a  $W$  - pracą wyjścia).**

Prosta  $y = bx + a$  gdzie  $y = V_h$ ,  $x = \nu$ ,  $b = \frac{h}{e}$ ,  $a = \frac{W}{e}$  przedstawiona na rys.3 pozwala przy znajomości ładunku elementarnego  $e$  wyznaczyć ze współczynnika nachylenia  $b$  - wartość stałej Plancka  $h$ , a ze współczynnika  $a$  - pracę wyjścia  $W$ . Właśnie wyznaczenie stałej Plancka jest jednym z celów tego ćwiczenia.

### 1.3. Dualizm korpuskularno - falowy

Sukces teorii korpuskularnej światła w wytłumaczeniu zjawiska fotoelektrycznego rodzi fundamentalne pytanie, **czym jest światło: falą, czy też strumieniem cząstek - fotonów?** Wiemy, że światło, jak każda fala ulega dyfrakcji i interferencji, a z drugiej strony takie zjawiska jak efekt fotoelektryczny, efekt Comptona czy też efekt tworzenia par elektron - pozyton potwierdzają teorię korpuskularną. W tej sytuacji należy przyjąć, że światło posiada cechy zarówno falowe jak i korpuskularne, a jego natura jest złożeniem tych cech powodując, że w pewnych warunkach zachowuje się ono jak fala, a w innych jak cząstka (foton) o energii  $E = h\nu$  i pędzie  $p = h/\lambda$ .

Podobnie dwoistą naturę mają cząsteczki materialne, o czy mówi teoria de Broglie'a, w myśl której cząstce o pędzie  $p$  należy przypisać pewną falę o długości  $\lambda = h/p$ , gdzie  $h$  - stała Plancka. Słuszność tej hipotezy potwierdziły doświadczenia, w których pokazano, że cząstki materialne (np. elektrony) mogą ulegać dyfrakcji, a więc zachowują się jak fala.

W ostatnich latach dzięki zbudowaniu źródeł światła o bardzo dużej energii (lasery o bardzo dużej mocy) okazało się, że efekt fotoelektryczny z użyciem takiego światła nie może być ściśle opisany przez równanie (2). Jest to spowodowane możliwością wystąpienia reakcji wielofotonowych. Innymi słowy, przy tak dużej gęstości fotonów pojawia się możliwość jednoczesnego oddziaływania elektronu z wieloma fotonami i absorbowanie ich energii.

## 2. Opis ćwiczenia

Układ pomiarowy, którego zasada działania została przedstawiona na rys.1, składa się z fotokomórki, monochromatora i źródła światła białego lub zestawu diod LED, potencjometru pozwalającego zmieniać napięcie zasilacza jak i jego polaryzację, oraz mierników napięcia i natężenia prądu. Monochromator lub diody LED pozwalają oświetlać fotokomórkę światłem o znanej długości  $\lambda$ .

### 3. Wykonanie ćwiczenia

Sposób wykonania ćwiczenia zależy od stanowiska, na którym jest realizowane. Szczegółowe informacje dotyczące sposobu wykonania pomiarów są zawarte na tabliczce przy stanowisku laboratoryjnym.

### 4. Opracowanie wyników

1. Korzystając z metody najmniejszych kwadratów obliczyć nachylenie prostej przedstawiającej zależność  $V_h$  od  $\nu$  (wzór 3). Ze współczynnika kierunkowego prostej oraz jego niepewności obliczyć stałą Plancka oraz niepewność tej stałej. Podobnie ze znajomości współczynnika a oszacować pracę wyjścia oraz niepewność tej wartości. **UWAGA - Skorzystać z programu Origin!**
2. Wykreślić na papierze milimetrowym na jednym wykresie obie charakterystyki prądowo - napięciowe. W sprawozdaniu zawrzeć opis tych zależności - wytłumaczyć ich przebiegi.
3. Obliczyć niepewności rozszerzone wyznaczonych wartości i prawidłowo zapisać wyniki.
4. Porównać otrzymaną wartość stałej  $h$  z wielkością tablicową i przedstawić własną ocenę tej metody wyznaczania stałej Plancka.

Tablicowe wartości niektórych stałych fizycznych:

$$c = 299792458 \text{ m/s} \quad e = 1,60217733 \times 10^{-19} \text{ C} \quad h = 6,6260755 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

### 5. Literatura

1. D. Halliday i R. Resnick; „Fizyka” t.II W - wa, PWN 1984 (lub nowsze), rozdz. 49-4
2. H.A. Enge, M.R.Wehr i J.A. Richards; „Wstęp do fizyki atomowej”, W - wa, PWN 1983, rozdz. 3 - 11.
3. A. Piekara; „Elektryczność materia i promieniowanie” W - wa, PWN 1986, rozdz. 1C.
4. H. Szydłowski; „Pracownia fizyczna” W - wa, PWN 1980, str.515
5. E.H. Wichman; „Fizyka kwantowa“ W - wa, PWN 1973, str.46