



INSTYTUT PROBLEMÓW JĄDROWYCH

im. Andrzeja Sołtana

DZIAŁ SZKOLENIA I DORADZTWA

sekretariat: tel. 0 22 718 0612, fax 0 22 779 3481, e-mail: dsid@ipj.gov.pl •
prof. dr hab. Ludwik Dobrzyński e-mail: ludwik@ipj.gov.pl •
mgr Ewa Droste e-mail: droste@ipj.gov.pl • mgr inż. Łukasz Adamowski e-mail: l.adamowski@ipj.gov.pl •
Robert Wołkiewicz e-mail: r.wolkiewicz@ipj.gov.pl

ĆWICZENIE	LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ
17	Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne
Data pomiaru:	
Imię i nazwisko studenta/ ucznia:	
Wydział, kierunek, rok studiów/ Szkoła:	

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest potwierdzenie równania Einsteina opisującego zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne oraz pomiar wartości stałej Plancka h .

2. UKŁAD DOŚWIADCZALNY

Aparatura używana w ćwiczeniu składa się ze źródła światła nadfioletowego i widzialnego, jakim jest lampa rtęciowa, oraz fotokomórki. Katoda fotokomórki wykonana jest z siarczku ołowiu (PbS), zaś okienko wykonane ze szkła kwarcowego, które przepuszcza nadfiolet. Katoda i anoda fotokomórki połączone są z woltomierzem przez wtórnik o dużym oporze wejściowym. Ma to zapobiec przepływowi prądu w obwodzie fotokomórki, który zafałszowałby pomiar. Schemat ideowy układu przedstawiony jest na rys. 1, natomiast faktyczny wygląd przyrządów przedstawia rys. 2.

3. WSTĘP TEORETYCZNY

1. Zjawisko emisji elektronów pod wpływem światła

W ośrodkach materialnych takich jak metale znajdują się elektrony nie związane z konkretnymi atomami. Są to tak zwane elektrony przewodnictwa, bowiem to ich ruch jest przepływem prądu elektrycznego w danym materiale. Są one jednak związane z przewodnikiem jako całością i nie opuszczają go w sposób dowolny.

Aby elektron mógł być wyemitowany z takiego przewodnika potrzebuje odpowiednio dużej energii. Energia ta może być dostarczona przez padające na powierzchnię przewodnika światło.

Jeśli oświetloną metalową elektrodę umieścimy w komorze próżniowej w sąsiedztwie innej elektrody, to elektrony wylatujące z oświetlonej elektrody będą dolatywały do tej drugiej powodując przepływ prądu. W ten sposób działają fotokomórki. Elektrodę, która jest oświetlana, nazywamy fotokatodą, zaś tę, do której trafiają elektrony – anodą. Zwykle działanie fotokomórki wymaga podłączenia do fotokatody i anody napięcia, które będzie wymuszało ruch elektronów w odpowiednim kierunku, a ze zmianą natężenia światła zmienia się natężenie prądu (czyli liczba elektronów przelatujących pomiędzy elektrodami w jednostce czasu).

Jeśli nie poda się zewnętrznego napięcia do fotokomórki, to można zaobserwować, że na jej zaciskach pojawia się różnica potencjałów. Wynika to z tego, że elektrony wylatujące z fotokatody docierając do anody ładują ją ładunkiem elektrycznym ujemnym. W tym samym czasie katoda ładuje się ładunkiem dodatnim i pomiędzy nimi pojawia się pole elektryczne hamujące następne elektrony. W chwili, gdy energia pola elektrostatycznego zrównoważy energię elektronów wylatujących z fotokatody, sytuacja stabilizuje się i napięcie pomiędzy katodą a anodą już się nie zmienia.

2. Próby wytłumaczenia zjawiska fotoelektrycznego.

Ponieważ światło jest falą elektromagnetyczną nasuwa się podejrzenie, że fala taka wprawiając elektrony w metalu w ruch oscylacyjny może powodować ich rozprędkenie do prędkości pozwalających na opuszczenie materiału. W takim wypadku ilość elektronów i ich energia zależałyby od natężenia fali. „Silniejsza” fala powodowałaby emisję elektronów szybciej i o większych prędkościach (czyli także większych energiach kinetycznych) niż fala „słabsza”. Doświadczenia pokazują jednak, że tak nie jest. Zjawisko fotoelektryczne nie zależy od natężenia fali i dodatkowo jest natychmiastowe (czyli emisja elektronów następuje od razu po podziałaniu światłem na fotokatodę, a nie z pewnym opóźnieniem pozwalającym na odpowiednie przyspieszenie elektronów zmiennym polem elektrycznym fali). Co więcej, istnieje granica długości fali padającego światła, powyżej której efekt fotoelektryczny nie występuje. Teoria klasyczna, oparta na równaniach Maxwella, miała trudności z wyjaśnieniem tych obserwacji.

W 1905 r. Albert Einstein zaproponował rozwiązanie, które opierało się na założeniu, że światło nie jest falą, tylko cząstką. W jego pojęciu cząstki światła (czyli fotony) zderzałyby się z elektronami i przekazywałyby im swoją energię w sposób natychmiastowy. Zależność energii fotonu od jego częstotliwości Einstein opisał jako:

$$E_f = h\nu \quad (1)$$

gdzie E_f to energia fotonu, ν to częstotliwość światła, a h to stała Plancka (jedna z uniwersalnych stałych przyrody).

Dodatkowo Einstein założył, że część energii padającego fotonu zostaje przez elektron zużyta na wydostawanie się z materiału przewodnika. Jest to tak zwana *praca wyjścia* i jej wielkość jest charakterystyczna dla poszczególnych materiałów. Pozostała część energii zostaje przekształcona w energię kinetyczną elektronu. Z zasady zachowania energii można zapisać to w postaci równania:

$$h\nu = W + E_k \quad (2)$$

gdzie $h\nu$ to energia fotonu, W to praca wyjścia, a E_k to energia kinetyczna elektronu. W stanie ustalonym, gdy różnica potencjałów pomiędzy elektrodami hamuje ruch wybijanych elektronów, można napisać kolejne równanie:

$$E_k = eU \quad (3)$$

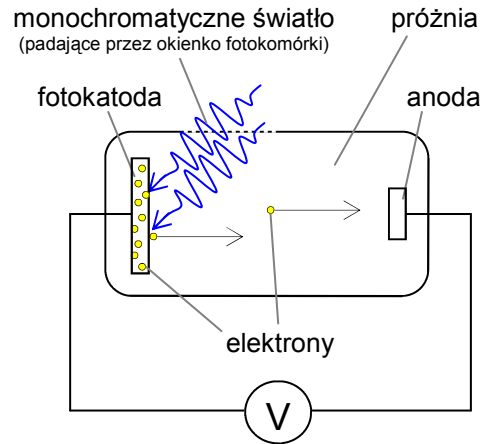
gdzie E_k to energia kinetyczna elektronu, e to ładunek elektronu ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C), a U to powstająca na elektrodach fotokomórki różnica potencjałów. Oznacza to, że cała energia kinetyczna elektronu zostaje zużyta na pokonanie energii pola elektrycznego.

Z połączenia wzorów (2) i (3) po przekształceniach można otrzymać wzór opisujący zależność napięcia od częstotliwości padającej fali:

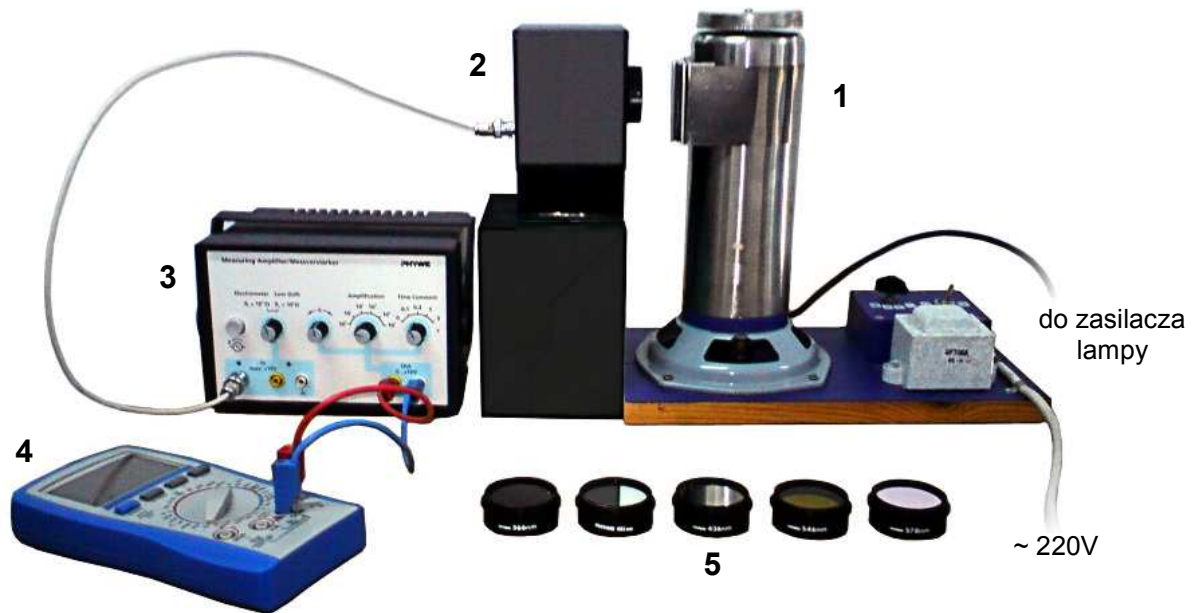
$$U = \frac{h}{e} \cdot \nu - \frac{W}{e} \quad (4)$$

3. Historyczne znaczenie wyjaśnienia efektu fotoelektrycznego.

Stała h została wprowadzona w 1900 roku przez Maxa Plancka w celu wyjaśnienia emisji promieniowania przez tzw. *ciało doskonale czarne* (tj. takie, które nie odbija żadnego promieniowania elektromagnetycznego). Założył on, że emisja promieniowania może odbywać się tylko porcjami o określonej energii (czyli kwantami), a nie w sposób ciągły. Stanowiło to zerwanie ze stosunkowo dobrze potwierdzoną teorią klasyczną, jednak dawało dużo lepszą niż ona zgodność z eksperymentami.



Rys. 1. Schemat idealny aparatury do badania efektu fotoelektrycznego



Rys. 1. Aparatura do badania efektu fotoelektrycznego
(1 - lampa rtęciowa, 2 - fotokomórka, 3 - wzmacniacz, 4 - woltomierz, 5 - filtry interferencyjne)

Stała Plancka pojawiła się później w einsteinowskim wyjaśnieniu efektu fotoelektrycznego, choć nie od razu podana była wprost. Jeszcze później okazała się być jednym z kluczowych czynników w tak zwanej *stałej Rydberga* opisującej długość fali światła emitowanego przez wzbudzone atomy oraz pojawiła się w wyjaśnieniu eksperymentu Francka-Hertza, polegającym właśnie na wzbudzaniu atomów. Oba te zjawiska połączył w 1913 r. model atomu Nielsa Bohra, który opisując ruch elektronów po orbitach w atomie również użył stałej Plancka. Powiązanie energii fotonów z ich częstotliwością poprzez stałą h występuje dziś powszechnie i jest sprawdzalne również na podstawie innych eksperymentów (np. obserwacji efektu Comptona), ale to właśnie zjawisko fotoelektryczne było pierwszym z doświadczeń, które pozwoliło na precyzyjne zmierzenie jej wartości. Dokonał tego sceptyczny wobec koncepcji Einsteina Robert Millikan, który m.in. za wytrwałość w tych badaniach został uhonorowany nagrodą Nobla w 1923 r. Sam Albert Einstein za wyjaśnienie efektu fotoelektrycznego otrzymał nagrodę Nobla w roku 1921. Duża zgodność tego wyjaśnienia teoretycznego z wynikami pomiarów oraz jego prostota przekonały naukowców, że fizyka kwantowa ma rację bytu mimo sprzeczności formalnej z podejściem klasycznym.

Współcześnie zjawiska fotoelektryczne (zewnętrzne i wewnętrzne) wykorzystuje się powszechnie w technice, np. w ogniwach fotowoltaicznych, w fotokomórkach, w cyfrowych kamerach i aparatach fotograficznych itp.



METODA NAJMNIEJSZYCH KWADRATÓW

Statystyczna metoda najmniejszych kwadratów pozwala obliczyć parametry a i b prostej:

$$y = ax + b$$

Jeżeli niepewnością pomiarową obciążone są wartości tylko jednej zmiennej (x lub y) i niepewności są równe dla wszystkich punktów pomiarowych, wtedy obliczenia dokonujemy według poniższych wzorów:

$$\bar{a} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$\bar{b} = \frac{\sum y_i - \bar{a} \sum x_i}{n}$$

gdzie n - liczba pomiarów, wszystkie sumy liczone są w granicach od $i = 1$ do $i = n$.

Niepewności wyznaczenia współczynników a i b dane są zależnościami:

$$S_a = \sqrt{\frac{n S_y}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}$$

$$S_b = S_a \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}}$$

gdzie:

$$S_y = \frac{1}{n-2} \sum (y_i - ax_i - b)^2$$

4. PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

A) Włączyć wentylator lampy rtęciowej i ustawić pokrętelem jego obroty na wartość maksymalną.

B) Włączyć lampę rtęciową przyciskiem na jej zasilaczu. Nagrzewanie się lampy do normalnej temperatury pracy trwa około 15 minut. **Uwaga! Podczas pracy lampy nie należy dotykać jej metalowych części, ponieważ grozi to poparzeniem! Nie wolno także patrzeć w okienko lampy, gdyż grozi to czasową bądź trwałą ślepotą!** Zaleca się stosowanie okularów podczas wykonywania ćwiczenia. Nie muszą to być okulary przeciwsłoneczne (nawet zwykłe szkło zatrzymuje promieniowanie ultrafioletowe, które jest najbardziej szkodliwe), jednak takie pozwolą ograniczyć intensywność światła wpadającego do oczu.

C) Połączyć pozostałe elementy zestawu laboratoryjnego wedle załączonej ilustracji (rys. 2).

D) Sprawdzić ustawienia wzmacniacza sygnału z fotokomórki:

- Pokrętko wyboru trybu pracy: „Electrometer $R_e \geq 10^{13} \Omega$ ”.
- Wzmocnienie: „Amplification” = „10⁰” = 1 (napięcie na wejściu nie będzie wzmacniane, wzmacniacz będzie pracował w charakterze wtórnika).
- Stała czasowa: „Time Constant” = „0,1 s”.

Sprawdzić ustawienia woltomierza:

- Skala pomiaru: „2V”.
- Rodzaj prądu: „DC” = prąd stały.

E) Włączyć zasilanie wzmacniacza (przyciskiem z tyłu obudowy) i woltomierza.

F) Nałożyć filtr interferencyjny o wybranej długości fali na okienko fotokomórki.

G) Przystawić fotokomórkę do lampy i otworzyć przesłonę okienka.

H) Sprawdzić poprawność wyznaczenia napięcia odniesienia („zerowego”). W tym celu przytrzymać na wzmacniaczu przycisk zwierający styki wejściowe oznaczony „0” i regulując pokrętelem „0” otrzymać na woltomierzu wartość 0 V, po czym puścić przycisk.

I) Na skutek niedoskonałości budowy układu pomiarowego mierzone napięcie zależy m.in. od intensywności i miejsca padania światła. By zminimalizować wpływ tego zjawiska należy przesuwając delikatnie przesłonę okienka ustawić ją w pozycji, gdzie napięcie jest największe. Uzyskaną wartość zapisać w tabeli 2a wraz z długością fali filtra. Oszacować niepewności pomiarowe obu zapisywanych wielkości.

J) Zamknąć przesłonę okienka i zmienić filtr interferencyjny na fotokomórce. Powtórzyć powyższy pomiar dla wszystkich dostępnych filtrów i ich wyniki zapisać w tabeli 2a.

K) Wykonać jeszcze kilka serii pomiarowych ze wszystkimi filtrami w celu przekonania się, czy wyniki nie zależą od czynników zewnętrznych. Przedyskutować, jakie to mogą być czynniki. Wyniki kolejnych serii zapisywać w tabelach 2b, 2c itd.

L) Po dokonaniu wszystkich pomiarów wyłączyć woltomierz i wzmacniacz/wtórnik. Wyłączyć także lampę rtęciową, ale nie wyłączać chłodzącego ją wentylatora.

Ł) Uzupelnąć tabele o częstotliwości światła odpowiadającego poszczególnym długościom fal. Zależność tą określają wzory:

$$\lambda = cT = c/v \quad \text{ i } \quad v = c/\lambda \quad (5) \text{ i } (6)$$

gdzie λ to długość fali, c to prędkość światła w próżni ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s), T to okres fali, a ν to odpowiadająca temu okresowi częstotliwość.

M) Na podstawie danych z tabel wykonać wykresy zależności napięcia $U(x) = y$ od częstotliwości $\nu = x$. Zaznaczyć granice niepewności pomiarowych. Do otrzymanych punktów dopasować linie proste $y = ax + b$ tak, by każda przecinała się z obiema osiami wykresu. Wyznaczyć współczynniki a i b tych prostych i zapisać je w tabeli 1. W tym celu można skorzystać z metody najmniejszych kwadratów (patrz ramka) lub zrobić to graficznie na podstawie wykresów.

N) Porównując wzór (4) z wzorem prostej można zauważyć, że:

$$a = \frac{h}{e} \quad b = -\frac{W}{e} \quad (7) \text{ i } (8)$$

Znając współczynniki a i b oraz wartość ładunku elementarnego ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C) wyznaczyć wartości stałej Plancka h oraz pracy wyjścia W . Wyniki zapisać w tabeli 1.

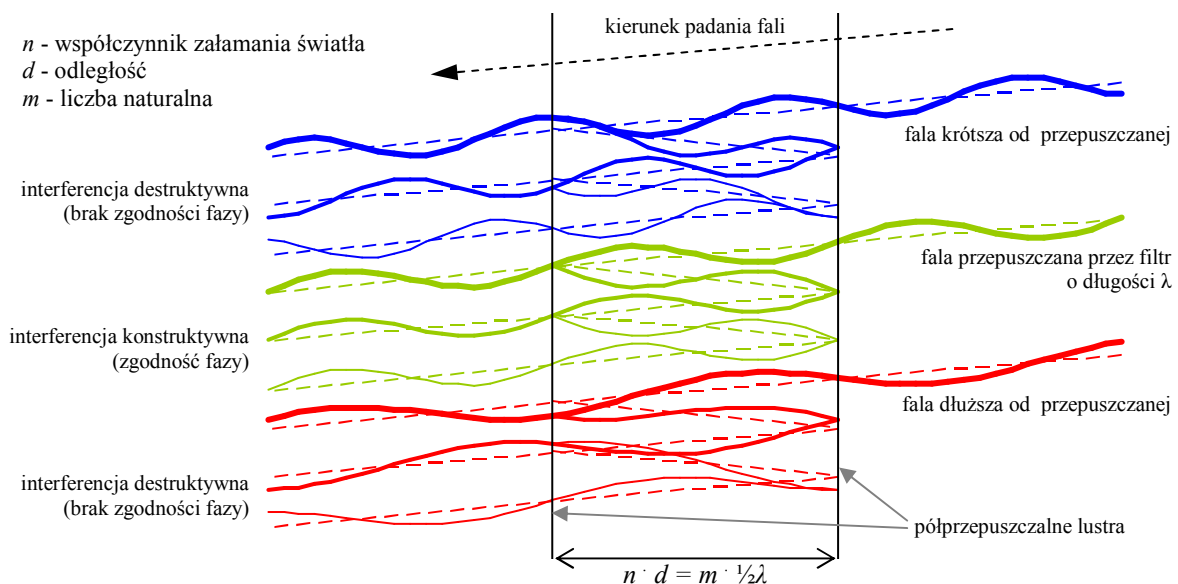
O) Porównać obliczone wartości stałej Plancka z wartością podręcznikową, która wynosi $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js = $4,136 \cdot 10^{-15}$ eVs. Przedyskutować możliwe przyczyny ewentualnych różnic.

P) Porównać między sobą obliczone wartości pracy wyjścia W dla siarczku ołowiu. Przedyskutować wartości niepewności pomiarowych oraz możliwe przyczyny ewentualnych różnic.



JAK DZIAŁA FILTR INTERFERENCYJNY?

Zasada działania filtra interferencyjnego opiera się na selektywnym wzmacnianiu i wygaszaniu określonych częstotliwości fali elektromagnetycznych poprzez wielokrotne odbicia pomiędzy półprzepuszczalnymi lustrami umieszczonymi w odległości odpowiadającej określonej długości fali. Zjawisko to występuje nie tylko dla światła widzialnego, ale także np. dla mikrofal i fal radiowych, jednak ze względu na długość fali filtry interferencyjne dla światła muszą mieć dużo mniejsze rozmiary niż filtry dla tych fal. W praktyce filtry światła robi się przez napylenie w próżni kolejnych warstw materiałów dielektrycznych lub przewodzących. W filtrach dielektrycznych jako półprzepuszczalne lustro stosuje się na przemian warstwy o dużym i małym współczynniku załamania światła, w których długość drogi $n \cdot d$ optycznej jest równa $\frac{1}{4}\lambda$, a w filtrach metalowych cienkie warstwy srebra lub glinu. Pomiędzy warstwami odbijającymi znajduje się warstwa przepuszczającego światło materiału o długości drogi optycznej odpowiadającej wielokrotności $\frac{1}{2}\lambda$.



ĆWICZENIE 17	LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne
Data pomiaru:.....	
Imię i nazwisko studenta/ucznia:.....	
Wydział, kierunek, rok studiów:.....	
Szkoła, klasa:.....	

Opracowanie wyników:

TABELA 1

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i> [Js]	<i>W</i> [J]
±	±	±	±
±	±	±	±
±	±	±	±
±	±	±	±
±	±	±	±

Przydatne wzory:

$$U = \frac{h}{e} \cdot \nu - \frac{W}{e}$$

$$y = a \cdot x + b$$

$$\nu = c/\lambda$$

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Podstawowe stałe:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$$

TABELA 2a

λ [nm]	ν [Hz]	U [V]
±	±	±
±	±	±
±	±	±
±	±	±
±	±	±

TABELA 2b

λ [nm]	ν [Hz]	U [V]
±	±	±
±	±	±
±	±	±
±	±	±
±	±	±

TABELA 2c

λ [nm]	ν [Hz]	U [V]
±	±	±
±	±	±
±	±	±
±	±	±
±	±	±

TABELA 2d

λ [nm]	ν [Hz]	U [V]
±	±	±
±	±	±
±	±	±
±	±	±
±	±	±

TABELA 2e

λ [nm]	ν [Hz]	U [V]
±	±	±
±	±	±
±	±	±
±	±	±
±	±	±