
 POLITECHNIKA OPOLSKA	KATEDRA FIZYKI	
	LABORATORIUM FIZYKI	
WYZNACZANIE STAŁEJ PLANCKA ORAZ PRACY WYJŚCIA ELEKTRONU		

WSTĘP

Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne polega na emisji elektronów z powierzchni metali wywołanej pochłanianiem energii fotonów padających na tę powierzchnię przez elektrony będące w warstwie przy powierzchniowej. Fotoemisja elektronów (fotoelektronów) jest możliwa tylko wtedy gdy:

$$h \cdot \nu \geq W \quad (1)$$

energia $E = h \cdot \nu$ padającego fotonu jest równa lub większa od pracy wyjścia W elektronu.

Istnieje progowa wartość ν_0 częstotliwości fotonu, której odpowiada wartość energii równej pracy wyjścia W fotoelektronu:

$$h \cdot \nu_0 = W \quad (2)$$

Energie poszczególnych fotonów wnikających pod powierzchnię metalu nie sumują się. Nie dochodzi do zjawisk tzw. dwufotonowej lub trzyfotonowej absorpcji przez jeden elektron sumarycznej energii 2-ch, czy 3-ch fotonów. Wobec tego strumień fotonów o częstotliwościach mniejszych od progowej nie może wytworzyć efektu fotoemisji elektronów z powierzchni metalu.

Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne opisuje prawo Einsteina:

$$h \cdot \nu = W + E_{k_{max}} \quad (3)$$

gdzie: h – stała Plancka,
 $E_{k_{max}}$ – wartość maksymalnej energii kinetycznej fotoelektronów,

Mając na uwadze, że $E = \frac{m \cdot v^2}{2}$ oraz $\nu = \frac{c}{\lambda}$, równanie (3) zapisujemy w postaci:

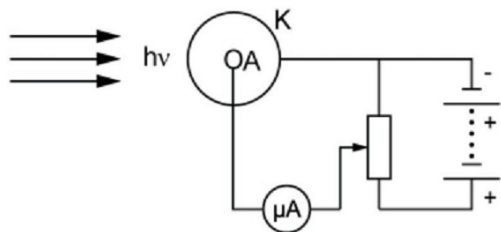
$$h \cdot \frac{c}{\lambda} = W + \frac{m \cdot v_{max}^2}{2} \quad (4)$$

gdzie: λ – długość fali padającego fotonu,
 c – prędkość światła w próżni,
 m – masa elektronu,
 v – wartość maksymalnej prędkości wyemitowanych z powierzchni elektronów.

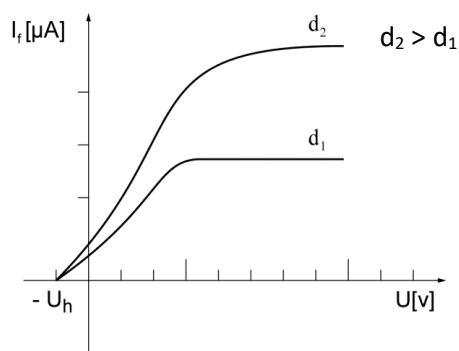
Kwant energii fotonu zaabsorbowanej przez elektron zostaje zużyty na wykonanie pracy wyjścia elektronu na powierzchnię i nadanie mu energii kinetycznej. Jeżeli temu procesowi nie towarzyszą straty energii, to fotoelektron opuszczający powierzchnię metalu porusza się z maksymalną energią kinetyczną daną wyrażeniem:

$$E_{k_{max}} = h \cdot \nu - W \quad (5)$$

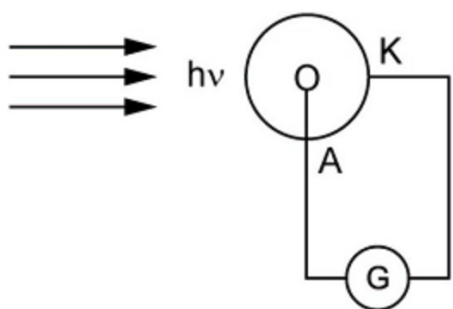
Jednym z urządzeń wykorzystujących do swojego działania zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne jest fotokomórka próżniowa. Energię fotoelektronów emitowanych przez fotokomórkę można zwiększyć przyspieszając je w polu elektrycznym wytworzonym napięciem przyłożonym do fotokatody i anody (Rys. 1a.). W taki sposób można uzyskać znaczne zwiększenie wartości natężenia fotoprądu wzbudzonego światłem padającym na fotokatodę. Natężenie fotoprądu (dla stałego natężenia oświetlenia) zwiększa się ze wzrostem napięcia przyspieszającego, osiągając nasycenie (Rys. 1b.).



Rys. 1a. Schemat zasilania fotokomórki



Rys. 1b. Zależność natężenia I_f fotoprądu od napięcia U między fotokatodą i anodą (d_1 i d_2 odległość fotokomórki od źródła światła).



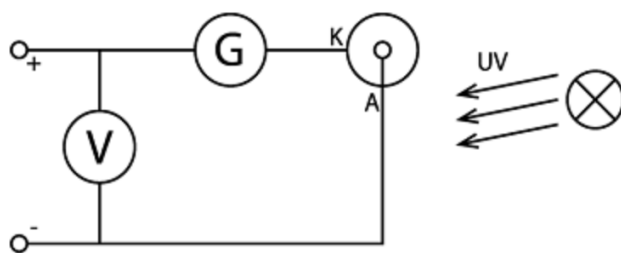
Rys. 2. Układ fotokomórki z galwanometrem G mierzącym natężenie fotoprądu.

galwanometru (Rys. 2.) – amperomierza o specjalnej konstrukcji, którego czułość jest rzędu 10^{-9} A (*nanoampery*).

W pewnych warunkach doświadczalnych, przy użyciu odpowiedniego układu z fotokomórką próżniową można pomiary, których wartości umożliwią wyznaczyć stałą Plancka. Jeżeli w układzie z fotokomórką przedstawionym na Rys. 1a. odłączymy źródło zasilania, wtedy elektrony emitowane z powierzchni fotokatody nie będą przyspieszane w obszarze pomiędzy katodą a anodą. Do anody docierać będą głównie fotoelektrony o maksymalnych energiach kinetycznych (3). Jak wynika z Rys. 1b. natężenie prądu fotoelektrycznego w stosunku do wartości ze stanu nasycenia zmniejszy wartość o kilka rzędów wielkości. Do pomiaru tak małych prądów konieczne jest zastosowanie

UKŁAD DOŚWIADCZALNY

W celu wykonania pomiarów umożliwiających wyznaczenie stałej Plancka należy do układu z Rys. 2. Dołączyć zewnętrzne napięciowe źródło zasilania i odwrotnie spolaryzować elektrody fotokomórki - ujemny potencjał anody, dodatni potencjał fotokatody.



Rys. 3. Schemat układu z fotokomórką do wyznaczenia stałej Plancka.

Do zacisków „+” i „-” dołącza się regulowane zewnętrzne źródło napięcia.

Na Rys. 3. przedstawiony jest schemat układu ze źródłem napięcia. Poprzez regulację wartości zewnętrznego napięcia można ustawić taką wartość $U = U_h$ (U_h - napięcie hamujące) dla której natężenie prądu fotoelektrycznego wskazywane przez galwanometr będzie równe zero. W tych warunkach całkowitemu zahamowaniu ulegają fotoelektrony o maksymalnej energii kinetycznej (fotoelektrony o mniejszych energiach zostaną wcześniej zahamowane napięciem $U < U_h$). Zgodnie z równaniem (5) zapisać to można zależnością:

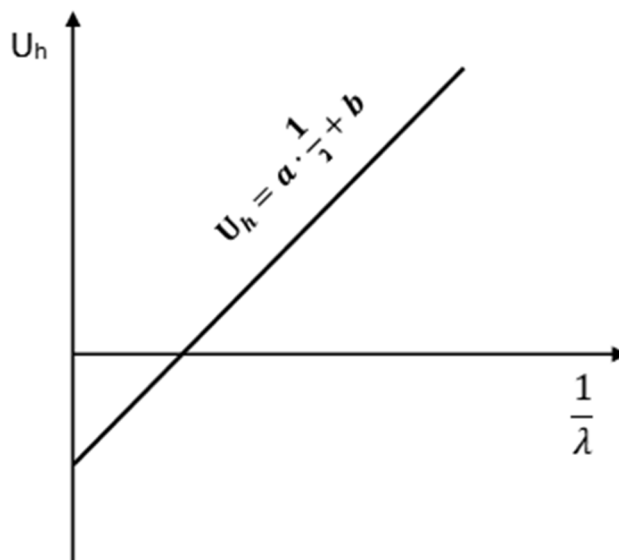
$$e \cdot U_h = E_{k_{max}} = h \cdot \nu - W \quad (6)$$

gdzie: e – ładunek elektronu,
 U_h – napięcie (potencjał) hamowania.

Przekształcając (6) i wykorzystując równanie (4) otrzymujemy zależność napięcia hamującego U_h od długości λ fali światła oświetlającego fotokatodę:

$$U_h = \frac{h \cdot c}{e} \cdot \frac{1}{\lambda} - \frac{W}{e} \quad (7)$$

Wartość potencjału hamującego U_h nie zależy od natężenia światła, lecz liniowo zwiększa się z odwrotnością długości fali λ światła padającego na powierzchnię katody fotokomórki. Ogólny wykres zależności (7) przedstawiony jest na Rys. 4.



Rys. 4. Wynikający z równania (7) wykres zależności potencjału hamującego U_h od odwrotności długości fali λ^{-1} światła oświetlającego katodę fotokomórki gazowanej w układzie z Rys. 3.

Zgodnie z widocznym na Rys. 4. wykresem zależność U_h od λ^{-1} opisana jest równaniem:

$$U_h = a \cdot \frac{1}{\lambda} + b \quad (7)$$

w którym: „a” jest nachyleniem prostej, a „b” wartością rzędnej równania prostej.

Porównując zależności (6) i (7) otrzymujemy proste relacje między ich odpowiednimi częściami, umożliwiające zwi azać wyznaczone na drodze doświadczenia równanie prostej (7) z wielkościami fizycznymi:

$$\begin{aligned} a &= \frac{h \cdot c}{e} \\ b &= -\frac{W}{e} \end{aligned} \quad (8)$$

Powyższe wyrażenia stanowią podstawę metody wyznaczenia stałej Plancka oraz pracy wyjścia W elektronu z materiału fotokatody (badanej fotokomórki)

WYKONANIE POMIARÓW

- Połączyć układ pomiarowy według schematu widocznego na stanowisku badawczym. Przed przystąpieniem do pomiarów sprawdzić, czy plamka świetlna galwanometru G znajduje się w położeniu zerowym.
- Potencjometrem P zasilacza ustawić minimalne napięcie (ok. 55 mV). Źródłami promieniowania UV są diody elektroluminescencyjne (LED). Długości fal λ_n wysyłanych przez diody należy odczytać z opisu znajdującego się przy stanowisku i wpisać do Tabeli Pomiarów. Również wpisać wartości szerokości półmłokowych $\Delta\lambda_{1/2}$ pasm emisyjnych diod, które zostaną użyte do oszacowania niepewności $u(\lambda_n)$
- Włączenie zasilania diody powoduje odchylenie od początkowego położenia zerowego plamki galwanometru (zaczyna płynąć fotoprąd). Potencjometrem zmieniać wartość napięcia U , aż do sprowadzenia plamki galwanometru do jej pozycji początkowej. Odczytać na woltomierzu wartość napięcia hamującego U_h . Wynik wpisać do Tabeli Pomiarów. Pomiaru powinny być robione sprawnie i szybko, tak by nie dopuścić do zbyt mocnego nagrzewania fotokomórki.
- Pomiary pkt. 3 wykonać dla wszystkich diod.
- Powtórzyć trzykrotnie serie pomiarów opisane w pkt. 3. i pkt. 4. Pomiedzy kolejnymi seriami pomiarowymi odczekać około 10 minut (najlepiej odłączyć zasilanie) na wystudzenie katody fotokomórki.
- Oszacować niepewności wzorcowania i eksperymentatora pomiaru napięcia.

TABELA POMIARÓW

λ_n [nm]	$\Delta\lambda_{1/2}$ [nm]	U_{h1n} [V]	U_{h2n} [V]	U_{h3n} [V]

PRZYRZĄDY POMIAROWE, NIEPEWNOŚCI POMIARÓW

Miernik	Woltomierz, U
Producent / Typ:	
Zakres pomiarowy*	$z = [\quad]$
Niepewność wzorcowania *	$C_1 = \dots [\dots]$
**	$C_2 = \dots [\dots]$
Niepewność eksperymentatora *	$\Delta_e(U) = [\quad]$

- * w przypadku korzystania z różnych zakresów miernika, stosowną informację zapisać w osobnych wierszach, odpowiednio dla każdego z zakresów,
- ** w miejsca C_1 i C_2 wstawić wartości odczytanie z karty katalogowej producenta miernika.

WYKONANIE OBLICZEŃ

- [1] Dla dowolnej wartości U_{h1n} ($i = 1, 2$ lub 3) wykonać przykład oszacowania wartości jej rozszerzonej ($k = 2$) niepewności, np. $U(U_{h1n})$:

$$U(U_{h1n}) = k \cdot u(U_{h1n}) = k \cdot \sqrt{\frac{(\Delta_d(U_{h1n}))^2 + (\Delta_e(U_{h1n}))^2}{3}} \quad (9)$$

- [2] Wykonać pozostałe obliczenia. Otrzymane wyniki wpisać do Tabeli wyników:

TABELA POMIARÓW

λ_n	U_{h1n}	$U(U_{h1n})$	U_{h2n}	$U(U_{h2n})$	U_{h3n}	$U(U_{h3n})$
[nm]	[V]		[V]		[V]	

- [3] Wykonać przykład obliczenia średniej wartości napięcia hamowania U_h :

$$U_h = \frac{U_{h1n} + U_{h2n} + U_{h3n}}{3} \quad (10)$$

- [4] Wykonać przykład oszacowania niepewności $u(U_h)$ z uwzględnieniem metody typu A i metody typu B:

$$u(U_h) = \sqrt{(u_A(U_h))^2 + (u_B(U_h))^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (U_h - U_{hin})^2}{3 \cdot (3-1)} + \frac{\sum_{i=1}^3 (u(U_{h1n}))^2}{3}} \quad (11)$$

- [5] Wykonać przykład obliczenia wartości odwrotności długości fali:

$$\frac{1}{\lambda_n} = \dots \quad (12)$$

- [6] Wykonać przykład oszacowania wartości niepewności odwrotności długości fali $u\left(\frac{1}{\lambda_n}\right)$:

$$u\left(\frac{1}{\lambda_n}\right) = \sqrt{\left(\frac{\partial \frac{1}{\lambda_n}}{\partial \lambda_n} \cdot u(\lambda_n)\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{1}{\lambda_n^2} \cdot u(\lambda_n)\right)^2} = \frac{u(\lambda_n)}{\lambda_n^2} \quad (13)$$

uwzględniamy, że: $u(\lambda) = \frac{\Delta\lambda_{1/2}}{2}$

wobec tego: $u\left(\frac{1}{\lambda_n}\right) = \frac{\Delta\lambda_{1/2}}{2 \cdot \lambda_n^2}$

- [7] Wykonać pozostałe obliczenia. Otrzymane wyniki wpisać do Tabeli Wyników:

TABELA WYNIKÓW

λ_n	U_h	$u(U_h)$	$\frac{1}{\lambda_n}$	$u\left(\frac{1}{\lambda_n}\right)$
[nm]	[V]	[V]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]

- [8] Wykonać wykres zależności napięcia hamowania U_h od odwrotności długości fali λ^{-1} . Metodą regresji liniowej poprowadzić prostą najlepszego dopasowania do punktów doświadczalnych.
- [9] Z użyciem funkcji REGLINP (arkusz Excel) wyznaczyć wartości parametrów a i b (również $u(a)$, $u(b)$, R^2) równania prostej dopasowania. Wartości wyznaczonych parametrów zapisać w Tabeli Wyników.

TABELA WYNIKÓW

parametry równania prostej	nachylenie		odcięta		miara jakości dopasowania
	a	u(a)	b	u(b)	R^2
	[uzupełnić]	[uzupełnić]	[uzupełnić]	[uzupełnić]	[-]
przed zaokrągleniem					
po zaokrągleniu					

- [10] Wyznaczyć wartość stałej Plancka h (8):

$$h = \frac{a \cdot e}{c} \quad (14)$$

- [11] Oszacować wartość rozszerzonej ($k = 2$) niepewności wyznaczenia stałej Plancka:

$$U(h) = k \cdot u(h) = k \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial a} \cdot u(a)\right)^2} = k \cdot \sqrt{\left(\frac{e}{c} \cdot u(a)\right)^2} = k \cdot h \cdot \frac{u(a)}{a} \quad (15)$$

- [12] Wyznaczyć wartość pracy wyjścia W elektronu z materiału fotokatody (8):

$$W = -eb \quad (16)$$

- [13] Oszacować wartość rozszerzonej ($k = 2$) niepewności $u(W)$:

$$U(W) = k \cdot u(W) = k \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial b} \cdot u(b)\right)^2} = k \cdot \sqrt{(-e \cdot u(b))^2} = k \cdot W \cdot \frac{u(b)}{b} \quad (17)$$

- [14] Wykonać wnioski z ćwiczenia.

LITERATURA

- [1] SKORKO M.: Fizyka, PWN, Warszawa 1978.
 [2] Ćwiczenia Laboratoryjne z Fizyki (praca zbiorowa), Skrypt Nr 279, Politechnika Opolska 2007.