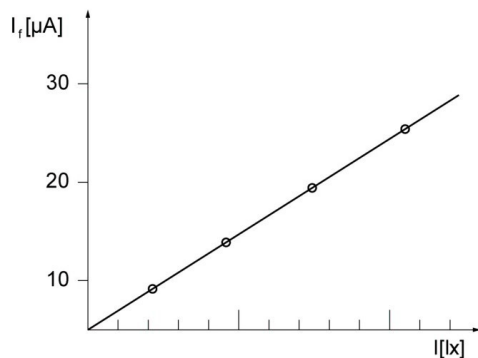


BADANIE FOTOKOMÓRKI GAZOWANEJ

WSTĘP

Zjawisko fotoelektryczne zostało odkryte przez H. Hertza pod koniec XIX wieku. Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne polega na emisji elektronów z powierzchni metali pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego (światła). Prowadzone później badania pełniej opisały zaobserwowane zjawisko.

Jeśli częstotliwość ν padającego światła jest stała i nie zmieniamy wartości napięcia U pomiędzy katodą i anodą to istnieje prosta proporcjonalność pomiędzy natężeniem fotoprądu I_f a natężeniem padającego światła I (Rys. 1.).



Rys. 1. Zależność fotoprądu I_f od natężenia padającego światła I .

Stwierdzono, że wybijane elektrony (fotoelektrony) posiadają energię kinetyczną E_k , której wartość zależy od częstotliwości ν padającego promieniowania, a nie zależy od natężenia I padającego promieniowania elektromagnetycznego. Zależność tę, zupełnie niezrozumiałą z punktu widzenia falowej natury światła, wyjaśnił dopiero Albert Einstein. Założył on, że światło ma budowę kwantową (energia pojedynczego kwantu – fotonu - równa jest $E_\nu = h\nu$). Energia fotonu padającego na powierzchnię metalu jest oddawana jednemu z elektronów, a kwant przestaje istnieć. Jeżeli wartość przekazanej energii jest co najmniej równa pracy wyjścia W elektronu - może zajść zjawisko fotoelektryczne. Pracą wyjścia W nazywa się

minimalną energię konieczną do przejścia elektronu z poziomu Fermiego z ciała stałego do otaczającej próżni. Poziom Fermiego to poziom energetyczny wyznaczony w temperaturze zera bezwzględnego, poniżej którego wszystkie stany są obsadzone, a stany leżące powyżej są nieobsadzone, lub poziom którego (dla $T > 0$) prawdopodobieństwo obsadzenia wynosi 0,5. A. Einstein związał energię fotonu ν z pracą wyjścia W elektronu z metalu zależnością, znaną obecnie jako równanie Einsteina:

$$h \cdot \nu = W + E_k \quad (1)$$

gdzie: h – stała Plancka, $h=6,6256 \cdot 10^{-34}$ J·s,
 ν – częstotliwość padającego promieniowania,
 $h \cdot \nu$ – energia fotonu,
 W – praca wyjścia elektronu,
 E_k – energia kinetyczna elektronu opuszczającego powierzchnię metalu

W przypadku, gdy cała energia fotonu pochłoniętego przez elektron zostaje zużyta tylko na pracę wyjścia, $E_k = 0$, to:

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

gdzie: ν_0 – nosi nazwę granicznej częstotliwości promieniowania padającego.

Wobec powyższego, po oświetleniu materiału promieniowaniem o częstotliwości mniejszej od ν_0 nie zachodzi zjawisko fotoelektryczne:

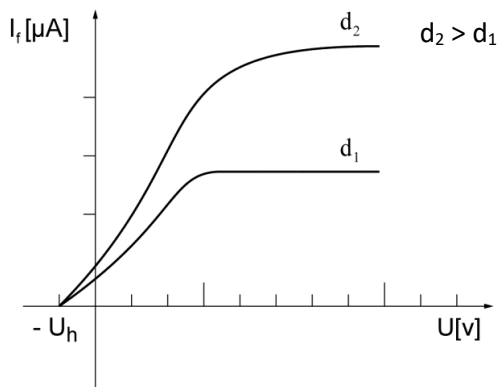
$\nu \geq \nu_0$ – zjawisko zachodzi,
 $\nu < \nu_0$ – zjawisko nie zachodzi.

Częstotliwości ν_0 odpowiada długość fali λ_0 nazywana długofalową (czerwoną) granicą zjawiska fotoelektrycznego.

$$W = h \cdot \nu_0 = \frac{h \cdot c}{\lambda_0} \quad (3)$$

gdzie: c – prędkość światła w próżni.

W trakcie badań nad zjawiskiem fotoelektrycznym wyjaśniono związek między natężeniem prądu fotoelektrycznego I_f a różnicą potencjałów U między katodą a anodą. Zależność tę przedstawia Rys. 2.



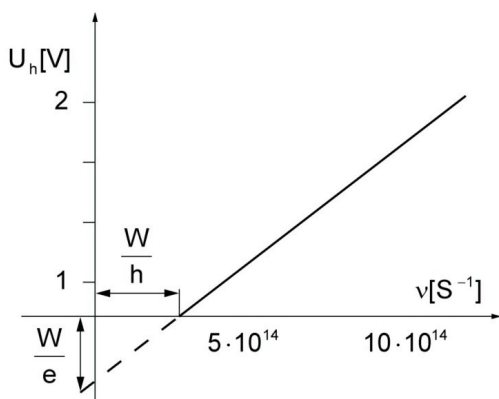
Rys. 2. Zależność natężenia I_f fotoprądu od różnicy potencjału U między katodą i anodą (d_1 i d_2 odległość fotokomórki od źródła światła).

Ze wzrostem przyspieszającego elektrony dodatniego potencjału anody, natężenie fotoprądu zwiększa się i osiąga wartość stałą, zwaną prądem nasycenia, wtedy wszystkie elektrony wyemitowane z powierzchni katody docierają do anody. Zmiana znaku różnicy tych potencjałów powoduje stopniowe zmniejszanie wartości fotoprądu aż do jego całkowitego zaniku dla pewnej charakterystycznej dla materiału katody wartości potencjału, zwanej potencjałem hamującym U_h . Wartość potencjału hamującego dla danego rodzaju materiału katody zależy od częstotliwości ν padającego promieniowania, natomiast nie zależy od natężenia I tego promieniowania (Rys. 2., Rys. 3.).

Zatem, potencjał hamowania V_h to taka wartość potencjału, która potrzebna jest do zahamowania fotoelektronów posiadających największą energię kinetyczną (największą prędkość). Czyli:

$$e \cdot U_h = E_{k,max} = \frac{m \cdot v_{max}^2}{2} \quad (4)$$

W miarę zmniejszania ujemnego potencjału U_h , coraz więcej fotoelektronów może dotrzeć do anody, wobec tego wzrasta natężenie fotoprądu I_f .



Rys. 3. Zależność wartości potencjału hamującego U_h od częstotliwości ν padającego promieniowania.

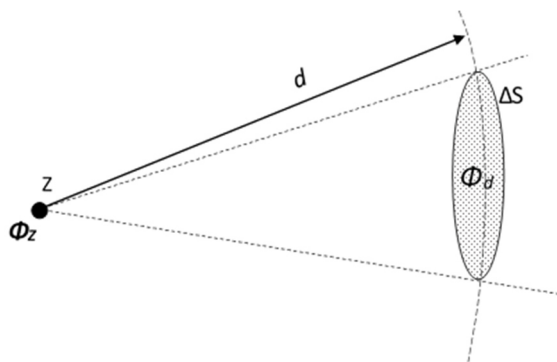
Fotokomórki wykorzystujące zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne dzielimy na dwa rodzaje: próżniowe i gazowane. Są to zamknięte bańki szklane z umieszczonymi wewnątrz dwoma elektrodami. W fotokomórce próżniowej panuje ciśnienie rzędu 10^{-6} Pa. Natomiast bańka fotokomórki gazowanej wypełniona jest gazem obojętnym pod obniżonym ciśnieniem. Atomy tego gazu mogą zostać zjonizowane przez wybite z katody fotoelektrony, przyspieszane w polu elektrycznym wytworzonym po przyłożeniu do elektrod napięcia. Pojawiające się nowe elektrony zwiększają wartość płynącego w fotokomórce prądu. Dlatego fotokomórki mogą pracować tylko do określonej wartości napięcia, po którego przekroczeniu może nastąpić jonizacja lawinowa i zniszczenie fotokomórki.

Właściwości fotokomórki określają między innymi dwie podstawowe zależności: prądowo-napięciowa o typowym przebiegu pokazanym na Rys. 2. oraz charakterystyka świetlna, jako zależność fotoprądu I_f fotokomórki od natężenia I strumienia światła oświetlającego jej katodę, przy stałej wartości napięcia U przyłożonego do jej elektrod.

Przebieg charakterystyki świetlnej fotokomórki silnie zależy od jej odległości d od źródła światła Z . Oznaczmy symbolem Φ_Z moc promieniowania źródła, która równa jest ilości energii ΔE światła emitowanego przez źródło w jednostce czasu Δt :

$$\Phi_Z = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \left[\frac{J}{s} = W \right] \quad (5)$$

W przypadku źródła o nieskończenie małych rozmiarach, zwanego źródłem punktowym, emitowany przez nie strumień światła rozchodzi się w sposób jednakowy we wszystkich kierunkach otaczającej izotropowej (jednorodnej) przestrzeni. Rozważmy kulistą sferę, której środek promienia krzywizny d pokrywa się ze źródłem (Rys. 4.). Jeżeli ośrodek nie wykazuje absorpcji światła (próżnia lub suche powietrze dla niedużych



Rys. 3. Punktowe źródło światła Z otoczone sferą o promieniu d z powierzchniowym elementem ΔS .

odległości), wówczas w każdej jednostce czasu Δt na powierzchnię sfery będzie padać strumień światła o całkowitej energii równej wypromienianej przez źródło energii ΔE_z . W przypadku powierzchniowego elementu sfery wielkość przenikającego go strumienia światła jest mniejsza, a związana z tym moc Φ_d stanowi ułamek mocy Φ_z , równy ilorazowi wartości ΔS przez pole powierzchni sfery: $4\pi d^2$:

$$\Phi_d = \frac{\Delta S}{4\pi d^2} \cdot \Phi_z \quad (6)$$

W otrzymanej zależności (6) warto zauważyć, że odsuwanie elementu o stałej powierzchni ΔS od źródła światła powoduje szybkim zmniejszaniem

(z kwadratem odległości d) mocy światła na niego padającego. Zależność ta jest zgodna z wykorzystywanym w fotometrii prawem Lamberta, często nazywanym prawem odwrotnych kwadratów.

UKŁAD DOŚWIADCZALNY

Schemat układu umieszczony jest w widocznej części stanowiska laboratoryjnego. W skład układu wchodzi: ława optyczna z liniątką o podziałce milimetrowej, uchwyt z autonomicznie zasilanym źródłem światła w oprawie umożliwiającej propagację rozproszonego strumienia światła, uchwyt z obudową fotokomórki gazowanej, zasilacz fotokomórki oraz mierniki: woltomierz do pomiaru napięcia przyłożonego do elektrod fotokomórki i amperomierz do pomiaru fotoprądu. Uchwyty źródła światła i fotokomórki pozwalają na swobodne ich przesuwanie wzdłuż ławy optycznej, a doczepione do nich wskaźnikowe języczki ułatwiają odczyt ich położeń na skali linałku.

Zastosowanym w układzie doświadczalnym źródłem światła jest żarówka halogenowa ze spiralą wolframową o małych rozmiarach geometrycznych. Wysyłane przez nią światło charakteryzuje się dość szerokim spektrum energii emitowanych fotonów. Nie wszystkie fotony emitowane przez źródło w kierunku fotokomórki będą miały energie wystarczające dla wywołania zjawiska fotoelektrycznego zewnętrznego w katodzie fotokomórki. Wobec tego tylko z liczbą N fotonów o energiach $\langle E_\nu \rangle$ co najmniej równych lub większych od pracy W wyjścia elektronu z katody ($\langle E_\nu \rangle \geq W$) związane będzie prawdopodobieństwo k emisji fotoelektronów. Wartość $k < 1$, ponieważ nie każdy foton po wnikięciu pod powierzchnię katody napotka sprzyjające warunki do przekazania energii elektronowi. Ze strumieniem $k \cdot N$ fotonów o energii $\langle E_\nu \rangle$ związana jest średnia moc Φ_{sr} , która wynosi:

$$\Phi_{sr} = \frac{k \cdot N \cdot \langle E_\nu \rangle}{\Delta t} \quad (7)$$

W fotokomórce wystawionej na ekspozycję światła powierzchnia S fotokatody ma wartość stałą. Ze zwiększaniem odległości fotokomórki d od źródła światła, liczba związanych z fotoelektronami fotonów $k \cdot N_d$ padających jednostce czasu Δt na fotokatodę będzie coraz mniejsza i zależna od d . Uwzględniając równanie (7) zależność (6) zapisujemy w postaci:

$$\frac{k \cdot N_d \cdot \langle E_\nu \rangle}{\Delta t} = \frac{S}{4\pi \cdot d^2} \cdot \frac{k \cdot N \cdot \langle E_\nu \rangle}{\Delta t} \quad (8)$$

Liczba $k \cdot N$ (też $k \cdot N_d$), równa jest liczbie fotoelektronów, które w wyniku zderzeń z atomami gazu szlachetnego wytworzą liczbę M elektronów w przestrzeni między elektrodami fotokomórki i z którymi związana jest wartość ładunku $Q = e \cdot M$. Wówczas zależność (8), po częściowym uproszczeniu, zapisujemy jako:

$$\frac{e \cdot M_d}{\Delta t} = \frac{S}{4\pi \cdot d^2} \cdot \frac{e \cdot M}{\Delta t} \quad (9)$$

Natężenie prądu elektrycznego J równe jest ilości ładunku Q przepływającego przez fotokomórkę w jednostce czasu Δt :

$$J = \frac{Q}{\Delta t} \quad (10)$$

Uwzględniając wzór (10) przepisujemy zależność (9) do nowej postaci:

$$J_d = p \cdot J_0 \frac{1}{d^2} \quad (11)$$

w której: d – jest odległością fotokomórki od źródła światła,
 J_d – jest natężeniem prądu w obwodzie fotokomórki oddalonej o d od źródła światła,
 J_0 – to niemierzalna wartość maksymalnego natężenia prądu w obwodzie fotokomórki, gdy $d = 0$.
Spełnienie warunków bezpośredniego pomiaru J_0 wymagałoby aby połowa strumienia fotonów emitowanych przez źródło trafiła w powierzchnię fotokatody.

Zależność (11) wymaga zastosowania punktowego źródła światła. W rzeczywistości warunek ten nie jest spełniony. Dlatego doświadczalne sprawdzenie tej zależności wymaga, by wartość d była znacznie większa od każdego z wymiarów geometrycznych objętości emitującej fotony przez rzeczywiste źródło światła.

Dla danej fotokomórki obecny w (11) iloczyn $p \cdot J_0$ ma wartość stałą dla danego napięcia U przyłożonego do katody i anody. Przyjmując nową stałą $A = p \cdot J_0$ otrzymujemy zależność przewidującą przebieg charakterystyki świetlnej fotokomórki:

$$J_d = A \cdot \frac{1}{d^2} \quad (11)$$

zgodnie z którą w układzie współrzędnych $\left(\frac{1}{d^2}, J_d\right)$ otrzymanie prostoliniowego trendu punktów doświadczalnych stanowi potwierdzenie prawa Lamberta.

WYKONANIE POMIARÓW

- Połączyć układ według schematu widocznego na stanowisku.
- Wykonać pomiary charakterystyki prądowo-napięciowej fotokomórki dla trzech różnych położeń fotokomórki d_f , odpowiadających orientacyjnym odległościom źródła światła - fotokomórka z zakresu od 9 – 18 cm. Zmieniając napięcie U fotokomórki w zakresie od 0 – 100 V, co 10 V zapisywać w Tabeli Pomiarów wartości U oraz J_d .
- Wykonać pomiary charakterystyki świetlnej dla trzech różnych napięć U . Zmieniać położenie fotokomórki d_f odpowiadających orientacyjnej odległości źródła światła - fotokomórka z zakresu od 9–18 cm co 1cm. W Tabeli Pomiarów notować wartości odległości d i fotoprądu J_d .
- Pod tabelą pomiarów zapisać wartość położenia źródła światła d_z oraz wartości oszacowanych niepewności eksperymentatora i niepewności wzorcowania pomiarów bezpośrednich.

TABELA POMIARÓW

CHARAKTERYSTYKA PRĄDOWO-NAPIĘCIOWA			CHARAKTERYSTYKA ŚWIETLNA		
d_f	U	J_d	U	d_f	J_d
[cm]	[V]	[μ A]	[V]	[cm]	[μ A]

PRZYRZĄDY POMIAROWE, NIEPEWNOŚCI POMIARÓW

	Woltomierz U	Amperomierz J_d	Położenie źródła światła, d_z	Położenie fotokomórki, d_f
Producent / Typ:			nie dotyczy	nie dotyczy
Zakres pomiarowy*	$z = []$	$z = []$	nie dotyczy	nie dotyczy
Niepewność wzorcowania * **	$C_1 = \dots []$ $C_2 = \dots []$	$C_1 = \dots []$ $C_2 = \dots []$	$\Delta_d(d_z) = []$	$\Delta_d(d_f) = []$
Niepewność eksperymentatora *	$\Delta_e(U) = []$	$\Delta_e(J_d) = []$	$\Delta_e(d_z) = []$	$\Delta_e(d_f) = []$

- * 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 odczytane z karty katalogowej producenta miernika.

OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

- Wykonać przykład oszacowania rozszerzonej ($k = 2$) całkowitej niepewności przykładowego pomiaru położenia źródła światła lub fotokomórki: np. $U(d_z)$:

$$U(d_z) = k \cdot u(d_z) = k \cdot \sqrt{\frac{(\Delta_d(d_z))^2 + (\Delta_e(d_z))^2}{3}} \quad (12)$$

- Wykonać przykład oszacowania rozszerzonej ($k = 2$) całkowitej niepewności pomiaru napięcia $U(U)$:

$$U(U) = k \cdot \sqrt{\frac{(\Delta_d(U))^2 + (\Delta_e(U))^2}{3}} = \frac{k}{\sqrt{3}} \sqrt{(C_1 \cdot U + C_2)^2 + (\Delta_e(U))^2} \quad (13)$$

- Wykonać przykład oszacowania rozszerzonej ($k = 2$) całkowitej niepewności pomiaru natężenia prądu fotokomórki $U(J_d)$:

$$U(J_d) = \frac{k}{\sqrt{3}} \sqrt{(C_1 \cdot J_d + C_2)^2 + (\Delta_e(J_d))^2} \quad (14)$$

- Wykonać przykład obliczenia odległości d fotokomórka – źródło światła:

$$d = d_z - d_f \quad (15)$$

- Wykonać przykład oszacowania wartości niepewności $u(d)$:

$$u(d) = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial d_z} \cdot U(d_z)\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial d_f} \cdot U(d_f)\right)^2} = \sqrt{(1 \cdot U(d_z))^2 + (-1 \cdot U(d_f))^2} = \sqrt{(U(d_z))^2 + (U(d_f))^2} \quad (16)$$

- Wykonać pozostałe obliczenia a otrzymane wyniki zapisać w Tabeli Wyników:

TABELA WYNIKÓW

CHARAKTERYSTYKA PRĄDOWO-NAPIĘCIOWA					
d	u(d)	U	U(U)	J _d	U(J _d)
[cm]	[cm]	[V]	[V]	[μA]	[μA]

- W jednym układzie współrzędnych wykonać wykres rodziny charakterystyk prądowo-napięciowych fotokomórki.
- Omówić otrzymany wykres w kontekście zgodności charakterystyk doświadczalnie wyznaczonych z przewidywaniami omówionymi we wstępie oraz widocznej zależności ich przebiegu od odległości fotokomórki od źródła światła.
- Wykonać przykład obliczenia wartości $\frac{1}{d^2}$:

$$\frac{1}{d^2} = \dots \quad (17)$$

10. Wykonać przykład oszacowania wartości niepewności $u\left(\frac{1}{d^2}\right)$:

$$u\left(\frac{1}{d^2}\right) = \sqrt{\left(\frac{\partial \frac{1}{d^2}}{\partial d} \cdot u(d)\right)^2} = \sqrt{\left(-2 \frac{1}{d^3} \cdot u(d)\right)^2} = \frac{2 \cdot u(d)}{d^3} \quad (18)$$

11. Wykonać pozostałe obliczenia a otrzymane wyniki zapisać w Tabeli Wyników:

TABELA WYNIKÓW
CHARAKTERYSTYKA ŚWIETLNA

U	U(U)	$\frac{1}{d^2}$	$u\left(\frac{1}{d^2}\right)$	J_d	U(J_d)
[V]	[V]	$\left[\frac{1}{cm^2}\right]$	$\left[\frac{1}{cm^2}\right]$	[μA]	[μA]

12. W jednym układzie współrzędnych wykonać wykres rodziny charakterystyk świetlnych fotokomórki (zależności natężenia prądu fotokomórki od odwrotności kwadratu odległości fotokomórka – źródło światła).
13. Omówić otrzymany wykres w kontekście zgodności charakterystyk doświadczalnie wyznaczonych z przewidywaniami omówionymi we wstępie oraz widocznej zależności ich przebiegu od napięcia fotokomórki.

LITERATURA

[1] HALLIDAY D., RESNICK R., WALKER J.: Podstawy Fizyki cz. 2, PWN, Warszawa 2003.
 [2] Ćwiczenia Laboratoryjne z Fizyki (praca zbiorowa), Skrypt Nr 279, Politechnika Opolska 2007.