Ćwiczenie 62

BADANIE FOTOPOWIELACZA

19.1. Wiadomości ogólne

Fotopowielacz elektronowy jest urządzeniem, w którym wykorzystano zjawisko zewnętrznej fotoemisji elektronów oraz emisji wtórnej elektronów. Fotoemisję elektronów opisuje prawo sformułowane przez A. Einsteina

$$E_v = W + E_k \tag{62.1}$$

gdzie: W– praca wyjścia,
E_k – maksymalna energia kinetyczna fotoelektronów,
E_v – energia kwantu światła.

Powyższa zależność jest wyrazem kwantowej natury światła. Kwant światła, padając na powierzchnię ciała, może wybić elektron. Jest to możliwe, jeżeli energia kwantu E_v jest większa od pracy wyjścia W. Uwolniony elektron może poruszać się z maksymalną energią E_k o wartości wynikającej ze wzoru (62.1). Liczba uwolnionych z powierzchni fotoelektronów zależy, między innymi, od długości fali i natężenia światła, od rodzaju materiału i jakości powierzchni.

Drugim zjawiskiem wykorzystanym w fotopowielaczu jest zjawisko emisji wtórnej elektronów. Emisja wtórna elektronów ma miejsce w przypadku, gdy poruszający się elektron zwany pierwotnym, pada na powierzchnię ciała stałego i wybija z tego materiału jeden lub kilka elektronów zwanych elektronami wtórnymi. O średniej ilości elektronów wtórnych mówi współczynnik emisji wtórnej zdefiniowany w następujący sposób

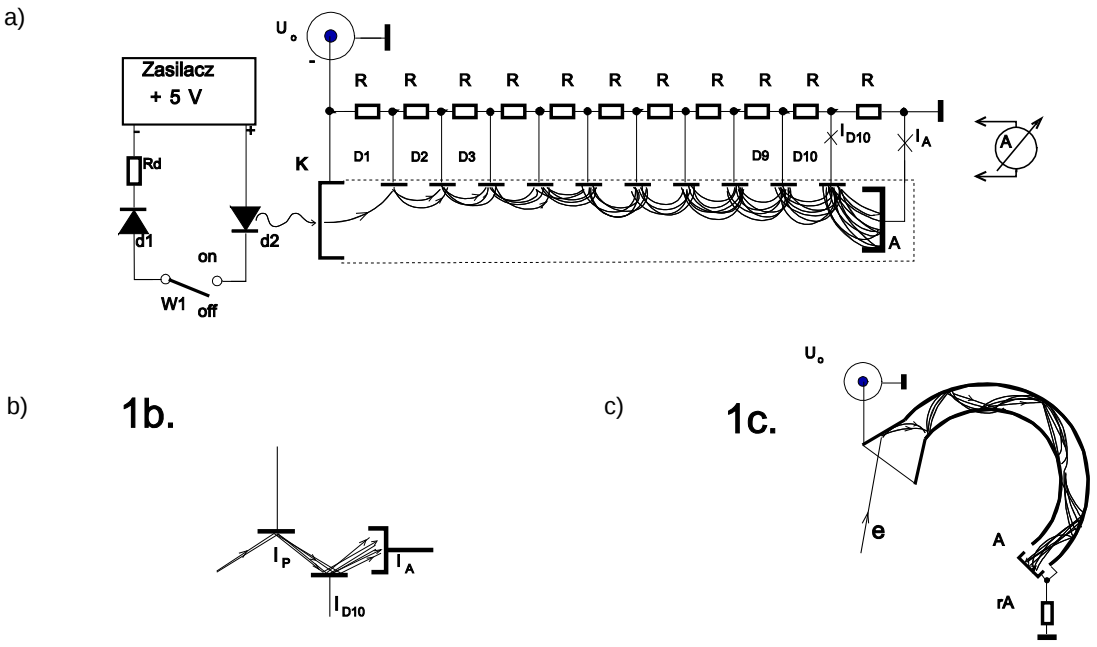
$$\delta = \frac{I_w}{I_p} \tag{62.2}$$

gdzie: I_w – natężenie prądu elektronów wtórnych,
I_p – natężenie prądu elektronów pierwotnych.

Współczynnik emisji wtórnej δ zależy od energii elektronów pierwotnych, od rodzaju i jakości powierzchni materiału. Przykładowo, dla sadzy wartość współczynnika emisji wtórnej zawiera się w granicach 0,4 – 0,9, dla stali do 3, a dla tlenków metali alkalicznych do 15.

19.1.1. Budowa fotopowielacza

Fotopowielacz składa się z fotokatody, z szeregu elektrod zwanych dynodami oraz z anody. Wszystkie elementy umieszczone są w próżniowej bańce ze szkła. Uproszczony schemat fotopowielacza pokazany jest na rysunku 1a. Kolejne dynody D1–D2–..–D10–A połączone są ze sobą opornikami R. Tak utworzona drabinka szeregowo połączonych oporników zasilana jest napięciem U_0 wartości od –700 V do –1500 V. Dzięki temu kolejne dynody posiadają coraz wyższy potencjał, a w przestrzeni między nimi istnieje pole elektryczne. Oświetlając katodę K, możemy spowodować zjawisko fotoemisji, czyli wybicia elektronu przez foton. Uwolniony elektron jest następnie przyspieszany w polu elektrycznym w kierunku dynody D1. Przyspieszony w polu o różnicy potencjałów U_{D1} elektron zwiększa swoją energię o wartość $e \cdot U_{D1}$ i uderza w powierzchnię dynody D1. Ten jeden elektron wybija średnio δ elektronów z powierzchni D1. Powstałe w ten sposób elektrony wtórne są przyspieszane w kierunku dynody D2. W wyniku emisji wtórnej z tej dynody może uwolnić się średnio już δ·δ elektronów. Podobny proces przyspieszania – emisji – przyspieszania odbywa się na pozostałych ośmiu dynodach. Elektrony uwolnione z dynody D10 przechwytywane są przez anodę A.



Rys. 62.1

W efekcie, w fotopowielaczu jeden foton może spowodować powstanie możliwego do rejestracji impulsu prądowego (ok. δ^{10} elektronów w czasie ok.10 ns). Jednym z parametrów charakteryzującym fotopowielacz jest współczynnik wzmocnienia, czyli ilość elektronów dochodzących do anody podczas impulsu wywołanego jednym fotoelektronem. Wartość wzmocnienia można oszacować na podstawie wzoru

$$K = \delta^n, \qquad (62.3)$$

gdzie: n – liczba dynod.

Istotnym zagadnieniem jest odpowiedni wybór materiału na fotokatodę, ponieważ czułość fotopowielacza zależy także od kwantowej wydajności fotokatody. Kwantowa

wydajność jest to stosunek liczby wybitych fotoelektronów do liczby kwantów o określonej energii (długości fali) pochłoniętych przez fotokatodę. Wartość kwantowej wydajności jest funkcją długości fali światła i jest zawsze mniejsza od 1.

Nawet w nieoświetlonym fotopowielaczu pojawia się prąd anodowy o niewielkiej wartości, zwany prądem ciemnym powielacza. Ten niekorzystny efekt związany jest z występowaniem zjawiska termoemisji, czyli zjawiska samorzutnego uwolnienia się elektronów z powierzchni ciała o temperaturze T > 0 K. Gęstość „termoelektronów" można obliczyć na podstawie wzoru Richardsona

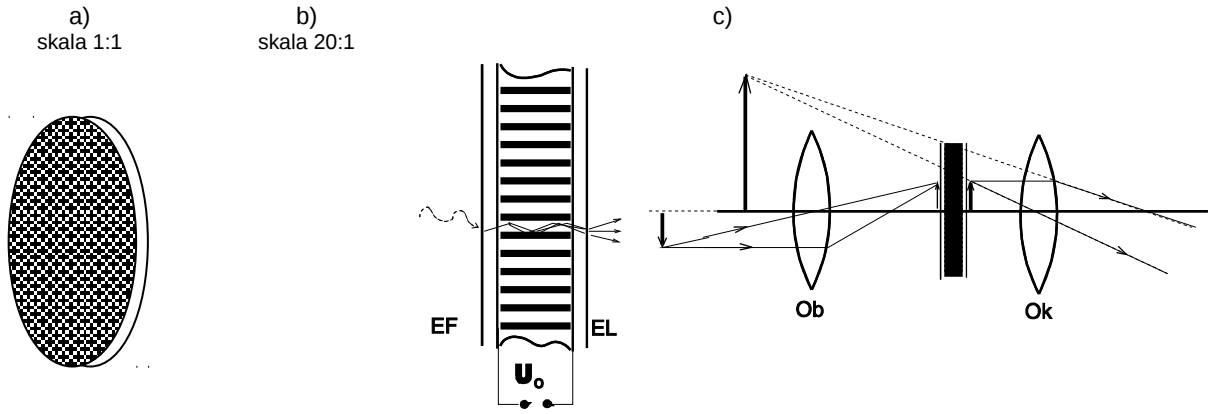
$$j = A \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{W}{kT}} \qquad (62.4)$$

gdzie:
- j – gęstość prądu termoemisji,
- A – stała,
- T – temperatura fotokatody,
- W – praca wyjścia,
- k – stała Boltzmanna.

19.1.2. Informacje dodatkowe

Ciekawym rozwinięciem idei rejestracji pojedynczych cząstek (np. elektronów, jonów...) jest kanałowy powielacz elektronów (channeltron). Podobnie jak w powielaczu dynodowym, podstawą działania kanałowego powielacza jest zjawisko wielokrotnej emisji wtórnej elektronów. Powielacz kanałowy jest zwiniętą rurką o długości ok. 140 mm, średnicy zewnętrznej i wewnętrznej odpowiednio ok. 2 mm i 3 mm (rys. 62.1c) wykonanej ze specjalnego szkła o odpowiednim przewodnictwie powierzchniowym i dużym współczynniku emisji wtórnej δ. Przyłożenie napięcia do obu końców powielacza powoduje powstanie wzdłuż osi powielacza jednorodnego pola elektrycznego. Powierzchnia wewnętrzna rurki powielacza pełni rolę jednocześnie drabinki oporników i dynod standardowego powielacza. Elektron e wpadając do wejścia powielacza wybija δ elektronów. Te – następnie przyspieszane w polu elektrycznym – padając na powierzchnię powielacza, wybijają $\delta \cdot \delta$ elektronów itd. Szacuje się, że procesów zderzeń-emisji jest ok. 20. Dzięki temu można uzyskać wzmocnienie rzędu $2{,}5^{20} \approx 10^8$.

Idea działania powielacza kanałowego została wykorzystana w płytce powielającej tzw. wzmacniaczu obrazu. Zasadniczym elementem wzmacniacza jest szklany krążek o grubości ok. 0,5 mm i średnicy 30 mm z wielką ilością prostych mikrokanalików przechodzących przez krążek wzdłuż osi (rys. 62.2a). Każdy z tych mikrokanalików jest powielaczem elektronowym o średnicy ok. 15 μm i wzmocnieniu ok. 1000. Do powierzchni o ujemnym potencjale przylega fotoczuła elektroda EF (rys. 62.2b), a do drugiej powierzchni przylega ekran luminescencyjny EL. Foton wyzwalając elektron z elektrody EF powoduje powstanie lawiny ok. 1000 elektronów, które – padając na ekran EL – wywołać mogą widoczny błysk. Ponieważ gęstość powierzchniowa mikropowielaczy wynosi ok. 500 000/cm^2 należy oczekiwać, że rzeczywisty obraz z obiektywu Ob (rys. 62.2c) pojawiający się na fotoelektrodzie EF zostanie wzmocniony i odwzorowany na elektrodzie EL. Dodając do układu okular Ok, mamy uproszczony schemat lornetki umożliwiającej obserwację nocą przy wykorzystaniu rozproszonego światła gwiazd lub Księżyca (chętnie używanej przez służby specjalne).



Rys. 622

62.2. Zadania

62.2.1. Zmierzyć natężenie prądów I_{D10} oraz I_A dla siedmiu różnych napięć zasilających z zakresu 700 V do 1500 V przy stałym oświetleniu, czyli przy stałej, najmniejszej odległości źródło-powielacz (pręt wsunięty do oporu, czyli $L_{min.} = 2$ cm).
62.2.2. Zmierzyć natężenie prądów I_{D10} oraz I_A dla siedmiu różnych odległości źródła światła od powielacza przy stałym napięciu zasilania $U_0 = 1500$ V.
62.2.3. Przy wyłączonym źródle światła zmierzyć wartość prądu I_A przy napięciu zasilania $U_0 = 1500$ V.

62.3. Zasada i przebieg pomiaru

Prąd płynący do dynody D10 i anody A można zmierzyć za pomocą mikroamperomierza włączanego na czas pomiaru w odpowiednie miejsce obwodu za pomocą przełączników (uwaga: przełączniki nie są pokazane na rys. 62.1a).

Aby wyznaczyć średni współczynnik emisji wtórnej, zgodnie z definicją, należałoby zmierzyć wartości prądu wtórnego I_w oraz prądu pierwotnego I_p. W powielaczu dynodowym można wyznaczyć δ, mierząc natężenie prądu płynącego przez dynodę D10 i anodę A (rys. 62.1b).

Źródłem światła jest dioda elektroluminescencyjna (LED) d2 zasilana z zasilacza. W jej obwodzie znajduje się także kontrolna dioda d1 oraz włącznik W1, pozwalający na jej włączanie (on) lub wyłączanie (off).

62.4 Opracowanie wyników pomiarów

62.4.1. Obliczyć wartość współczynnika emisji wtórnej δ oraz współczynnika wzmocnienia K (wzór (62.3)) dla wszystkich badanych warunków pracy powielacza. Przy analizie δ warto skorzystać z I prawa Kirchoffa i rysunku 62.1b. Oszacować niepewność pomiaru **δ** oraz **K tylko** dla napięcia pracy $\mathbf{U_0}$ = 1500 V.

62.4.2 Przedstawić w formie wykresu zależność $\delta = f(U_0/11)$ (napięcie $U_0/11$ jest średnim napięciem przyspieszającym elektrony na każdym etapie powielenia).

62.4.3. Zakładając, że źródłem całego prądu ciemnego jest katoda, na podstawie wzoru opisującego zjawisko termoemisji i obliczonej wartości wzmocnienia fotopowielacza oszacować wartość pracy wyjścia materiału fotokatody (wynik podać w **eV** i w **J**).
Dane: $A = 1{,}2 \times 10^6$ A/m^{2}K^2, $k = 1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K, ładunek elektronu – $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C, powierzchnia katody S = 2 cm^2.

62.4.4. Odpowiedzieć na pytania:

a) czy współczynnik emisji wtórnej zależy od napięcia przyspieszającego elektrony pierwotne?
b) czy współczynnik emisji wtórnej zależy od natężenia światła?

62.5. Analiza niepewności pomiaru

Aby ocenić niepewność pomiaru współczynnika emisji wtórnej, należy obliczyć niepewności standardowe pomiarów natężenia prądu I_{D10} i I_A. Uwzględniając niepewność wzorca $\Delta_d I$ oraz niepewność eksperymentatora $\Delta_e I$, niepewności standardowe prądu I_{D10} i I_A można obliczyć przy użyciu wzoru

$$S_I = \sqrt{\left(\frac{\Delta_d I}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_e I}{\sqrt{3}}\right)^2}\ , \qquad (62.5)$$

gdzie: $\Delta_d I$ – wartość najmniejszej działki mikroamperomierza,
$\Delta_e I$ – wartość połowy zakresu niestabilności położenia wskazówki mikroamperomierza.

Niepewność standardową wartości δ można obliczyć ze wzoru

$$S_\delta = \delta^2 \sqrt{\left(\frac{S_{I_{D10}}}{I_A}\right)^2 + \left(\frac{I_{D10} S_{I_A}}{I_A^2}\right)^2} = \frac{\delta^2}{I_A} \sqrt{\left(S_{I_{D10}}\right)^2 + \left(\frac{I_{D10} S_{I_A}}{I_A}\right)^2}\ . \qquad (62.6)$$

Niepewność względna pomiaru wzmocnienia fotopowielacza wynosi

$$\frac{S_K}{K} = 10 \frac{S_\delta}{\delta}\ . \qquad (62.7)$$

Uwaga! Ponieważ niepewność pomiaru współczynnika wzmocnienia jest duża, otrzymana wartość K oraz pracy wyjścia W jest tylko oszacowaniem ich rzeczywistych wartości.

Zalecana literatura

[1] Szczeniowski Sz.: Fizyka doświadczalna, cz.I-cz.V. Warszawa: PWN 1972-1983.
[2] Resnick R., Halliday D.: Fizyka 1. I. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN 1994.
[3] Halliday D., Resnick R.: Fizyka 1. II. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN 1994.
[4] Sawieliew I. W.: Wykłady z fizyki 1.1-1.3. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN 1998.