

Zagadnienia powiązane

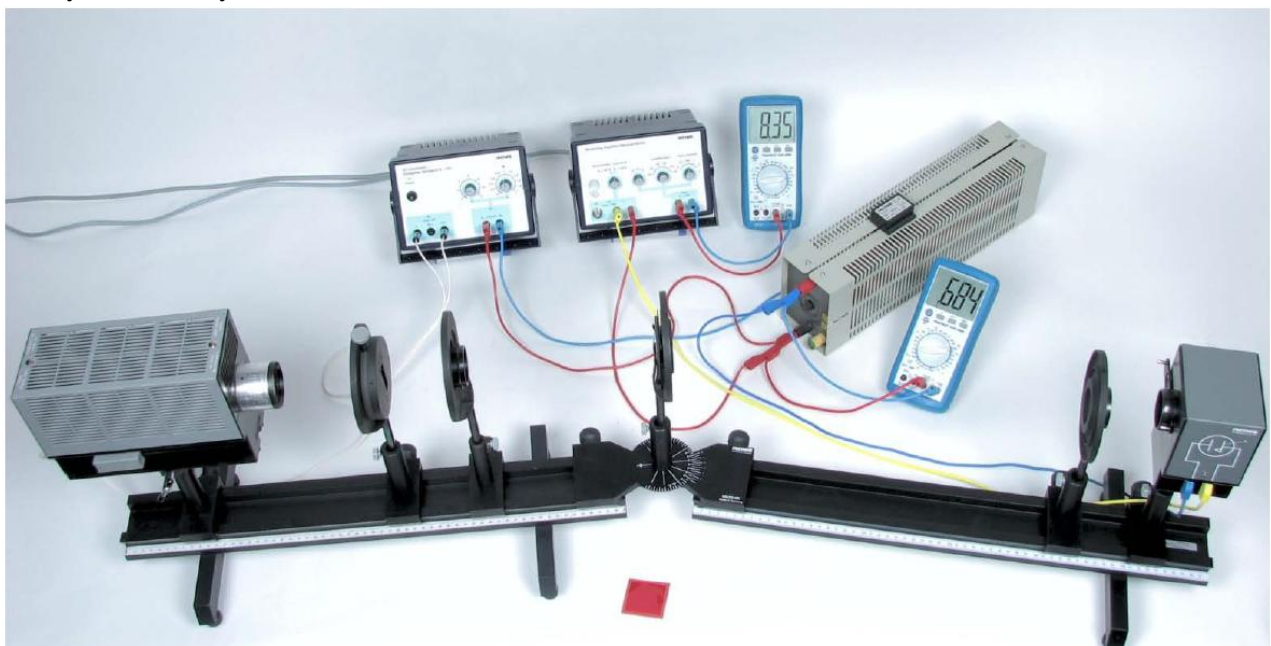
Energia fotonu, absorpcja fotonu, zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne, praca wyjścia, fotoogniwo, teoria kwantów, stała Plancka, spektrometr siatkowy.

Podstawy

Zjawisko fotoelektryczne stało się jednym z kluczowych eksperymentów w rozwoju współczesnej fizyki. Białe światło z żarówki, po przefiltrowaniu przez spektrometr siatkowy, trafia na fotokomórkę. Maksymalna energia emitowanych elektronów (fotoelektronów) zależy wyłącznie od częstotliwości padającego światła i jest niezależna od jego natężenia. Ta prawda wydaje się być sprzeczna z falową teorią światła, ale jest zrozumiała w ramach korpuskularnej teorii. Napięcie hamowania U_0 przy różnych częstotliwościach światła wyznaczamy z charakterystyki prądowo napięciowej fotokomórki, a następnie przygotowujemy wykres zależności U_0 od f światła. Z tego wykresu wyznaczamy stałą Plancka.

Wyposażenie

1 Fotoogniwo w obudowie	06779-00
1 Siatka dyfrakcyjna, 600 linii/mm	08546-00
1 Filtr barwny, światło czerwone, >600 nm	08416-00
1 Szczelina, regulowana	08049-00
1 Uchwyt do przysłony	08040-00
2 Uchwyty na soczewkę	08012-00
2 Soczewki w obudowie $f = +100$ mm	08021-01
2 Przewody połączeniowe, wtyczka 4 mm, 32A, czerwony, $l = 50$ cm	07361-01
2 Przewody połączeniowe, wtyczka 4 mm, 32A, niebieski, $l = 50$ cm	07361-04
1 Przewód połączeniowy, wtyczka 4 mm, 32A, czerwony, $l = 150$ cm	07364-01
2 Przewody połączeniowe, wtyczka 4 mm, 32A, czerwony, $l = 150$ cm	07364-04
1 Przewód połączeniowy, wtyczka 4 mm, 32A, żółty, $l = 150$ cm	07364-02
1 Przewód połączeniowy, wtyczka 4 mm, 32A, czarny, $l = 150$ cm	07364-05
1 Rezystor zmienny, 100 Ohm	06114-02



Rys. Przygotowanie doświadczenia P2510502

1 Lampa eksperymentalna 2	08129-01
1 Lampa halogenowa, 12 V, 50 W	08129-06
1 Uchwyt G 3.65 dla lampy halogenowej 50/100 W	08129-04
1 Podwójny kondensator, $f = 60$ mm	08137-00
1 Zasilacz 0...12 V DC/ 6 V, 12 V AC, 230 V	13505-93
1 Uniwersalny wzmacniacz pomiarowy	13626-93
2 Multimetry cyfrowe, 3 1/2 cyfry	07122-00
2 Ława optyczny profilowana, $l = 600$ mm	08283-00
3 Podstawy do ławy optycznej profilowanej, regulowane	08284-00
1 Przegub obrotowy ławy optycznej profilowanej	08285-00
5 Suwaków do ławy optycznej profilowanej, $h = 80$ mm	08286-02

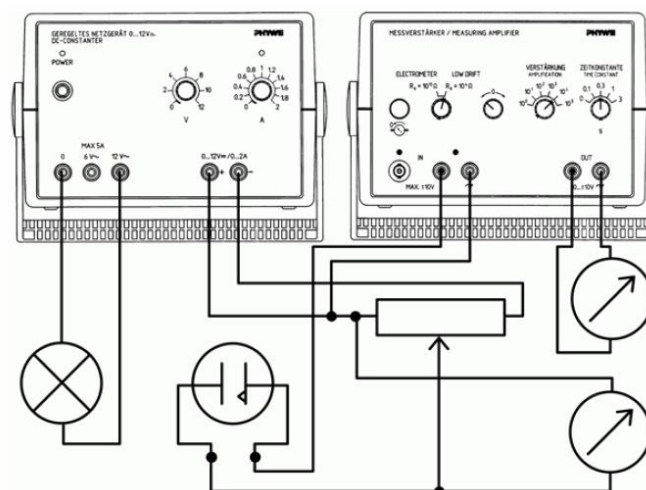
Zadania

1. Wyznacz częstotliwość światła f w zależności od kąta spektrometru
2. Doświadczalnie wyznacz napięcie hamowania U_0 dla różnych częstotliwości światła f i przygotuj wykres zależności U_0 od f .
3. Z zależności napięcia hamowania U_0 od częstotliwości światła f oblicz stałą Plancka.

Przygotowanie i sposób postępowania

Układ do doświadczenia do demonstracji zjawiska fotoelektrycznego zawiera fotokomórkę, której katoda jest pobudzana wiązką światła o określonej częstotliwości f ; podłączony do anody potencjometr nadaje jej odpowiedni potencjał (dodatnie lub ujemne napięcie U względem katody); woltomierz służy do pomiaru tego napięcia; mikroamperomierz mierzy natężenie fotoprądu I .

- Połącz dwie ławy optyczne przegubem obrotowym tak, aby jedna stała mocno na stole, a druga mogła się obracać
- Ustaw lampę 9,0 cm, szczelinę 34,0 cm, a pierwszą 100 mm soczewkę 44,0 cm od lewej strony ławy optycznej i włącz lampę
- Ustaw szerokość szczeliny na taką jak ma fotokomórka
- Przesuń uchwyt żarówki wewnątrz lampy, tak aby skupić światło wychodzące z lampy na płaszczyźnie szczeliny
- Przesuń obiektyw tak, aby światło było równoległe po przejściu przez soczewkę - można ocenić wiązkę na ścianie
- Włóż 600 liniową siatkę do uchwytu znajdującego się w środku przegubu
- Obserwując widma na powierzchniach (w otoczeniu), wyreguluj siatkę, tak aby linie były pionowe - ta sama wysokość po obu stronach siatki
- Umieść fotokomórkę na drugim końcu drugiej ławy optycznej, użyj na wejściu szczeliny
- Skup wiązkę światła na szczelinie fotokomórki za pomocą drugiej soczewki 100 mm umieszczonej przed nią
- Zapisz kąt jako kąt zerowy, gdy wszystkie nieugięte wiązki światła docierającego do szczeliny wejściowej fotokomórki



Rys. 2: Schemat doświadczenia

- Wykonaj połączenia elektryczne zgodnie z Rysunkiem 2
- Ustaw wzmacniacz pomiarowy w tryb „low drift”, wzmocnienie 10^5 i stała czasowa 0,3 s
- Sprawdź zerowanie uniwersalnego wzmacniacza - bez podłączenia sygnału na wejściu, ustaw, za pomocą przycisku zerowania, napięcie wyjściowe wzmacniacza na zero
- Ustaw napięcie zasilania na potencjometrze na 3 V, natężenie prądu na 1 A.
- Obserwuj natężenie na wyjściu wzmacniacza, które jest proporcjonalne do natężenia „fotoprądu” zależnego od napięcia polaryzacji fotokomórki
- Zmierz napięcia obniżające do zera natężenie prądu, dla różnych kątów dla pierwszego rzędu widma dyfrakcyjnego światła - dla siatki 600 linii/mm od 13° do 25° .
- Aby zapobiec zakłóceniom UV, światło może przechodzić przez czerwony filtr (dla kąta dyfrakcji powyżej 21°).

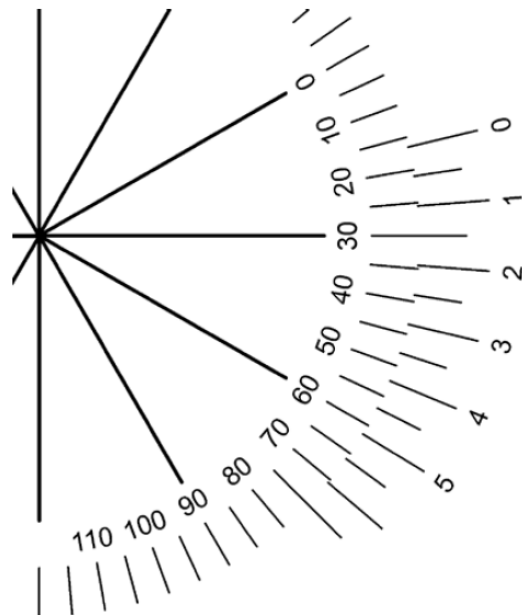
Uwagi:

Wejście wzmacniacza ma oporność 10.000Ω . Jeśli wzmacniacz jest ustawiony na wzmocnienie 10^4 , 1V na wyjściu wzmacniacza odpowiada 0,0001 V na wejściu, a tym samym odpowiada natężeniu prądu 10 nA.

Stała czasowa jest ustawiona tak, aby uniknąć błędów spowodowanych wpływem szumów pochodzących z sieci. Skalę Verniera na przegubie obrotowym należy odczytać następująco: weź kolejny niższy odczyt kąta na skali wewnętrznej obok znaku zero skali zewnętrznej i dodaj kąt odczytany na skali Verniera w miejscu, gdzie linie na obu skalach (zewnętrznej, ruchomej) zbiegają się, zobacz przykład na Rysunku 3.

Teoria i analiza wyników

Zewnętrzny efekt fotoelektryczny po raz pierwszy zostało opisane w 1886 roku przez Heinricha Hertza. Wkrótce stało się jasne, że to zjawisko wykazuje pewne cechy, których nie da się wyjaśnić za pomocą klasycznej falowej teorii światła. Na przykład gdy natężenie światła padającego na metal zwiększa się, w teorii klasycznej elektrony uwalniane z niego absorbowałyby więcej energii. Jednak eksperymenty wykazały, że maksymalna, możliwa energia emitowanych elektronów zależy jedynie od częstotliwości padającego światła i jest niezależna od jego natężenia. Teoretyczne wyjaśnienie podane zostało przez Einsteina w 1905 roku. Zasugerował on, że w pewnym zakresie, światło może zachowywać się jak cząstki, poruszające się ze stałą prędkością (prędkość



światła w próżni) i posiadające energię $E = hf$. Wyjaśnienie Einsteina zjawiska fotoelektrycznego, demonstruje cząstki światła zwane fotonami, które przyczyniły się do rozwoju teorii kwantów. Tak więc, zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne jest jednym z najważniejszych doświadczeń w rozwoju nowoczesnej fizyki, a Einstein otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki "za odkrycie prawa efektu fotoelektrycznego".

Rys. 3: Przykład odczytu skali Verniera: najbliższa wartość w pobliżu znaku zero wynosi 15° , kolejne znaki zbiegają się na $1,5^\circ$, więc odczytany kąt wynosi $16,5^\circ$

Zadanie 1: Wyznacz zależność częstotliwości światła f od kąta spektrometru

Częstotliwość światła padającego na fotokomórkę wyznaczymy za pomocą następujących równań:

$$d \sin \alpha = n \cdot \lambda \quad (1)$$

$$\alpha = \arcsin(\lambda/d) \quad (2)$$

α jest kątem spektrometru, d jest stałą siatki (tu: 1/600 mm), λ jest długością fali emitowanego światła, a w tym przypadku, nr prążka dyfrakcyjnego wynosi 1.

Częstotliwość światła można wyznaczyć a długość fali λ ze wzoru $f = c/\lambda$ z prędkością światła $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$.

Zadanie 2: Wyznaczyć doświadczalnie napięcie hamowania U_0 dla różnych częstotliwości światła i przygotować wykres U_0 w funkcji częstotliwości f .

Wewnątrz fotokomórki, katoda o szczególnie niskiej pracy wyjścia, umieszczona jest, wraz z metalową anodą, w próżniowej rurce. Jeśli foton o częstotliwości f uderzy w katodę i jego energia jest wystarczająca, elektron może opuścić materiał katody (zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne).

Jeśli emitowane elektrony dotrą do anody, zostaną przez nią wchłonięte i popłyną fotoprądem.

Efekt fotoelektryczny polega na oddziaływaniu fotonu z elektronem. Podczas tego procesu, pęd i energia są zachowane, elektron absorbuje foton i po reakcji uzyskuje jego pełną energię hf . Jeżeli energia fotonu hf jest większa niż praca wyjścia W_C (współczynnik pracy katody), elektron może po reakcji opuścić tę substancję z maksymalną energią kinetyczną $W_{kin} = hf - W_C$. Nazywamy to zjawiskiem fotoelektrycznym zewnętrznym i opisujemy równaniem:

$$hf = W_C + W_{kin} \quad (\text{równanie Einsteina}) \quad (3)$$

Energię kinetyczną W_{kin} emitowanych elektronów wyznaczamy za pomocą hamującego pola elektrycznego: do anody fotokomórki przykładamy, ujemny względem katody, potencjał. Opóźnia on ruch fotoelektronów, a tym samym zmniejsza natężenie fotoprądu. Ponieważ nie wszystkie elektrony mają maksymalną energię, ulega ona rozkładowi. Wielkość napięcia, gdy do anody nie docierają elektrony, a napięcie znika, nazywamy napięciem hamowania i oznaczamy U_0 .

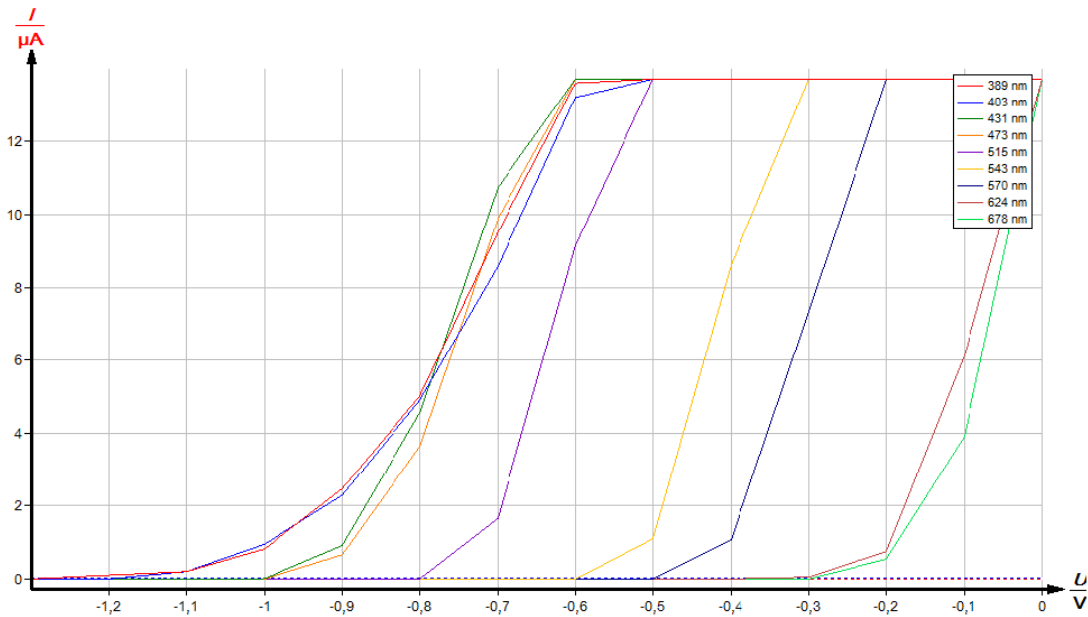
Przygotowując wykres zależności I od napięcia bias U_{bias} wykazujemy zależność napięcia U_0 od długości fali λ .

Zadanie 3: Z zależności napięcia hamowania od częstotliwości światła, wyznacz stałą Plancka.

Elektrony mogą dotrzeć do anody, gdy ich energia kinetyczna W_{kin} jest większa niż energia działającego w kierunku przeciwnym pola elektrycznego wytworzonego przez napięcie polaryzujące U_{bias} plus nieznanne pole elektryczne wytworzone przez napięcie U_{AC} pomiędzy anodą i katodą, które ma taki sam kierunek jak napięcie bias. Patrz Rysunek 4.

Tabela 1: Wyniki

Kąt spektrometru	λ/nm	$f/10^{12}\text{ Hz}$	U_0/V
13,5	389	772	1,3
14	403	744	1,2
15	431	696	1,05
16,5	473	634	0,9
18	515	582	0,7
19	543	552	0,55
20	570	526	0,47
22	624	480	0,32
24	678	442	0,25



Rys. 4: Natężenie prądu fotoelektrycznego I w funkcji napięcia polaryzacji dla różnych częstotliwości światła

Ponieważ napięcie kontaktowe jest tego samego rzędu co napięcie polaryzujące, nie możemy go lekceważyć. Dlatego nie jest możliwe wyznaczenie bezwzględnej energii kinetycznej elektronów. Niemniej jednak stałą Plancka można obliczyć z zależności napięcia hamowania od częstotliwości światła, zgodnie z poniższymi uwagami:

Przy napięciu hamowania U_0 , energia kinetyczna elektronu W_{kin} jest równa energii traconej w polu elektrycznym eU (U zawiera napięcie hamowania U_0 i napięcie U_{AC}):

$$e(U_0 + U_{AC}) = W_{kin} \quad (4)$$

Napięcie kontaktowe oblicza się na podstawie potencjałów elektrochemicznych anody i katody U_A i U_C . Mnożąc obie wartości przez ładunek elementarny $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$. Odpowiadają im prace W_A i W_C . Zatem równanie (4) jest równoważne równaniu:

$$eU_0 + W_A - W_C = W_{kin} \quad (5)$$

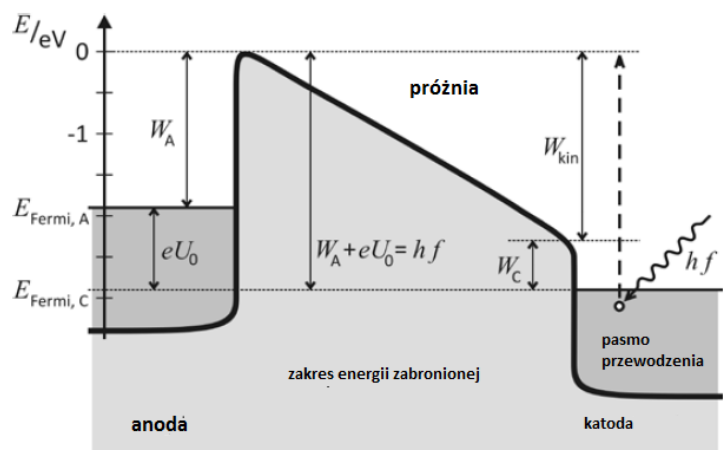
Aby obliczyć stałą Plancka h przy wykorzystaniu zjawiska fotoelektrycznego, porównujemy (5) z równaniem Einsteina (3):

$$W_{kin} = eU_0 + W_A - W_C = hf - W_C \quad (6)$$

Zatem funkcja pracy katody nie pojawia się w równaniu dla napięcia hamowania i równanie (6) można zapisać w postaci następującej funkcji liniowej:

$$eU_0 = hf - W_A$$

lub



Rys. 5: Schemat energetyczny elektronów w fotokomórce oświetlonej światłem z $\lambda = 436 \text{ nm}$ / $f = 688 \text{ THz}$ i polaryzacją $U_0 = 1 \text{ V}$

$$U_0 = f \cdot \frac{h}{e} - U_A \quad (7)$$

Ponieważ U_A jest stałe, występuje liniowa zależność pomiędzy napięciem hamowania U_0 i częstotliwością światła f . Nachylenie tej funkcji pozwala wyznaczyć stałą Plancka h .

Zmierzone nachylenie wynosi:

$$0,00329 \text{ V/THz}$$

Z mnożenia przez e uzyskujemy: $h = 5,27 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Obliczona wartość może różnić $\pm 25\%$ od wartości z literatury: $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

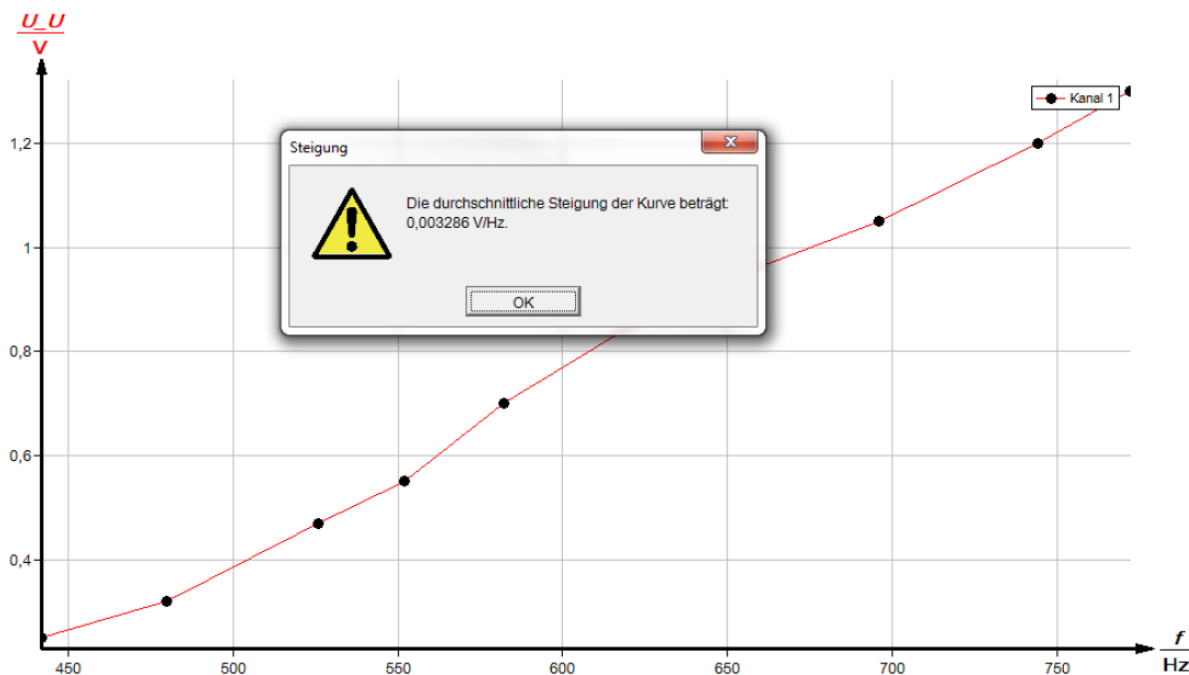
Uwagi

Funkcja pracy katody W_C nie pojawia się we wzorze na napięcie hamowania. Wynika to z faktu, że elektrony pochodzą z poziomu Fermiego katody, a następnie muszą dotrzeć do powierzchni anody, co pozwala na przejście powierzchni katody.

Z drugiej strony, funkcja pracy katody warunkuje wystarczalność energii fotonu do uwolnienia elektronu z katody. Historycznie rzecz biorąc, początkowo dla zjawiska fotoelektrycznego, analizowano próg długości fali, a dopiero później rozumiano, że widmo energii fotoelektronów zależy od częstotliwości i natężenia światła.

Napięcie hamowania U_0 wyznaczysz analizując niewielki stok krzywej przy przekraczaniu osi X (punkt zerowy). Dokładne wyznaczenie napięcia hamowania jest zatem skomplikowane.

Dla wysokich napięć polaryzujących, pojawia się prąd „ujemny”. Prąd ten jest niezależny od prądu fotoelektrycznego z anody do katody. Elektrony mogą zostać wyzwolone również z anody. Liczba elektronów również w tym przypadku zależy od częstotliwości światła. Można przypuszczać, że natężenie i zależność od długości fali, dla fotoelektronów anodowych (przeptywających od anody do katody) jest znacznie mniejsza niż dla fotoelektronów „katodowych”. Tak więc przesunięcie punktu zerowego względem natężenia światła zależy od tego zjawiska i jest różne dla różnych długości fal,



Rys. 6: Napięcie hamowania U_0 w funkcji częstotliwości światła.

dlatego pomiar punktu zerowego krzywej charakterystyki prądowo-napięciowej fotokomórki nie jest wiarygodny.

Ogólny prąd wsteczny może być jednak uznany za mały, ze względu na znacznie niższą pracę wyjścia katody w stosunku do anody. Dzięki temu można zaniedbać ten efekt.

Inne przesunięcie punktu zerowego w zależności od natężenia musiałyby być zmierzone dla każdej długości fali i należałoby wziąć pod uwagę normalizację względem natężenia.

Ponieważ na badanie ma wpływ rozkład energii fotoelektronów, precyzja tych pomiarów nie będzie tak duża, aby można ją polecić. Praca wyjścia dla elektronów opuszczających substancję i energia elektronów przed reakcją z fotonem nie posiada ostrych ekstremów, dlatego ogólna, osiągalna dokładność tej metody jest ograniczona.

Dla precyzyjnego pomiaru stałej Plancka bardziej odpowiednie jest promieniowanie X (rentgenowskie), ale badanie zjawisk fotoelektrycznego zewnętrznego w świetle widzialnym ma ogromne znaczenie historyczne.

Miejsce na notatki