

Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne. Wyznaczanie charakterystyki fotooporu

Wymagania do ćwiczenia

1. Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne i wewnętrzne jako wynik oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią.
2. Budowa i zasada działania fotoopornika.
3. Fotometria.

Literatura

1. J. Orear, Fizyka, t.2, WNT Warszawa, 1990, str. 89-91.
2. J. R. Meyer-Arendt, Wstęp do optyki, PWN Warszawa, 1977, str. 367-369.
3. OpenStax, Fizyka dla szkół wyższych. Tom 3, Rozdział 6.2: Efekt fotoelektryczny.

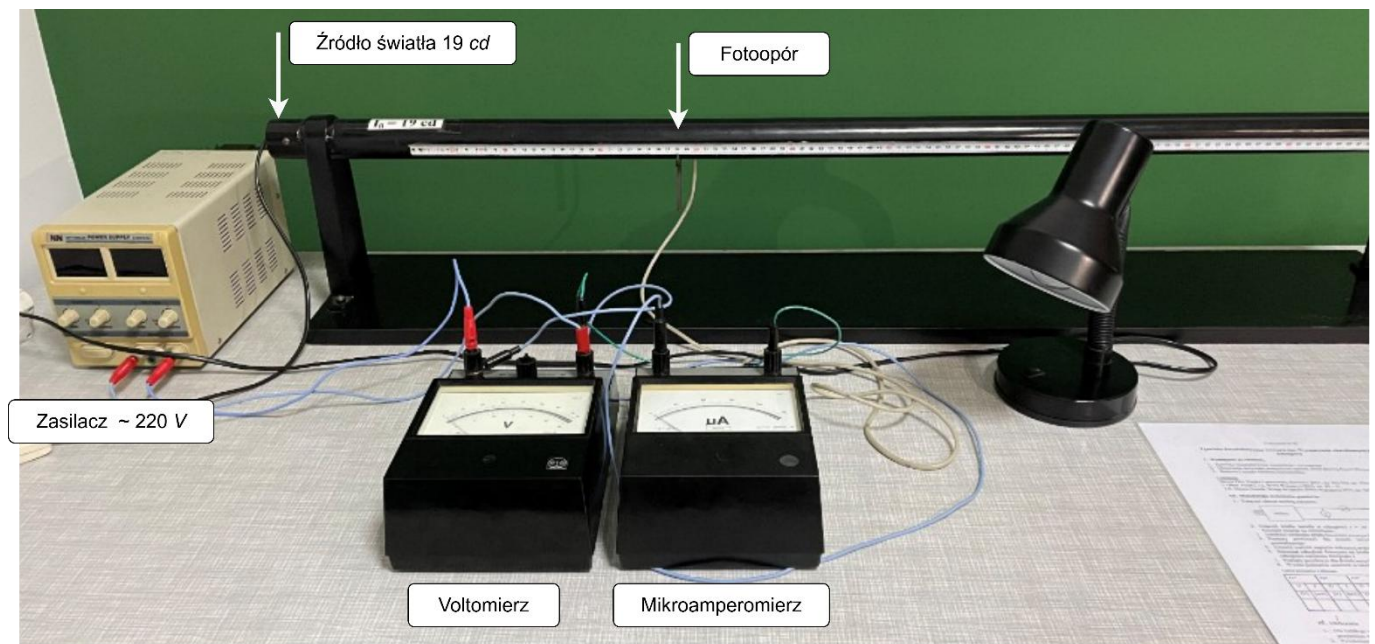
Przykładowe pytania

1. Jakie są podstawowe różnice między falową a korpuskularną teorią promieniowania elektromagnetycznego?
2. Jakie zjawiska fizyczne potwierdzają falową naturę promieniowania elektromagnetycznego?
3. W jaki sposób eksperymenty fotoelektryczne obaliły przewidywania klasycznej teorii falowej?
4. Na czym polega zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne i jakie warunki muszą być spełnione, aby ono zaszło?
5. Co to jest praca wyjścia elektronu i od czego zależy jej wartość?
6. Dlaczego światło widzialne wywołuje zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne tylko w niektórych metalach?
7. Na czym polega zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne i w jakich materiałach występuje?
8. Jak zmienia się oporność fotoopornika pod wpływem oświetlenia i dlaczego?
9. Jakie są różnice między zjawiskiem fotoelektrycznym zewnętrznym a wewnętrznym?
10. Wyjaśnij podstawy teorii pasmowej ciała stałego. Czym różnią się od siebie metal i półprzewodnik?
11. W jaki sposób natężenie oświetlenia zależy od odległości źródła światła od fotoopornika?

12. W jaki sposób dokonuje się linearyzacji zależności prądu fotoelektrycznego od oświetlenia?
13. Na czym polega metoda najmniejszych kwadratów?
14. Jak określamy niepewność pomiaru miernikiem analogowym?

Przyrządy pomiarowe

Mikroamperomierz, woltomierz, przymiar milimetrowy



WPROWADZENIE DO TEMATYKI ĆWICZENIA

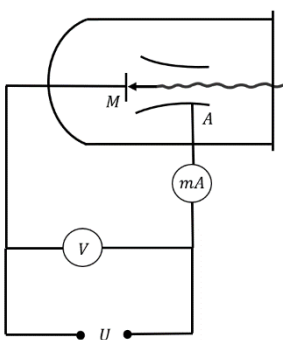


Wstęp

Promieniowanie elektromagnetyczne jest niewątpliwie falą, co potwierdzają takie zjawiska jak np. interferencja, dyfrakcja, polaryzacja. Istnieje jednak szereg zjawisk, w których promieniowanie zachowuje się tak jakby było wiązką cząstek (kwantów), które nazywamy również fotonami. Już w 1900 r. Max Planck wprowadził pojęcie kwantyzacji energii promieniowania, przy wyjaśnianiu promieniowania ciała doskonale czarnego, zakładając, że promieniowanie elektromagnetyczne emitowane jest w postaci porcji energii $h\nu$. Następnie Einstein w 1905 r. założył dodatkowo, że promieniowanie jest również pochłaniane takimi samymi porcjami $h\nu$ i rozchodzi się w postaci dyskretnych cząstek. Przyjęcie fotonowej (korpuskularnej) natury promieniowania pozwoliło wyjaśnić wyniki eksperymentalne związane między innymi ze zjawiskiem fotoelektrycznym, które okazały się być w sprzeczności z teorią falową promieniowania.



Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne.



Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne polega na wybijaniu elektronów z powierzchni metalu pod wpływem światła. Przeprowadźmy doświadczenie w układzie przedstawionym na rysunku. Promieniowanie elektromagnetyczne o częstości ν pada na płytkę metalową M i wybija z niej elektrony (zwane fotoelektronami). Pomiędzy płytką M i anodą A utrzymywana jest stała różnica potencjałów U i wybite elektrony są przyciągane do anody - w obwodzie płynie prąd fotoelektryczny (fotoprąd), którego natężenie mierzone jest za pomocą amperomierza. Zależność natężenia prądu I od przyłożonego napięcia U , dla dwóch wartości natężenia promieniowania padającego I_z i $2I_z$, przedstawiona została na Rys. 2b. Jak widać, natężenie prądu nie zależy od napięcia U dla jego dużych wartości - oznacza to, że wszystkie wybite z metalu elektrony zostają przyciągnięte przez anodę. Gdy napięcie maleje, część elektronów nie dociera do anody - natężenie prądu maleje. Przy wartości $U = 0$, prąd $I \neq 0$ - energia kinetyczna wybitych elektronów jest wystarczająca, aby dotarły one do anody bez napięcia przyciągającego. Jeśli zmienimy znak napięcia, to przy wartości $U = -U_0$

prąd przestaje płynąć (napięcie hamujące). Wszystkie elektrony wybite z metalu, nawet te najszybsze, zostały zatrzymane przez pole elektryczne, które wykonało pracę, która odebrała energię elektronom (o ładunku e):

$$W_e = eU_0 = E_{k \max} \quad (1)$$

Wartość maksymalnej energii kinetycznej $E_{k \max}$ wybitych elektronów, a więc również wartość napięcia hamującego U_0 , nie zależy od natężenia padającego promieniowania I_z . Wynik ten jest w sprzeczności z falową teorią promieniowania, której przewidywania są następujące: elektron znajdujący się w płycie metalowej poddany jest działaniu fali elektromagnetycznej, której natężenie $I_z \propto E_0^2$, gdzie E_0 jest amplitudą natężenia pola elektrycznego fali; jeśli rośnie natężenie promieniowania, to rośnie również natężenie pola elektrycznego E . Siła działająca na elektron, $F = eE$ również rośnie, a więc rośnie przyspieszenie elektronu $a = \frac{F}{m}$. Elektron osiąga wówczas większą prędkość, a więc większą energię kinetyczną. Praca wykonana przy hamowaniu elektronu, a co za tym idzie – napięcie hamujące musiałyby rosnąć.

Jeśli natomiast za Einsteinem założymy, że:

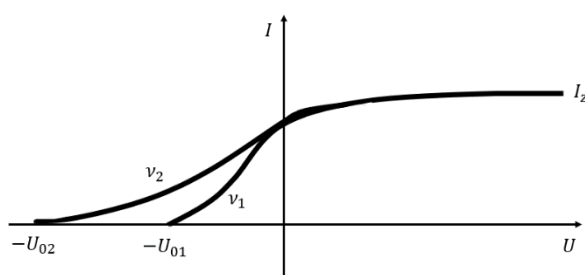
- padające promieniowanie jest wiązką fotonów, każdy o energii

$$E_f = h\nu \quad (2)$$

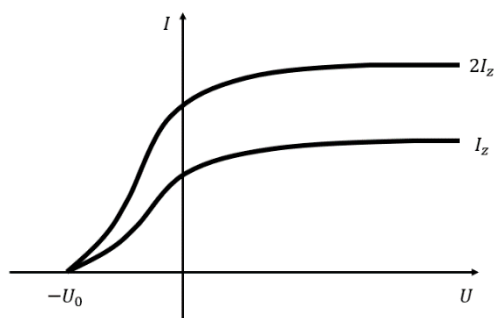
gdzie ν jest częstotliwością padającego promieniowania, $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Js – stała Plancka,

- jeden foton oddziałuje z jednym elektronem,

to zwiększenie natężenia promieniowania I_z w padającej na metal wiązce powoduje zwiększenie liczby fotonów. Spowoduje to zwiększenie liczby wybijanych elektronów, a więc obserwowany wzrost natężenia fotoprądu I . Nie zmieni się natomiast energia fotonu $h\nu$, a więc również energia kinetyczna fotoelektronu – napięcie hamowania nie zależy od natężenia promieniowania.

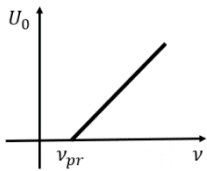


Rys. 2a, 2b



Wyniki eksperymentu, podczas którego podaje się różną częstotliwość padającego promieniowania przedstawione zostały obok na wykresie $I(U)$ dla dwóch różnych częstotliwości ν_1, ν_2 , przy stałej $I_z = \text{const}$. Wartość napięcia hamującego jest tym większa im większa jest częstotliwość promieniowania. Napięcie hamujące zależy do częstotliwości światła i przy częstotliwościach mniejszych od pewnej częstotliwości progowej ν_{pr} (zależnej od rodzaju metalu) zjawisko fotoelektryczne nie występuje, niezależnie od wartości natężenia promieniowania I_z .

Wynik ten jest również w sprzeczności z teorią falową promieniowania, z której wynika, że niezależnie jak niska jest częstotliwość padającego promieniowania, elektrony powinny być wybijane z metalu zawsze wtedy, gdy dostarczymy im wystarczająco dużej energii związanej z natężeniem światła.



Istnienie energii progowej jest natomiast zgodne z założeniem, że energia jest przekazywana w postaci kwantów. Elektrony są utrzymywane w metalu siłami elektrycznymi. Aby elektron mógł opuścić metal, musi mu zostać dostarczona pewna energia, zwana *pracą wyjścia* W . Energia ta zależy od rodzaju metalu, z którego zbudowana jest tarcza. Jeśli dostarczona elektronowi energia jest niższa od pracy wyjścia, wówczas zjawisko fotoelektryczne nie zajdzie. Jeśli dostarczona energia jest wyższa od pracy wyjścia – elektron po opuszczeniu metalu uzyska dodatkowo energię kinetyczną. Einstein zastosował, do opisu zjawiska fotoelektrycznego, zasadę zachowania energii w postaci

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

Jest to podstawowe prawo opisujące zjawisko fotoelektryczne. Możemy obliczyć z tego prawa energię kinetyczną fotoelektronu, która jest równa

$$E_{k\max} = h\nu - W \quad (4)$$

Wykorzystując zależność (1) i przepisując ostatnie równanie w postaci

$$U_0 = \frac{h\nu}{e} - \frac{W}{e} \quad (5)$$

widzimy, że napięcie hamujące jest liniową funkcją częstości – wynik zgodny z doświadczeniem. Praca wyjścia jest wielkością zależną od rodzaju materiału i jej wartość jest rzędu kilku elektronowoltów. Przykładowe wartości podano w tabeli poniżej

materiał	Pt	Au	Ni	C	Cu	Ag	Al	Na	Ba	K	Cs
W [eV]	5.5	5.3	5.1	5.0	4.7	4.5	4.3	2.7	2.6	2.3	2.0

Maksymalna energia promieniowania widzialnego o długości 400 nm jest równa ok. 3 eV. Widać więc, że zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne wywołane światłem widzialnym można zaobserwować tylko dla sodu, baru, potasu i cezu. W pozostałych przypadkach zachodzi ono dla promieniowania o większych energiach, a więc dla promieniowania ultrafioletowego, promieniowania rentgenowskiego, promieniowania gamma.

Otrzymane wyniki eksperymentów są potwierdzone przez fotonową naturę promieniowania. Oznacza to, że podczas oddziaływania promieniowania z materią, promieniowanie zachowuje się jak cząstka. Innymi zjawiskami potwierdzającymi fotonową naturę promieniowania są nie omówione tutaj zjawiska Comptona i Thomsona (sprężyste rozproszenie fotonu na swobodnych elektronach i elektronach silnie związanych z rdzeniami atomowymi) oraz tworzenie par elektron - pozyton.

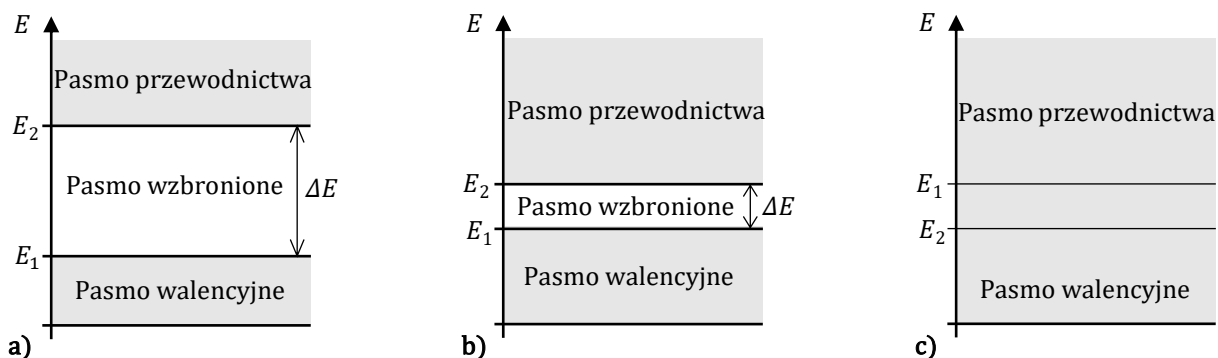


Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne

Ciała stałe, ze względu na przewodnictwo elektryczne możemy podzielić na metale, półprzewodniki, izolatory. Wartość oporu właściwego ρ w temperaturze pokojowej tych materiałów zmienia się od wartości rzędu $10^{-6} \Omega\text{cm}$ dla metali do wartości $10^{14} - 10^{12} \Omega\text{cm}$ dla izolatorów. Opór właściwy półprzewodników mieści się w przedziale $10^{-2} \div 10^9 \Omega\text{cm}$. Przewodność elektryczna σ , będąca odwrotnością oporu właściwego, zależy od koncentracji nośników ładunku n , ich ruchliwości μ i ładunku q

$$\sigma = qn\mu \quad (6)$$

Elektron w kryształach jest przyciągany przez dodatnio naładowane jądra atomów i odpychany przez inne elektrony. Posiada energię związaną z tymi oddziaływaniami. Przyjmuje ona różne wartości, jednak nie całkiem dowolne. Zakres możliwych energii elektronu nazywamy **widmem**. Widmo energetyczne elektronu w kryształach charakteryzuje się pasmami, czyli przedziałami dozwolonych energii o skończonej szerokości. Zgodnie z teorią pasmowa elektrony zajmują stany w dozwolonych pasmach energetycznych, co znaczy tylko tyle, że energia każdego elektronu może przyjmować jakąkolwiek wartość z któregoś dozwolonego przedziału energii, czyli z któregoś pasma.



Schematy pasm energetycznych półprzewodników: a) izolator, b) półprzewodnik, c) przewodnik.

Pasma energetyczne dzielą się na dwa główne typy: pasmo walencyjne oraz pasmo przewodnictwa. Pasma walencyjne zawiera energie elektronów związanych z atomami, które z tego powodu nie uczestniczą w przewodzeniu prądu, natomiast pasmo przewodnictwa składa się z energii wolnych elektronów, które mogą swobodnie poruszać się poza atomami i tworzyć prąd elektryczny.

Między pasmami energetycznymi występuje przerwa energetyczna (pasmo wzbronione), określająca zakres energii, jakiej elektrony nie mogą posiadać. Szerokość tej przerwy ma kluczowe znaczenie dla przewodnictwa materiału. Dla izolatora przerwa energetyczna jest na tyle duża, że elektrony znajdujące się na powłokach walencyjnych atomów i posiadające energię z pasma walencyjnego nie mogą zdobyć wystarczającej ilości

energii ΔE , np. na skutek ruchów cieplnych, aby ich energia miała wartość należącą do pasma przewodnictwa, czyli nie mogą oderwać się od atomów i tworzyć prądu elektrycznego.

Dla półprzewodników przerwa energetyczna jest niewielka, a wtedy mała część elektronów walencyjnych może zdobyć wystarczająco dużo energii, np. na skutek ruchów cieplnych, aby oderwać się od atomu – ich energia zwiększa się z należącej do pasma walencyjnego na należącą do pasma przewodnictwa (w żargonie mówimy, że elektrony przechodzą z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa) i jako takie uzyskują swobodę ruchu i mogą brać udział w przepływie prądu.

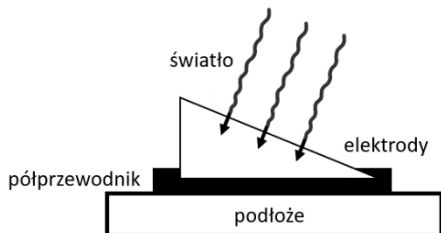
Bardzo mała przerwa energetyczna lub brak tej przerwy wskazuje na dobry przewodnik. Wtedy energia elektronów z pasma walencyjnego jest jednocześnie energią z pasma przewodnictwa, czyli wszystkie elektrony walencyjne są jednocześnie elektronami przewodnictwa. Potocznie mówimy, że elektrony przechodzą z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa – jest to przejście samoistne. Skutkuje to tym, że wszystkie elektrony walencyjne są oderwane od atomów i mogą swobodnie się poruszać tworząc prąd.

Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne występuje w półprzewodnikach. Jeśli na półprzewodnik pada promieniowanie o energii $E_f = h\nu$ i energia ta jest większa od energii pasma wzbronionego, to w wyniku pochłonięcia energii elektron z pasma walencyjnego przechodzi do pasma przewodnictwa. Powstaje w ten sposób nowa para nośników prądu: elektron w paśmie przewodnictwa, czyli elektron swobodny, i dziura w paśmie walencyjnym, czyli brak elektronu walencyjnego w atomie. Ponieważ szerokość pasma wzbronionego w półprzewodnikach jest rzędu elektronowolta, zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne zachodzi dla promieniowania widzialnego. W innym typie półprzewodników, tzw. domieszkowanych, elektrony pod wpływem energii światła mogą przechodzić z pasma walencyjnego na poziomy domieszkowe (donorowe) lub z poziomów domieszkowych do pasma przewodnictwa.



Zasada działania fotoopornika

Działanie fotooporników oparte jest na wyżej omówionym zjawisku fotoelektrycznym wewnętrznym. Liczba



generowanych nośników jest proporcjonalna do liczby fotonów padających na fotoopornik, przewodnictwo elektryczne wzrasta, a więc oporność fotoopornika maleje.

Zmiany rezystancji ΔR naświetlonego rezystora zależą od parametrów materiału półprzewodnikowego (ruchliwości dziur i elektronów, czasu życia nośników ładunku, itp), wymiarów detektora (odległość między elektrodami, pole powierzchni fotoczutej) i właściwości docierającego promieniowania (natężenie promieniowania, jego częstota). Efektem tych zmian jest przepływ prądu fotoelektrycznego w obwodzie fotorezystora zasilanego

napięciem U (bez względu na polaryzację tego napięcia) i pojawianie się na wyjściu układu sygnału elektrycznego proporcjonalnego do ΔR .

Jeżeli dany element, np. fotorezystor, zostanie oświetlony za pomocą źródła światła, to pochłanianie światła w powietrzu na odległości rzędu metrów można pominąć. Dlatego gdy światło jest emitowane przez źródło jednorodnie dookoła w pełny kąt bryłowy $\omega = 4\pi$, to z zasady zachowania energii obliczenie natężenia oświetlenia E (w luksach) na sferycznej powierzchni odległej o r od źródła światła, ze światłości I_z źródła światła, wygląda następująco

$$E = \frac{I_z \omega}{S} = \frac{I_z \cdot 4\pi}{4\pi r^2} = \frac{I_z}{r^2} \quad (7)$$

Oświetlenie fotorezystora powoduje zwiększenie przepływającego prądu (zmniejsza się jego rezystancja). Prąd będący różnicą całkowitego prądu płynącego przez fotoopornik i prądu ciemnego (prąd płynący przez fotoopornik przy braku oświetlenia) nazywamy **prądem fotoelektrycznym**. Jego wartość I zależy od natężenia oświetlenia E fotoopornika i jest określona przybliżoną zależnością w postaci

$$I = aE^b \quad (8)$$

w której parametr a jest zależny od wartości przyłożonego na fotoopornik napięcia, natomiast b jest stałą zależną od materiału półprzewodnikowego i rodzaju domieszek.

Parametry te można wyznaczyć posługując się metodą najmniejszych kwadratów, uprzednio linearyzując zależność (8) przez zlogarytmowanie obu jej stron

$$\ln I = \ln a + b \cdot \ln E \quad (9)$$

co można też zapisać jako

$$y = Ax + B \quad (10)$$

$$\text{gdzie } x = \ln E, \ y = \ln I, \ B = \ln a, \ A = b. \quad (11)$$

W zależności od zastosowań wykonuje się fotooporniki z różnych materiałów półprzewodnikowych. Przykładowo w zakresie widzialnym są to: krzem (Si), siarczki i tellurek ołowiu (PbS, PbTe), a w zakresie podczerwieni antymonek indu (InSb), chłogogenidki ołowiu i cyny (PbSnTe) lub tellurki kadmowo-rtęciowe (HgCdTe).

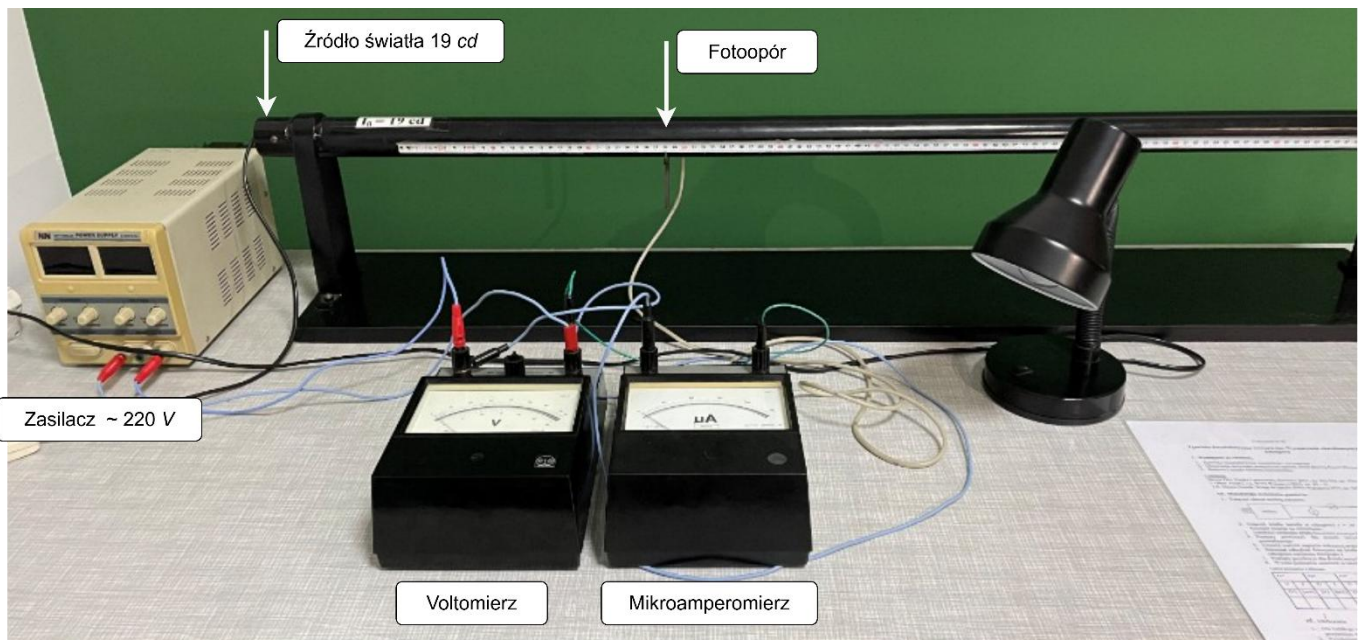


Metodologia wykonania ćwiczenia

1. Połączyć obwód według schematu



2. Ustawić źródło światła w odległości $r = 20$ cm od fotooporu. Sprawdzić czy fotoopór reaguje na oświetlenie.
3. Zmierzyć natężenie prądu fotoelektrycznego I w funkcji przyłożonego napięcia U .
4. Pomiary powtórzyć dla dwóch innych odległości r wskazanych przez prowadzącego.
5. Ustawić wartość napięcia wskazaną przez prowadzącego.
6. Zmieniać odległość fotooporu od źródła światła co 10 cm. Odczytać dla każdej odległości natężenie fotoprądu I .
7. Pomiary powtórzyć dla dwóch innych wartości napięcia.
8. Wyniki pomiarów (biała część tabeli) i obliczeń (szara część tabeli) umieścić w tabeli



$$u(a) = \left| \frac{\partial a}{\partial B} u(B) \right|, \quad u(b) = u(A)$$

8. We wnioskach zestawień wyznaczone parametry a i b badanego fotoopornika dla każdego z trzech napięć U , razem z ich niepewnościami. Następnie poprawnie porównać ze sobą trzy parametry a i osobno trzy parametry b , wykrywając ich zależność lub niezależność od przyłożonego napięcia, tak jak to opisano w objaśnieniach pod wzorem (8). Porównania dokonujemy za pomocą metody opisanej w skrypcie Niepewności pomiarów, dla współczynnika rozszerzenia $k = 2$.