



ĆWICZENIE

18b

LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ

Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne i sprawność ogniwa fotowoltaicznego

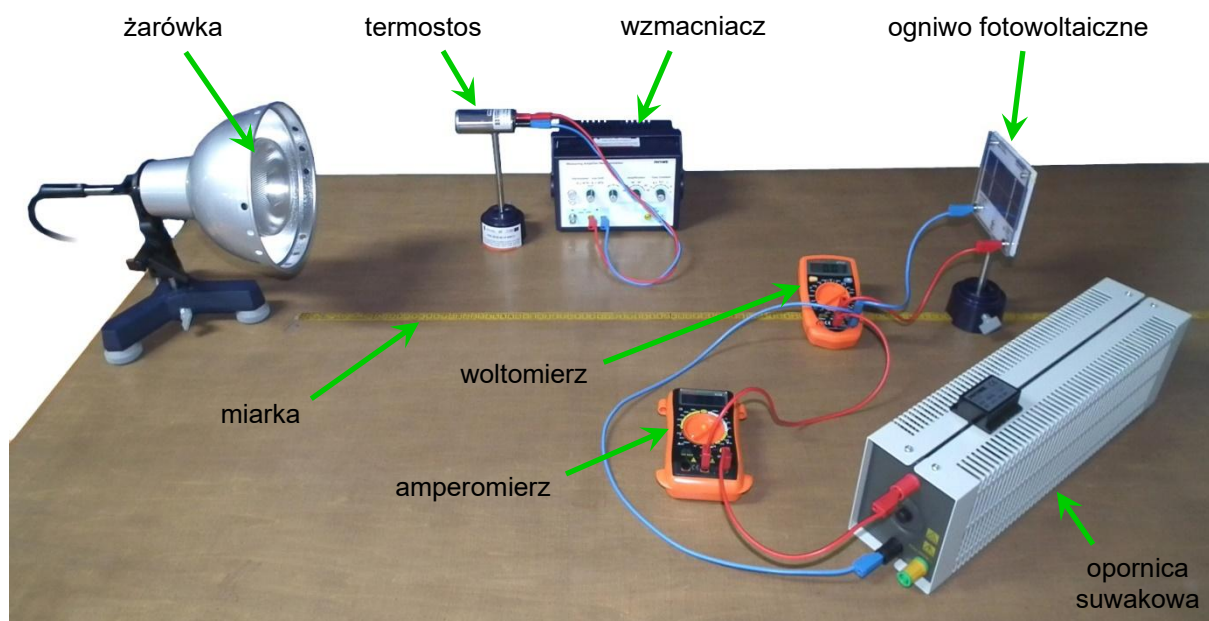
1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania ogniwa fotowoltaicznego oraz zbadanie sprawności przekształcania energii świetlnej na energię elektryczną. Wykonanie ćwiczenia pozwala również zapoznać się z działaniem termostosu jako miernika mocy promieniowania.

2. Układ doświadczalny

W skład układu doświadczalnego wchodzi:

- żarówka jako źródło światła,
- termostos,
- ogniwo fotowoltaiczne,
- wysokooporowy wzmacniacz,
- woltomierz,
- amperomierz,
- opornica suwakowa,
- linijka ze skalą centymetrową,
- nieprzezroczysta przesłona.



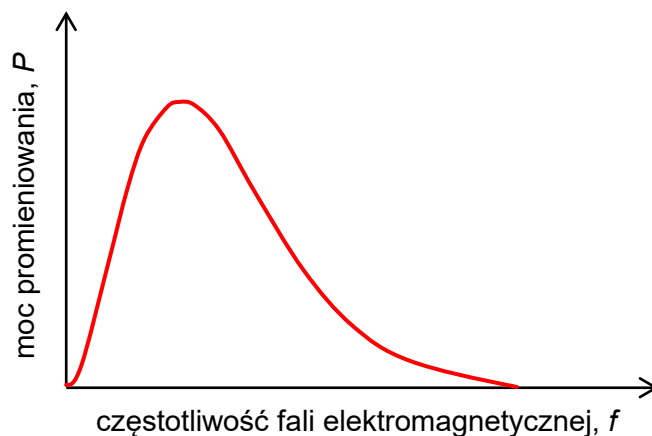
Rys. 1. Wygląd układu pomiarowego.

3. Wstęp teoretyczny

1. Promieniowanie ciała doskonale czarnego

Ciało doskonale czarne to hipotetyczny obiekt, który nie odbija żadnego padającego nań promieniowania elektromagnetycznego. Obiekt taki może jednak sam z siebie emitować promieniowanie i właśnie takie zjawisko określa się mianem promieniowania ciała doskonale czarnego.

W rzeczywistości doskonale czarne obiekty nie istnieją, ale są takie, dla których ilość odbijanego promieniowania z pewnego zakresu jest pomijalnie mała w porównaniu z ilością promieniowania emitowanego. Przykładem takich obiektów są gwiazdy oraz żarówki, które stanowią dobre przybliżenie ciała czarnego w zakresie światła widzialnego, a także podczerwieni oraz (w przypadku gwiazd) nadfioletu. Emisja promieniowania przez te obiekty związana jest ze stosunkowo wysoką temperaturą powierzchni tych obiektów. W przypadku gwiazdy, jaką jest Słońce, temperatura ta wynosi ok. 5500°C . W przypadku większości żarówek temperatura żarnika wykonanego z wolframu to ok. 2500°C . Widmo takiego promieniowania jest ciągłe, co oznacza, że emitowane światło ma szereg różnych częstotliwości, z których żadna nie jest wyróżniona (rys. 2). Całkowita emitowana moc promieniowania jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury, co opisuje prawo odkryte w 1879 r. przez Jożefa Stefana i Ludwiga Boltzmanna. Z kolei maksimum natężenia promieniowania przypada na jedną z częstotliwości, która (zgodnie z prawem odkrytym w 1893 r. przez Wilhelma Wiena) jest proporcjonalna do temperatury ciała. Mimo znajomości tych zależności widmo promieniowania ciała doskonale czarnego zostało po raz pierwszy poprawnie opisane dopiero w 1900 r. przez Maxa Plancka, który założył cząstkową naturę światła, a każdej cząstce światła (*fotonowi*) przypisał energię proporcjonalną do częstotliwości tego światła. Fotony ulatując z emitującego je ciała unoszą zatem pewną porcję energii (*kwant*, od łac. „quantum” – „jak dużo”), którą przekazują obiektowi, do którego dotrą. Zwykle powoduje to ogrzanie tego oświetlonego obiektu (ale może też spowodować inne procesy, jak np. efekt fotoelektryczny).



Rys. 2. Widmo promieniowania ciała doskonale czarnego.

2. Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne

Światło widzialne (lub zbliżone do niego promieniowanie elektromagnetyczne takie jak podczerwień i nadfiolet) padając na pewne obiekty może spowodować przepływ ładunków elektrycznych. W szczególności może to oznaczać wprawianie elektronów w ruch wewnątrz tego obiektu, co nazywa się *zjawiskiem fotoelektrycznym wewnętrznym*. Energia kinetyczna zyskiwana jest przez elektrony kosztem energii pochłanianych fotonów.

Zjawisko takie może następować na przykład w półprzewodnikach, w których elektrony zwykle są związane z atomami i tworzą wiązania chemiczne. Mówi się wtedy o nich, że na wykresie pokazującym energię elektronów leżą one w *paśmie walencyjnym*, bo ich energia jest zbyt mała, by

mogły oderwać się od atomów i przewodzić prąd. Jeśli jednak takie elektrony dostaną odpowiednio dużą dodatkową porcję energii, mogą uwolnić się z atomowych więzów i przejść do tzw. *pasma przewodnictwa*. Dzieje się tak np. w przypadku podgrzewania, gdy niektóre elektrony uzyskują odpowiednie energie tylko dzięki ruchom termicznym, ale także np. podczas uderzania fotonów w półprzewodnik. Warunkiem jest to, by porcja energii dostarczana przez fotony była większa niż różnica pomiędzy pasmem walencyjnym a pasmem przewodnictwa.

Puste miejsce w paśmie walencyjnym opuszczone przez elektron można traktować jak wirtualny nośnik prądu o ładunku dodatnim zwany „dziurą”. Wynika to z tego, że na to puste miejsce w wyniku dyfuzji może trafić inny elektron z pasma walencyjnego, po którym również pozostaje puste miejsce, na które trafia kolejny elektron, który pozostawia po sobie puste miejsce itd. Patrząc makroskopowo można taką sytuację uznać za przepływ prądu złożonego z dodatnich dziur.

W przypadku zwykłego półprzewodnika bez domieszek elektron zwykle szybko wraca na swoje miejsce i taki proces nazywa się *rekombinacją* elektronów i dziur. W stałych warunkach wytwarza się stan równowagowy, w którym ciągle generuje się i rekombinuje tyle samo par elektron-dziura, więc nawet jeśli taki półprzewodnik jest oświetlony, to żaden wyraźny prąd w nim nie płynie. Równowaga między generacją i rekombinacją par nośników zmienia się w przypadku, gdy do półprzewodnika przyłożone jest zewnętrzne napięcie. W powstałym polu elektrycznym elektrony i dziury dryfują w przeciwnych kierunkach i zamiast rekombinować uczestniczą w przepływie prądu. Tak może działać np. fotokomórka, która przewodzi prąd tylko w obecności światła.

W przypadku półprzewodników domieszkowanych dzieje się podobnie, z tym, że w półprzewodnikach typu n istnieje cały czas nadwyżka elektronów nad dziurami (bo atomy domieszek mają własne dodatkowe elektrony mogące przewodzić prąd), a w przewodnikach typu p – nadwyżka dziur nad elektronami (bo atomy domieszek przytrzymują część elektronów mogących przewodzić prąd). Te nośniki, których w danym półprzewodniku jest więcej, nazywa się *większościowymi*, a te, których mniej – *mniejściowymi*.

W miejscu styku dwóch półprzewodników domieszkowanych dwojakiego rodzaju powstaje tzw. *złącze p-n*. Jego istota polega na tym, że w momencie połączenia dwóch różnych półprzewodników większościowe elektrony z półprzewodnika typu n przepływają do półprzewodnika typu p (analogicznie większościowe dziury przepływają w przeciwną stronę). Dzieje się tak aż do momentu, gdy rekombinacja wyrówna się po obu stronach złącza, a powstałe po przemieszczeniu nośników pole elektryczne związane z nieruchomymi jonami zrównoważy dyfuzję termiczną elektronów i dziur.

3. Działanie krzemowego ogniwa fotowoltaicznego

Na podobnej zasadzie działa ogniwo fotoelektryczne, w którym na złącze p-n pada strumień fotonów. Generowane dzięki ich energii nośniki większościowe przepływają na odpowiednią stronę złącza i zwiększają różnicę potencjałów na biegunach złącza, a w razie obciążenia go oporem elektrycznym – uczestniczą w przepływie prądu. W ten sposób w ogniwie generowana jest siła elektromotoryczna.

Ogniwa używane w praktyce zbudowane są często na bazie domieszkowanego krzemu, przy czym domieszka typu p ma postać cienkiej zewnętrznej warstwy, umożliwiającej dopływ światła do złącza, zaś podstawę stanowi grubsza warstwa domieszki typu n. Do obu tych warstw podłączone są elektrody, którymi wyprowadza się prąd elektryczny.

Pojedyncze ogniwo krzemowe wytwarza zwykle napięcie równe jedynie ok. 0,5 V, dlatego często ogniwa łączy się je szeregowo w celu uzyskania wyższych napięć. Napięcie to zależy głównie od *przerwy energetycznej* w danym półprzewodniku (czyli różnicy energii pomiędzy pasmem przewodnictwa a pasmem walencyjnym). Jednocześnie wielkość tej przerwy decyduje o tym, jaka musi być energia padający fotonów, by mogły one wygenerować parę elektron-dziura. Dla krzemu

w temperaturze pokojowej przerwa energetyczna wynosi ok. 1,1 eV, co odpowiada długości fali ok. 1,13 μm , czyli z zakresu podczerwieni. Oznacza to, że w przypadku światła słonecznego większość jego promieniowania może wywołać zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne, jednak nie oznacza automatycznie, że wydajność tego procesu jest duża. Paradoksalnie to również wielkość przerwy energetycznej ogranicza maksymalne napięcie na złączu i decyduje o tym, że duża część energii fotonu przekazanej elektronom zostaje rozproszona w fotoogniwie podczas tzw. *termalizacji* elektronów, zamiast być przekształcona w użyteczną energię prądu elektrycznego. Ponadto sam proces rekombinacji elektronów i dziur jest nie do pominięcia, a wyzwana w nim energia ucieka z układu na zasadzie emisji promieniowania i dyssypacji ciepła. To powoduje, że teoretyczna maksymalna sprawność ogniwa fotowoltaicznego o przedstawionej budowie jest mniejsza niż 30% i występuje przy przerwie energetycznej równej ok. 1,5 eV, a zatem jest nieosiągalna dla krzemu. Dodatkowym utrudnieniem jest odbijanie i pochłanianie światła przez zewnętrzną warstwę zarówno samego półprzewodnika p, jak i obudowy ogniwa, a także przepuszczanie części światła przez całe ogniwo. W praktyce oznacza to, że sprawność krzemowych ogniw fotowoltaicznych dochodzi do jedynie kilkunastu procentów.

4. Hipoteza

Ogniwo fotowoltaiczne jest jednym z wielu możliwych źródeł energii, a jego moc jest ograniczona z powodu strat energii fotonów w samym ogniwie. Nie cała moc padającego promieniowania może być zatem przetworzona na moc, jaką ogniwo jest w stanie potencjalnie dostarczyć.

Ponadto, podobnie jak w przypadku innych ogniw (np. galwanicznych czy paliwowych), moc uzyskiwana w odbiorniku wykonującym użyteczną pracę jest mniejsza niż moc, którą jest w stanie dostarczyć ogniwo. Wynika to nie tylko ze strat energii podczas przepływu prądu elektrycznego przez przewody, ale również często z nieodpowiednio dobranego obciążenia ogniwa. Aby optymalnie wykorzystać moc dostarczaną przez ogniwo, należy zadbać, by opór elektryczny obciążenia był właściwy. Przykładowo, jeśli do ogniwa nie podłączy się żadnego odbiornika, to wprowadzie napięcie U na ogniwo nie spadnie, ale nie popłynie żaden prąd elektryczny, czyli natężenie prądu I będzie zerowe. Zgodnie ze wzorem:

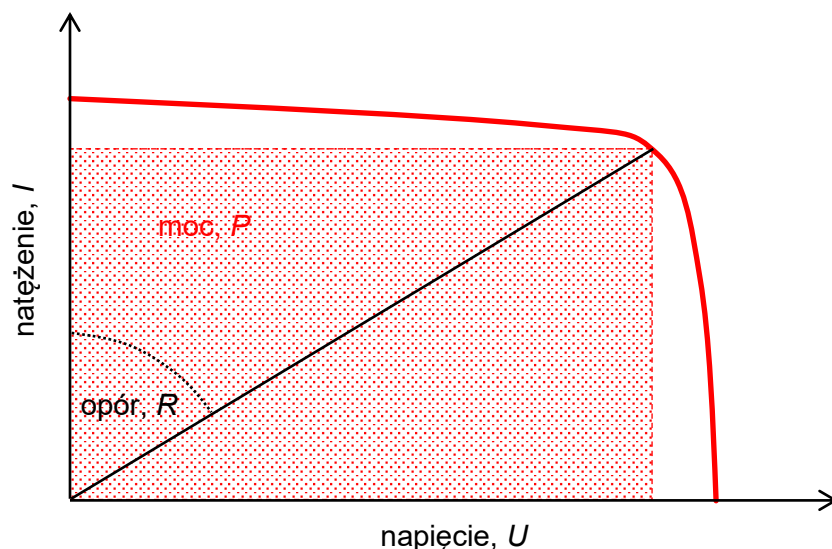
$$P = U \cdot I \quad (1)$$

oznacza to, że moc P płynącego prądu również będzie zerowa. Z kolei jeśli połączy się oba bieguny przewodem, to wprowadzie prąd może płynąć bez przeszkód i jego natężenie I będzie bardzo duże, ale jednocześnie napięcie U będzie zerowe, ponieważ potencjały obu biegunów się wyrównają po ich połączeniu (z dokładnością do spadku napięcia na przewodzie). W tym wypadku moc P również będzie zerowa. Wynika z tego, że opór nie może być ani za duży, ani za mały. Prawdopodobnie istnieje tylko jedna wartość oporu, dla której prąd płynący w obwodzie będzie miał maksymalną moc. Sprawdzenie tej hipotezy jest jednym z celów ćwiczenia.

Drugim z celów ćwiczenia jest zmierzenie sprawności całego procesu zamiany mocy światła na mocy użyteczną. Sprawność ta wyrażona jest wzorem:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_f} \quad (2)$$

gdzie P_{max} to maksymalna moc płynącego prądu elektrycznego wyznaczona dla optymalnie dobranego oporu obciążenia, zaś P_f to całkowita moc promieniowania dostarczanego do ogniwa. Moc maksymalną wyznacza się robiąc tzw. *charakterystykę prądowo-napięciową*, czyli podłączając do ogniwa różne wartości oporu i mierząc napięcie i natężenie prądu. Do wyznaczenia całkowitej mocy promieniowania P_f użyty będzie termistor wstawiony w miejsce fotoogniwa.

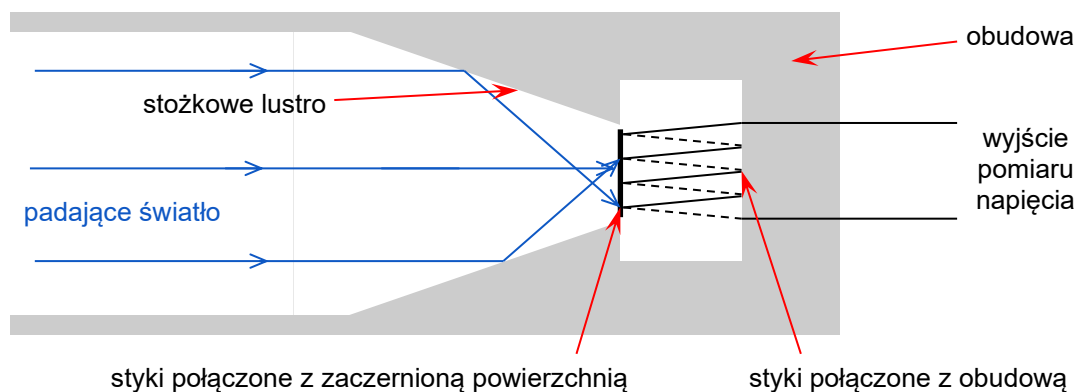


Rys. 3. Typowa charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa.

5. Działanie termostosu

Termostos to nic innego jak zestaw kilkunastu szeregowo połączonych termopar. Z kolei każda termopara składa się dwóch styków różnych metali lub ich stopów. Na każdym styku dwóch metali obecne są różnice potencjałów (czyli napięcie) spowodowane temperaturą. Wynika to z dwóch zjawisk. Po pierwsze w tej samej temperaturze w różnych przewodnikach elektrony mają różny rozkład energii, więc na styku dwóch materiałów część elektronów z jednego przepływa (dyfunduje) samoistnie do drugiego, aż do osiągnięcia stanu równowagi. Po drugie nawet w jednym przewodniku może powstać różnica rozkładów energii elektronów w różnych miejscach, jeśli dwa jego końce znajdują się w różnych temperaturach. To również skutkuje powstaniem napięcia zależnego od różnicy temperatur.

Aby wykorzystać termostos do pomiaru mocy promieniowania, należy jeden z jego elementów zaczernić tak, by pochłaniał jak najwięcej padającego nań promieniowania (od dalekiej podczerwieni do nadfioletu) – to spowoduje jego podgrzanie. Do tego elementu podłącza się parzyste styki zestawu termopar, zaś nieparzyste połączone są z masywną obudową. Duża masa i lustrzana powierzchnia obudowy powoduje, że jej temperatura zmienia się w niewielkim stopniu. W warunkach stałego oświetlenia i równowagowego przepływu ciepła wewnątrz tak przygotowanego urządzenia napięcie okazuje się być proporcjonalne do mocy padającego światła, niezależnie od widma tego światła. Stan taki stabilizuje się zwykle w ciągu kilku sekund. Oczywiście po czasie zmieni się także temperatura obudowy, co wprowadza konieczność zerowania wskazań podczas długich pomiarów.

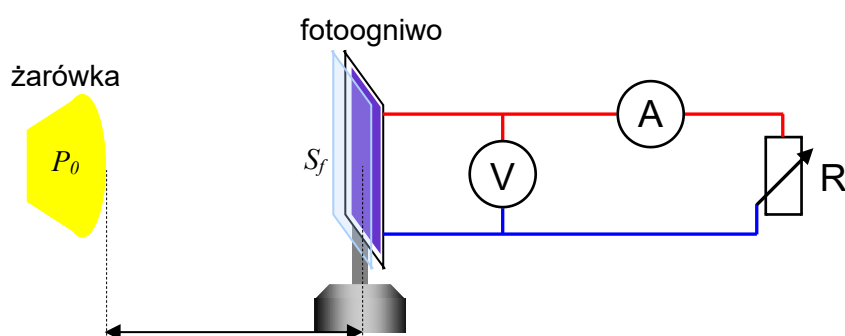


Rys. 4. Konstrukcja i zasada działania termostosu jako kierunkowego detektora światła.

Konstrukcja obudowy termostosu używanego do pomiaru strumienia światła cechuje się także kierunkowością, jest bowiem zrobiona na zasadzie stożkowego lustra, które koncentruje światło padające z jednego kierunku na wyczernionym elemencie. Oczywiście jest to ograniczona kierunkowość, zatem należy dbać, by w otoczeniu mierzonego źródła światła nie znalazło się inne, które mogłoby zakłócić pomiar. Ciała cieplejsze niż obudowa termostosu będą zawyżać napięcie, zaś te zimniejsze – zaniżać je.

4. Przebieg doświadczenia

A) Podłączyć układ pomiarowy zgodnie z rys. 5. Układ w tej konfiguracji służy do pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej ogniwa fotowoltaicznego.



Rys. 5. Schemat pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej fotoogniwa.

B) Po sprawdzeniu poprawności połączenia elementów układu pomiarowego włączyć je zgodnie z opisem dołączonym do stanowiska.

C) Ustawić fotoogniwo w wybranej odległości od lampy (zakres dozwolonych odległości skonsultować z obsługą laboratorium). Powierzchnię ogniwa ustawić tak, by światło z lampy padało na nią pod kątem prostym.

D) Ustawić na opornicy suwakowej taką wartość oporu, by napięcie na woltomierzu było jak największe. Odczytać wartości napięcia oraz natężenia prądu i zapisać je jako U i I . Na podstawie wzoru (1) obliczyć uzyskaną moc prądu elektrycznego i zapisać ją jako P .

E) Wstawić nieprzezroczystą przesłonę w połowie odległości pomiędzy lampą a ogniwnem tak, by światło nie mogło przelecieć bezpośrednio z lampy do ogniwa. Odczytać wartości napięcia oraz natężenia prądu i zapisać je jako U_{tla} i I_{tla} . Na podstawie wzoru (1) obliczyć uzyskaną moc prądu elektrycznego i zapisać ją jako P_{tla} .

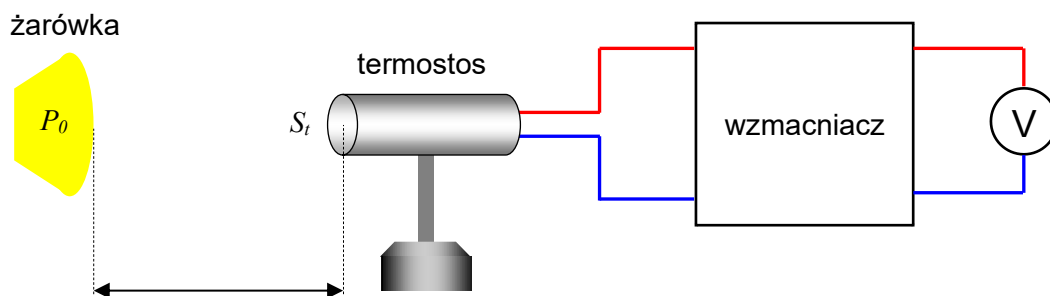
F) Przetawić opornicę suwakową tak, by napięcie było jak najmniejsze. Ponownie zmierzyc U , I , U_{tla} i I_{tla} oraz obliczyć moce P i P_{tla} .

G) Powtórzyć takie same pomiary i obliczenia dla różnych pośrednich ustawień opornicy suwakowej. Liczbę pomiarów oraz zakres ustawień skonsultować z obsługą laboratorium. Szczególnie dokładnie zbadać te ustawienia, dla których moc P przyjmuje możliwie największe wartości. Czy wyniki pomiarów zgadzają się z przewidywaną charakterystyką prądowo-napięciową ogniwa (patrz rys. 3)?

H) Po zakończeniu pomiarów znaleźć wartość mocy prądu elektrycznego P_{max} , którą jest największa różnica pomiędzy wyznaczonymi wartościami P i P_{tla} .

I) Wyłączyć poszczególne elementy układu pomiarowego.

J) Podłączyć układ pomiarowy zgodnie z rys. 6. Układ w tej konfiguracji służy do pomiaru całkowitej mocy promieniowania dochodzącego ze źródła na wybraną odległość.



Rys. 6. Schemat pomiaru całkowitej mocy promieniowania.

K) Po sprawdzeniu poprawności połączenia elementów układu pomiarowego włączyć wzmacniacz i woltomierz. Jeśli termostost ma założoną przesłonę okienka, to należy ją zdjąć i odłożyć w bezpieczne miejsce.

L) Odłączyć termostost od wzmacniacza, przy pomocy jednego z przewodów zewrzeć oba bieguny wejścia wzmacniacza i odpowiednim pokręteł wyzerować wskazania woltomierza.

Uwaga: Gdyby nie udało się uzyskać dokładnie wartości 0 na wyświetlaczu woltomierza, należy zapamiętać lub zapisać ustawioną wartość jako poprawkę na zerowanie.

M) Rozewrzeć wejście wzmacniacza i podłączyć do niego z powrotem termostost, po czym ustawić termostost w tej samej odległości, w jakiej wcześniej ustawione było fotoogniwo. Termostost powinien znajdować się na tej samej wysokości, co środek żarówki.

Uwaga: Zwrócić uwagę na to, że w przypadku termostostu odległość jest liczona od jego płaszczyzny jego okienka, a nie od jego wnętrza!

N) Obracając termostost wokół osi pionowej wycelować nim w środek żarówki, to znaczy tak, by wskazania woltomierza były maksymalne.

O) Zapisać wartości napięcia wskazywanego przez woltomierz U_t .

P) W połowie odległości pomiędzy żarówką a termostosem wstawić nieprzezroczystą przesłonę tak, by światło nie mogło przelatywać bezpośrednio z żarówki do termostostu. Po ustabilizowaniu się wskazań woltomierza zapisać napięcie jako U_{tla} , czyli napięcie powstające w wyniku docierania do termostostu światła z otoczenia lub odbitego od otoczenia światła z żarówki.

Uwaga: przesłona powinna mieć tę samą temperaturę co otoczenie, ponieważ jeśli będzie miała inną temperaturę, to termostost zmierzy różnicę pomiędzy promieniowaniem wychodzącym z otoczenia i z przesłony, co zafałszuje wyniki pomiaru.

Q) Obliczyć moc promieniowania docierającego do termostostu P_t na podstawie równania:

$$U_t - U_{tla} = A \cdot P_t \quad (3)$$

gdzie U_t i U_{tla} to wielkości zmierzone, natomiast A to współczynnik dostarczony przez producenta termostostu (załączony w opisie stanowiska).

R) Po zakończeniu pomiarów wyłączyć poszczególne elementy układu pomiarowego.

S) Znając powierzchnię termostosu S_t oraz powierzchnię fotoogniwa S_f (można je zmierzyć lub odczytać z opisu stanowiska) obliczyć, jaka była moc promieniowania docierającego do fotoogniwa P_f , zakładając, że moc jest proporcjonalna do powierzchni, na jaką pada promieniowanie.

T) Znając wartości P_{max} i P_f obliczyć sprawność fotoogniwa na podstawie wzoru (2).

U) Oszacować niepewności pomiarowe zmierzonych i obliczonych wielkości. Jak to oszacowanie wpływa na wnioski wyciągnięte z pomiaru?