



## Szkoła z przyszłością

szkolenie współfinansowane przez Unię Europejską  
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego



Narodowe Centrum Badań Jądrowych, ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk

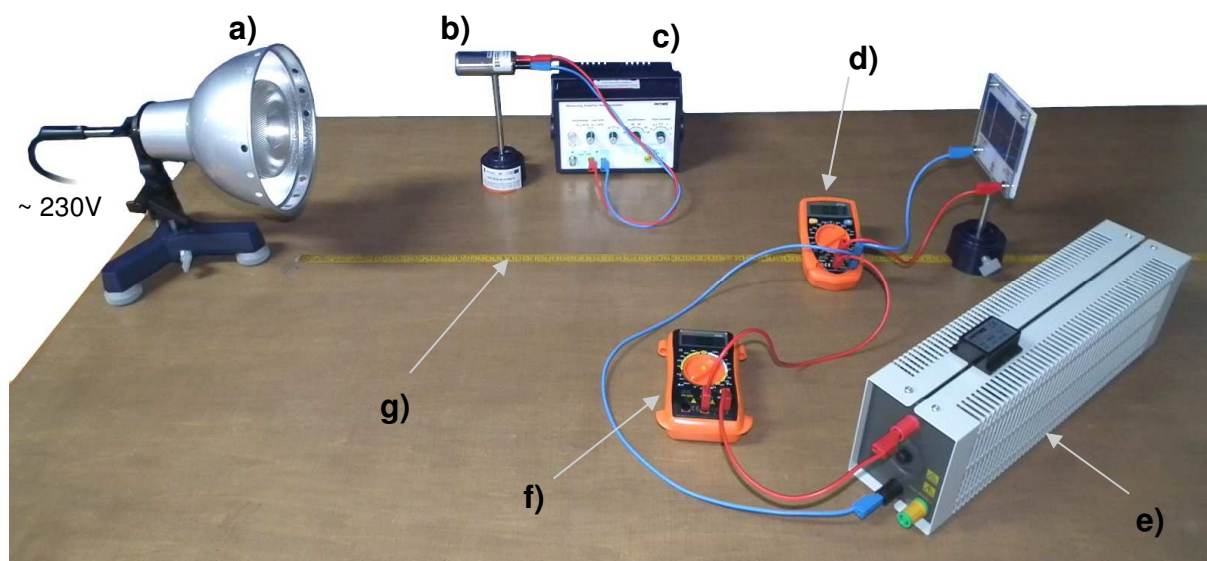
ĆWICZENIE	LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ
22	Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne
Data pomiaru: .....	
Imię i nazwisko: .....	
Imię i nazwisko: .....	

### 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 oraz potwierdzić, że promieniowanie świetlne rozchodzi się prostoliniowo, a jego natężenie maleje z kwadratem odległości.

### 2. UKŁAD DOŚWIADCZALNY

Aparatura używana w ćwiczeniu składa się z żarówki jako źródła światła widzialnego, ogniwa fotowoltaicznego, termostosu (czyli układu szeregowo połączonych termopar, o którym więcej w ramce wewnątrz instrukcji), opornicy suwakowej oraz woltomierza i amperomierza. Opornica suwakowa wraz z woltomierzem i amperomierzem pozwalają zdjąć charakterystykę prądowo-napięciową ogniwa fotowoltaicznego, a tzw. termostos służy do pomiaru strumienia światła, gdyż (w przeciwieństwie do ogniwa fotowoltaicznego) jego napięcie jest wprost proporcjonalne do całkowitej energii szerokiego widma promieniowania.



Rys. 1. Aparatura do badania efektu fotoelektrycznego wewnętrznego (a - lampa żarowa, b - termostos, c - wzmacniacz, d - woltomierz, e - opornica suwakowa, f - amperomierz, g - linijka)

### 3. WSTĘP TEORETYCZNY

W półprzewodnikach elektrony zwykle są związane z atomami i tworzą wiązania chemiczne. Mówi się wtedy o nich, że leżą w *paśmie walencyjnym*, bo ich energia (związana z temperaturą) 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 w półprzewodnik fotonów o pewnej energii.

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 itd. Patrząc makroskopowo można taką sytuację uznać za przepływ prądu złożonego z dodatnich „dziur”.

W przypadku zwykłego półprzewodnika bez domieszek elektrony zwykle 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. W przypadku półprzewodników domieszkowanych dzieje się podobnie, z tym, że w półprzewodnikach typu n istnieje cały czas nadwyżka elektronów nad dziurami, a w przewodnikach typu p – nadwyżka dziur nad elektronami. Te nośniki, których jest więcej, nazywa się *większościowymi*, a te, których mniej – *mniejściowymi*. Ponadto w półprzewodnikach domieszkowanych pomiędzy pasmem walencyjnym a pasmem przewodnictwa istnieją pochodzące od domieszek dodatkowe poziomy energetyczne (*donorowe* i *akceptorowe*), które działają jak pomocnicze stopnie przy przeskakiwaniu elektronów z jednego pasma na drugie.

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.

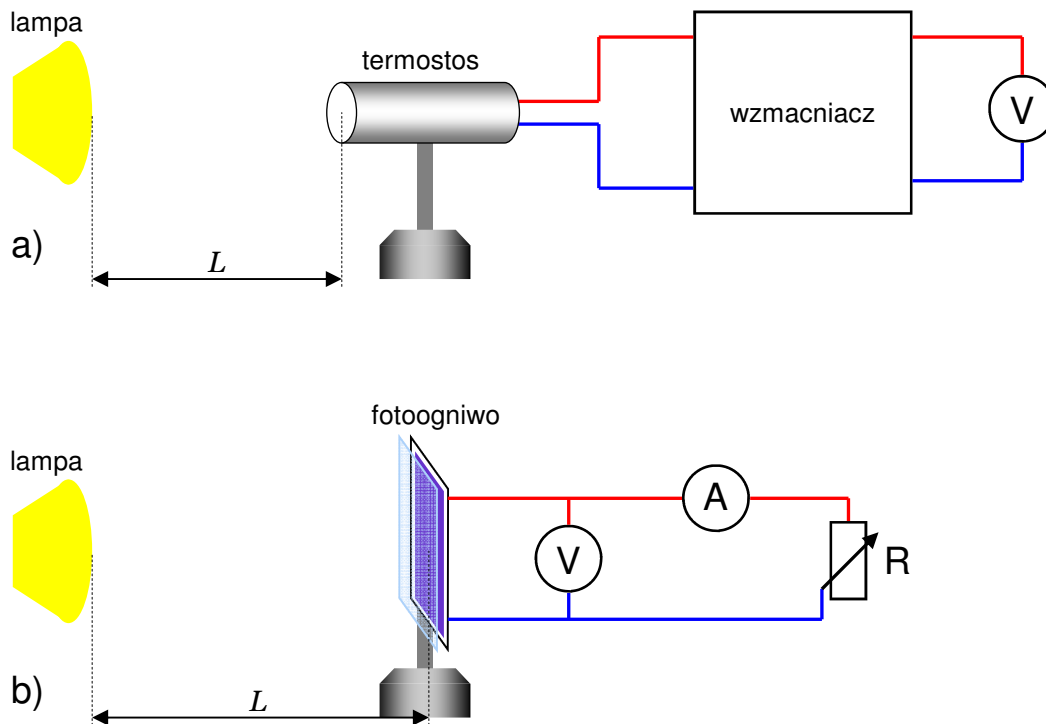
Na podobnej zasadzie działa ogniwo fotoelektryczne. Wprawdzie do niego nie przykładana się zewnętrznego napięcia, ale zbudowane jest z półprzewodników domieszkowanych dwojakiego rodzaju tworzących tzw. *złącze p-n*. Jego istota polega na tym, że w momencie połączenia dwóch różnych półprzewodników większościowe elektrony z półprzewodnika typu n przepływają do półprzewodnika typu p (analogicznie większościowe dziury przepływają w przeciwną stronę). Dzieje się tak aż do momentu, gdy pole elektryczne powstałe przez przemieszczenie ładunków zrównoważy dyfuzję termiczną nośników.

Wewnętrzne pole elektryczne złącza p-n może działać tak samo, jak pole zewnętrzne, stąd jeśli na takie złącze pada strumień fotonów, to generowane dzięki ich energii pary elektron-dziura są rozseparowywane 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  $\mu\text{m}$ , 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 elektro-

nów 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 budowy ogniwa, a także przepuszczanie części światła przez całe ogniwo. W praktyce oznacza to, że sprawność krzemowych ogniw fotowoltaicznych jest rzędu kilkunastu procentów.



**Rys. 2. Schemat idealny aparatury do badania efektu fotoelektrycznego wewnętrznego**  
a) układ z termostosem, b) układ z fotoogniwem

#### 4. PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

**A)** Zamocować na stole linię z podziałką, a na jej początku ustawić lampę tak, by powierzchnia żarówki znajdowała się w położeniu oznaczonym zerem.

**B)** Podłączyć woltomierz do wyjścia wzmacniacza i sprawdzić jego ustawienia:

- Skala pomiaru: „200 mV”.
- Rodzaj prądu: „DC” = prąd stały.

**C)** Sprawdzić ustawienia wzmacniacza:

- Pokrętło wyboru trybu pracy: „Low Drift  $R_e = 10^4 \Omega$ ”.
- Wzmocnienie: „Amplification” = „ $10^0$ ” = 1.
- Stała czasowa: „Time Constant” = „0 s”.

i włączyć jego zasilanie (przyciskiem z tyłu obudowy).

**D)** Przy pomocy jednego z przewodów zewrzeć oba bieguny wejścia wzmacniacza i pokrętłem oznaczonym „ $\rightarrow 0$ ” wyzerować wskazania woltomierza. (Gdyby nie udało się uzyskać dokładnie wartości 0 na wyświetlaczu woltomierza, należy zapamiętać lub zapisać ustawioną wartość jako poprawkę na zerowanie.)

**E)** Rozewrzeć wejście wzmacniacza i przy pomocy dwóch przewodów podłączyć do niego termos. Delikatnie zdjąć szklaną osłonę z okienka tego urządzenia. Układ pomiarowy w takiej konfiguracji (zgodnej z rys. 2a) służy do pomiaru całkowitej mocy strumienia promieniowania przechodzącego przez okienko termostosu.

**F)** Ustawić termos w pewnej odległości  $L$  od lampy (minimum 50 cm, maksimum 120 cm). Zmierzyć napięcie  $U_t$  na woltomierzu, a wynik (z uwzględnioną poprawką na zerowanie) zapisać w tabeli 1. Uwaga: odległość od lampy mierzyć należy do zewnętrznej płaszczyzny okienka termostosu przy zdjętej osłonie – w takiej konfiguracji termos reaguje na większość promieniowania przelatującego przez całe jego okienko prostopadle do jego płaszczyzny.

**G)** Pomiar z punktu F powtórzyć dla kilkunastu różnych odległości, wybieranych w losowej kolejności. Po zakończonych pomiarach założyć z powrotem osłonę okienka termostosu oraz wyłączyć zasilanie woltomierza i wzmacniacza.

**H)** Podłączyć układ pomiarowy zgodnie z rys. 2b. Układ w tej konfiguracji służy do pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej ogniwa fotowoltaicznego.

**I)** Sprawdzić ustawienia amperomierza:

- Skala pomiaru: „200 mA”.
- Rodzaj prądu: „DC” = prąd stały.

Sprawdzić ustawienia woltomierza:

- Skala pomiaru: „20 V”.
- Rodzaj prądu: „DC” = prąd stały.

**J)** Ustawić ogniwo fotowoltaiczne w jednej z kilkunastu poprzednio wybranych odległości od powierzchni lampy. Uwaga: odległość od lampy należy liczyć do płaszczyzny płytek krzemowych ogniwa. Uwaga: dbać o to, by światło padało na ogniwo pod kątem zbliżonym do kąta prostego.

**K)** Dla wybranej odległości  $L$  zmieniać ustawienia opornicy suwakowej i obserwować zmiany natężenia  $I_p$  i napięcia  $U_p$  prądu płynącego w obwodzie. Wybrać zakres, w którym duże zmiany napięcia zmieniają się w duże zmiany natężenia. Dla kilku ustawień opornicy z tego zakresu zanotować wartości napięcia i natężenia w tabeli 3.

**L)** Pomiary z punktu K powtórzyć dla jeszcze kilku innych odległości, wybranych z tych używanych wcześniej do pomiaru z termostosem.

**M)** Po zakończeniu pomiarów wyłączyć woltomierz, amperomierz, a także lampę.

**N)** W tabeli 1 uzupełnić kolumnę z mocą promieniowania docierającego do termostosu, wiedząc, że termos daje napięcie  $U_t$  równe w przybliżeniu 0,16 V na każdy 1 W mocy  $P_t$  promieniowania padającego w jego okienko:

$$U_t [\text{V}] = 0,16 \text{ V/W} \cdot P_t [\text{W}] \quad (1)$$

**O)** W tabeli 3 uzupełnić kolumnę z mocą prądu generowanego przez ogniwo fotowoltaiczne (w tym celu wystarczy pomnożyć napięcie  $U_p$  i natężenie  $I_p$  prądu płynącego w obwodzie:  $P_p = U_p \cdot I_p$ ). Największą wartość mocy dla każdej z odległości  $L$  przenieść do tabeli 2.

**P)** Wiedząc, że promień okienka termostosu to ok. 1,2 cm, a powierzchnia ogniwa fotowoltaicznego wynosi ok. 50 cm<sup>2</sup>, obliczyć, jaka była moc promieniowania docierającego do fotoogniwa ( $P_f$ ) w każdej z odległości z tabeli 2. Można w tym celu skorzystać z proporcji:

$$\frac{P_f}{P_t} = \frac{50 \text{ cm}^2}{\pi \cdot (1,2 \text{ cm})^2} \quad (2)$$

**Q)** Dla każdej z odległości z tabeli 2 obliczyć sprawność ogniwa, czyli stosunek maksymalnej mocy prądu płynącego w obwodzie  $P_{pmax}$  do mocy promieniowania docierającego do ogniwa  $P_f$ .

**R)** Zgodnie z prawami fizyki spodziewana zależność mocy promieniowania zarejestrowanego przez termostos ( $P_t$ ) oraz maksymalnej mocy prądu w obwodzie ( $P_{pmax}$ ) od odległości od lampy ( $L$ ) powinna być opisana wzorem:

$$P \sim \frac{1}{L^2} \quad (3)$$

Aby potwierdzić tę zależność, wykonać wykres obu mocy stosując jedno z przekształceń zmiennych:

- $x = 1/L^2, y = P,$
- $x = L, y = 1/P^{1/2},$
- $x = \ln L, y = \ln P.$

Każde z tych przekształceń powoduje, że na wykresie punkty pomiarowe powinny układać się na linii prostej, co łatwo sprawdzić metodą graficzną (np. przykładając linijkę do wykresu).

**S)** Przeprowadzić rachunek niepewności pomiarowych oraz dyskusję możliwych czynników zakłócających pomiar. Jakie wnioski wynikają z przeprowadzonego eksperymentu?



## JAK DZIAŁA TERMOSTOS?

Termostos to nic innego jak zestaw kilkunastu szeregowo połączonych termopar. Z kolei każda termopara składa się z 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. Stan taki stabilizuje się zwykle w ciągu kilku sekund. Oczywiście po bardzo długim pomiarze zmieni się także temperatura obudowy, co wprowadza konieczność zerowania wskazań podczas długiej sesji pomiarowej.

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 wyczerzonym 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.

