

## Badanie ogniwa fotowoltaicznego

### Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z podstawowymi wiadomościami na temat ogniw fotowoltaicznych oraz wyznaczenie: zależności prądu fotoogniwa od natężenia oświetlenia, charakterystyk prądowo-napięciowych fotoogniwa dla różnych wartości natężenia oświetlenia, oporu wewnętrznego oświetlonego fotoogniwa.

### Wprowadzenie

Ogniwa fotowoltaiczne służą do zamiany energii światła na energię elektryczną. W ostatnich latach można zaobserwować coraz większą popularność takich urządzeń, nazywanych powszechnie ogniwami (bateriami) słonecznymi lub fotoogniwami. Dynamiczny rozwój techniki fotowoltaicznej spowodowany jest poszukiwaniem alternatywnych źródeł energii. Ogniwa fotowoltaiczne uważane są za najbardziej przyjazne środowisku źródła energii. Jest to związane między innymi z brakiem: hałasu, emisji zanieczyszczeń, wpływu paneli słonecznych na ekosystem. Poza tym materiały używane do produkcji baterii słonecznych są powszechnie dostępne a utylizacja zużytych instalacji nie jest kłopotliwa. Niestety stosunkowo wysoki koszt wytworzenia do wyprodukowanej energii elektrycznej powoduje relatywnie niewielki zysk z instalacji fotowoltaicznych. Dodatkową wadą tych urządzeń jest zależność ilości produkowanej energii elektrycznej od warunków pogodowych, co powoduje nieprzewidywalność produkcji. Wydajność paneli słonecznych może się zmienić ponad dziesięciokrotnie w zależności od nasłonecznienia i temperatury otoczenia (im wyższa temperatura fotoogniwa tym niższa jego wydajność).

Pojedyncze ogniwa fotowoltaiczne łączy się ze sobą tworząc baterię fotowoltaiczną (baterię słoneczną, panel słoneczny). Spotykane w Polsce baterie słoneczne najczęściej zasilają niewielkie urządzenia elektroniczne, lampy ogrodowe, instalacje drogowe itp. W naszej szerokości geograficznej, ze względu na niewielkie średnioroczne nasłonecznienie, raczej nie spotyka się elektrowni słonecznych. Coraz częściej wykorzystuje się natomiast energię słoneczną do podgrzewania wody w domach, instalując na ich dachach kolektory słoneczne (nie wytwarzają one prądu elektrycznego).

Obecnie na rynku najbardziej popularne są panele słoneczne wykonane z krzemu (monokrystalicznego, polikrystalicznego, amorficznego). Coraz powszechniej wykorzystuje się również ogniwa fotowoltaiczne na bazie telurku kadmu (CdTe) oraz stopu miedzi, indu, galu i selenu (CIGS). Ciekawie zapowiadają się badania ogniw fotowoltaicznych bazujących na naturalnych barwnikach (DSSC). Wprawdzie na razie ich sprawność jest niewielka, ale niski koszt i prostota produkcji (zwyczajne drukowanie) dają nadzieję na ich rozpowszechnienie. Pomimo że obecnie w warunkach laboratoryjnych uzyskuje się fotoogniwa krzemowe o sprawnościach ponad 25% (ogniwa wielowarstwowe nawet ponad 40%), to jednak te produkowane przemysłowo nie dają takich dobrych rezultatów (patrz Tabela 1). Wymienione powyżej fotoogniwa różnią się kosztami wytworzenia oraz sprawnością, dlatego - w zależności od potrzeby - wykorzystuje się różne ich typy (np. satelity wyposażane są w drogie i wydajne fotoogniwa z krzemu monokrystalicznego lub ogniwa wielowarstwowe, a lampki ogrodowe w tanie ogniwa z krzemu amorficznego).

Tabela 1. Sprawności ogniw fotowoltaicznych (produkowanych przemysłowo) w zależności od zastosowanego do ich budowy materiału

materiał użyty do wytworzenia fotoogniwa	sprawność [%]	materiał użyty do wytworzenia fotoogniwa (rodzaj fotoogniwa)	sprawność [%]
monokrystaliczny krzem	14÷17	telurek kadmu CdTe	ok. 11
polikrystaliczny krzem	11÷15	CIGS	10÷15
amorficzny krzem	5÷9	DSSC	ok. 3

Poznajmy uproszczony model działania ogniwa fotowoltaicznego na przykładzie popularnego fotoogniwa krzemowego. Aby to zrobić, na początek musimy zapoznać się z procesem przewodnictwa elektrycznego w półprzewodnikach, zasadą działania złącza *p-n* oraz z wewnętrznym zjawiskiem fotoelektrycznym.

## Przewodnictwo elektryczne w półprzewodnikach

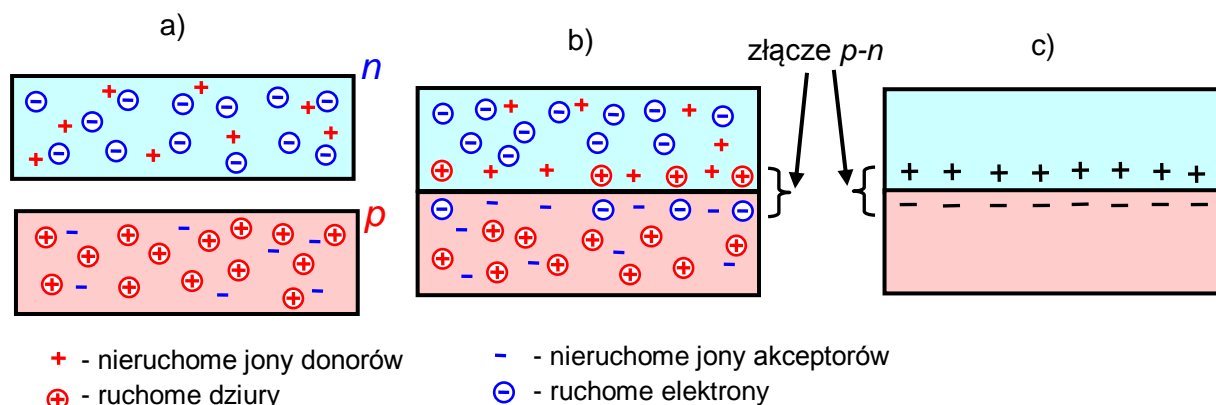
Krzem jest materiałem półprzewodnikowym. Półprzewodniki w temperaturze zera bezwzględnego są izolatorami (wynika to z braku swobodnych nośników prądu elektrycznego), natomiast wraz ze wzrostem temperatury zaczynają coraz lepiej przewodzić prąd elektryczny. To drgania termiczne sprawiają, że część elektronów walencyjnych może oderwać się od atomów półprzewodnika i stać się nośnikami prądu elektrycznego. Zgodnie z teorią pasmową ciała stałego powiedzielibyśmy, że drgania dostarczyłyby elektronowi energię  $E_g$  potrzebną na przejście z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Należy jednak zaznaczyć, że koncentracja nośników prądu w półprzewodnikach nawet w stosunkowo wysokich temperaturach jest o ponad dziesięć rzędów mniejsza w porównaniu z dobrymi przewodnikami. Przydatność półprzewodników w technologii można znacznie poprawić, wprowadzając do ich sieci krystalicznych bardzo niewielką ilość odpowiednio dobranych atomów zwanych domieszkami. Istnieją dwa typy domieszkowania zwane typem  $n$  oraz typem  $p$ .

Prześledźmy proces domieszkowania na przykładzie krzemu. Krzem jest pierwiastkiem czterowartościowym. Jego atomy tworzące sieć krystaliczną łączą się z czterema najbliższymi sąsiadami, tworząc wiązania kowalencyjne. Jeżeli do sieci krystalicznej krzemu "wbudujemy" na przykład pięciowartościowy atom fosforu, cztery z elektronów walencyjnych atomu fosforu stworzą wiązania z otaczającymi go atomami krzemu. Piąty elektron nie biorący udziału w wiązaniu jest słabo związany z rdzeniem jonu fosforu. Energia potrzebna do oderwania takiego elektronu  $E_d$  jest mniejsza od energii  $E_g$  dla krzemu dlatego przy nieznacznym wzroście temperatury elektrony domieszki odrywają się od atomów fosforu powodując wzrost przewodnictwa elektrycznego. Atom fosforu nazywamy *donorem*, ponieważ łatwo dostarcza elektron do pasma przewodnictwa, natomiast półprzewodnik domieszkowany w powyższy sposób nazywamy półprzewodnikiem typu  $n$ , gdyż nośnikami większościowymi prądu są ujemnie naładowane elektrony (ang. *negative* - ujemny).

Jeżeli w sieć krystaliczną wbudujemy na przykład trójwartościowy atom glinu może on stworzyć wiązania kowalencyjne jedynie z trzema sąsiednimi atomami krzemu. Tym samym w jednym z wiązań pomiędzy atomem glinu i krzemem brakuje elektronu (jest dziura). Jeżeli dostarczymy stosunkowo niewielką energię  $E_a$  elektronowi z sąsiedniego wiązania pomiędzy atomami krzemu, zapełnimy tę dziurę, tworząc jednocześnie kolejną dziurę. Proces ten może dalej postępować i dziura będzie poruszać się w sieci krystalicznej. Atom glinu nazywamy *akceptorem*, gdyż przyjmuje elektron z sąsiedniego wiązania lub, inaczej mówiąc, z pasma walencyjnego krzemu. Tak domieszkowany półprzewodnik nazywamy półprzewodnikiem typu  $p$ , gdyż nośnikami większościowymi prądu są dodatnio naładowane dziury (ang. *positive* - dodatni).

### Złącze p-n

Jeżeli dwa niezależne półprzewodniki typu  $p$  i  $n$  (rys. 1a) połączymy ściśle ze sobą, to na granicy kontaktu część elektronów z półprzewodnika typu  $n$  dyfunduje do półprzewodnika typu  $p$  i na odwrót: część dziur z półprzewodnika typu  $p$  dyfunduje do obszaru półprzewodnika typu  $n$  (rys. 1b).



Rys. 1. a) rozkład nośników prądu elektrycznego w półprzewodnikach typu  $n$  i  $p$ , b) rozkład nośników prądu elektrycznego w półprzewodnikach typu  $n$  i  $p$  na granicy złącza, c) schematyczne przedstawienie warstwy kontaktowej (złącza  $p-n$ ).

W obszarze przejściowym na granicy półprzewodników noszącym nazwę warstwy kontaktowej gromadzi się ładunek. W wyniku takiego rozdziału ładunków wewnątrz warstwy kontaktowej (złącza  $p-n$ ) powstaje pole elektryczne i zarazem różnica potencjałów. Na rysunku 1c dla uproszczenia pokazano jedynie schematycznie warstwę kontaktową. Złącze  $p-n$  jest bardzo powszechnie wykorzystywane w elektronice, ale w naszych dalszych rozważaniach ograniczymy się jedynie do przypadku fotoogniwa. Zanim jednak przejdziemy do zasady jego działania, przypomnijmy, na czym polega zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne.

### Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne

Jak wspomniano, żeby oderwać elektron walencyjny od atomu półprzewodnika, należy dostarczyć mu pewnej energii  $E_g$ . Energię tę mogą dostarczyć drgania termiczne, ale również na przykład promieniowanie świetlne. Jeżeli w wyniku promieniowania świetlnego wewnątrz półprzewodnika powstają pary dziura-elektron to takie zjawisko nazywamy zjawiskiem fotoelektrycznym wewnętrznym. Zjawisko to ukazuje nam cząsteczkową naturę światła. Żeby doszło do uwolnienia elektronu walencyjnego kwant promieniowania świetlnego (foton) musi mieć energię co najmniej równą  $E_g$ . Energia kwantu  $E_f$  zależna jest od częstotliwości fali świetlnej  $\nu$  w następujący sposób

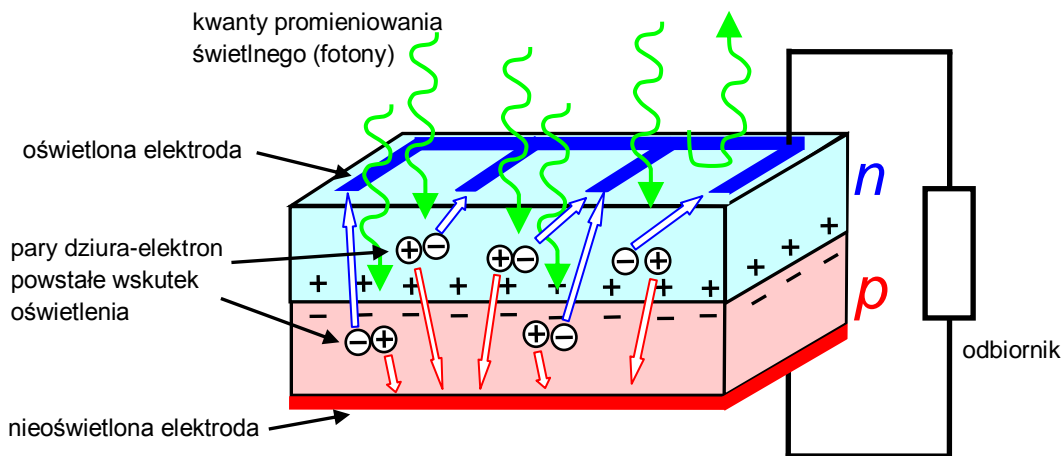
$$E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

gdzie  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Js jest stałą Plancka,  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s jest prędkością światła w próżni,  $\lambda$  jest długością fali świetlnej. Tym samym możemy zapisać warunek na zaistnienie zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego

$$h\nu \geq E_g. \quad (2)$$

### Budowa i zasada działania ogniwa fotowoltaicznego

Aby zbudować ogniwo fotowoltaiczne należy na obydwu warstwach półprzewodników umieścić metaliczne elektrody zdolne do zbierania ładunku z ich powierzchni. Ze względu na to, że do złącza  $p-n$  musi docierać światło, jedna z elektrod powinna mieć małą powierzchnię, aby światło mogło swobodnie docierać w głąb złącza. Druga z elektrod (nieoświetlona) przylega całkowicie do powierzchni dolnej ścianki fotoogniwa (rys. 2).



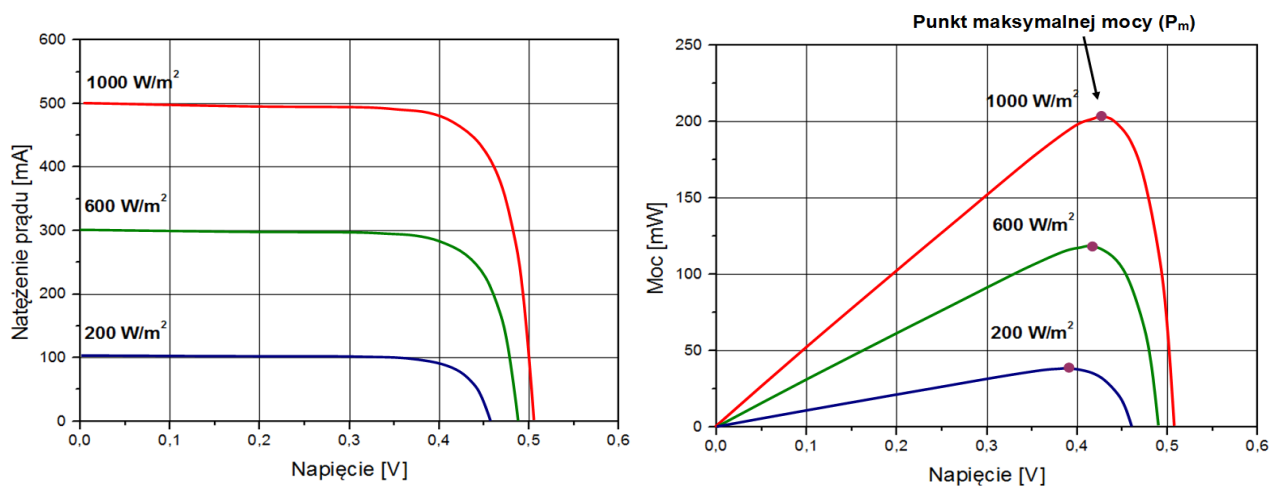
Rys. 2. Schemat budowy ogniwa fotowoltaicznego.

Jeżeli na fotoogniwo pada światło o dostatecznie dużej energii ( $h\nu \geq E_g$ ), w jego wnętrzu zachodzi zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne. Powstałe pary dziura-elektron (tzw. fotoelektron i fotodziura) w wyniku dyfuzji docierają do złącza. Jeżeli nośniki prądu docierają do złącza od strony półprzewodnika typu  $n$ , dziury, dla których nie istnieje bariera potencjału, zostaną przeniesione do półprzewodnika typu  $p$ , natomiast dla elektronów bariera potencjału jest granicą nie do pokonania. Sytuacja ma się odwrotnie od strony półprzewodnika typu  $p$ . Tym samym przy oświetleniu fotoogniwa w części  $n$  zbiera się ładunek ujemny, natomiast w części  $p$  ładunek dodatni. Pomiędzy elektrodami (oświetloną i nieoświetloną) występuje więc różnica potencjałów. Jeżeli elektrody podłączymy do odbiornika, w zamkniętym obwodzie elektrycznym popłynie prąd elektryczny. Natężenie tego prądu będzie w przybliżeniu proporcjonalne do natężenia oświetlenia fotoogniwa. Należy dodać, że sprawność fotoogniw obniża m.in. proces rekombinacji nośników

czyli ponownego łączenia się dziury i elektronu. Negatywnie wpływa również zjawisko odbicia światła od powierzchni fotoogniwa (minimalizuje się je poprzez pokrycie fotoogniwa warstwą przeciw-odbiciową).

Przy projektowaniu urządzeń zasilanych energią z ogniw fotowoltaicznych istotna jest znajomość charakterystyk takich ogniw. Są one zbliżone dla różnych typów fotoogniw. Na rysunku 3 przedstawiono zależności prądu od napięcia oraz mocy od napięcia wykonane dla ogniwa fotowoltaicznego przy różnych natężeniach światła. Charakterystyki powstały poprzez zmianę rezystancji odbiornika.

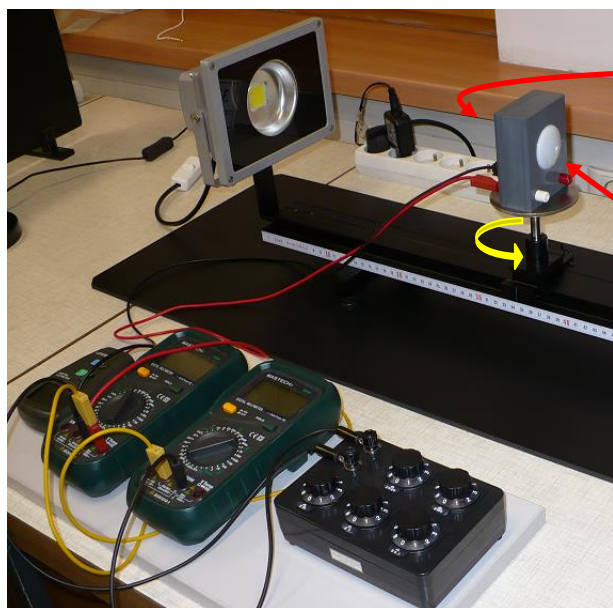
Jak widać z charakterystyk prądowo-napięciowych, maksymalny prąd ogniwa fotowoltaicznego zmienia się proporcjonalnie do jego oświetlenia, podczas gdy napięcie maksymalne zależy od oświetlenia w niewielkim stopniu. Zależność mocy od napięcia pokazuje dodatkowo, że przy pewnym obciążeniu fotoogniwa pobierana moc osiąga wartość maksymalną (punkt maksymalnej mocy). Maksymalną moc z ogniwa można uzyskać, gdy rezystancja odbiornika jest równa rezystancji wewnętrznej ogniwa.



Rys. 3. Charakterystyki prąd-napięcie oraz moc-napięcie przy różnym oświetleniu ogniwa fotowoltaicznego.

### Opis stanowiska pomiarowego

Stanowisko pomiarowe składa z źródła światła (lampa LED), ławy optycznej ze skalą, przesuwnego uchwyty z zamocowanym detektorem światła oraz ogniwem fotowoltaicznym. Znajduje się tu również luksomierz, rezystor dekadowy oraz dwa multimetry, z których jeden należy ustawić w opcji woltomierza (na zakresie 2V - prąd stały), a drugi miliamperomierza (zakres 200 mA - prąd stały). Detektor światła i ogniwo fotowoltaiczne znajdują się na wspólnym obrotowym uchwycie. Ich zamiany dokonuje się poprzez obrót kółka uchwytu o 180 stopni.

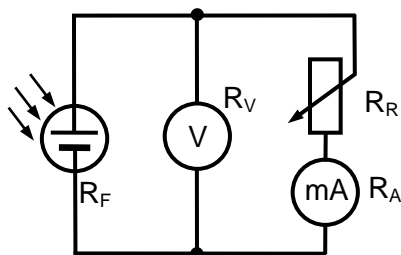


ogniwo fotowoltaiczne

detektor światła

Zdjęcie układu pomiarowego.

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie: zależności prądu fotoogniwa od natężenia oświetlenia, charakterystyk prądowo-napięciowych fotoogniwa dla różnych wartości natężenia oświetlenia, oporu wewnętrznego oświetlonego fotoogniwa. Aby tego dokonać, na początek należy wyznaczyć zależność natężenia oświetlenia  $L$  od odległości od źródła światła  $r$  (zgodnie z teorią natężenie oświetlenia powinno maleć z kwadratem odległości od punktowego źródła światła  $L \sim 1/r^2$ ). W tym celu detektor światła należy podłączyć do luksomierza. Po tych badaniach należy przystąpić do właściwych pomiarów. Naprzeciwko źródła światła należy ustawić ogniwo fotowoltaiczne, a następnie połączyć je zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4. Rezystancję odbiornika należy zmieniać przy pomocy rezystora dekadowego. Napięcie zmierzone woltomierzem jest w rzeczywistości spadkiem napięcia na rezystorze dekadowym  $R_R$  oraz na rezystancji miliamperomierza  $R_A$ . Dla dużych wartości rezystancji  $R_R$ , rezystancja miliamperomierza ( $R_A \approx 5\Omega$  na zakresie 200 mA) jest pomijalnie mała, ale trzeba pamiętać o wpływie rezystancji  $R_A$  na rezystancję odbiornika  $R_{ODB} \approx R_R + R_A$  dla niewielkich wartości na rezystorze dekadowym.



Rys. 4. Schemat elektryczny obwodu pomiarowego

Na podstawie otrzymanych wyników można wykreślić zależność prądu od napięcia  $I=f(U)$ . Następnie należy obliczyć moc  $P$  wydzieloną na odbiorniku, korzystając ze wzoru

$$P = UI. \quad (3)$$

Po wykreśleniu zależności mocy od napięcia  $P=f(U)$  należy wyznaczyć na wykresie punkt maksymalnej mocy. Odczytana z wykresu wartość maksymalnej mocy  $P_m$  oraz odpowiadające jej napięcie  $U_m$  umożliwi wyznaczenie z poniższej zależności rezystancji odbiornika  $R_{mODB}$ , która w tym przypadku jest równa rezystancji wewnętrznej fotoogniwa  $R_F$

$$R_{mODB} = R_F = \frac{U_m^2}{P_m}. \quad (4)$$

## Przebieg ćwiczenia

### A. Pomiar zależności natężenia oświetlenia od odległości od źródła światła $L=f(r)$

1. Włącz lampę a następnie ustaw naprzeciwko niej detektor światła podłączony do luksomierza. Wykonaj pomiary natężenia oświetlenia w funkcji odległości od źródła światła w zakresie  $20 \div 90$  cm. Ze względu na nieliniową zależność oświetlenia od odległości, początkowo zmieniaj dystans co 2 cm, potem co 5 cm a na koniec co 10 cm.
2. Wykreśl zależność natężenia oświetlenia od odległości od źródła światła  $L=f(r)$ .
3. Zapisz wnioski.

**Uwaga!** W trakcie pomiaru luksomierzem korzystaj z odpowiednich zakresów pomiarowych przyrządu. Zwróć uwagę na mnożnik, który należy zastosować do wyświetlonej wartości (ukazuje się w dolnej części wyświetlacza).

### B. Pomiar zależności natężenia prądu od natężenia oświetlenia $I=f(L)$

1. Odłącz detektor światła od luksomierza a następnie obróć go o  $180^\circ$ .
2. Połącz ogniwo fotowoltaiczne zgodnie ze schematem elektrycznym obwodu przedstawionym na rys. 4.

3. Na rezystorze dekadowym ustaw wartość  $R_R = 0 \Omega$  a następnie wykonaj pomiary natężenia prądu w funkcji odległości od źródła światła w zakresie  $20 \div 90$  cm (podobnie lub tak samo jak w przypadku pomiarów  $L=f(r)$ ).
4. Korzystając wykresu  $L=f(r)$  przyporządkuj wybranym odległościom odpowiednie wartości natężenia oświetlenia.
5. Wykreśl zależność prądu płynącego przez fotoogniwo od natężenia oświetlenia  $I=f(L)$ .
6. Zapisz wnioski.

### **C. Pomiar zależności natężenia prądu od napięcia $I=f(U)$**

1. Ustaw fotoogniwo w odległości  $r = 30$  cm od lampy i wykonaj pomiary natężenia prądu fotoogniwa od napięcia zmieniając rezystancję  $R_R$ .

**Uwaga!** Należy odpowiednio dobrać rezystancje tak, aby zarejestrować pełen przebieg charakterystyki prądowo-napięciowej. Na początek należy zmieniać rezystancję  $R_R$  co  $1\Omega$  (w zakresie  $0 \div 10 \Omega$ ) następnie co  $2\Omega$  (w zakresie  $10 \div 20 \Omega$ ) a potem co 5, 10, 100, 1000  $\Omega$ . Dla rezystancji powyżej 1000  $\Omega$  zmiany prądu i napięcia są prawie niezauważalne.

2. Czynności te powtórz dla odległości 35 cm oraz 45 cm.
3. Z wykresu  $L=f(r)$  odczytaj wartości natężenia oświetlenia odpowiadające wybranym odległościom pomiarowym  $r$ .
4. Wykreśl wszystkie trzy charakterystyki prądowo-napięciowe na wspólnym wykresie.
5. Zapisz wnioski.

### **D. Wyznaczenie rezystancji wewnętrznej oświetlonego fotoogniwa**

1. Korzystając z uprzednio uzyskanych wyników wylicz ze wzoru (3) moc a następnie wykreśl charakterystyki moc-napięcie na wspólnym wykresie.
2. Znajdź na każdym z wykresów punkt mocy maksymalnej a następnie korzystając ze wzoru (4) oblicz rezystancję wewnętrzną oświetlonego fotoogniwa.
3. Zapisz wnioski.