

BADANIE OGNIW I BATERII SŁONECZNYCH

1. ENERGIA SŁONECZNA

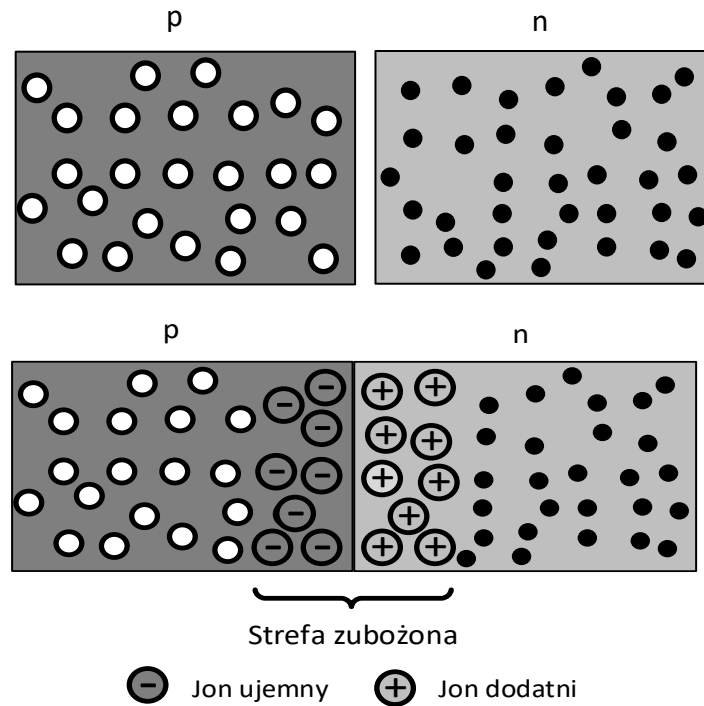
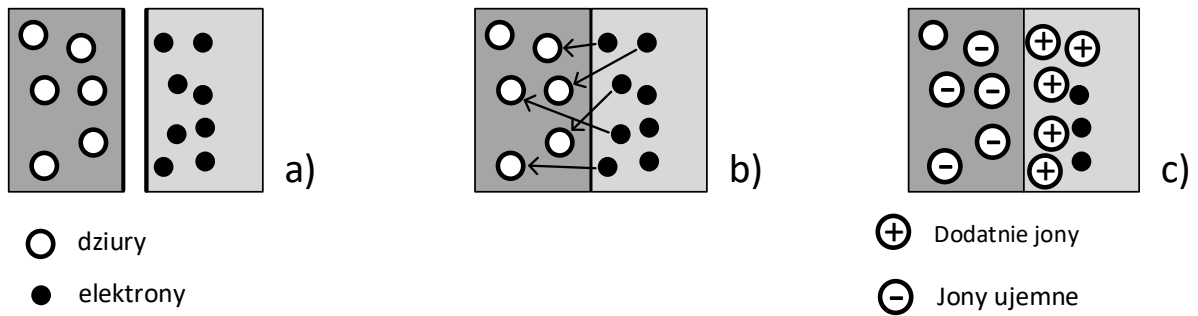
Zewnętrzna warstwa Słońca – fotosfera – ma temperaturę efektywną równą 5778K (5505°C), jest źródłem promieniowania. Tylko jego bardzo mała część energii emitowanej, wynosząca $5 \cdot 10^{-10}$, pada na powierzchnię Ziemi. Ta ilość energii wystarcza do utrzymania temperatury powierzchni Ziemi na poziomie obecnie średnio ok. 14,9°C [5]. Podstawową wielkością charakteryzującą ilość energii pochodzącej od Słońca jest tzw. stała słoneczna - ilość energii dopływającej w jednostce czasu i jednostce powierzchni prostopadłej wyznaczana na górnej granicy atmosfery. Wielkość ta jest obecnie mierzona za pomocą aparatury w satelitach. Średnia wartość stałej słonecznej wynosi 1361 W/m². Przy przejściu przez atmosferę część energii zostaje rozproszona. Natężenie promieniowania słonecznego padającego bezpośrednio na powierzchnię Ziemi zależy od położenia geograficznego punktu pomiaru, położenia słońca (pory roku, pora dnia), wysokości nad poziomem morza, rodzaju i stopnia zachmurzenia. Dla miejsc położonych około zwrotników przy maksymalnej przejrzystości powietrza może osiągać wartości ok. 1100 W/m². Natężenie promieniowania rozproszonego pochodzącego z całkowitego obszaru nieba wynosi od ok. 70 W/m² (pogodne niebo) do 280 W/m² (całkowite zachmurzenie).

Promieniowanie słoneczne stanowi odnawialne źródło energii wykorzystywane w energetyce do uzyskiwania energii cieplnej (kolektory słoneczne) i energii elektrycznej (baterie fotowoltaiczne).

2. OGNIWO FOTOWOLTAICZNE

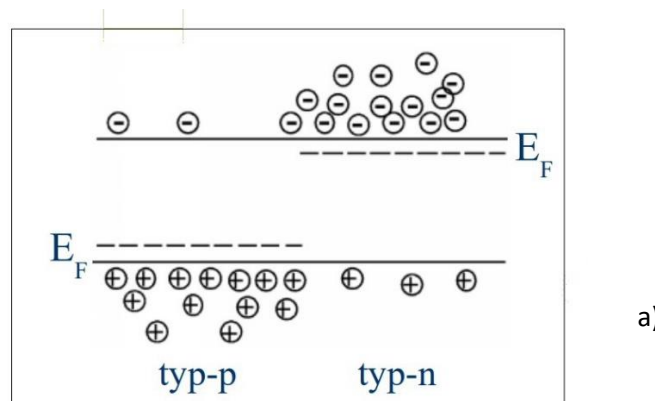
Ogniwo fotowoltaiczne (ogniwo słoneczne) to urządzenie w którym następuje konwersja energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. W działaniu ogniwa wykorzystuje się zjawisko efektu fotowoltaicznego odkrytego w 1938r. przez uczonego francuskiego Becquerela. W zbudowanym przez siebie ogniwie składającym się z dwóch płytek z platyny (jedna pokryta chlorkiem srebra) po oświetleniu elektrod światłem słonecznym pojawiła się różnica potencjałów w obwodzie zewnętrznym. Kolejne prace w tej dziedzinie skutkowały zbudowaniem ogniwa fotowoltaicznego na bazie selenu. Efekt fotowoltaiczny obserwowano w połączeniach dwóch materiałów: selenu i złota, miedzi i tlenku miedzi. Rozwój technologii produkcji materiałów półprzewodnikowych pozwolił na wykorzystanie krzemu i wytworzonego w nim złącza p-n do budowy ogniwa fotowoltaicznych. Czysty krzem jest domieszkowany trój- i pięciowartościowymi atomami domieszkującymi w celu uzyskania półprzewodnika odpowiednio typu n lub typu p. Na rysunku 1a [4] pokazano, w sposób poglądowy, materiał typu n zawierający elektrony i materiał typu p zawierający dziury w stanie tu przed ich zetknięciem.

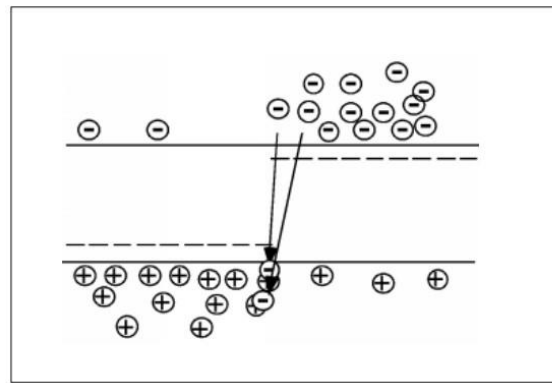
Po zetknięciu obu materiałów następuje dyfuzja elektronów i dziur przez granice połączenia materiałów. Elektrony z obszaru n na złączu dyfundują do obszaru p i łączą się z atomami domieszkowymi tworząc jony ujemne. Dziury z obszaru p na złączu dyfundują do obszaru n i łączą się z atomami domieszkowymi tworząc jony dodatnie. Przepływ nośników jest nazywany prądem dyfuzyjnym (rekombinacyjnym) – rysunek 1b. Na styku obu materiałów powstaje warstwa zaporowa, zubożona w nośniki, oraz strefy złożone z jonów dodatnich w obszarze n i ujemnych w obszarze p wytwarzające pole elektryczne przeciwdziałające dalszej dyfuzji. Ustala się stan równowagi charakteryzujący się zanikiem dalszego przepływu elektronów i dziur. Prąd dyfuzyjny przyjmuje wartość zero. Stan ten jest pokazany na rysunku 1c.



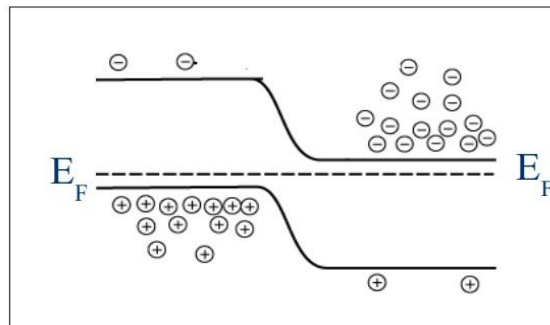
Rys.1 Tworzenie się złącza p-n [4]

Proces tworzenia się złącza p-n można przedstawić na modelu pasmowym – rysunek 2. Przed złączeniem oba półprzewodniki mają różne poziomy Fermiego – rysunek 2a. Po złączeniu następuje przepływ elektronów i dziur, które rekombinują z jonami domieszek (rys. 2b). Wskutek tego tworzy się ładunek przestrzenny i następuje proces modyfikacji poziomów energetycznych taki, że poziomy Fermiego dla obu półprzewodników wyrównują się – rysunek 2c.





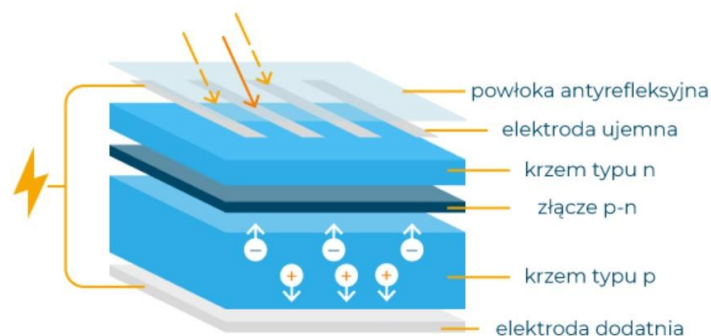
b)



c)

Rys.2 Model pasmowy tworzenia złącza p-n [4]

W ogniwie słonecznym półprzewodnikowym złącze p-n stanowi rodzaj separatora par elektron-dziura w półprzewodniku. Gdy na złącze p-n pada promieniowanie słoneczne to absorpcja fotonów o energii większej niż energia warstwy zaporowej powoduje generację par elektron-dziura. Liczba par elektron-dziura jest proporcjonalna do natężenia padającego światła. Pole elektryczne w warstwie zaporowej wymusza przepływ elektronów w kierunku półprzewodnika n i dziur w kierunku półprzewodnika p. Takie przemieszczenie się ładunków elektrycznych powoduje pojawienie się różnicy potencjałów – napięcia elektrycznego U . Gdy do ogniwa dołączymy obciążenie zewnętrzne, wtedy przepływać będzie przez nie prąd elektryczny. Schematyczną budowę i działanie ogniwa fotowoltaicznego pokazano na rysunku 3.



Rys. 3 Budowa ogniwa fotowoltaicznego [5]

Potencjał dyfuzyjny U_D w złączu $p-n$ jest zależny od ilości domieszek i odpowiada pierwotnej różnicy pomiędzy energiami poziomów Fermiego oddzielnie dla obszarów p i n . Różnica energetyczna między pasmem walencyjnym i przewodnictwa dla krzemu w temperaturze pokojowej wynosi $E = 1.1 \text{ eV}$ [1,2,6,7]. Dla krzemu potencjał dyfuzyjny U_D wynosi 0.5V do 0.7V [1,2]. Napięcie U może co najwyżej osiągnąć wartość potencjału dyfuzyjnego U_D .

Gęstość strumienia elektronów i dziur wynosi

$$i = e \cdot \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) \left(\frac{n_0 D_e t}{L_e^2} + \frac{p_0 D_h}{L_h} \right) - e \cdot g \quad (1)$$

gdzie: g – liczba par elektron-dziura wytwarzana na jednostkę powierzchni, U - generowane napięcie, e – ładunek elementarny ($1,602 \cdot 10^{-19}$ [C]), k – stała Boltzmann, T – temperatura, L_e, L_h – średnia droga swobodna odpowiednio elektronów (e) i dziur (h), D_e i D_h – stała dyfuzji elektronów i dziur, n_0 i p_0 – koncentracja mniejszościowych nośników w stanie równowagi.

Stąd dla prądu zwarcia ($U=0$) gęstość ta wynosi

$$i_s = - e \cdot g \quad (2)$$

Jest ona proporcjonalna do natężenia oświetlenia padającego światła przy stałej temperaturze ogniwa. Parametr g przyjmuje nieco większe wartości przy wzroście temperatury (wzrost mniejszy niż $10^{-4} \frac{1}{K}$). Równowagowe koncentracje p_0 i n_0 rosną wraz ze wzrostem temperatury [1,2]

$$n_0 \approx e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} \quad (3)$$

Generowana SEM maleje ze wzrostem temperatury ogniwa, przy czym typową wartością jest zmiana o $-2,3 \frac{mV}{K}$.

Najczęściej stosowane obecnie ogniwa fotowoltaiczne wykorzystują krzem jako materiał półprzewodnikowy. Wśród ogniw fotowoltaicznych zbudowanych na bazie krzemu można wyróżnić ogniwa słoneczne wykorzystujące krzem krystaliczny w postaci monokrystalicznej lub polikrystalicznej.

Ogniwa z krzemu monokrystalicznego mają sprawność około 15% - 17% (przy produkcji masowej). Znaczącą wadą jest wymagana bardzo wysoka czystość monokryształu i ograniczona do 40cm^2 , ze względów technologicznych, powierzchnia pojedynczego ogniwa. Pociąga to za sobą znaczne koszty produkcji. Maksymalna moc dostarczana przez takie ogniwo wynosi ok. 0,6W przy napięciu 0,5V.

- Ogniwa z krzemu polikrystalicznego wykorzystujące uwodorniony krzem amorficzny mają niską sprawność około 6% do 8%. Mimo niskich kosztów produkcji dalszy rozwój tej technologii został wstrzymany. Dalej rozwija się technologię wykorzystującą strukturę p-i-n trójwarstwową z dodatkową warstwą półprzewodnika między obszarami typu p i typu n. Sprawność takiej konstrukcji osiąga wartość 10%. Dodatkową zaletą są niskie koszty produkcji.

Produkcja ogniw fotowoltaicznych wykorzystuje wiele typów materiałów (półprzewodnikowych i innych) umożliwiających uzyskanie efektu fotowoltaicznego. Są to m.in. półprzewodniki z grup III-V, których wysoka sprawność 30% do 40% jest uwarunkowana bardzo wysokimi czystościami zastosowanych materiałów. Stosowane są tu również tellurek kadmu CdTe i selenek indowo-galowo-miedziowy CIGS. W konstrukcji ogniw fotowoltaicznych są również wykorzystywane polimery oraz konstrukcje na bazie dwutlenku Tytanu TiO_2 . Ze względu na trudności technologiczne i wysokie koszty produkcji, mimo wysokich sprawności, ogniwa takie są wykorzystywane głównie w zastosowaniach specjalnych.

Pojedyncze ogniwo fotowoltaiczne ma ograniczone wartości generowanego prądu i napięcia elektrycznego. W celu uzyskania żądanych (większych) wartości prądu i napięcia wyjściowego buduje się baterie fotowoltaiczne łącząc odpowiednio szeregowo i równolegle pojedyncze fotoogniwa ze sobą.

3. ZASTOSOWANIE BATERII SŁONECZNYCH JAKO ŹRÓDŁA ENERGII ODNAWIALNEJ

Podstawowym zastosowaniem baterii słonecznych jest produkcja energii elektrycznej na potrzeby gospodarki. Dotyczy to zwłaszcza baterii wykorzystujących krzem jako materiał półprzewodnikowy.

Autonomiczne źródło energii elektrycznej jest szczególnie cenne w miejscach oddalonych od stacjonarnej sieci zasilającej.

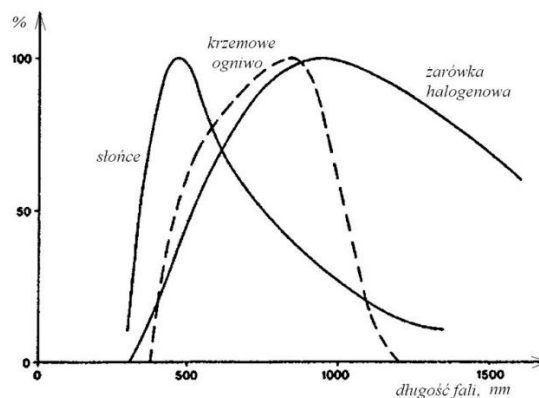
Baterie słoneczne służą jako źródła energii w zastosowaniach specjalnych np. w technice kosmicznej do zasilania stacji i satelitów kosmicznych.

Wykorzystywanie baterii słonecznych niesie ze sobą dużo udogodnień i równocześnie ograniczeń.

Podstawową zaletą zastosowania baterii słonecznych do produkcji energii elektrycznej jest wykorzystanie Słońca jako nieskończonego źródła energii.

Istnieje szereg przyczyn ograniczających możliwości skorzystania z tego źródła

- brak źródła energii w czasie nocy, zachmurzenie w ciągu dnia,
- konieczność ustawienia optymalnego, dla danego miejsca geograficznego, położenia baterii słonecznych w kierunku słońca,
- zmiana natężenia oświetlenia baterii związana z porą dnia (tu pomocne są układy nadążne),
- spadek sprawności baterii związany ze wzrostem jej temperatury ,
- przesunięcie charakterystyk widmowych światła słonecznego względem charakterystyki czułości spektralnej krzemu zastosowanego do budowy baterii słonecznych (rys. 4).



Rys. 4 Widmo promieniowania Słońca ($T \cong 5800 K$) i żarówki halogenowej ($T \cong 2000 K$) oraz charakterystyka czułości spektralnej krzemowego ogniwa słonecznego [1, 2].

- duże koszty produkcji baterii ze względu na zastosowane technologie i materiały,
- trudności technologiczne magazynowania energii elektrycznej.

Mimo tych trudności powstaje obecnie wiele farm słonecznych (wielohektarowe pola pokryte bateriami słonecznymi) a także baterie słoneczne instaluje się na wielu dachach budynków.

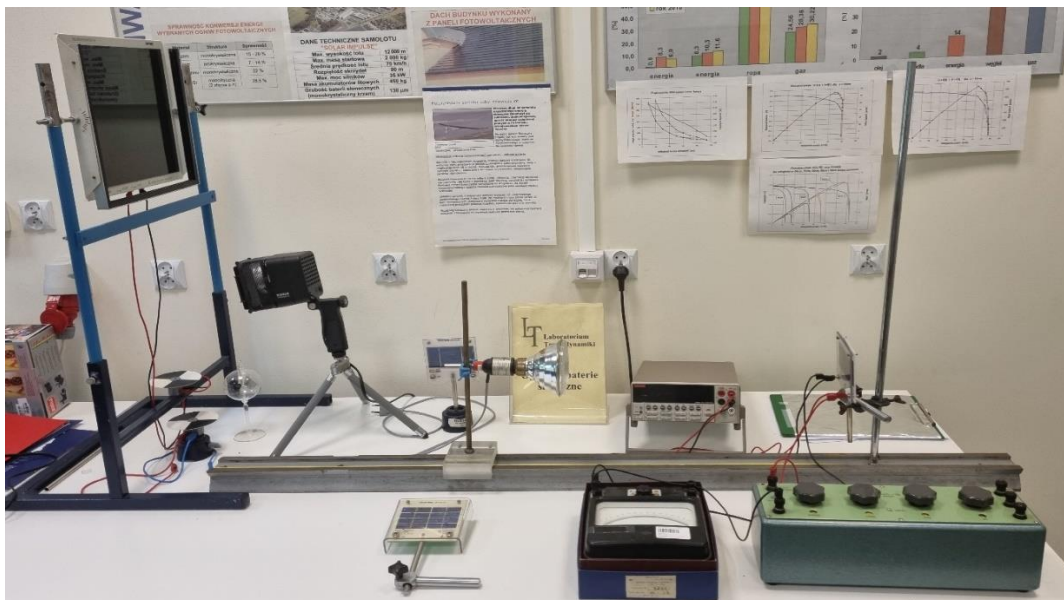
4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie podstawowych parametrów i charakterystyk baterii foto-woltaicznych na stanowisku laboratoryjnym. Widok ogólny stanowiska jest pokazany na rysunku 5.

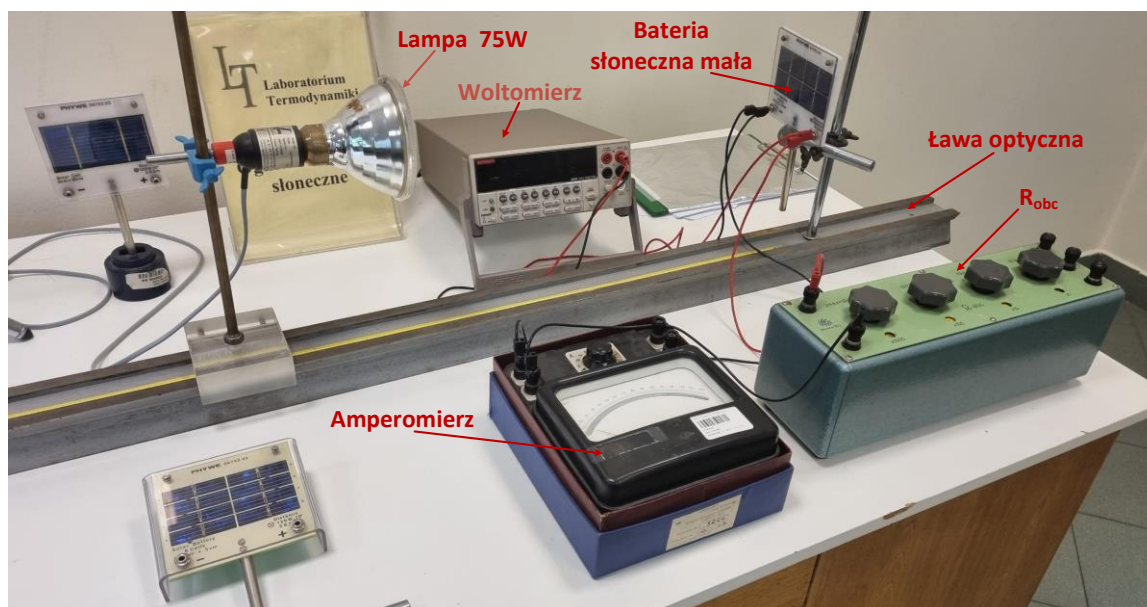
Stanowisko składa się z następujących elementów:

- bateria słoneczna duża -powierzchnia ,
- lampa na trójnożnym statywie z żarówką halogenową o mocy 1000W,
- bateria słoneczna mała (4 ogniwa połączone szeregowo),

- lampa na statywie z żarówką o mocy 75W, statyw może być przesuwany po szynie ławy optycznej
- ława optyczna,
- woltomierz cyfrowy (5 i ½ cyfry) z rozdzielczością co najmniej 0,1 mV,
- amperomierz analogowy, wskazówkowy – zakres regulowany od 30 mA do 30A, dokładność odczytu 0,5%.,
- rezystor dekadowy 1Ω do 9999Ω jako obciążenie zewnętrzne dla ogniwa.



Rys. 5 Widok ogólny stanowiska laboratoryjnego



Rys.6. Widok ogólny części stanowiska laboratoryjnego do wyznaczania parametrów baterii słonecznej małej

W dalszej części wydzielono opisy eksperymentów osobno dla małej i dużej baterii słonecznej.

W pierwszej kolejności obiektem badań będzie mała bateria słoneczna. Na rysunku 6 pokazano elementy stanowiska, które będą używane w tej części ćwiczenia.

3.1 Wyznaczenie charakterystyki $E=f(x)$ natężenia oświetlenia baterii zmiennego w funkcji odległości od lampy do baterii słonecznej.

Zestaw przyrządów został powiększony o przyrząd Foto-Radiometr HD-2102.2 z sondą LP 471 – PHOT do pomiaru natężenia oświetlenia – gęstości strumienia świetlnego padającego na daną powierzchnię. Foto-Radiometr HD-2102.2 z sondą LP 471 – PHOT pokazano na rysunku 7.



Rys. 7 Foto-Radiometr HD-2102.2 z sondą LP 471 – PHOT. Obok leży sonda LP 471-RAD do pomiaru gęstości strumienia ciepła

Punktowe źródło światła o światłości I wywołuje natężenie oświetlenia E w punkcie powierzchni, określone wzorem:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$$

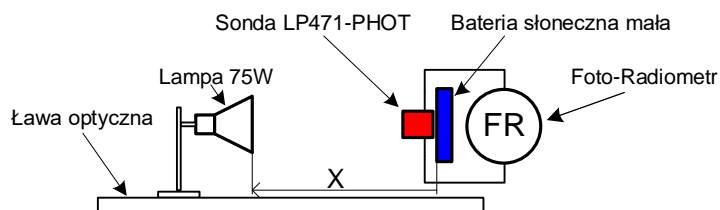
gdzie E – natężenie oświetlenia, α – kąt między normalną do powierzchni a wektorem skierowanym na źródło światła, r - odległość punktu powierzchni od źródła światła.

Jednostką natężenia oświetlenia jest luks [lx] równy lumenowi na metr kwadratowy [$\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{m}^{-2}$].

Zakres pomiarowy zastosowanej sondy LP 471-PHOT wynosi od 0,01 do 200×10^3 lx.

Opis wykonania pomiarów:

1. Zestawić układ pomiarowy pokazany na rysunku 8.



Rys. 8 Układ pomiarowy do zadania 3.1. X – odległość czoła lampy oświetlającej 75W od powierzchni czołowej baterii

2. Sondę LP471-PHOT (połączoną z Foto-Radiometrem) umieścić przed powierzchnią baterii słonecznej.
3. Zmierzyć wartość natężenia oświetlenia E powierzchni baterii słonecznej dla ośmiu położenia X ; stojaka lampy 75W na ławie optycznej. Ustawienia stojaka wybierać w miarę równomiernie zaczynając od położenia X_{max} maksymalnego odsunięcia stojaka od baterii do położenia 30cm od baterii.

Uwaga: Nie zbliżać lampy 75W do baterii słonecznej na odległość mniejszą niż 30cm.

4. Wyniki pomiarów zapisać w tablicy 1.

Tablica 1

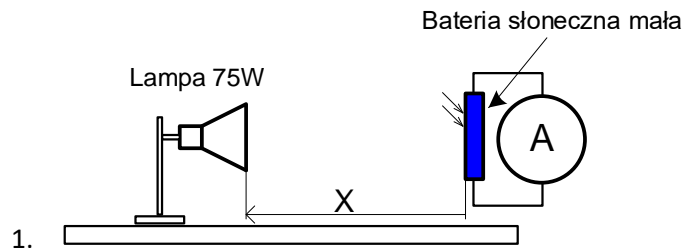
Odległość X_i lampy od baterii [cm]								
Natężenie oświetlenia E [lx]								

5. Sporządzić wykres $E=f(X)$
6. Wyznaczyć postać analityczną (wzór) zależności $E=f(X)$ pozwalający wyznaczyć wartość natężenia oświetlenia baterii dla dowolnego X z przedziału $<30\text{cm}, X_{\text{max}}>$

3.2 Wyznaczenie charakterystyki prądu zwarcia $I_{\text{zw}} = f(E)$ w funkcji natężenia oświetlenia E

Opis wykonania pomiarów:

1. Zestawić układ pomiarowy pokazany na rysunku 9.



Rys. 9 Układ pomiarowy do zadania 3.2.

2. Zmierzyć wartość prądu zwarcia I_{zw} dla ośmiu położen X_i stojaka lampy 75W na ławie optycznej. Ustawienia stojaka wybierać w miarę równomiernie zaczynając od położenia X_{max} maksymalnego odsunięcia stojaka od baterii do położenia 30cm od baterii.
Uwaga: Nie zbliżać lampy 75W do baterii słonecznej na odległość mniejszą niż 30cm.
3. Wyniki pomiarów zapisać w tablicy 2.

Tablica 2

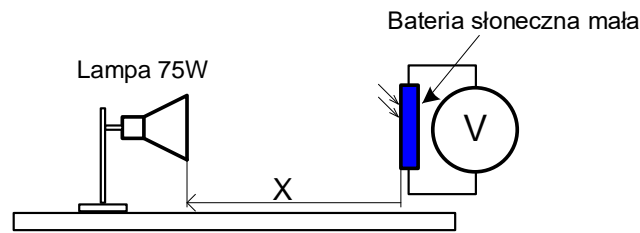
Odległość X_i lampy od baterii [cm]								
Natężenie oświetlenia E [lx]								
Prąd zwarcia I_{zw} [mA]								

4. Sporządzić wykres charakterystyki prądu zwarcia $I_{\text{zw}} = f(E)$ w funkcji natężenia oświetlenia E. Do określenia wartości E wykorzystać postać analityczną (wzór) zależności $E=f(X)$ wyznaczony w zadaniu 3.1.

3.3 Wyznaczenie charakterystyki generowanej SEM w funkcji natężenia oświetlenia E

Opis wykonania pomiarów:

1. Zestawić układ pomiarowy pokazany na rysunku 10.



Rys.10 Układ pomiarowy do zadania 3.3

- Zmierzyć wartość SEM generowanej przez baterię słoneczną bez dołączonego obciążenia zewnętrznego, dla ośmiu położeń X_i stojaka lampy 75W na ławie optycznej. Ustawienia stojaka wybierać w miarę równomiernie zaczynając od położenia X_{\max} maksymalnego odsunięcia lampy od baterii do położenia 30cm od baterii.

Uwaga: Nie zbliżać lampy 75W do baterii słonecznej na odległość mniejszą niż 30cm.

- Wyniki pomiarów zapisać w tablicy 3.

Tablica 3

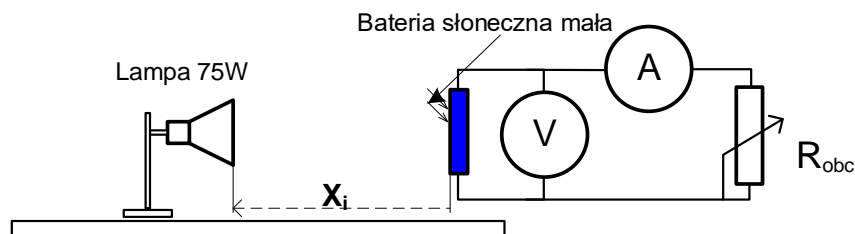
Odległość X_i lampy od baterii [cm]									
Natężenie oświetlenia E [lx]									
SEM [V]									

- Sporządzić wykres charakterystyki generowanej SEM $U = f(E)$ w funkcji natężenia oświetlenia E. Wykorzystać w tym celu postać analityczną (wzór) zależności $J=f(X)$ wyznaczony w zadaniu 3.

3.4 Wyznaczenie charakterystyki napięciowo-prądowej $U = f(I)$ dla wybranej / wybranych wartości odległości X_i lampy od baterii słonecznej małej. Wyznaczenie przebiegów $P = U \cdot I$, wyznaczenie P_{\max} dla otrzymanych charakterystyk

Opis wykonania pomiarów:

- Zestawić układ pomiarowy pokazany na rysunku 11.



Rys. 11 Układ pomiarowy do zadania 3.4.

- Ustawić stojak lampy 75W w wybranym położeniu na ławie optycznej.
- Zmieniając wartość rezystancji obciążenia R_{obc} wg wartości z tablicy 4 notować każdorazowo wartości generowanego napięcia i prądu płynącego przez obciążenie.
- Obliczyć wartość mocy P dla wszystkich wierszy tablicy 4.
- Narysować charakterystyki napięciowo-prądową $U = f(I)$ oraz charakterystyki mocy $P=f(I)$ na tym samym wykresie (dwie osie y). Wyznaczyć wartość mocy maksymalnej dla danych warunków oświetlenia baterii. Pod wykresem podać wartości: odległości czoła lampy 75W od baterii (X_i),

natężenia oświetlenia baterii słonecznej E , mocy maksymalnej oraz odpowiadających jej wartości napięcia i prądu, generowanych przez baterię dla ustawionego położenia stojaka lampy.

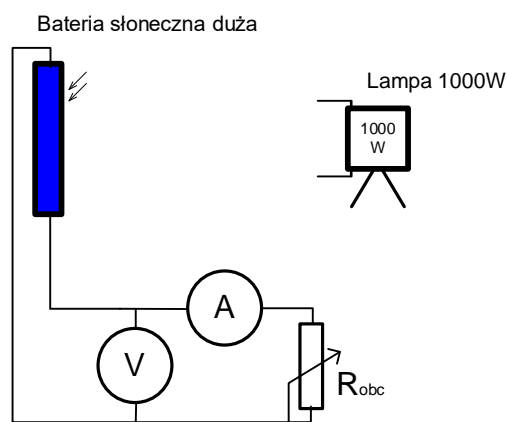
W celu wyznaczenia kolejnej charakterystyki napięciowo-prądowej baterii przesunąć stojak lampy 75W do innego położenia i powtórzyć czynności opisane w punktach od 3 do 5 tego zadania.

Kolejne zadanie dotyczy wyznaczenia charakterystyki napięciowo-prądowej baterii słonecznej dużej oświetlanej lampą z żarówką halogenową 1000W.

3.5 Wyznaczenia charakterystyki napięciowo-prądowej dużej baterii słonecznej

Opis wykonania pomiarów:

1. Zestawić układ pomiarowy pokazany na rysunku 12. Lampę 1000W ustawić w odległości ok. 70cm od powierzchni baterii słonecznej.

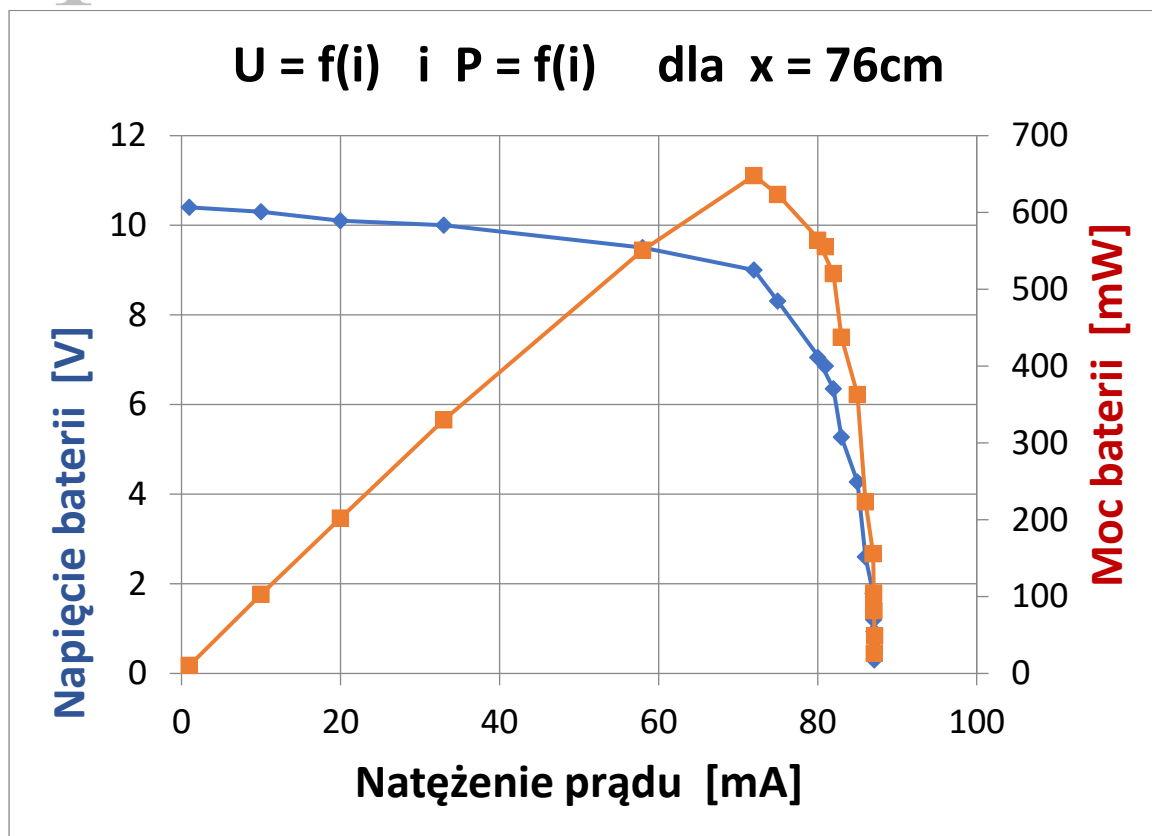


Rys.12 Układ pomiarowy do zadania 3.5.

2. Wykonać czynności opisane w punktach od 3 do 5 z zadania 3.4.

Uwaga: Nie odłączać lampy 1000W od gniazdka zasilania - wentylatorkę cały czas chłodzi lampę.

Na rysunku 13 pokazano przykładowe przebiegi charakterystyki napięciowo-prądowej i mocy baterii uzyskane na stanowisku laboratoryjnym.



Rys.13 Przykładowe wyniki dla baterii słonecznej małej.

RAPORT

W Raporcie z ćwiczenia umieścić wyniki dla wszystkich zadań: wszystkie tabelki, wykresy, dokonane przeliczenia i aproksymacje. Sformułować ocenę otrzymanych wyników.

LITERATURA

- [1] Phywe: *Characteristic curves of a solar cell*, LEP 4.1.09
- [2] Phywe, *Physics: Catalogue 3.22*, page 171-222
- [3] *Ogniwa fotowoltaiczne*. Laboratorium z Elektrochemii Ciała Stałego, AGH
- [4] <https://if.pw.edu.pl/~malys/2016-w09-Polprzewodniki-Zlacza-p-n.pdf>, 2016, Instytut Fizyki, PW
- [5] Lenart W., Juźwik M., Kasprzak G., Lewicka-Kłoszewska B.: *Postaw na słońce*, Fundacja BOŚ, 2015
- [6] Terpiłowski J.: *Ogniwa i baterie słoneczne*, 2009, Instrukcja Laboratorium Termodynamiki WAT (instrukcja wewnętrzna, materiał niepublikowany)
- [7] Kittel Ch.: *Wstęp do fizyki ciała stałego*, Księgarnia Internetowa PWN, 1996
- [8] Koniarczyk P.: *Badanie ogniw i baterii słonecznych. Kolektor słoneczny*, 2010, Instrukcja Laboratorium Termodynamiki WAT (instrukcja wewnętrzna, materiał niepublikowany)

Tabela 4 do zadania 3.4 i 3.5

R_{obc}	U	I	P
Ω	V	mA	mW
10 000			
9 000			
8 000			
7 000			
6 000			
5 000			
4 000			
3 000			
2 000			
1 000			
900			
800			
700			
600			
500			
400			
300			
200			
100			
90			
80			
70			
60			
50			
40			
30			
20			
10			
9			
8			
7			
6			
5			
4			
3			
2			