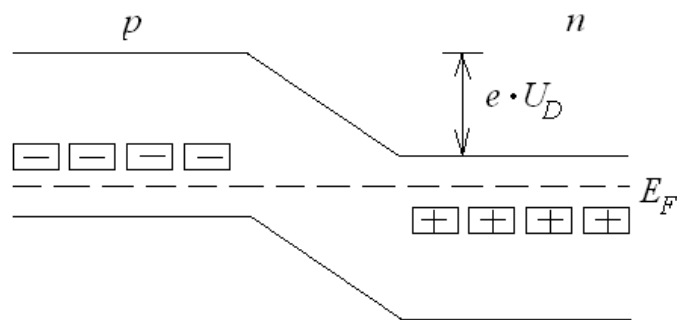


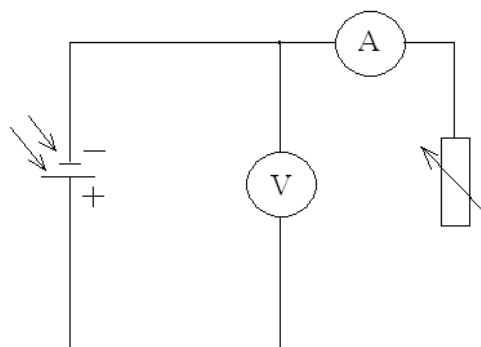
1. Budowa i zasada działania

Ogniwo słoneczne jest to ogniwo fotowoltaiczne, w którym do wytwarzania prądu elektrycznego wykorzystuje się promieniowanie słoneczne. Większość ogniw słonecznych zawiera złącze  $p-n$  z monokrystalicznego krzemu. Gdy fotony światła słonecznego padają na złącze półprzewodnikowe lub w jego pobliżu, powstające pary *elektron-dziura* pod wpływem pola elektrycznego przy złączu rozdzielają się, tak że dziury przechodzą do obszaru  $p$ , a elektrony do obszaru  $n$  – rys. 1 [3, 4].



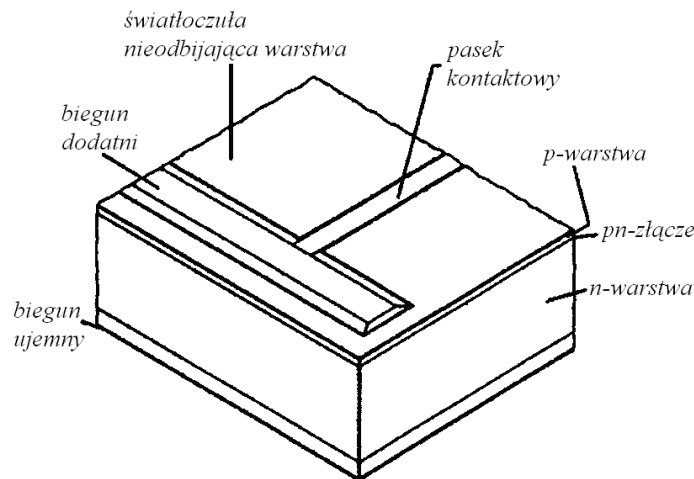
Rys. 1. Złącze  $p-n$  na diagramie energetycznym: (-) – akceptory (elektrony), (+) – donory (dziury),  $U_D$  – potencjał dyfuzyjny,  $E_F$  – energia poziomu Fermiego,  $e$  – ładunek elektronu.

To przemieszczanie się swobodnego ładunku wytwarza prąd elektryczny, jeśli do kontaktów wyjściowych urządzenia jest podłączone obciążenie – rys. 2. Praktyczną realizację ogniwa słonecznego – na schemacie - pokazano na rys. 3.



Rys. 2. Układ do pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej ogniwa słonecznego [1, 2].

## 21 – Badanie ogniw i baterii słonecznych



Rys. 3. Schemat konstrukcji ogniw słonecznych [1, 2].

### Uwagi dodatkowe:

- jak dotąd nie udało się wytworzyć pojedynczych krzemowych ogniw słonecznych o powierzchni większej, niż  $40 \text{ cm}^2$ ;
- maksymalna moc dostarczana przez takie ogniwo w pełnym słońcu wynosi w przybliżeniu  $0.6 \text{ V}$ , przy napięciu  $0.5 \text{ V}$ ;
- sprawność tych urządzeń wynosi około  $15\%$ . Z tych też powodów ogniwa słoneczne stosowane do celów praktycznych muszą być połączone w baterie;
- płyty z ogniwami słonecznymi były do niedawna wyłącznymi źródłami energii dla satelitów i pojazdów kosmicznych;
- stosowanie baterii słonecznych w warunkach ziemskich jest znacznie ograniczone z powodu wysokiej ceny. Aktualnie mają one zastosowanie jako źródła zasilania urządzeń związanych z bezpieczeństwem ruchu drogowego, tzn. służą do podświetlania znaków drogowych czy prędkościomierzy radarowych i to w miejscach znacznie odległych od stacjonarnej sieci elektrycznej.

## 2. Badania eksperymentalne

W prezentowanym ćwiczeniu należy:

- określić natężenie światła za pomocą stosu termoparowego w zależności od odległości od źródła światła;
- zmierzyć wartości prądu zwarcia i SEM ogniw przy różnych odległościach od źródła światła;
- wyznaczyć zależność prądu zwarcia i SEM ogniw w zależności od jego temperatury;
- wyznaczyć charakterystykę napięciowo-prądową ogniw przy różnych natężeniach światła;
- wyznaczyć charakterystykę napięciowo-prądową ogniw w zależności od warunków jego pracy: a) podczas chłodzenia aparatury wentylatorkiem i bez chłodzenia; b) podczas ekranowania i bez ekranowania źródła światła przez szybę szklaną;
- określić charakterystykę układu podczas oświetlania go przez światło słoneczne.

## 3. Stanowisko badawcze - wyposażenie

Wyposażenie stanowiska badawczego [1, 2]:

- ogniwo słoneczne: 4 cele,  $2.5 \times 5 \text{ cm}$  - 1 szt.;
- stos termoparowy – 1 szt.;
- szklany termometr laboratoryjny rtęciowy:  $9\text{-}10 \div (+)100 \text{ }^\circ\text{C}$  – 1 szt.,
- wzmacniacz pomiarowy – 1 szt.;

## 21 – Badanie ogniw i baterii słonecznych

- opornica: 330  $\Omega$ , 1 A – 1 szt.;
- żarówka z reflektorem: 230 V, 120 W – 1 szt.;
- multimetr cyfrowy – 2 szt.;
- wentylator z grzałką – 1 szt.;
- liniał ze skalą: 1÷1000 mm – 1 szt.;
- statywy laboratoryjne – 4 szt.;
- przewody elektryczne.

Widok stanowiska pomiarowego do wyznaczania charakterystyk ogniwa słonecznego firmy Phywe (Niemcy) pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Stanowisko doświadczalne do wyznaczania charakterystyk ogniwa słonecznego [1, 2].

### Układ i warunki pomiarowe:

1. pomiar natężenia światła za pomocą stosu termoparowego i wzmacniacza oraz wyposażenia zestawu pomiarowego przy różnych odległościach od źródła światła (*uwaga: maksymalne napięcie wyjściowe wzmacniacza wynosi 10 V*):
  - a) apertura wejściowa stosu termoparowego (powierzchnia zewnętrzna płytki grafitowej) wyznacza jego pozycję w stosunku do źródła światła;
  - b) odległość między żarówką a stosem termoparowym powinna wynosić przynajmniej 50 cm, bo apertura stosu wynosi tylko 20°;
  - c) ogniwo słoneczne rejestruje zarówno natężenie światła rozproszonego, jak i światła docierającego do niego bezpośrednio z żarówki;
  - d) ponieważ żarówka wysyła wąski stożek światła, tzn. w przybliżeniu 30°, to światło rozproszone powstaje głównie jako wynik odbicia od powierzchni stołu i może być w dużym stopniu skompensowane poprzez czarną wykładzinę powierzchni stołu albo pokrycie stołu kawałkiem czarnego kartonu;
2. napięcie na zaciskach otwartego ogniwa - SEM i prąd zwarcia ogniwa słonecznego są zależne od temperatury. Dlatego przy zdejmowaniu charakterystyk ogniwa słonecznego jest ono utrzymywane w temperaturze pokojowej za pomocą wentylatora;
3. aby zademonstrować efekt temperaturowy, należy nawiewać gorące powietrze z suszarki na ogniwo słoneczne, mierząc termometrem temperaturę jego powierzchni;
4. nie należy dotykać ogniwa słonecznego, gdyż jego cienka  $p$  - warstwa może zostać łatwo uszkodzona;
5. jeżeli odległość między lampą a ogniwem przekracza 50 cm, to przyrost temperatury spowodowanej przez promieniowanie można nie brać pod uwagę. Wpływ ten jest mały w porównaniu z wpływem gorącego powietrza.



## 21 – Badanie ogniw i baterii słonecznych

Pomiar SEM i prądu zwarcia:

1. możliwy jest również pomiar charakterystyk ogniwa przy wykorzystaniu promieniowania słonecznego. W tym przypadku należy brać pod uwagę zarówno promieniowanie docierające do ogniwa wprost, jak i promieniowanie rozproszone;
2. stos termoparowy stosuje się ponownie do określenia zależności między prądem zwarcia i natężeniem światła, chociaż z powodu małej wartości kątowej apertury, rejestruje on tylko natężenie światła docierające wprost;
3. dlatego w celach porównawczych należy umieścić przed ogniwem rurkę z czarnego kartonu o długości około 20 cm, by ekranować je przed promieniowaniem rozproszonym;
4. ważne jest również, by zarówno osie ogniwa, jak i stosu termoparowego były wycelowane na Słońce.

Teoria i oszacowania:

1. czysty krzem jest celowo domieszkowany (można to uznać za rodzaj zanieczyszczenia) trzy i pięciowartościowymi atomami domieszkującymi, aby otrzymać półprzewodnik typu  $n$  lub  $p$ ;
2. jeżeli połączy się ze sobą kryształy typu  $p$  i  $n$ , to otrzymamy złącze  $p-n$  – rys. 1 i 3, którego właściwości elektryczne określają wydajność ogniwa słonecznego;
3. w stanie równowagi, tzn. bez napięcia zewnętrznego, energia poziomu Fermiego  $E_f$  będzie zawsze taka sama, ponieważ elektrony dyfundują do obszaru  $p$ , a dziury do obszaru  $n$ , co jest spowodowane różnicą koncentracji elektronów i dziur w obszarach  $p$  i  $n$ ;
4. nieruchome atomy domieszkujące tworzą ładunek przestrzenny ograniczający zakres prądowy, prąd dyfuzji i zakres pola odchyłek między nimi w stanie równowagi;
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 [1÷4]:

$$E = 1.1 \text{ eV} .$$

Dla krzemu potencjał dyfuzyjny wynosi [1÷4]:

$$U_D = 0.5 \text{ do } 0.7 \text{ V} .$$

6. jeżeli światło pada na złącze  $p-n$ , wtedy fotony tworzą pary „elektron-dziura” oddzielone przez ładunek przestrzenny. Elektrony są przeciągnięte do obszaru  $n$ , a dziury do obszaru  $p$ ;
7. fotony są nie tylko absorbowane w złączu  $p-n$ , ale również w warstwie  $p$  ponad nim. Generowane elektrony są mniejszościowymi nośnikami w tych obszarach, ich koncentracja jest znacząco zredukowana przez rekombinację i wydajność tego procesu. Dlatego warstwa  $p$  o grubości  $t$  musi być cienka w stosunku do średniej drogi swobodnej  $L_E$  elektronów w niej, aby mogły one wejść w warstwę  $n$ :

$$L_E \gg t ;$$

8. jeżeli  $g$  jest liczbą par „elektron-dziura” wytwarzanych na jednostkę powierzchni, a do złącza  $p-n$  jest przyłożone napięcie  $U$ , wtedy gęstość strumienia elektronów i dziur wynosi:

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

gdzie  $e$  jest elementarnym ładunkiem,  $k$  jest stałą Boltzmanna,  $T$  jest temperaturą,  $L$  jest średnią drogą swobodną odpowiednio elektronów i dziur,  $D$  jest stałą dyfuzji odpowiednio dla elektronów i dziur, a  $p_o$  i  $n_o$  są koncentracjami mniejszościowych nośników w stanie równowagi. Zatem gęstość prądu zwarcia ( $U=0$ ):

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

jest proporcjonalna do natężenia padającego światła w stałej temperaturze. Parametr  $g$  staje się nieco większy (mniej, niż  $10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ), jeżeli rośnie temperatura;

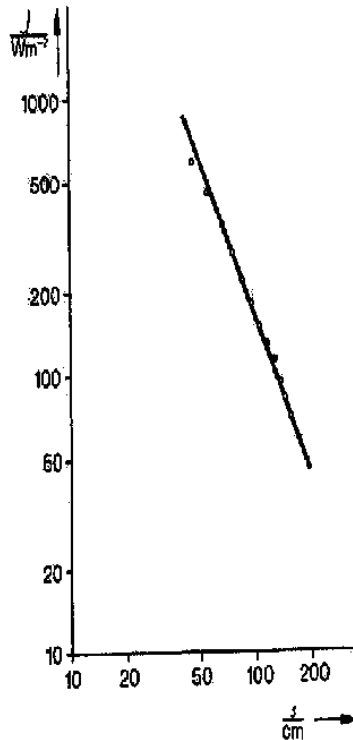
### 21 – Badanie ogniw i baterii słonecznych

9. napięcie  $U$  może co najwyżej osiągnąć wartość potencjału dyfuzyjnego  $U_D$ , nigdy większe. Jeżeli rośnie temperatura, wtedy SEM spada, przy czym typową wartością jest 2.3 mV/K. Zatem równowagowe koncentracje  $p_o$  i  $n_o$  rosną wraz ze wzrostem temperatury [1÷4]:

$$n_o \approx e^{\frac{\Delta E}{2kT}}.$$

#### Wnioski:

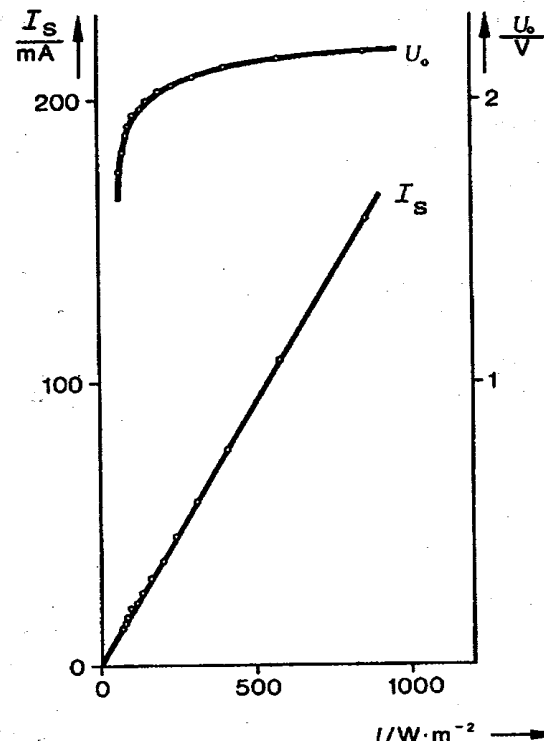
1. natężenie światła zmienia się wraz ze zmianą odległości między źródłem światła i ogniwem słonecznym. Aby określić natężenie światła za pomocą stosu termoparowego przyjęto, że cała wiązka o aperturze wyjściowej 2.5 cm pada na powierzchnię pomiarową stosu o czułości 0.16 mV/mW. Poprzez ekstrapolację linią prostą zależności  $J(s)$  – rys. 5, określamy wartość natężenia światła  $J$  w odległości  $s \leq 50$  cm.



Rys. 5. Zależność natężenia światła  $J$  ( $W/m^2$ ) od odległości  $s$  (cm) prostopadle do źródła światła, tzn.  $J(s)$  [1].

2. przyjmując za podstawę zmierzone wartości  $J(s)$  – rys. 5, otrzymujemy zależność między natężeniem światła  $J$ , a prądem zwarcia  $I_s$  i SEM  $U_o$  dla różnych odległości od źródła światła – rys. 6.

21 – Badanie ogniw i baterii słonecznych



Rys. 6. Prąd zwarcia  $I_s$  i napięcie na zaciskach otwartego ogniwa  $U_o$  w funkcji natężenia źródła światła  $J$  [1].

3. bateria słoneczna, która zawiera 4 ogniwa połączone szeregowo ma zatem maksymalną wartość SEM równą 2 V. Prąd zwarcia jest proporcjonalny do natężenia światła i wynosi:

$$I_s = 1.84 \cdot 10^{-4} \cdot J; \text{ A}/(\text{Wm}^{-2}).$$

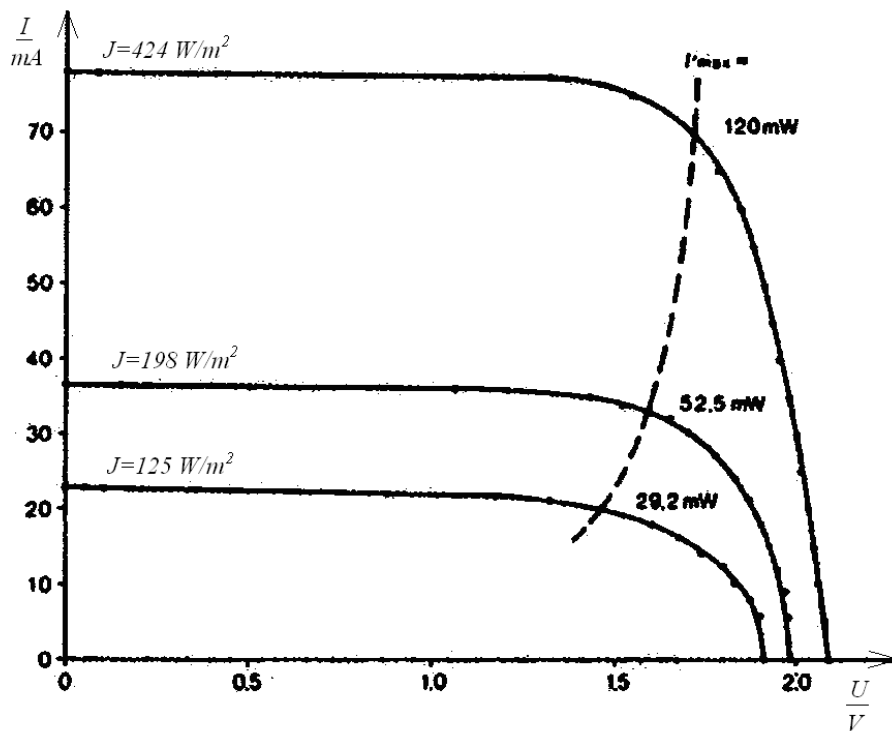
Kiedy mierzymy wpływ temperatury na  $U_o$  i  $I_s$ , należy brać pod uwagę rozkład temperatury nad gorącą powierzchnią baterii słonecznej. Pomiar można przeprowadzić tylko zgrubnie, oceniając jedynie rząd jej wielkości. Pomiar SEM w przypadku gorącego i zimnego powietrza daje zależność (dla 4 ogniw):

$$\frac{\Delta U_o}{\Delta T} = -8 \text{ mV/K}.$$

Zatem dla pojedynczego ogniwa otrzymujemy wartość (-)2 mV/K. Wpływ zmian temperatury na prąd zwarcia nie był mierzony.

Charakterystyki prądowo-napięciowe baterii słonecznej przy różnych wartościach natężenia światła pokazano na rys 7.

21 – Badanie ogniw i baterii słonecznych

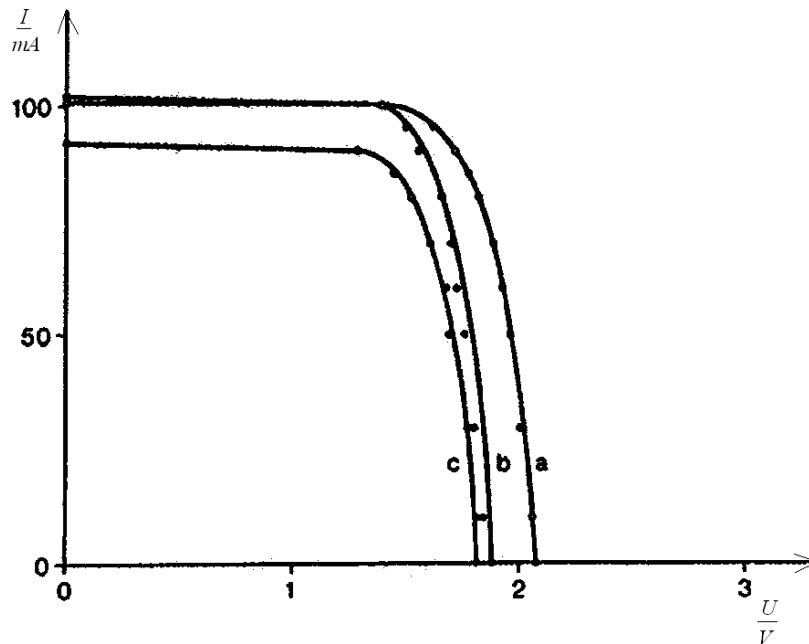


Rys. 7. Charakterystyki prądowo-napięciowe baterii słonecznej przy różnych wartościach natężenia światła [1].

Charakterystyki prądowo-napięciowe baterii słonecznej: a) przy chłodzeniu baterii wentylatorem; b) bez chłodzenia powierzchni baterii wentylatorem; c) przy ekranowaniu powierzchni baterii płytą szklaną – pokazano na rys. 8. Maksymalna moc wyjściowa baterii słonecznej występuje w punkcie (zaznaczone na rys. 7 przerywaną linią), w którym opornik obciążenia ma tę samą wartość, co oporność wewnętrzna  $R_i$  baterii słonecznej. Oporność wewnętrzna baterii spada wraz ze wzrostem natężenia światła. Jeżeli porównamy maksymalną moc wyjściową baterii z mocą padającego na nią promieniowania, otrzymujemy sprawność baterii słonecznej równą około 6% (z powierzchni baterii równej  $50 \text{ cm}^2$ ).

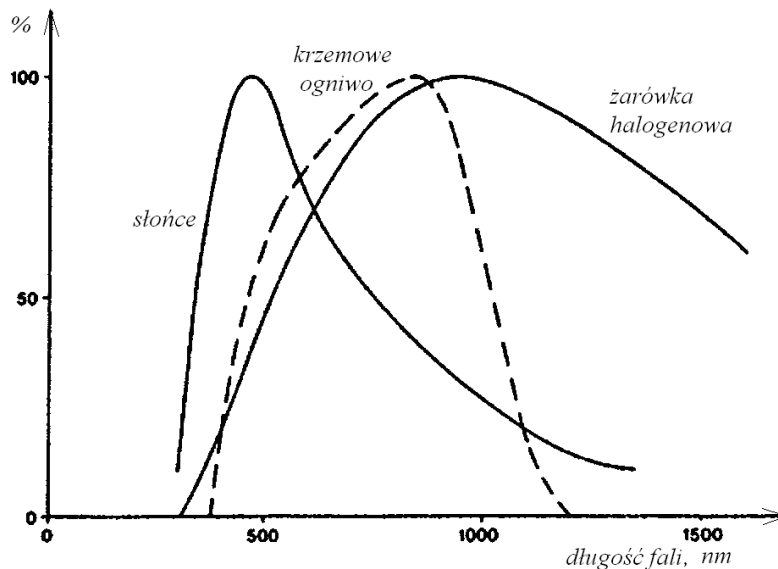
4. płyta szklana, która absorbuje światło w podczerwieni, może być użyta do zwiększenia temperatury baterii słonecznej. Na rys. 8 pokazano wpływ różnych warunków na pracę baterii słonecznej.

21 – Badanie ogniw i baterii słonecznych



Rys. 8. Charakterystyki prądowo-napięciowe baterii słonecznej: a) przy chłodzeniu baterii wentylatorem; b) bez chłodzenia powierzchni baterii wentylatorem; c) przy ekranowaniu powierzchni baterii płytą szklaną [1].

5. padające na komórki baterii światło słoneczne daje różne od światła żarówki charakterystyki prądowo-napięciowe. Powodem są różne charakterystyki widmowe źródeł światła – rys. 9.



Rys. 9. Widmo promieniowania Słońca ( $T \cong 5800 K$ ) i żarówki ( $T \cong 2000 K$ ) oraz charakterystyka czułości spektralnej krzemowego ogniwa słonecznego [1, 2].

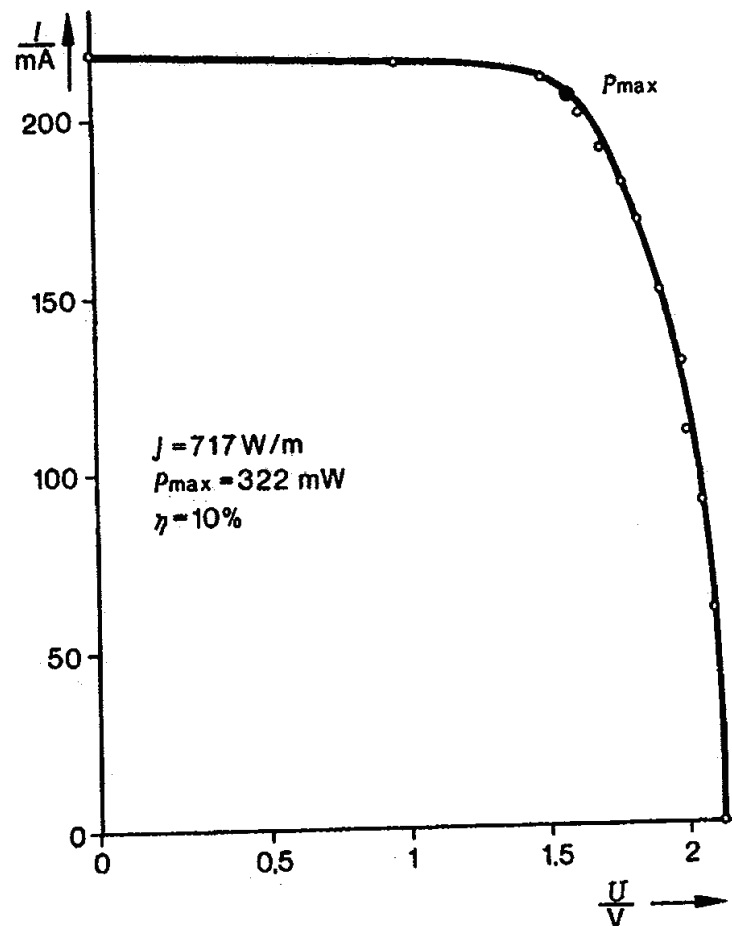
Przy tym samym natężeniu światła, światło słoneczne daje prąd zwarcia o wyższej wartości, co reguluje zależność:

$$I_s = 3.04 \cdot 10^{-4} \cdot J; A/(Wm^2).$$

Ponieważ zakres podczerwieni w widmie światła słonecznego jest krótszy, więc bateria słoneczna nie nagrzewa się tak bardzo i wobec tego pomiary z i bez chłodzenia baterii dają takie same charakterystyki dla tego samego źródła – rys. 10.



21 – Badanie ogniw i baterii słonecznych



Rys. 10. Charakterystyka prądowo-napięciowa przy ekspozycji baterii słonecznej na światło słoneczne (promieniowanie bezpośrednie i rozproszone):  $P_{\max}$  – maksymalna moc,  $\eta$  -sprawność baterii [1].

Literatura:

- [1] Phywe: *Characteristic curves of a solar cell*, LEP 4.1.09
- [2] Phywe, *Physics: Catalogue 3.22*, page 171-222
- [3] J. Terpiłowski: *Ogniwa i baterie słoneczne*, 2009, Instrukcja Laboratorium Termodynamiki WAT (instrukcja wewnętrzna, materiał niepublikowany)
- [4] Ch. Kittel: *Wstęp do fizyki ciała stałego*, Księgarnia Internetowa PWN, 1996