



**ĆWICZENIE
104**

EFEKT FOTOWOLTAICZNY – OGNIWO SŁONECZNE

Cel ćwiczenia: Wyznaczenie charakterystyki prądowo–napięciowej $I(V)$ ogniwa słonecznego przed i po oświetleniu światłem widzialnym; prądu zwarcia, napięcia rozwarcia i współczynnika wypełnienia.

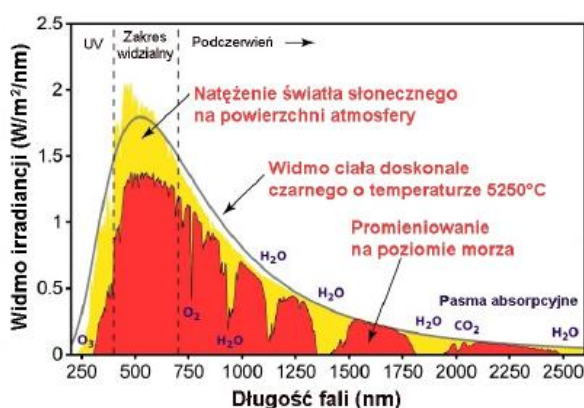
Zagadnienia: Złącze p-n, efekt fotowoltaiczny.

1 Wprowadzenie

Fotowoltaika to technologia, która polega na wytwarzaniu energii elektrycznej poprzez konwersję promieniowania słonecznego bezpośrednio na prąd elektryczny. Konwersja odbywa się w półprzewodnikach, w których zachodzi efekt fotowoltaiczny. Podstawowym elementem fotowoltaicznym jest ogniwo, z którego wykonuje się panele (zestaw wielu ogniw) i matryce paneli.

Promieniowanie słoneczne

Aby opisać warunki oświetlenia poza atmosferą i po przejściu przez atmosferę, wprowadzono pojęcie ilości masy powietrza AM (ang. Air Mass), przez którą przechodzi światło. Do powierzchni atmosfery w południe na równiku dociera światło o natężeniu $H=1,37 \text{ kW/m}^2$ (tzw. stała słoneczna). Odpowiada temu ilość masy powietrza równa zero, zatem są to warunki oświetlenia AM0. Do powierzchni Ziemi dociera ok. $73\%H$ – to warunki AM1. Wydajności ogniw słonecznych są podawane dla natężenia oświetlenia $AM1.5 = 1000 \text{ W/m}^2$. Oprócz natężenia oświetlenia, najważniejszą cechą promieniowania słonecznego, którą trzeba uwzględnić projektując ogniwo słoneczne, jest jego rozkład spektralny (rys.1). Najlepiej, aby czułość widmowa ogniwa pokrywała się z tym rozkładem spektralnym.

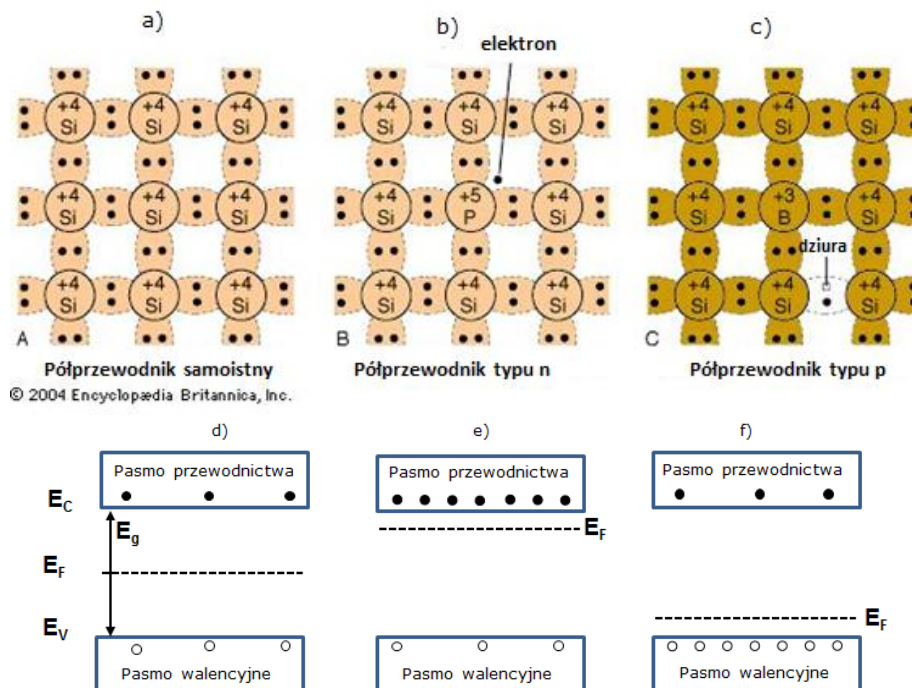


Rys.1. Rozkład spektralny widma promieniowania Słońca poza atmosferą, po przejściu przez atmosferę oraz widmo CDC o temperaturze 5520K.

Półprzewodniki

Krzem jest półprzewodnikiem, który dominuje na rynku fotowoltaicznym. W atomie krzemu na powłoce walencyjnej znajdują się 4 elektrony. Sąsiednie atomy w kryształ Si tworzą wiązanie kowalencyjne (rys.2a) – dwa elektrony są wspólne. Półprzewodnik, w którym wszystkie atomy są takiego samego rodzaju, nazywa się półprzewodnikiem samoistnym. Kryształ Si, w którym niektóre atomy zostaną zastąpione atomami z V grupy układu okresowego (np. fosforem), nazywa się półprzewodnikiem typu n. Jeden z pięciu elektronów walencyjnych nie ma partnera

do wiązania kowalencyjnego (rys. 2b) – stanie się elektronem swobodnym zaś atom fosforu zostanie jodem dodatnim (donorem). Jeśli niektóre atomy Si zostaną zastąpione atomami z III grupy układu okresowego (np. borem), to jedno wiązanie pozostanie nieobsadzone elektronem – pojawi się nadmiarowy nieobsadzony stan – dziura (rys. 2c). Ten pusty stan może przyjąć elektron. Powstanie ujemny jon – akceptor i swobodny ładunek dodatni - dziura. W ten sposób powstaje półprzewodnik typu p.



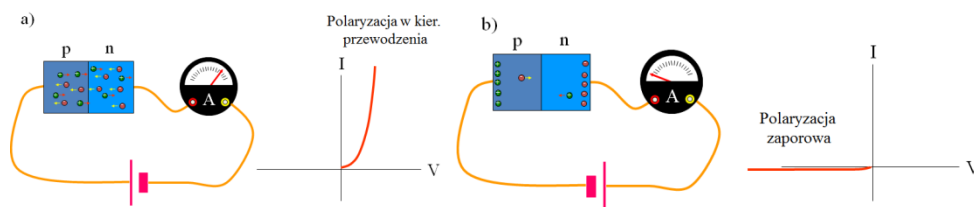
Rys. 2. Wiązanie kowalencyjne w Si a) samoistnym, b) typu n, c) typu p i odpowiednie diagramy pasmowe.

Zachowanie elektronów w ciele stałym tłumaczy dobrze teoria pasmowa. W izolowanych atomach dozwolone energie elektronu są skwantowane. W ciele stałym, gdy atomy znajdują się bardzo blisko siebie (są to odległości rzędu nanometrów) dyskretne poziomy elektronów z powłok walencyjnych rozszczepiają się w pasma energetyczne, oddzielone od siebie zakresem energii niedozwolonych. Najbardziej istotne z punktu widzenia transportu prądu są: ostatnie pasmo obsadzone elektronami, zwane pasmem walencyjnym i kolejne puste (lub częściowo wypełnione) elektronami, zwane pasmem przewodnictwa. Półprzewodniki to materiały, w których pasmo walencyjne i pasmo przewodnictwa są oddzielone od siebie przerwą wzbronioną E_g , rzędu kilku eV. W półprzewodniku samoistnym w pasmie przewodnictwa znajduje się tyle samo elektronów ile dziur w pasmie walencyjnym (rys. 2d). W półprzewodniku typu n w pasmie przewodnictwa jest więcej elektronów niż dziur w pasmie walencyjnym (rys. 2e) a w półprzewodniku typu p – odwrotnie (rys. 2f). Dlatego elektrony w półprzewodniku typu n są nośnikami większościowymi a dziury mniejszościowymi a w półprzewodniku typu p odwrotnie. Na rys. 2d-2f oprócz krawędzi pasm (E_C - przewodnictwa, E_V - walencyjne) zaznaczono poziom Fermiego, E_F . Jest to poziom, który oddziela stany wypełnione elektronami od stanów pustych. W półprzewodniku typu n (p) poziom Fermiego przesuwają się w stronę krawędzi pasma przewodnictwa (pasma walencyjnego) (rys. 2e i 2f).

Złącze p-n

Zasada działania ogniwa słonecznego polega na występowaniu efektu fotowoltaicznego na złączu dwóch półprzewodników, typu p i typu n, czyli na złączu p-n. W złączu p-n koncentracja dziur w obszarze typu p jest większa niż w obszarze typu n i analogicznie koncentracja

elektronów jest znacznie większa w obszarze n w stosunku do ich koncentracji w obszarze p. Na skutek tego gradientu koncentracji nośników powstaje tzw. prąd dyfuzyjny, który polega na przechodzeniu elektronów z obszaru n do obszaru p i dziur z obszaru p do obszaru n. W wyniku dyfuzji elektronów z obszaru n pozostają w nim dodatnio naładowane jony donorów, zaś w skutek dyfuzji dziur z obszaru p do n, pozostają ujemnie naładowane akceptory. W ten sposób w obszarze przejściowym powstaje dipolowa warstwa ładunku przestrzennego i pole elektryczne o natężeniu \vec{E}_0 skierowane od potencjału dodatniego (obszar typu n) do potencjału ujemnego (obszar typu p). Pole to przeciwdziała dalszej dyfuzji nośników większościowych. Jednocześnie pole to powoduje unoszenie nośników mniejszościowych (elektronów z obszaru p do n i dziur z obszaru n do p) – stąd nazwa prądu unoszenia. W stanie równowagi termodynamicznej, te dwa prądy równoważą się i przez złącze nie płynie prąd. Jeśli zostanie przyłożone zewnętrzne pole elektryczne, które odejmie się od pola \vec{E}_0 , to przez złącze popłynie duży prąd dyfuzyjny, nawet rzędu setek miliamperów. Mówimy wtedy o polaryzacji w kierunku przewodzenia (rys. 3a). Jeśli zostanie przyłożone zewnętrzne pole elektryczne, które doda się do pola \vec{E}_0 , to przez złącze popłynie niewielki prąd unoszenia (rys. 3b). W dobrej diodzie tj. prąd rzędu nA. Mówimy wtedy o polaryzacji zaporowej.

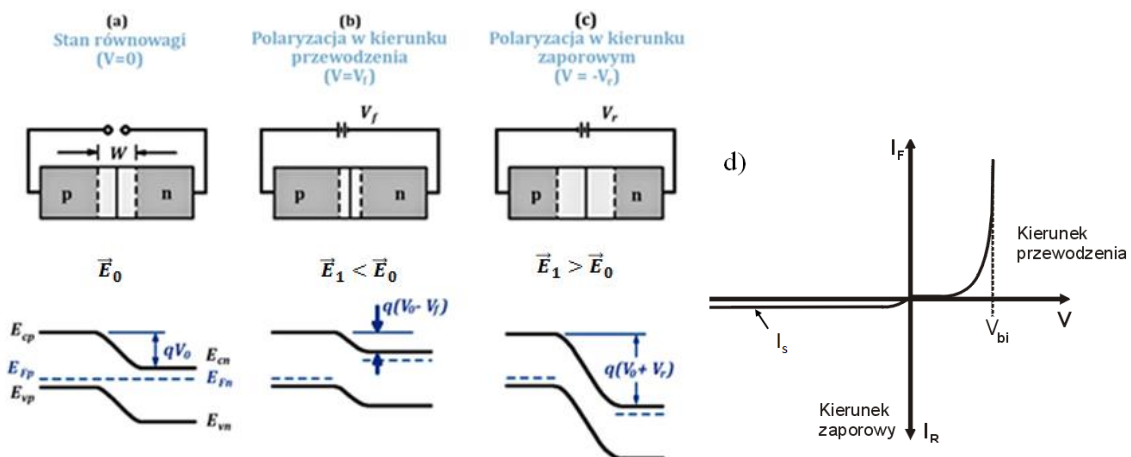


Rys. 3. Złącze p-n a) spolaryzowane w kierunku przewodzenia i b) w kierunku zaporowym

Na rys. 4 przedstawiono złącze p-n bez polaryzacji zewnętrznej oraz po spolaryzowaniu, odpowiednie diagramy pasmowe oraz charakterystykę prądowo-napięciową, I-V. Dla krzemowego złącza p-n napięcie, przy którym następuje wzrost prądu (potencjał wbudowany V_0) wynosi ok. 0.7V. Charakterystykę I-V opisuje wzór Shockley'a:

$$I = I_s(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (1),$$

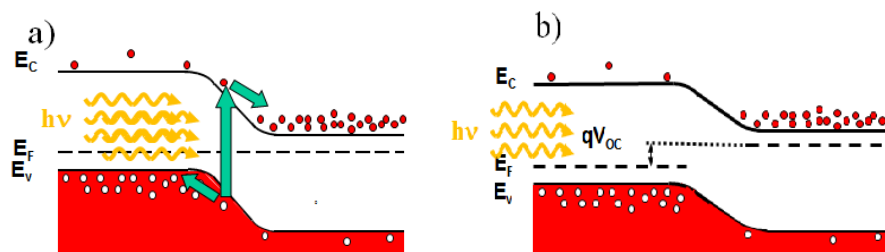
gdzie q- ładunek elementarny, T-temperatura (K), k – stała Boltzmanna, I_s – prąd nasycenia.



Rys.4. Złącze p-n a) w stanie równowagi, b) spolaryzowane w kierunku przewodzenia napięciem V_f i c) w kierunku zaporowym napięciem V_r d) charakterystyka I-V.

Efekt fotowoltaiczny na złączu p-n

Założmy, że dioda półprzewodnikowa jest oświetlana przez promieniowanie elektromagnetyczne o energii większej od przerwy wzbronionej E_g . Gdy promieniowanie to jest absorbowane w pobliżu samego złącza, to powstające pary elektron - dziura są separowane przez pole elektryczne złącza. W efekcie fotowoltaicznym główną rolę odgrywają nośniki mniejszościowe, ponieważ koncentracja nośników większościowych praktycznie nie ulega zmianie wskutek absorpcji światła (koncentracja nośników generowanych światłem jest o kilka rzędów mniejsza od ich koncentracji równowagowej). Nośniki mniejszościowe poruszają się w kierunku złącza powodując wzrost prądu wstecznego, jeśli obwód zewnętrzny złącza jest zwarty – płynie prąd zwarcia I_{sc} (rys. 5a). Jeśli złącza jest rozwarte, to elektrony podążają do obszaru typu n i na jego końcach pojawia się potencjał ujemny. Dziury podążają do obszaru p i na jego końcu pojawia się potencjał dodatni. W efekcie na końcach złącza p-n pojawia się różnica potencjałów, tzw. napięcie rozwarcia V_{oc} (rys. 5b). Jest to równoważne polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia. Napięcie rozwarcia ogniwa krzemowego $\sim 0.5V$.



Rys. 5 Diagram pasmowy ogniwa po oświetleniu a) zwartego, b) rozwartego

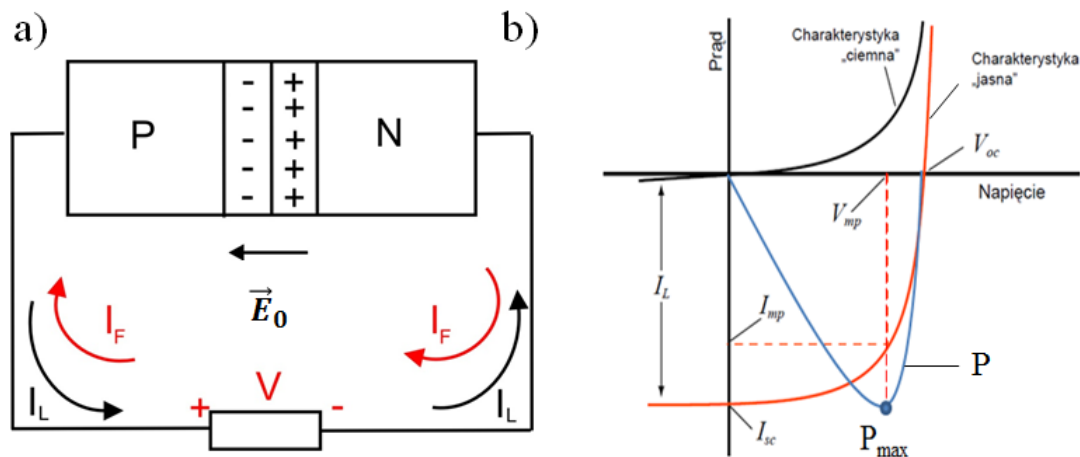
Jeśli oświetlone ogniwo jest obciążone rezystancją R_L , to płynie przez nią prąd wsteczny I_L . Ten prąd powoduje pojawienie się spadku napięcia V na oporze R_L . Napięcie V polaryzuje złącze w kierunku przewodzenia, to z kolei powoduje przepływ prądu I_F (rys. 6). Całkowity prąd:

$$I = -(I_L - I_F) \quad (2).$$

W każdym punkcie w IV ćwiartce charakterystyki I-V oświetlonego złącza iloczyn prądu i napięcia jest mniejszy od zera:

$$P = I \cdot V < 0. \quad (3)$$

Oznacza to, że generowana jest moc prądu elektrycznego. W ten sposób następuje konwersja energii promieniowania elektromagnetycznego w energię elektryczną.



Rys. 6a) Schemat obwodu elektrycznego ogniwa obciążonego rezystancją R_L i b) charakterystyki I-V przed i po oświetleniu oraz zależność mocy $P=f(V)$. Zaznaczono prąd zwarcia I_{sc} i napięcie rozwarcia V_{oc} , punkt maksymalnej mocy P_{max} i odpowiadające mu prąd I_{mp} i napięcie V_{mp} .

Parametry ogniwa słonecznego

Najważniejszym parametrem decydującym o użyteczności ogniwa jest jego sprawność. Jest to stosunek mocy generowanej przez ogniwo w punkcie odpowiadającym maksymalnej mocy P_{max} (patrz rys. 6b) do mocy padającego promieniowania elektromagnetycznego ϕ :

$$\eta = \frac{I_{mp}V_{mp}}{\phi} \quad (4)$$

Jeśli wprowadzi się tzw. współczynnik wypełnienia, FF:

$$FF = \frac{I_{mp}V_{mp}}{I_{sc}V_{oc}}, \quad (5)$$

to sprawność można wyrazić wzorem:

$$\eta = FF \frac{I_{sc}V_{oc}}{\phi} \quad (6)$$

W celu porównania sprawności różnych ogniw wykonuje się pomiary charakterystyk I-V w takich samych warunkach oświetlenia (AM1.5). Źródło światła powinno mieć charakterystykę widmową zbliżoną do charakterystyki widmowej Słońca (rys.1). Źródła takie nazywają się symulatorami Słońca.

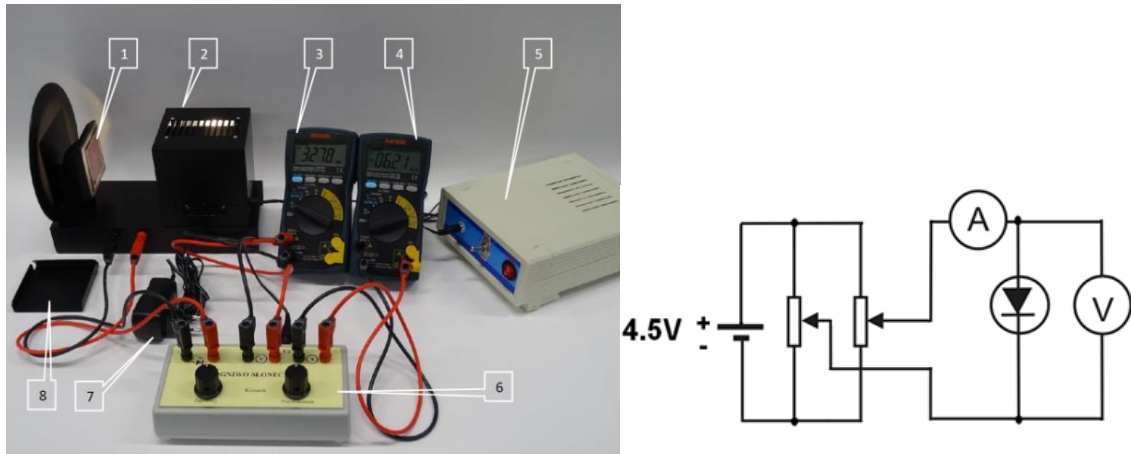
2 Zasada pomiaru i układ pomiarowy

2.1. Wykaz przyrządów

1. Panel z ogniwami
2. Oświetlacz
3. Woltomierz napięcia stałego
4. Miliamperomierz prądu stałego
5. Zasilacz stabilizowany oświetlacza
6. Układ do polaryzacji ogniwa
7. Zasilacz układu do polaryzacji ogniwa
8. Przesłona panelu

2.2. Schemat układu pomiarowego

Na rys. 7 przedstawiono stanowisko do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych panelu fotowoltaicznego. Panel fotowoltaiczny (1) umieszczony jest na ławie optycznej. Naprzeciwko panelu ustawiony jest oświetlacz (2). Zasilacz oświetlacza (5) pozwala na wybór dwóch natężeń oświetlenia. Woltomierz (3) i amperomierz (4) służą do pomiaru napięcia i prądu w obwodzie panelu. Układ (6) umożliwia polaryzację panelu przy pomocy potencjometrów znajdujących się w tym układzie.



Rys.7. Stanowisko do pomiaru charakterystyk I-V panelu słonecznego i schemat zastępczy układu do polaryzacji ogniwa.

3. Zadania do wykonania

3.1. Pomiary charakterystyki ciemnej:

- 1) Zmontować układ pomiarowy wg schematu przedstawionego na rys. 7.
- 2) Zmierzyć charakterystykę prądowo napięciową, tzn. zależność prądu od napięcia dla panelu zasłoniętego przysłoną.

3.2. Pomiary charakterystyki jasnej:

- 1) Zmontować układ pomiarowy wg schematu przedstawionego na rys. 7.
- 2) Zdjąć przysłonę z panelu słonecznego.
- 3) Włączyć zasilacz oświetlacza. Ustawić przełącznik w zasilaczu w dolnym położeniu. Położenie to odpowiada mniejszemu natężeniu oświetlenia. Górne położenie odpowiada większemu natężeniu oświetlenia.
- 4) Zmierzyć charakterystykę prądowo – napięciową dla panelu oświetlanego.
- 5) Powtórzyć pomiary charakterystyki I-V dla większego natężenia oświetlenia. W tym celu należy przełącznik w zasilaczu oświetlacza ustawić w górnym położeniu i powtórzyć punkt 4).

4. Opracowanie wyników:

- 1) Sporządzić wykres ciemnej charakterystyki $I-V$ panelu słonecznego.
- 2) Z wykresu odczytać potencjał wbudowany V_0 .
- 3) Sporządzić wykresy jasnej charakterystyki $I-V$ panelu słonecznego dla dwóch różnych natężeń oświetlenia.
- 4) Zaznaczyć na wykresach: prądy zwarcia I_{sc} i napięcia rozwarcia V_{oc} oraz punkty dla których prądy I_{mp} i napięcia V_{mp} odpowiadają maksymalnej mocy.
- 5) Sporządzić wykresy zależności mocy ogniwa $P=f(V)$.
- 6) Zaznaczyć na wykresach P_{max} .
- 7) Korzystając ze wzoru (5) wyznaczyć współczynniki wypełnienia dla obydwu natężeń oświetlenia.

5. Pytania:

1. Co to są warunki oświetlenia AM0, AM1 i AM1.5?
2. Narysuj charakterystykę widmową Słońca.
3. Co to jest półprzewodnik samoistny, typu p i typu n.
4. Jak powstaje złącze p-n?
5. Wyjaśnij na czym polega efekt fotowoltaiczny na złączu p-n.
7. Wymień parametry charakteryzujące ogniwo słoneczne.

Autor: dr hab. Ewa Popko