AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki

Katedra Chemii Nieorganicznej

Laboratorium z Elektrochemii Ciała Stałego

Ćwiczenie nr 4

Ogniwa fotowoltaiczne

Spis treści

1. Cel ćwiczenia ... 3
2. Fotoprzewodnictwo ... 3
3. Ogniwa fotowoltaiczne ... 4
3.1. Historia rozwoju technologii ... 4
3.2. Zasada działania ... 6
3.3. Rodzaje ogniw słonecznych ... 8
4. Opisy wykonania ćwiczeń ... 10
4.1. Zależność mocy ogniwa od jego powierzchni ... 10
4.2. Zależność mocy ogniw słonecznych od natężenia oświetlenia. ... 11
4.3. Zależność mocy ogniwa słonecznego pod obciążeniem od natężenia oświetlenia ... 12
4.4. Połączenie szeregowe i równoległe ogniw słonecznych ... 13
4.5. Zależność wewnętrznego oporu czynnego ogniwa słonecznego od natężenia oświetlenia ... 14
4.6. Diodowy charakter ogniwa słonecznego ... 15
4.7. Charakterystyka prądowo-napięciowa w zależności od natężenia oświetlenia oraz współczynnik wypełnienia ogniwa. ... 16
4.8. Zależność mocy ogniwa od częstotliwości światła ... 17
4.9. Wydajność przetwarzania energii ... 18
4.10. Zależność mocy ogniwa słonecznego od temperatury ... 20
4.11. Zasłonięcie ogniw przy połączeniu szeregowym ... 21

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania ogniwa fotowoltaicznego oraz czynnikami wpływającymi na jego moc.

2. Fotoprzewodnictwo

Światło zaabsorbowane przez półprzewodnik może spowodować zmianę stanu energetycznego elektronów swobodnych lub zmianę energii drgań atomów sieci. W związku z tym, rozróżnia się pięć typów absorpcji: samoistną (podstawową), ekscytonową, domieszkową, przez swobodne nośniki ładunku oraz przez sieć krystaliczną.

Gdy padające promieniowanie posiada odpowiednią energię – większą lub równą energii przerwy wzbronionej tego półprzewodnika, to istnieje prawdopodobieństwo, że w wyniku absorpcji tegoż kwantu nastąpi absorpcja samoistna. Polega ona na wzbudzeniu elektronów do pasma przewodnictwa i towarzyszącym temu powstaniu dziur elektronowych w paśmie walencyjnym, czyli na generacji par fotoelektron-fotodziura. Konsekwencją pochłonięcia dawki energii jest przepływ prądu elektrycznego – efekt ruchu dwóch typów nośników o przeciwnych znakach (elektronów e' i dziur $h^{\cdot}$), a zjawisko takie nosi nazwę fotoprzewodnictwa. Elektrony w polu elektrycznym poruszają się w kierunku przeciwnym do dziur elektronowych, a przewodnictwo będące tego wynikiem można opisać następującym równaniem:

$$\sigma = e\mu_n n + e\mu_p p \tag{1}$$

gdzie: e – ładunek elektronu [C], n, p – koncentracja elektronów i dziur elektronowych [cm^{-3}], μ_n, μ_p – ruchliwość elektronów i dziur elektronowych $\left[\frac{cm^2}{V \cdot s}\right]$.

Po usunięciu źródła światła stężenie nośników maleje, co jest wynikiem procesów rekombinacyjnych prowadzących do zaniku par elektron-dziura elektronowa. Rekombinacja może zachodzić według różnych mechanizmów. Ze względu na sposób przekazania energii nośników wyróżnia się m.in.:

- rekombinację promienistą (fotonową), gdy nadmiarowa energia elektronu wydzielana jest w postaci energii fotonu:
  - rekombinacja pasmo-pasmo (bezpośrednia, międzypasmowa) – elektron z pasma przewodnictwa rekombinuje z dziurą z pasma walencyjnego, w wyniku czego emitowany jest foton o energii $h\nu \geq E_g$ (E_g – energia wzbroniona) półprzewodnika (rekombinacja w materiałach niedomieszkowanych),
  - rekombinacja przez płytkie poziomy donorowe lub akceptorowe – elektron z pasma przewodnictwa rekombinuje z dziurą z poziomu akceptorowego lub elektron z poziomu donorowego rekombinuje z dziurą z pasma walencyjnego,
  - rekombinacja donor–akceptor – elektron z poziomu donorowego rekombinuje z dziurą z poziomu akceptorowego,
  - rekombinacja poprzez głębokie poziomy – energia powstałego fotonu, w porównaniu z w/w sytuacjami, jest znacznie mniejsza niż wartość przerwy energetycznej,
  - rekombinacja ekscytonowa – występuje, gdy para elektron–dziura (ekscyton) tworzy stan, którego energia jest mniejsza niż energia swobodnego elektronu i dziury;
- rekombinacje niepromienistą (fononową), gdy nadmiarowa energia elektronu zostaje przekazana sieci:
  - efekt Augera – elektron rekombinuje z dziurą oddając nadwyżkę energii drugiemu elektronowi w paśmie przewodnictwa, który zostaje wzbudzony do stanu o wyższej energii, a następnie

rozprasza uzyskaną energię w wyniku oddziaływania z siecią krystaliczną (rekombinacja obserwowana przy dużych koncentracjach nadmiarowych elektronów),
- emisja wielofononowa – proces ten wymaga emisji pewnej liczby fotonów, ponieważ energia jednego fononu jest mniejsza od spodziewanej straty energii (odpowiadającej szerokości przerwy zabronionej);

- rekombinacje plazmową – gdy nadmiarowa energii elektronu zostaje przekazana gazowi elektronowemu.

Fotoprzewodnictwo danego półprzewodnika jest inne jakościowo i ilościowo od tzw. „przewodnictwa ciemnego", czyli przewodnictwa wzbudzonego termicznie. Wzbudzanie będące wynikiem absorpcji promieniowania elektromagnetycznego powoduje wzrost koncentracji nośników, a co za tym idzie i przewodnictwa, w porównaniu z półprzewodnikiem o „przewodnictwie ciemnym". Dodatkowe nośniki mogą pochodzić zarówno z poziomów domieszkowych jak i z pasma walencyjnego. Pozwala to na rozróżnienie fotoprzewodnictwa domieszkowego i fotoprzewodnictwa samoistnego. Nie bez znaczenie jest tu fakt, iż w przypadku półprzewodnika typu *n* o kilka rzędów wzrasta stężenie nośników mniejszościowych, którymi są dziury.

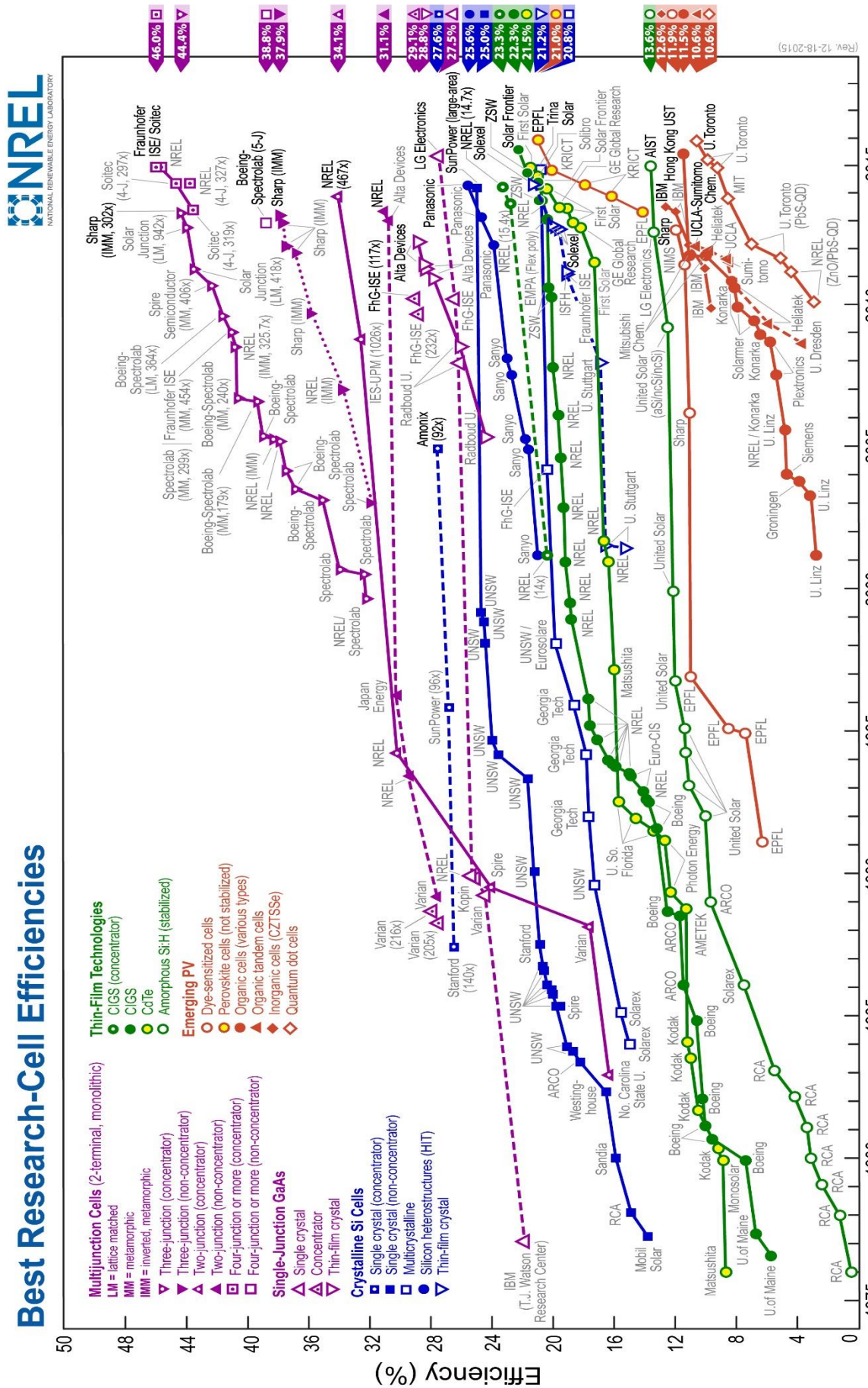
3. Ogniwa fotowoltaiczne

Ogniwa fotowoltaiczne, inaczej ogniwa słoneczne, to urządzenia półprzewodnikowe, w których następuje konwersja energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną. Istnieją dwa główne powody, dla których rozwój technologii tych ogniw trwa nieprzerwanie od prawie 40 lat. Z jednej strony, istnieje potrzeba zastąpienia paliw kopalnych odnawialnymi, z drugiej zaś, rosnąca wciąż świadomość ekologiczna wymaga opracowania ekologicznych metod pozyskiwania energii.

3.1. Historia rozwoju technologii

Efekt fotowoltaiczny, który jest podstawą działania ogniw, polega na powstaniu napięcia w materiale półprzewodnikowym, wskutek oddziaływania półprzewodnika z promieniowaniem elektromagnetycznym. Ze względu na wykorzystanie jedynie zakresu widzialnego z widma promieniowania słonecznego, ogniwa te równie często nazywane są słonecznymi.

Efekt fotowoltaiczny odkryty został w 1839 r. przez francuskiego naukowca Edmonda Becquerela. Becquerel skonstruował ogniwo składające się z zanurzonych w roztworze elektrolitu płytek platynowych, z których jedna pokryta była AgCl, a po jej naświetleniu światłem słonecznym w obwodzie zewnętrznym pojawia się różnica potencjałów. 40 lat później skonstruowane zostało pierwsze urządzenie wykorzystujące efekt fotowoltaiczny w fazie stałej, na bazie selenu. Podobny efekt obserwowano również w przypadku selenu i złota, miedzi i tlenku miedzi, siarczku ołowiu i siarczku talu. Prace badawcze nad fotoprzewodnictwem spowodowały rozwój fotowoltaiki. W latach 50-tych XX w. nastąpił rozwój elektroniki opartej na krzemie, co pozwoliło na opracowanie technologii wytwarzania złączy *p-n* z wykorzystaniem krzemu. Krzem – półprzewodnik typu *n* – w kontakcie

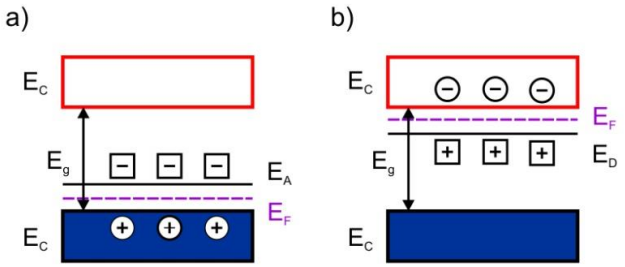


Rysunek 1. Historia rozwoju ogniw słonecznych różnych technologii. Źródło: http://www.nrel.gov/ncpv/

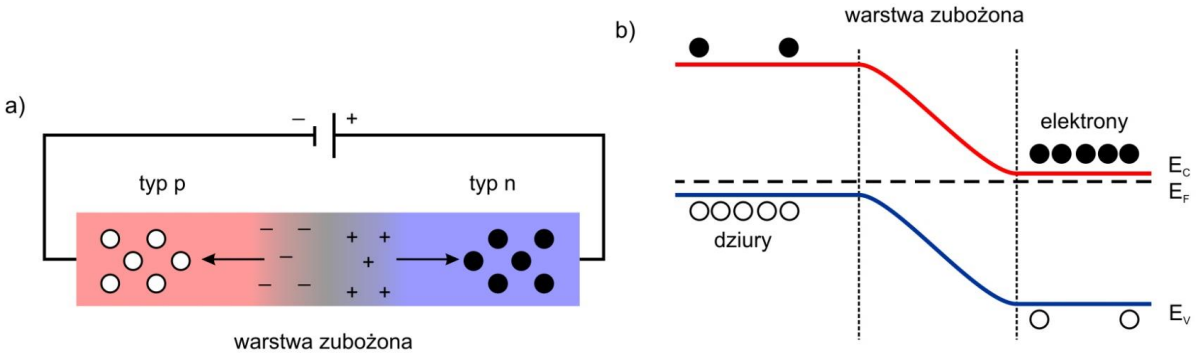
z atmosferą chlorku boru zyskiwał zewnętrzną warstwę półprzewodnikową typu *p*, co pozwalało na uzyskanie złącza *p-n*. Wydajność takich złączy była około sześciokrotnie wyższa niż stosowanych poprzednio złączy półprzewodnik/metal, co zapoczątkowało gwałtowny rozwój fotowoltaiki z wykorzystaniem szerokiej gamy materiałów (rysunek 1).

3.2. Zasada działania

Ogniwa słoneczne wykorzystują złącze *p-n*, które pełni rolę separatora wzbudzonych światłem par nośników elektron-dziura elektronowa. Na rysunku 2 przedstawiono strukturę pasmową półprzewodnika typu *p* (a) i typu *n* (b). Utworzenie złącza *p-n* powoduje powstanie gradientu koncentracji nośników, co stanowi bodziec ich dyfuzji – dziury elektronowe dyfundują z półprzewodnika typu *p* do półprzewodnika typu *n*, a elektrony z półprzewodnika typu *n* do półprzewodnika typu *p*. Efektem tego procesu jest powstanie warstwy zubożonej w nośniki a powstałe pole elektryczne przeciwdziała dalszej dyfuzji (rysunek 3a). Gdy dryf nośników prądu spowodowany polem elektrycznym równoważony jest przez prąd dyfuzyjny wynikający z gradientu koncentracji nośników, ustala się stan równowagi termicznej. W stanie równowagi poziomy Fermiego półprzewodnika typu *p* i typu *n* są sobie równe (rysunek 3b).



Rysunek 2. Struktura pasmowa półprzewodnika typu p (a) i typu n (b).



Rysunek 3. Schemat złącza p-n (a) oraz diagram położenia pasm energetycznych w złączu (b).

Różnica potencjału pomiędzy półprzewodnikiem typu *p* a *n* w stanie równowagi termicznej nosi nazwę potencjału wbudowanego, V_b, i związana jest z różnicą energii swobodnej strony *p* i strony *n* złącza. Potencjał wbudowany opisuje zależność:

$$V_b = \frac{k_B T}{e} ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \tag{2}$$

gdzie: k_B – stała Bolztmana, T – temperatura absolutna [K], N_A i N_D – koncentracja akceptorów i donorów w półprzewodniku typu *p* i półprzewodniku typu *n*, e – ładunek elementarny ($1{,}602 \cdot 10^{-19}$ [C]), n_i – koncentracja wewnętrzna nośników.

W skład warstwy zubożonej w większościowe nośniki ładunku wchodzą donory i akceptory, przez co odróżnia się ona wyraźnie od pozostałych obszarów neutralnych elektrycznie. Szerokość warstwy zubożonej *W* można opisać zależnością:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)V_b} \tag{3}$$

gdzie: ε – stała dielektryczna półprzewodnika.

Szerokość warstwy zwiększa się, gdy koncentracja donorów lub akceptorów ulega zmniejszeniu. Na przykład, gdy koncentracja akceptorów jest dużo większa niż koncentracja donorów $N_A >> N_D$, szerokość warstwy zubożonej opisuje poniższa zależność:

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{eN_D}V_b} \tag{4}$$

Przyłożenie napięcia zewnętrznego do złącza *p-n* w taki sposób, że dodatni biegun napięcia dołączony jest do półprzewodnika typu *p* a ujemny do *n* sprawia, że różnica potencjałów warstwy zubożonej ulega redukcji. Biegunowość taka to polaryzacja w kierunku przewodzenia i charakterystycznym dla niej jest zmniejszenie dryftu elektronów ze strony półprzewodnika *n* na stronę półprzewodnika *p*, oraz zwiększenie dryftu dziur elektronowych w kierunku przeciwnym. Oznacza to, że wstrzyknięte zostają nośniki mniejszościowe – elektrony – na stronę *p*, a dziury elektronowe na stronę *n*. Gęstość prądu J, w przypadku polaryzacji dodatniej, opisana jest równaniem:

$$J = J_0\left[exp\left(\frac{eV_F}{k_BT}\right) - 1\right] \tag{5}$$

gdzie: V_F – polaryzacja w kierunku przewodzenia, J_0 – gęstość prądu nasycenia złącza.

W przypadku sytuacji odwrotnej, potencjał elektrostatyczny warstwy zubożonej rośnie, prąd dyfuzyjny maleje, a gęstość prądu dyfuzyjnego polaryzacji w kierunku zaporowym opisuje zależność:

$$J = J_0\left[exp\left(\frac{eV_R}{k_BT}\right) - 1\right] \tag{6}$$

gdzie: V_R – polaryzacja w kierunku zaporowym.

Oświetlenie złącza *p-n* światłem słonecznym powoduje kreację par elektron-dziura elektronowa na skutek absorpcji fotonów o energii większej niż energia przerwy wzbronionej półprzewodnika, a ich liczba jest proporcjonalna do intensywności światła. Pole elektryczne w warstwie zubożonej sprawia, że dryft elektronów w kierunku półprzewodnika *n* oraz dziur elektronowych w kierunku półprzewodnika *p* zachodzi w warstwie zubożonej. Separacja ładunków powoduje przepływ prądu ze strony *n* na stronę *p*, gdy obwód zewnętrzny jest zwarty. Pary nośników wygenerowane w zasięgu dyfuzji od krawędzi warstwy zubożonej dają wkład do fotoprądu ze względu na dyfuzję nadmiarowych nośników do obszaru ładunku przestrzennego.

Powstałe w wyniku absorpcji światła nośniki ładunku zostają rozseparowane dzięki polu elektrycznemu w obszarze ładunku przestrzennego. Nośniki mniejszościowe, które dyfundują do granic obszaru ładunku przestrzennego, zanim ulegną rekombinacji również dają wkład do fotoprądu.

W przypadku małych ziaren (nanomateriały, cienkie warstwy) zagięcie pasm jest niewielkie, przez co wzbudzone elektrony dyfundują w kierunku powierzchni, rekombinują z dziurami elektronowymi lub zostają wyłapane przez poziomy pułapkowe. Średni czas τ_d, jaki jest potrzebny, aby nośnik ładunku dotarł z objętości półprzewodnika do powierzchni, silnie zależy od rozmiaru ziarna i opisany jest zależnością:

$$\tau_d = \frac{r_z^2}{\pi^2 J_D} \tag{7}$$

gdzie: r_z – średnica ziarna półprzewodnika, J_D – współczynnik dyfuzji elektronów.

Rozseparowanie nośników ładunków, jak ma to miejsce w złączu *p-n*, może zachodzić także dla złącza dwóch półprzewodników o takim samym typie przewodnictwa, ale różniących się wartością przerwy wzbronionej, co znajduje zastosowanie w barwnikowych ogniwach słonecznych.

3.3. Rodzaje ogniw słonecznych

3.3.1. Krzemowe ogniwa słoneczne

Krzemowe ogniwa fotowoltaiczne, pomimo niewysokiej wydajności, są obecnie najczęściej stosowane. Spośród nich wyróżnić można:

- <u>Ogniwa słoneczne z uwodornionego krzemu amorficznego, a-Si:H</u>

Rozwiązanie najlepiej poznane i najbardziej zaawansowane technologicznie. Zaletą takich ogniw jest niski koszt produkcji oraz wysoki współczynnik absorpcji światła. Technologia ta nie jest już jednak rozwijana ze względu na niskie efektywności procesu konwersji energii słonecznej na elektryczną, która dla ogniw a-Si:H wynosi ok. 6-8%. Następcą pierwszych ogniw *p-n* na bazie krzemu amorficznego stała się struktura *p-i-n*, czyli trójwarstwowy układ składający się z warstwy wewnętrznej półprzewodnika samoistnego pomiędzy obszarem typu *n* i typu *p*. Dodatkowa warstwa absorbująca promieniowanie słoneczne pozwala na zwiększenie wydajności konwersji energii do ok. 10%. Ze względu na niskie koszty produkcji ogniw opartych na krzemie amorficznym wiązane są z nim duże nadzieje.

- <u>Ogniwa słoneczne z krzemu krystalicznego</u>

Występują w postaci monokrystalicznej, c-Si, lub polikrystalicznej, pc-Si. Efektywność tych pierwszych w warunkach laboratoryjnych dochodzi do 24%, natomiast w produkcji masowej osiąga 14-17%. Poważną wadą ogniw c-Si jest wymagana duża czystość monokryształu, co pociąga za sobą wysokie koszty produkcji. Ogniwach z krzemu polikrystalicznego są znacznie tańsze w produkcji, jednakże ich efektywność w warunkach laboratoryjnych to ok. 20% natomiast w produkcji seryjnej 13-15%.

3.3.2. Nie-krzemowe ogniwa słoneczne

Technologia ogniw fotowoltaicznych obejmuje również inne związki, które mogą być użyte w ogniwie. Mogą to być zarówno związki półprzewodnikowe, jak i inne rozwiązania.

- <u>Ogniwa słoneczne oparte na półprzewodnikach z grup III-V</u>

W tej grupie najczęściej stosowane są ogniwa zbudowane z arsenku galu AsGa, ze względu na dobre dopasowanie energii przerwy wzbronionej do widma promieniowania słonecznego. Charakteryzują się najwyższą wydajnością pośród ogniw jednozłączowych, osiągającą wartość 30%, jednak zasadniczą wadą jest ich wysoka cena.

Cała rodzina półprzewodników typu III-V może być użyta do otrzymania ogniw fotowoltaicznych. Tworzenie multi-złączy pozwala na osiągnięcie wydajności rzędu nawet 41%. Warstwy takie wymagają jednak monokrystalicznych podłoży o wysokiej czystości wykonanych z tego samego materiału półprzewodnikowego co złącze. Generowane w ten sposób wysokie koszty sprawiają, że ogniwa tego typu przeznaczone są do zastosowań specjalnych, między innymi w przestrzeni kosmicznej.

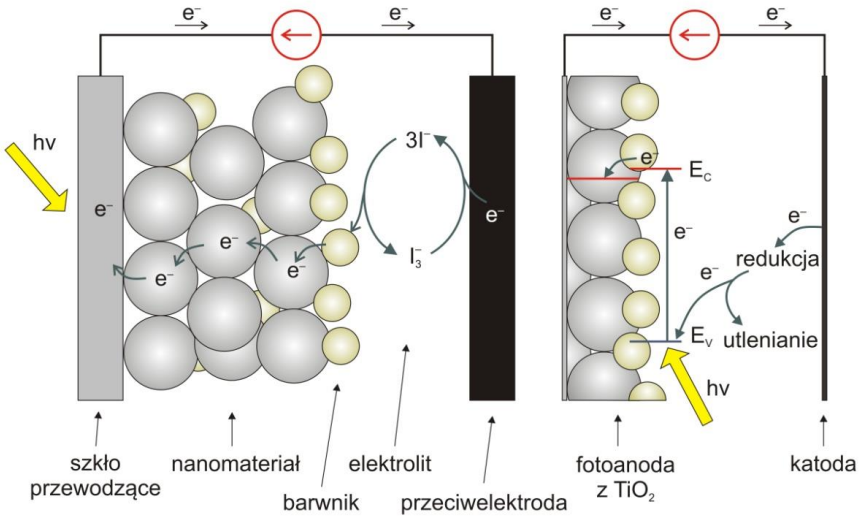
Inne materiały znajdujące zastosowanie to tellurek kadmu CdTe i selenek indowo-galowo-miedziowy CIGS (*Copper Indium Gallium diSelenide*). Ogniwa oparte na CdTe pozwalają na osiągnięcie wydajności sięgającej 16% dla pojedynczego złącza. Ze względu na bardzo dobre dopasowanie energii przerwy wzbronionej CdTe do widma promieniowania słonecznego ($E_g \approx 1{,}5$ eV, co odpowiada światłu o długości λ=827 nm) dane szacunkowe mówią o możliwości osiągnięcia wydajności przekraczającej 20%. Ogniwa zbudowane z CIGS, roztworów stałych $CuInS_2$ i $CuGaSe_2$-$CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ gdzie x=0÷1, charakteryzują się wysokim współczynnikiem absorpcji ze względu na energię przerwy wzbronionej zmieniającej się od 1 (x=1) do 1,7 eV (x=0). Wadą tych ogniw są jednak wysokie koszty podłoży.

- <u>Polimerowe ogniwa słoneczne</u>

Ogniwa polimerowe wykorzystują półprzewodniki organiczne, takie jak polimery oraz związki małocząsteczkowe (polifenylenowinylen, pigment ftalocyjaninowy). Zaletą takich ogniw jest ich elastyczność i mała masa, jednak wydajność procesu nie przekracza 7%. Ciekawym rozwiązaniem jest również wykorzystanie fullerenów oraz kropek kwantowych w tej technologii.

- <u>Konstrukcje oparte na dwutlenku tytanu</u>

Zarówno budowa jak i zasada działania ogniw barwnikowych opartych na TiO_2 jest odmienna od ogniw omówionych do tej pory. Fotoelektrodę stanowi szkło przewodzące pokryte warstwą TiO_2 w formie nanomateriału, na którym zaadsorbowana jest warstwa barwnika. Przeciwelektrodą jest zwykle elektroda platynowa a elektrolitem roztwór zawierający pary redoksowe I_3^-/I. W wyniku absorpcji światła przez chemisorbowaną monowarstwę barwnika następuje wzbudzenie elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Fotowzbudzone elektrony zostają „wstrzyknięte" do pasma przewodnictwa TiO_2 a następnie odprowadzone do elektrody. Przepływ elektronów pomiędzy elektrodami (fotoelektrodą i Pt) zapewnia elektryczny obwód zewnętrzny. Barwnik, w wyniku fotowzbudzenia, zostaje utleniony. Jego jony regenerowane są na powierzchni przeciwelektrody dzięki elektronom pochodzącym z elektrolitu zawierającego pary redoks. Jako barwniki stosowane są związki organiczne takie jak: N3, N712, Z907. Wydajność takich ogniw przekracza 11%.



Rysunek 4. Schemat działania nanokrystalicznego ogniwa słonecznego.

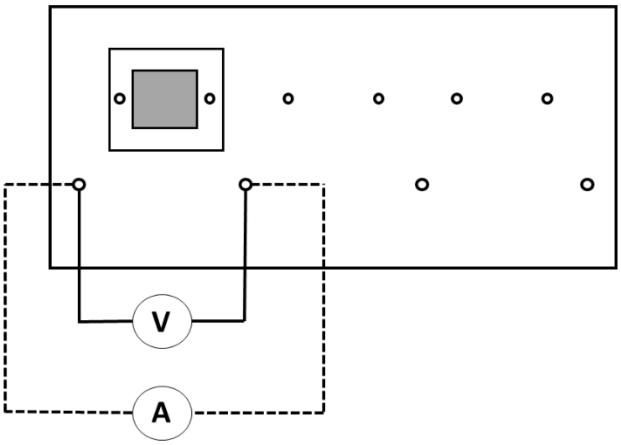
4. Opisy wykonania ćwiczeń

Uwaga: wszystkie obliczenia należy zawrzeć w sprawozdaniu

4.1. Zależność mocy ogniwa od jego powierzchni

Celem ćwiczenia jest określenie zależności pomiędzy wielkościami elektrycznymi ogniwa a wielkością jego powierzchni aktywnej.

Do wykonania ćwiczenia potrzebne są: płyta główna, duży panel słoneczny, woltomierz, amperomierz, płytki osłonowe, moduł oświetleniowy i zasilacz.



Schemat 1

Opis wykonania ćwiczenia

1. Złożyć układ zgodnie ze schematem 1.
2. Zmierzyć wartość natężenia i napięcia prądu zasłaniając odpowiednio ¼, ½ i ¾ powierzchni panelu słonecznego. Każdy pomiar wykonać trzykrotnie.
3. Uzyskane wyniki zestawić w poniższej tabeli.

	wielkość przesłony				
	0	½	¼	¾	1
U [V]					
I [mA]					
P [mW]					

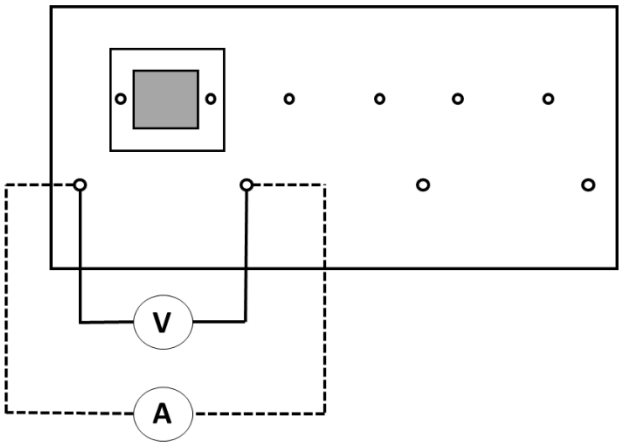
Zagadnienia do opracowania w sprawozdaniu:

1. Na podstawie pomiarów obliczyć moc elektryczną *P* panelu słonecznego.
2. Wyniki pomiarów przedstawić w formie 3 wykresów zależności napięcia i natężenia prądu oraz mocy w funkcji wielkości aktywnej powierzchni panelu słonecznego. Skomentować otrzymane zależności.
3. Zaproponować zależność występującą pomiędzy aktywną powierzchnią panelu słonecznego a jego mocą.

4.2. Zależność mocy ogniw słonecznych od natężenia oświetlenia.

Celem ćwiczenia jest określenie zależności pomiędzy wielkościami elektrycznymi ogniwa a natężeniem oświetlenia.

Do wykonania ćwiczenia potrzebne są: płyta główna, duży panel słoneczny, woltomierz, amperomierz, płytki osłonowe, moduł oświetleniowy i zasilacz.



Schemat 2

Opis wykonania ćwiczenia

1. Złożyć układ zgodnie ze schematem 2. W pierwszej fazie doświadczenia użyć tylko jednej lampy (10V) modułu oświetleniowego.
2. Zmierzyć wartość natężenia i napięcia prądu podczas oświetlania modułu źródłem światła. Każdy pomiar wykonać trzykrotnie.
3. Powtórzyć pomiary dla 2, 3 i 4 lamp w module oświetleniowym.
4. Uzyskane wyniki zestawić w poniższej tabeli.

	liczba źródeł światła			
	1 lampa	2 lampy	3 lampy	4 lampy
U [V]				
I [mA]				
P [mW]				

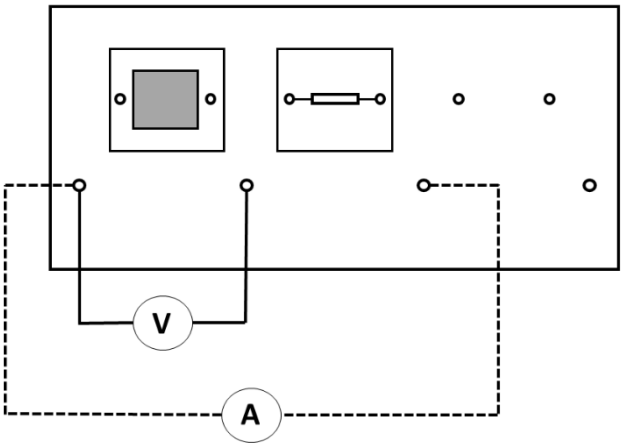
Zagadnienia do opracowania w sprawozdaniu:

1. Na podstawie pomiarów obliczyć moc elektryczną *P* panelu słonecznego.
2. Wyniki pomiarów przedstawić w formie 3 wykresów zależności napięcia i natężenia prądu oraz mocy w funkcji mocy strumienia świetlnego ($P=f(n)$, gdzie n – liczba źródeł światła).
3. Skomentować otrzymane zależności. Zaproponować zależność występującą pomiędzy natężeniem oświetlenia a generowanym napięciem na module słonecznym.

4.3. Zależność mocy ogniwa słonecznego pod obciążeniem od natężenia oświetlenia

Celem ćwiczenia jest określenie zależności pomiędzy wielkościami elektrycznymi ogniwa a natężeniem oświetlenia.

Do wykonania ćwiczenia potrzebne są: płyta główna, moduł oporu elektrycznego, duży panel słoneczny, woltomierz, amperomierz, moduł oświetleniowy i zasilacz.



Schemat 3

Opis wykonania ćwiczenia

1. Złożyć układ zgodnie ze schematem 3. W pierwszej fazie doświadczenia użyć tylko jednej lampy (10V) modułu oświetleniowego.
2. Zmierzyć wartość natężenia i napięcia prądu podczas oświetlania modułu źródłem światła. Każdy pomiar wykonać trzykrotnie.
3. Powtórzyć pomiary dla 2, 3 i 4 lamp w module oświetleniowym.
4. Uzyskane wyniki zestawić w poniższej tabeli.

	liczba źródeł światła			
	1 lampa	2 lampy	3 lampy	4 lampy
U [V]				
I [mA]				
P [mW]				

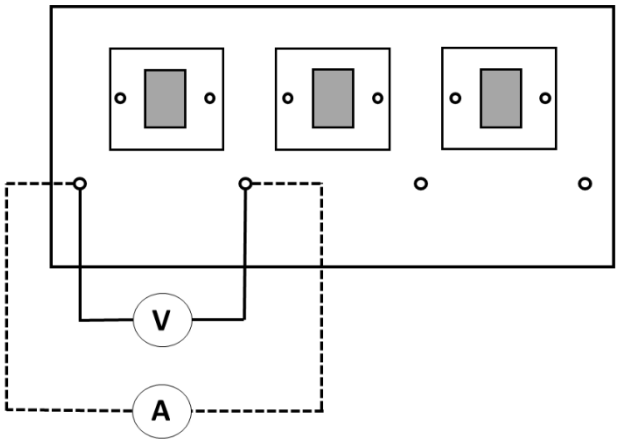
Zagadnienia do opracowania w sprawozdaniu:

1. Na podstawie pomiarów obliczyć moc elektryczną *P* panelu słonecznego.
2. Wyniki pomiarów przedstawić w formie 3 wykresów zależności napięcia i natężenia prądu oraz mocy w funkcji mocy strumienia świetlnego (*P=f(n),* gdzie n – liczba źródeł światła). Skomentować otrzymane zależności.
3. Zaproponować zależność występującą pomiędzy natężeniem oświetlenia a generowanym napięciem na module słonecznym.
4. Porównać wyniki z wynikami eksperymentu 4.2 (bez obciążenia). Wyjaśnić różnice pomiędzy danym, jeśli takie występują.

4.4. Połączenie szeregowe i równoległe ogniw słonecznych

Celem ćwiczenia jest określenie zależności napięcia i natężenia prądu od sposobu połączenia ogniw słonecznych.

Do wykonania ćwiczenia potrzebne są: płyta główna, małe panele słoneczne, woltomierz, amperomierz, moduł oświetleniowy i zasilacz.



Schemat 4

Opis wykonania ćwiczenia

1. Złożyć układ zgodnie ze schematem 4.
2. Zmierzyć wartość napięcia i natężenia prądu kolejno dla jednego, dwóch i trzech paneli słonecznych połączonych szeregowo. Każdy pomiar wykonać trzykrotnie.
3. Powtórzyć pomiary dla połączenia równoległego.
4. Uzyskane wyniki zestawić w poniższej tabeli.

	liczba paneli słonecznych połączonych szeregowo			liczba paneli słonecznych połączonych równolegle		
	1	2	3	1	2	3
U [V]						
I [mA]						
P [mW]						

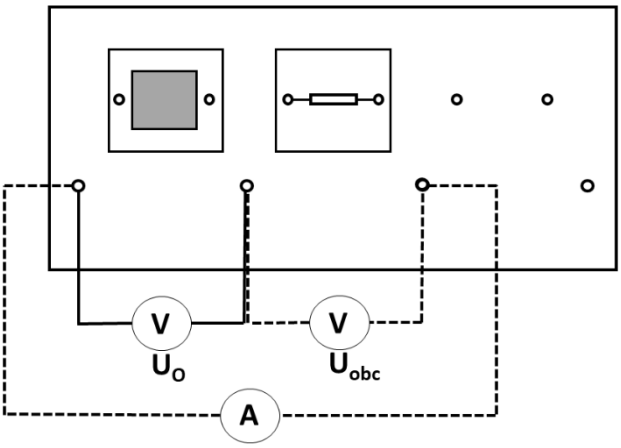
Zagadnienia do opracowania w sprawozdaniu:

1. Na podstawie pomiarów obliczyć moc elektryczną *P* ogniwa słonecznego w zależności od sposobu połączenia i liczby paneli słonecznych.
2. Na jednym wykresie przedstawić zależność: a) natężenia prądu od liczby paneli połączonych szeregowo i równolegle, b) napięcia prądu od liczby paneli połączonych szeregowo i równolegle, c) mocy od liczby paneli połączonych szeregowo i równolegle.
3. Sformułować zasadę zależności napięcia i natężenia prądu oraz mocy od rodzaju połączenia paneli słonecznych.

4.5. Zależność wewnętrznego oporu czynnego ogniwa słonecznego od natężenia oświetlenia

Celem ćwiczenia jest określenie wewnętrznej rezystancji ogniwa słonecznego jako źródła prądu elektrycznego i jego zależności od natężenia oświetlenia.

Do wykonania ćwiczenia potrzebne są: płyta główna, moduł oświetlający, moduł oporu elektrycznego, duże ogniwo słoneczne, woltomierz, amperomierz i zasilacz.



Schemat 5

Opis wykonania ćwiczenia

1. Złożyć układ zgodnie ze schematem 5. W pierwszej fazie doświadczenia użyć tylko jednej lampy (6V) modułu oświetleniowego.
2. Zmierzyć wartość napięcia jałowego ogniwa słonecznego (przerywany obwód), następnie zmierz napięcie na zaciskach oraz natężenie prądu przy obciążeniu.
3. Powtórzyć pomiary dla 2, 3 i 4 lamp w module oświetleniowym.
4. Uzyskane wyniki zestawić w poniższej tabeli.

	liczba źródeł światła			
	1 lampa	2 lampy	3 lampy	4 lampy
U_O [V]				
U_{obc} [V]				
I [mA]				
R_{wew} [Ω]				

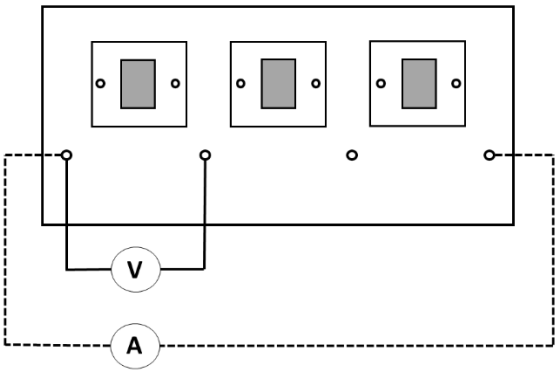
Zagadnienia do opracowania w sprawozdaniu:

1. Narysować schemat elektryczny układu, dla którego dokonuje się pomiaru wewnętrznej rezystancji ogniwa słonecznego.
2. Na podstawie pomiarów obliczyć wewnętrzną rezystancję ogniwa słonecznego dla różnych ilości światła
3. Narysować wykres zależności oporu wewnętrznego ogniw dla n źródeł światła.
4. Wyjaśnić na jakie zależności wskazuje wykres i wyjaśnić kształt krzywej.
   Porównać wyniki z wynikami eksperymentu 4.3.

4.6. Diodowy charakter ogniwa słonecznego

Celem ćwiczenia jest zbadanie diodowego charakteru ogniwa słonecznego.

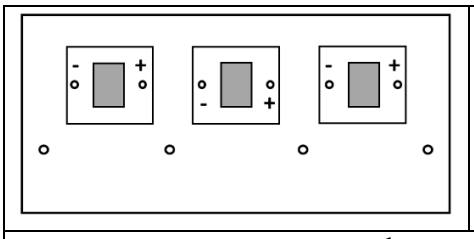
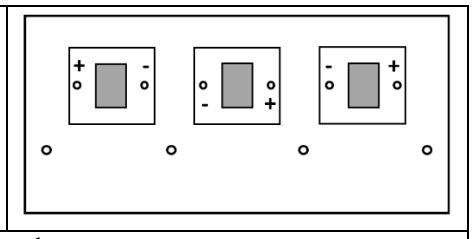
Do wykonania ćwiczenia potrzebne są: płyta główna, 3 małe panele słoneczne, amperomierz, woltomierz, płytka osłonowa, moduł oświetleniowy i zasilacz.



Schemat 6

Opis wykonania ćwiczenia

1. Złożyć układ zgodnie ze schematem 6.
2. Przykrywając powierzchnię ogniwa 1 płytką osłonową dokonać pomiaru napięcia i natężenia prądu dla różnych biegunowości. Pomiary powtórzyć trzykrotnie.
3. Przeprowadzić analogiczne pomiary przy oświetleniu.
4. Uzyskane wyniki zestawić w poniższej tabeli.

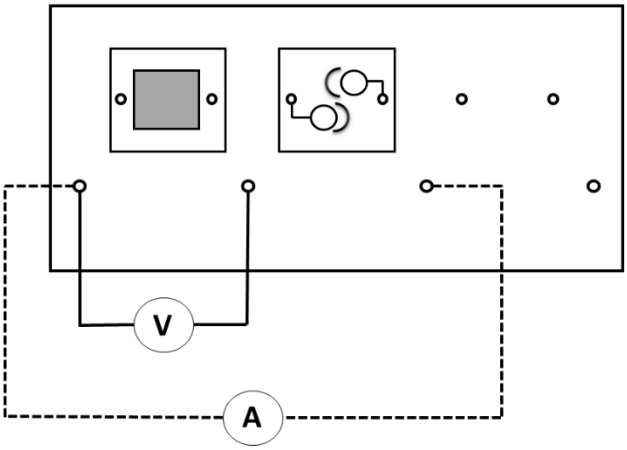
		
	bez przesłony	
U [V]		
I [mA]		
R [Ω]		
	z przesłoną	
U [V]		
I [mA]		
R [Ω]		

Zagadnienia do opracowania w sprawozdaniu:

1. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów obliczyć opór elektryczny ogniwa.
2. Wyjaśnić czym charakteryzuje się kierunek zaporowy i przewodzenia ogniwa słonecznego przy zastosowaniu przesłony.
3. Wyjaśnić czym charakteryzuje się kierunek zaporowy i przewodzenia ogniwa słonecznego przy jego oświetleniu.
4. Wyjaśnić różnice w aspekcie budowy i zasady działania diody w porównaniu do ogniwa słonecznego.

4.7. Charakterystyka prądowo-napięciowa w zależności od natężenia oświetlenia oraz współczynnik wypełnienia ogniwa.

Celem ćwiczenia jest określenie charakterystyki prądowo-napięciowe ogniwa słonecznego.
Do wykonania ćwiczenia potrzebne są: płyta główna, duży panel słoneczny, amperomierz, woltomierz, moduł potencjometryczny, moduł oświetleniowy i zasilacz.



Schemat 7

Opis wykonania ćwiczenia

1. Złożyć układ zgodnie ze schematem 7.
2. Podłączyć moduł oświetleniowy do zasilacza (4V) i skierować na moduł ogniwa słonecznego. W pierwszej fazie doświadczenia użyć tylko jednej lampy modułu oświetleniowego.
3. Ustawić wartość rezystancji na potencjometrze na takim poziomie, aby uzyskać jak najmniejsze napięcia.
4. Następnie ustawić odpowiednie wartości napięcia i dokonać dla nich pomiaru natężenia prądu elektrycznego, przy czym ustawić najpierw wartość oporu równą 100 Ω a następnie 1 kΩ.
5. Powtórzyć pomiary dla 2, 3 i 4 lamp w module oświetleniowym.
5. Zmierzyć wielkość prądu zwarciowego oraz napięcie jałowe. (Przy napięciu jałowym natężenie prądu jest bliskie zeru, przy prądzie zwarciowym napięcie jest bliskie zeru).
6. Uzyskane wyniki zestawić w poniższej tabeli.

….. lampy						….. lampy					
100 Ω			1 kΩ			100 Ω			1 kΩ		
U [V]	I [mA]	P [mW]	U [V]	I [mA]	P [mW]	U [V]	I [mA]	P [mW]	U [V]	I [mA]	P [mW]

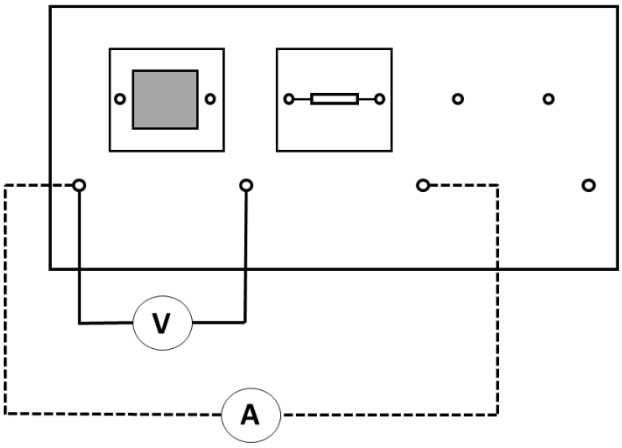
Zagadnienia do opracowania w sprawozdaniu:

1. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów narysować krzywe zależności natężenia od przyłożonego napięcia dla ogniwa słonecznego dla różnych wartości natężenia oświetlenia.
2. Obliczyć moc ogniwa dla każdego wariantu pomiaru oraz narysować krzywe zależności mocy od napięcia dla ogniwa słonecznego.
3. Wyznaczyć maksymalny punkt mocy oraz określić współczynnik wypełnienia ogniwa słonecznego. Porównać otrzymane dane.

4.8. Zależność mocy ogniwa od częstotliwości światła

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie zależności występującej pomiędzy mocą ogniwa słonecznego a częstotliwością światła.

Do wykonania ćwiczenia potrzebne są: płyta główna, duży panel słoneczny, amperomierz, woltomierz, moduł rezystancyjny, filtry barwne, moduł oświetleniowy i zasilacz.



Schemat 8

Opis wykonania ćwiczenia

1. Złożyć układ zgodnie ze schematem 8.
2. Przykrywając powierzchnię ogniwa filtrami barwnymi dla każdego z nich wykonać pomiar napięcia i natężenia prądu przy oświetleniu. Pomiary powtórzyć trzykrotnie.
3. Uzyskane wyniki zestawić w poniższej tabeli.

	barwa filtra		
	czerwony	żółty	niebieski
zakres długości fali świetlnej [nm]	650-800	550-700	400-550
$E_{fotonów}$ [eV]			
U [V]			
I [mA]			
P [mW]			

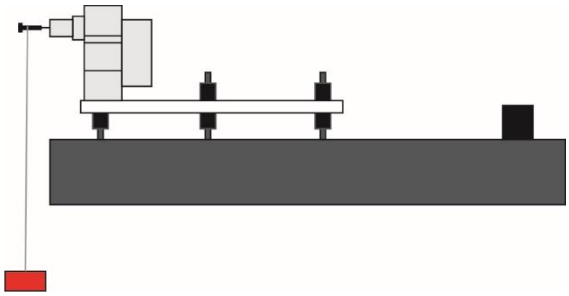
Zagadnienia do opracowania w sprawozdaniu:

1. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów obliczyć moc ogniwa dla każdego zakresu częstotliwości.
2. Obliczyć energię przechodzących elektronów, która zależna jest od barwy zastosowanego filtra. W którym zakresie częstotliwości spodziewane jest uzyskanie maksymalnej mocy przy założeniu, że wszystkie 3 filtry przepuszczają w przybliżeniu taką samą ilość fotonów? Dla jakich wartości energii fotonów występuje maksymalna moc ogniwa. Czy uzyskany wynik pokrywa się z oczekiwaniami? Jeśli nie – wyjaśnić dlaczego?

4.9. Wydajność przetwarzania energii

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie efektywności przekształcania energii elektrycznej w energię mechaniczną.

Do wykonania ćwiczenia potrzebne są: płyta główna, moduł oświetleniowy, moduł silnika elektrycznego z przekładnią, duży panel słoneczny, zasilacz, ciężarek o masie 13,5g, woltomierz, amperomierz, stoper, linijka, nitka.



Schemat 9

Opis wykonania ćwiczenia

1. Złożyć układ zgodnie ze schematem 9. Płytę główną ustawić przy brzegu stołu tak, aby ciężarek na nitce o długości około 30 cm mógł swobodnie zwisać. Połączyć szeregowo panel słoneczny z modułem silnika i zamknąć obwód prądu.
2. Oświetlić panel słoneczny modułem oświetleniowym.
3. Włączyć zasilacz i zmierzyć czas, jaki jest niezbędny do nawinięcia nitki o określonej długości. Jednocześnie wykonać pomiar natężenia i napięcia prądu ogniwa słonecznego.
4. Wszystkie pomiary powtórzyć trzykrotnie.
5. Uzyskane wyniki zestawić w poniższej tabeli.

h [cm]	wysokość, na jaką wciągany jest ciężarek	
t [s]	czas potrzebny dla osiągnięcia wysokości *h*	
U_1 [V]	napięcie elektryczne silniczka	
I_1 [mA]	natężenie prądu w układzie	
m [g]	masa ciężarka	

6. Używając multimetru, zasilacza i modułu oświetleniowego odczytać/zmierzyć poniższe wartości:

U_{zas} [V]	napięcie prądu zasilacza	
I_{zas} [mA]	natężenie prądu zasilacza	
U_m [V]	napięcie modułu oświetleniowego	
I_m [mA]	natężenie prądu w obwodzie modułu oświetleniowego	

Zagadnienia do opracowania w sprawozdaniu:

1. Obliczyć:
   - energię zasilacza E_z,
   - energię promieniowania świetlnego E_{prom} równą energii modułu oświetleniowego E_m,
   - energię panelu słonecznego E_{panel},
   - energię silnika E_s,
   - energię układu ogniwa słonecznego $E_{OS}=E_{panel} + E_s$
2. Obliczyć następujące efektywności przetwarzania:
   - energii elektrycznej zasilacza na energię promieniowania świetlnego,

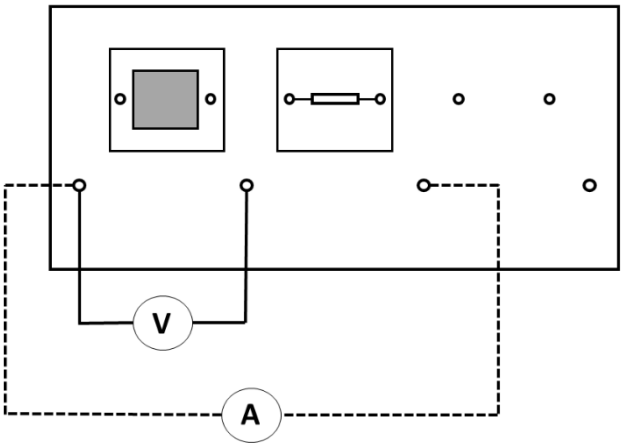
- energii promieniowania świetlnego na energię elektryczną panelu słonecznego,
- energii promieniowania świetlnego na energię elektryczną silniczka,
- energii promieniowania świetlnego na energię elektryczną układu ogniwa słonecznego,
- energii zasilacza na energię elektryczną układu ogniwa słonecznego.

Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

4.10. Zależność mocy ogniwa słonecznego od temperatury

Celem ćwiczenia jest określenie zależności mocy ogniwa słonecznego od temperatury.

Do wykonania ćwiczenia potrzebne są: płyta główna, duży panel słoneczny, woltomierz, amperomierz, termometr, moduł oświetleniowy i zasilacz (16V).



Schemat 10

Opis wykonania ćwiczenia

1. Przed wykonaniem tego ćwiczenia należy odczekać kwadrans aby panel słoneczny zdążył wystygnąć.
2. Złożyć układ zgodnie ze schematem 10.
3. Termometr umieścić w otworze modułu oświetleniowego w taki sposób aby termometr stykał się z powierzchnią panelu słonecznego. Odczytać temperaturę na termometrze, oświetlić panel słoneczny i natychmiast zmierzyć wartość natężenia i napięcia prądu.
4. Kolejne pomiary wartości napięcia i natężenia prądu przeprowadzać co 5ºC w zakresie do 55ºC.
5. Uzyskane wyniki zestawić w tabeli.

T [ºC]							
U [V]							
I [mA]							
P [mW]							

Zagadnienia do opracowania w sprawozdaniu:

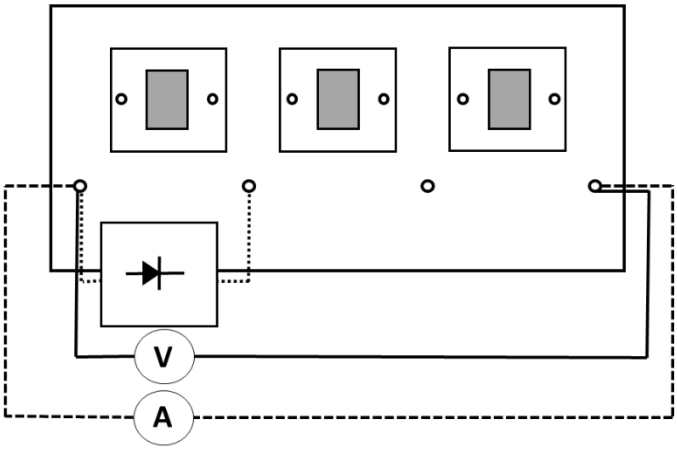
1. Na podstawie zmierzonych wartości obliczyć moc panelu słonecznego dla różnych temperatur.
2. Na wykresie przedstawić zależność mocy panelu od temperatury.
3. Porównać otrzymane wyniki z charakterystyką diody półprzewodnikowej.

Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

4.11. Zasłonięcie ogniw przy połączeniu szeregowym

Celem ćwiczenia jest określenie jak zmieniają się napięcie i natężenie prądu elektrycznego połączonych ogniw.

Do wykonania ćwiczenia potrzebne są: płyta główna, trzy małe panele słoneczne, moduł diodowy, woltomierz, amperomierz, płyta osłonowa, moduł oświetleniowy i zasilacz (16V).



Schemat 11

Opis wykonania ćwiczenia

1. Złożyć układ zgodnie ze schematem 11.
2. Zmierzyć napięcie początkowe i natężenie prądu ogniw słonecznych bez przesłony.
3. Najpierw zasłonić tylko jedno z dwóch ogniw, nie uwzględniając ogniwa z równolegle podłączoną diodą, następnie zasłonić ogniwo z podłączoną diodą.
4. Dla każdego z tych dwóch przypadków dokonać pomiaru wartości prądu zwarcia i napięcia jałowego.
5. Uzyskane wyniki zestawić w tabeli.

	(1)	(2)	(3)
	wszystkie ogniwa oświetlone	jedno ogniwo zasłonięte	ogniwo z równoległą diodą zasłonięte
U [V]			
I [mA]			
P [mW]			
Spadek mocy	-	……%	……%

Zagadnienia do opracowania w sprawozdaniu:

1. Obliczyć spadek mocy ogniwa w przypadku jego przesłonięcia, dla wariantu z diodą i bez niej, w stosunku do mocy początkowej.
2. Wytłumaczyć zbadane zjawisko.
3. Wyjaśnić jak można uzasadnić efektywność tego zjawiska w ogniwach słonecznych.