

**POLITECHNIKA**



**BIAŁOSTOCKA**

**WYDZIAŁ**



**INŻYNIERII**

**ZARZĄDZANIA**

**KATEDRA ZARZĄDZANIA PRODUKCJĄ**

Instrukcja do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu:

***FIZYKA***

Kod przedmiotu: **IS01137; IN01137**

**Ćwiczenie Nr 8**

# **BADANIE WŁAŚCIWOŚCI OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH**

Autor:

dr inż. Arkadiusz Łukjaniuk

Białystok 2022

*Wszystkie prawa zastrzeżone*

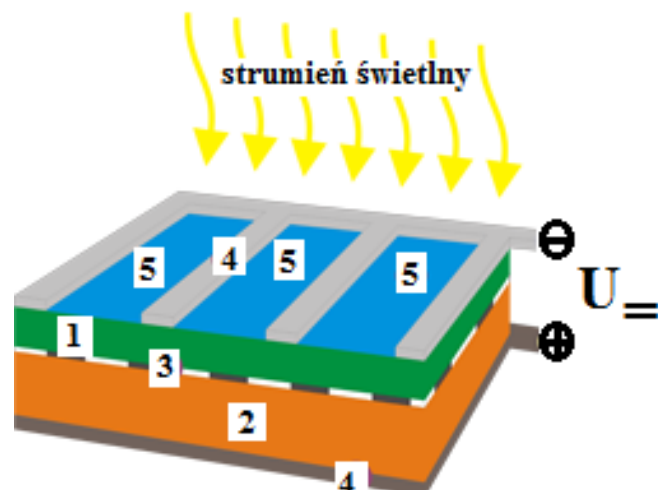
*Wszystkie nazwy handlowe i towarów występujące w niniejszej instrukcji są znakami towarowymi zastrzeżonymi lub nazwami zastrzeżonymi odpowiednich firm odnośnych właścicieli.*

**Cel ćwiczenia:** Celem ćwiczenia jest zapoznanie się studentów z budową i zasadą działania ogniw fotowoltaicznych oraz doświadczalne wyznaczenie ich parametrów eksploatacyjnych (moc czynna, napięcie, prąd) w funkcji natężenia oświetlenia, kąta padania strumienia świetlnego oraz wartości rezystancji odbiornika.

## 1. WPROWADZENIE

Nazwa „fotowoltaika” pochodzi od dwóch słów - "photo" oznaczającego światło oraz "voltaic" oznaczającego elektryczność i wskazuje ona na sposób otrzymania energii elektrycznej. Początki fotowoltaiki sięgają XIX wieku, kiedy to francuski uczyony nazwiskiem Becquerel odkrył efekt fotowoltaiczny (zjawisko powstania siły elektromotorycznej pod wpływem promieniowania słonecznego). Pierwsze ogniwo fotowoltaiczne powstało w 1883 roku, wykonane było z półprzewodnikowego selenu pokrytą cienką warstwą złota (sprawność ok. 1%).

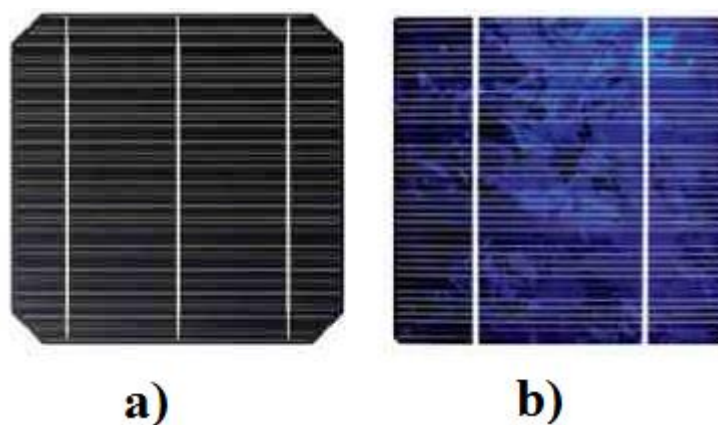
Ogniwo fotowoltaiczne („klasyczne”) składa się wysokiej czystości krzemu, na którym uformowana została bariera potencjału w postaci złącza **p-n** (rys.1). Po oświetleniu ogniwa padające na złącze fotony powodują powstawanie pary nośników o przeciwnych ładunkach elektrycznych, elektron – dziura. Obecność złącza **p-n** powoduje, że zostają one rozdzielone w dwie różne strony. Elektrony trafiają do złącza **n** a dziury do złącza **p**. W wyniku tego na złączu powstaje napięcie elektryczne. Tak jak rozdzielone ładunki są nośnikami nadmiarowymi posiadającymi nieskończony czas życia, a napięcie na złączu **p-n** jest stałe, to złącze poddane działaniu strumienia światła ma właściwości stabilnego ogniwa elektrycznego. Tak spreparowana struktura ogniwa jest umieszczana na szklanej płytce. Oczywiście zgodnie z prawami fizyki część strumienia świetlnego padającego na płytkę ogniwa jest odbijana od niej, część jest pochłaniana przez strukturę płytki, część przenika przez nią, a część powoduje zjawisko rozdzielenia ładunków, stąd też na sprawność ogniwa wpływa bardzo wiele czynników.



Rys.1. Budowa ogniwa fotowoltaicznego: 1-warstwa półprzewodnika typu **n**, 2 - warstwa półprzewodnika typu **p**, 3 – złącze **p-n**, 4 – wyprowadzenia metaliczne, 5 – pokrycie antyrefleksyjne.

Obecnie ogniwa fotowoltaiczne wytwarzane są w trzech różnych technologiach, stąd też wyróżniamy ogniwa I, II i III generacji.

**Ogniwa fotowoltaiczne I generacji** (klasyczne – rys.2) oparte są o tradycyjne krzemowe złącze **p-n** produkowane z bardzo czystego (99,99999%) krzemu krystalicznego w postaci wafli grubości ok 200-300  $\mu\text{m}$ . Charakteryzują się one najwyższą (z dostępnych typów ogniw) sprawnością - 17-22% (w niektórych przypadkach do 40%). Wadą jest wysoki koszt produkcji z uwagi na wysokie koszty krzemu oraz niska automatyzacja produkcji. Mimo tego ich obecny udział w rynku wynosi około 82%. Oprócz krzemu do budowy takich ogniw używa się też selen, german, arsenek galu. Wykonywane są w postaci ogniw monokrystalicznych i polikrystalicznych – rys.2.

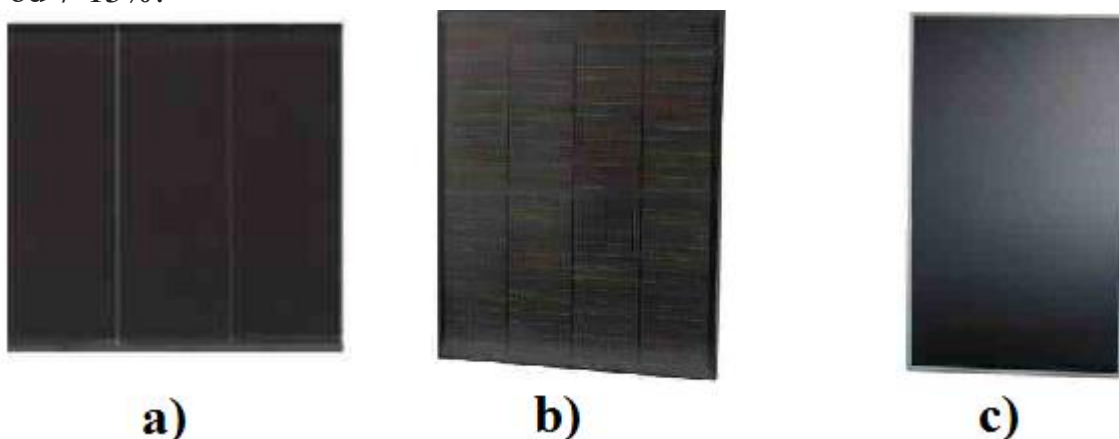


Rys.2. Widok ogniwa fotowoltaicznego: a) monokrystalicznego; b) polikrystalicznego.

**Ogniwa monokrystaliczne** (rys. 2a) wykonane są z jednego monolitycznego kryształu krzemu. Osiągają wysoką sprawność - zazwyczaj 18-22%. Wadą jest wysoka cena. Posiadają charakterystyczny ciemny kolor.

**Ogniwa polikrystaliczne** (rys. 2b) wykonane są z wykryształizowanego krzemu. Ich sprawność jest w przedziale 14-18% i są trochę tańsze od monokrystalicznych. Zazwyczaj posiadają charakterystyczny niebieski kolor oraz wyraźnie zarysowane kryształy krzemu.

**Ogniwa fotowoltaiczne II generacji** też są zbudowane w oparciu o złącze **p-n** jednak nie z krzemu krystalicznego lecz np. z tellurku kadmu (CdTe), mieszaniny miedzi, indu, galu, selenu (CIGS) czy krzemu amorficznego. Cechą charakterystyczną tych ogniw jest bardzo mała grubość warstwy półprzewodnika absorbującej światło - od 1-3  $\mu\text{m}$ . Z uwagi na cienką warstwę półprzewodników są znacznie tańsze w produkcji od ogniw I generacji, a cały proces bardziej zautomatyzowany. Główną wadą ogniw II generacji jest niższa sprawność od ogniw I generacji, która w zależności od technologii waha się od 7-15%.



Rys.3. Widok ogniw fotowoltaicznych II generacji: a) amorficzne; b) CIGS; c) tellurek kadmu CdTe.

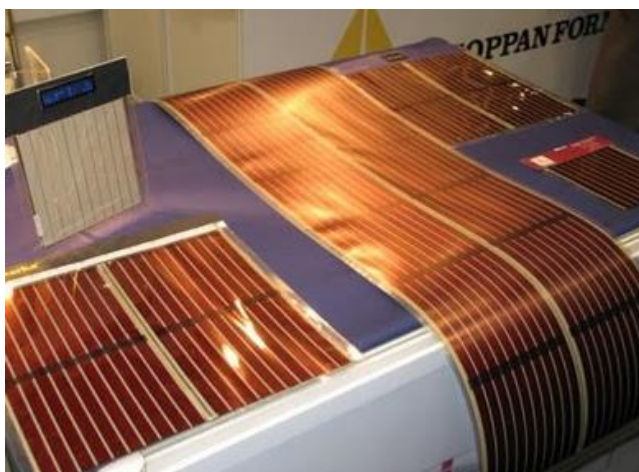
**Ogniwa amorficzne** (rys. 3a) wykonane z amorficznego, bezpostaciowego niewykryształizowanego krzemu. Cecha charakterystyczna to: niska sprawność (w przedziale 6-10%) oraz niska cena. Przeważnie posiadają charakterystyczny lekko bordowy kolor i brak widocznych kryształów krzemu.

Obecnie coraz bardziej rozwijane są ogniwa CdTe i CIGS.

**Ogniwa CdTe** (rys. 3b) wykonane z wykorzystaniem półprzewodnikowego tellurku kadmu - CdTe. W tej technologii zazwyczaj cały moduł zbudowany jest z jednego ogniwa. Sprawność wynosi 10-12%, a ze względu na bardzo niskie zużycie półprzewodnika ogniwa te charakteryzują się dobrym ilorazem ceny ogniwa do uzyskanej mocy.

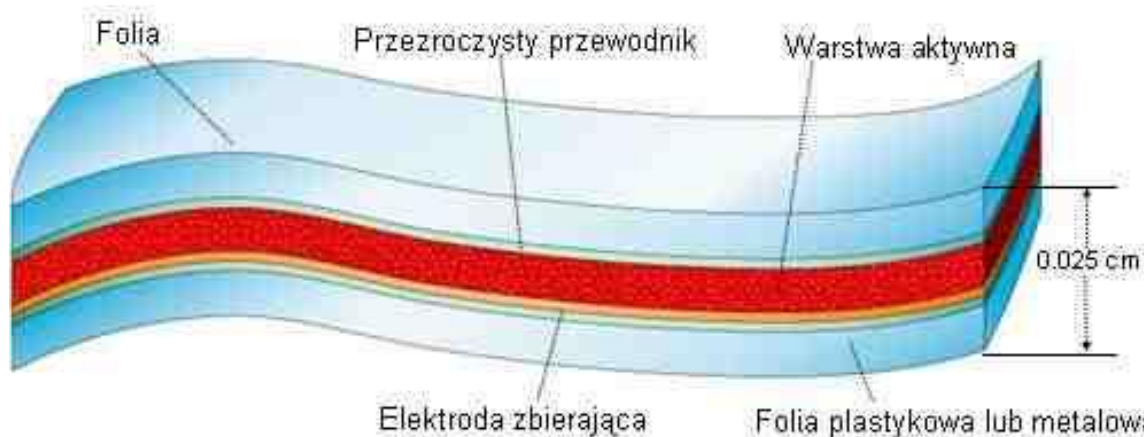
**Ogniwa CIGS** (rys. 3c) wykonane z mieszaniny półprzewodników (miedz, ind, gal, selen tzw. CIGS). W tej technologii bardzo często cały moduł zbudowany jest z jednego ogniwa. Sprawność wynosi 12-14%. Ogniwa oparte o CIGS mogą być produkowane metodą przemysłowego druku, który jest bardzo tanim i wydajnym sposobem produkcji ogniw.

**Ogniwa fotowoltaiczne III generacji** (rys. 4) – pozbawione są złącza **p-n** niezbędnego przy produkcji ogniw fotowoltaicznych z wykorzystaniem tradycyjnych półprzewodników. Najbardziej zaawansowane prace są nad ogniwami DSSC oraz organicznymi z wykorzystaniem polimerów. Wielką zaletą ogniw III generacji są niskie koszty oraz prostota produkcji. Główną przeszkodą w ich popularyzacji jest niska sprawność oscylująca wokół kilku procent. Obecny udział w rynku ogniw III generacji nie przekracza 0.5% [1].



Rys.4. Ogniwa III generacji zbudowane z polimerów - firma Konarka [2].

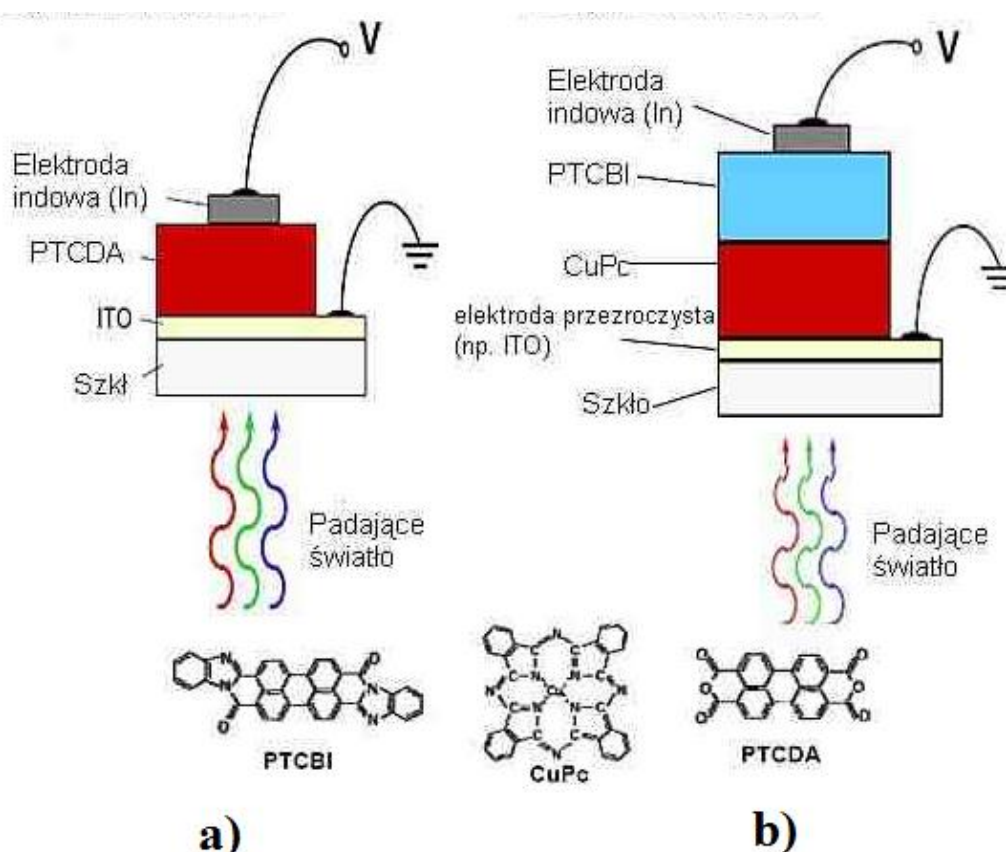
Na rysunku 5 przedstawiona jest budowa elastycznego ogniwa organicznego firmy Konarka.



Rys. 5. Schemat elastycznego ogniwa fotowoltaicznego produkowanego przez firmę Konarka Technologies, USA [2].

Ogromny postęp dotyczący badań, bazy technicznej i technologicznej w zakresie organicznych ogniw fotowoltaicznych pozwala sądzić, iż będą one stanowić konkurencyjną alternatywę wielu ogniw konwencjonalnych, zbudowanych na bazie materiałów nieorganicznych. Masowa produkcja staje się opłacalna po osiągnięciu wydajności rzędu 10%. W laboratorium została osiągnięta wydajność organicznych ogniw fotowoltaicznych ponad 11%, a niektóre firmy produkujące ogniwa doszły nawet do 15% [4]. Spodziewany koszt wytwarzania organicznych ogniw fotowoltaicznych powinien zejść poniżej 50 dol./m<sup>2</sup>. W przyszłości będą one ok. 10 razy tańsze niż nieorganiczne. Niezwykle zachęcające są także inne cechy organicznych ogniw fotowoltaicznych, zwłaszcza ich lekkość, elastyczność i to, że mogą być produkowane w postaci cienkich elastycznych folii [4].

Schemat budowy najprostszych organicznych ogniw fotowoltaicznych, zawierających jedną oraz dwie warstwy materiału organicznego, przedstawia rys. 6 [3].



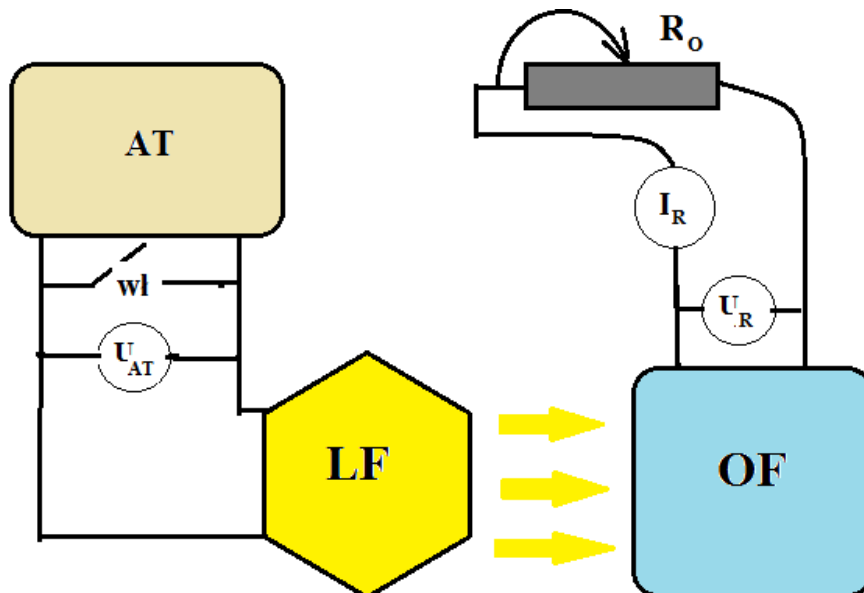
Rys. 6. Schemat budowy organicznego ogniwa fotowoltaicznego: a) jednowarstwowe; b) dwuwarstwowe [3].

Niektóre z obszarów zastosowań ogniw fotowoltaicznych:

- elektronika użytkowa, kalkulatory, lampy ogrodowe, oświetlenie znaków drogowych;
- wspomaganie sygnalizacji świetlnej;
- zasilanie elektroniki promów i sond kosmicznych, stacji orbitalnych i sztucznych satelitów Ziemi (w przestrzeni kosmicznej promieniowanie słoneczne jest o wiele silniejsze);
- doładowywanie akumulatorów w dzień i wykorzystywanie energii w nocy na jachtach, kempingach, domach jednorodzinnych;
- zasilanie układów telemetrycznych w stacjach pomiarowo-rozliczeniowych gazu ziemnego, ropy naftowej oraz energii elektrycznej;
- zasilanie automatyki przemysłowej i pomiarowej.

## 2. PRZEBIEG POMIARÓW

Pomiary dokonywane są w układzie, którego schemat przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego: AT – autotransformator; LF - lampa halogenowa 1000W z soczewką FRESNELA; OF – ogniwko fotowoltaiczne;  $R_o$  – rezystor suwakowy (obciążenie ogniwa fotowoltaicznego);  $U_{AT}$  – multimetr cyfrowy do pomiaru napięcia na autotransformatorze;  $U_R$  – multimetr cyfrowy do pomiaru napięcia na zaciskach OF;  $I_R$  - multimetr cyfrowy do pomiaru prądu płynącego przez  $R_o$ ; wł –włącznik napięcia zasilania LF.



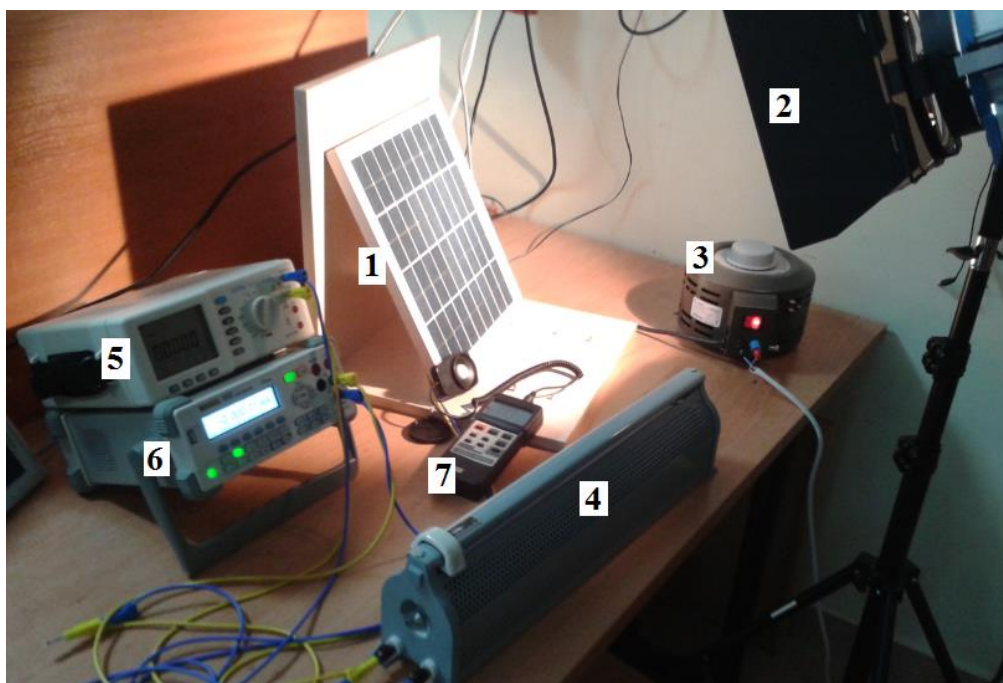
Do badań będzie używany jeden z dwóch paneli fotowoltaicznych, parametry których są podane w tabeli 1.

Tabela 1.

Parametr	Jednostki	MULTICOMP - MC-SP12-GCS	MULTICOMP - MC-SP10-GCS
Moc znamionowa $P_{\max}$	W	12	10
Maksymalne napięcie przy $P_{\max}$	V	17	17
Maksymalne natężenie przy $P_{\max}$	mA	710	590
Maksymalne napięcie jałowe	V	21,5	21,5
Prąd zwarcia	mA	830	650
Wymiary	mm	357x327x18	357x280x18
Waga	kg	1,68	1,42

Przed rozpoczęciem pomiarów prowadzący ćwiczenie wskazuje studentom typ badanego ogniwa fotowoltaicznego oraz sprawdza kompletność i poprawność połączeń układu pomiarowego zgodnie z rys 7 i 8.

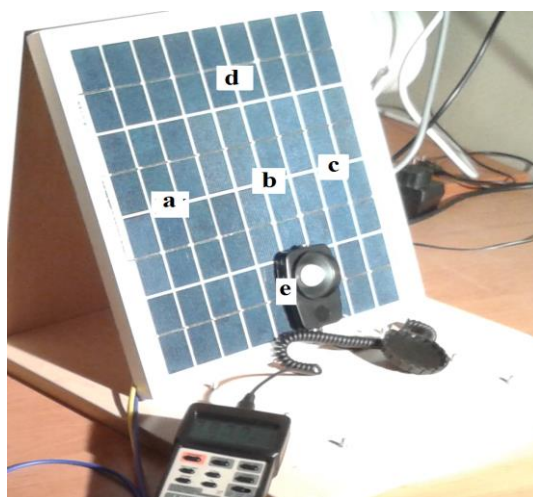
***Uwaga!!!! Podczas wykonywania pomiarów nie dotykać obudowy lampy!!!! Podczas dłuższego okresu pracy lampy z żarówką halogenową o mocy 1000 W obudowa lampy nagrzewa się do temperatury powyżej 100 °C.***



Rys. 8. Widok stanowiska pomiarowego: 1-ogniwo fotowoltaiczne; 2 – lampa oświetleniowa; 3-autotransformator; 4 – rezystor suwakowy  $R_0$ ; 5 – multimetr APPA 107 – pomiar napięcia na ogniwie fotowoltaicznym; 6 - multimetr APPA 107 – pomiar natężenia prądu; 7 – miernik natężenia oświetlenia - światłomierz cyfrowy LX-105.

## 2.1. Badanie wpływu kąta padania strumienia światła na parametry eksploatacyjne ogniwa fotowoltaicznego

Przed rozpoczęciem pomiarów należy załączyć napięcie zasilania lampy za pomocą włącznika na wyjściu autotransformatora. Ważne jest też dobre zorganizowanie pracy i podział czynności między poszczególnych członków grupy studenckiej. Wartość napięcia zasilania lampy oraz rezystancji obciążenia wskaże prowadzący ćwiczenie. Wykonać pomiary dla wartości kątów padania strumienia światła podanych w tabeli 2. Wyniki poszczególnych pomiarów należy zapisywać w tabeli 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych natężenia oświetlenia ogniwa fotowoltaicznego pokazuje rys. 9.



Rys. 9. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych natężenia oświetlenia ogniwa.

Tabela 2.

$U_{AT} = \dots\dots\dots V, R_o = \dots\dots\dots \Omega$											
Lp	$\alpha$	E						$U_o$	$U_R$	$I_R$	$P_R$
	deg	lx						V	V	mA	W
		a	b	c	d	e	$E_{sr}$				
1	90										
2	60										
3	45										
4	30										

Objaśnienia do tabeli 2:

$U_{AT}$  – napięcie na autotransformatorze;

$R_o$  – rezystancja odbiornika;

$\alpha$  - kąt nachylenia płaszczyzny ogniwa do kierunku promieniowania;

E – natężenie oświetlenia zmierzone w pięciu punktach (a, b, c, d, e - rys.9);

$E_{sr}$  – wartość średnia natężenia oświetlenia ogniwa fotowoltaicznego;

$U_R$  – napięcie na ogniwie fotowoltaicznym przy podłączonym odbiorniku;

$I_R$  – prąd płynący przez odbiornik;

$P_R$  – moc czynna pobierana z ogniwa fotowoltaicznego;

$U_0$  - napięcie na ogniwie fotowoltaicznym przy odłączonym odbiorniku.

Obliczyć moc  $P_R$  oraz sporządzić i skomentować wykresy  $P_R=f(\alpha)$ ,  $U_0=f(\alpha)$ .

## 2.2. Badanie wpływu natężenia strumienia światła na parametry eksploatacyjne ogniwa fotowoltaicznego

Wartość kąta padania strumienia światła lampy na ogniwo oraz rezystancji obciążenia wskaże prowadzący ćwiczenie. Zmianę wartości natężenia oświetlenia uzyskujemy poprzez zmianę napięcia zasilania lampy.

Tabela 3.

Kąt nachylenia płaszczyzny ogniwa $\alpha=.....^\circ$ , $R_0=.....\Omega$											
Lp	$U_{AT}$	E						$U_0$	$U_R$	$I_R$	$P_R$
	V	lx						V	V	mA	W
		a	b	c	d	e	$E_{\text{sr}}$				
1	80										
2	100										
3	110										
4	120										
5	130										
6	140										
7	150										
8	160										
9	170										
10	180										
11	190										
12	200										
13	205										
14	210										
15	215										
16	220										
17	225										
18	230										
19	235										
Ustawić wartość rezystancji obciążenia $R_0=0$											
	$U_{AT}$	E [lx]						$U_{zw}$	$I_{zw}$	$P_{zw}$	
	V	a	b	c	d	e	$E_{\text{sr}}$	V	mA	W	
	235										

Objaśnienia do tabeli 3:

$U_{zw}$  - napięcie zwarciove ogniwa fotowoltaicznego (przy  $R_o=0$ );

$I_{zw}$  – prąd zwarciovy ogniwa fotowoltaicznego;

$P_{zw}$  – moc czynna w stanie zwarciowym ogniwa;

Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 3. Wyliczyć i uzupełnić pozostałe kolumny tabeli 3. Sporządzić i skomentować uzyskane zależności  $U_o=f(E_{sr})$ ,  $U_R=f(E_{sr})$ ,  $P_R=f(E_{sr})$ . Sprawdzić uzyskane wartości:  $I_{zw}$ ,  $U_o$ ,  $P_R$  uzyskane przy  $U_{AT}=235V$  i skomentować zaistniałe rozbieżności.

### 2.3. Badanie wpływu rezystancji obciążenia na moc pobieraną z ogniwa fotowoltaicznego

Po wskazaniu przez prowadzącego ćwiczenie niezbędnych wartości studenci przystępują do wyznaczania zależności mocy pobieranej z ogniwa od wartości rezystancji obciążenia. Wyniki pomiarów zamieszczamy w tabeli 4.

Tabela 4.

E <sub>sr</sub> =.....Ix, U <sub>AT</sub> =.....V										
Kąt nachylenia płaszczyzny ogniwa										
	α=.....°			α=.....°			α=.....°			
Lp	R	U <sub>R</sub>	I <sub>R</sub>	P <sub>R</sub>	U <sub>R</sub>	I <sub>R</sub>	P <sub>R</sub>	U <sub>R</sub>	I <sub>R</sub>	P <sub>R</sub>
	Ω	V	A	W	V	A	W	V	A	W
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										

Dokonyjemy 20 pomiarów zmieniając (wg wskazań prowadzącego ćwiczenia) za pomocą opornika dekadowego rezystancję obciążenia, Korzystając ze wzorów obliczamy i uzupełniamy kolumny tabeli 4.

Narysować i skomentować uzyskane zależności  $P_R=f(R)$  dla różnych katów  $\alpha$ .

Wzory do obliczeń:

$$E_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^5 E_i}{5} \quad R = \frac{U_R}{I_R}, \quad P_R = U_R \cdot I_R; \quad P_{zw} = U_{zw} \cdot I_{zw}.$$

### 3. PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE

1. Narysuj oraz opisz budowę i zasadę działania ogniwa fotowoltaicznego.
2. Wymień i scharakteryzuj rodzaje ogniw fotowoltaicznych.
3. Podaj parametry ogniw fotowoltaicznych.
4. Porównaj ogniwa fotowoltaiczne I i II generacji.
5. Porównaj ogniwa fotowoltaiczne I i III generacji.
6. Wymień zastosowania ogniw fotowoltaicznych..
7. Definicja i jednostki natężenia oświetlenia.
8. Wyjaśnij zasadę pomiaru natężenia oświetlenia światłomierzem cyfrowym LX-105.
9. Wymień przyczyny błędów pomiaru natężenia oświetlenia.

### 4. LITERATURA

1. Hoppe H., Sariciftci N.S.: Organic solar cells: An overview. "J. Mater. Res." 19/2004.
2. Godlewski J.: Currents and photocurrents in organic materials determined by the interface phenomena. "Advances in Colloid and Interface Science" 116/2005.
3. Yu et al.: Polymer photovoltaic cells: Enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions. "Science" 270/1995.
4. Grätzel M.: Solar energy conversion by die-sensitized photovoltaic cells. "Inorg. Chem." 44/2005.
5. Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki. pod red. Ireny Lasockiej i Jana Zambrzyckiego. Wydaw. Politechniki Białostockiej. Białystok 2004.
6. Zbiór zadań z fizyki dla studentów uczelni technicznych. red. Wojciech Jarmoc. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej Białystok 2011.

### **Wymagania BHP**

*Warunkiem przystąpienia do praktycznej realizacji ćwiczenia jest zapoznanie się z instrukcją BHP i instrukcją przeciwpożarową oraz przestrzeganie zasad w nich zawartych. Wybrane urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym mogą posiadać instrukcje stanowiskowe. Przed rozpoczęciem pracy należy zapoznać się z instrukcjami stanowiskowymi wskazanym i przez prowadzącego.*

*W trakcie zajęć laboratoryjnych należy przestrzegać następujących zasad!*

- *Sprawdzić, czy urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym są w stanie kompletnym, nie wskazującym na fizyczne uszkodzenie.*
- *Sprawdzić prawidłowość połączeń urządzeń.*
- *Załączenie napięcia do układu pomiarowego może się odbywać po wyrażeniu zgody przez prowadzącego.*
- *Przyrządy pomiarowe należy ustawić w sposób zapewniający stałą obserwację, bez konieczności nachylania się nad innymi elementami układu znajdującymi się pod napięciem.*
- *Zabronione jest dokonywanie jakichkolwiek przełączeń oraz wymiana elementów składowych stanowiska pod napięciem.*
- *Zmiana konfiguracji stanowiska i połączeń w badanym układzie może się odbywać wyłącznie w porozumieniu z prowadzącym zajęcia.*
- *W przypadku zaniku napięcia zasilającego należy niezwłocznie wyłączyć wszystkie urządzenia.*
- *Stwierdzone wszelkie braki w wyposażeniu stanowisk oraz nieprawidłowości w funkcjonowaniu sprzętu należy przekazywać prowadzącemu zajęcia.*
- *Zabrania się samodzielnego włączania, manipulowania i korzystania z urządzeń nie należących do danego ćwiczenia.*
- *W przypadku wystąpienia porażenia prądem elektrycznym należy niezwłocznie wyłączyć zasilanie stanowisk laboratoryjnych za pomocą wyłącznika bezpieczeństwa, dostępnego na każdej tablicy rozdzielczej w laboratorium. Przed odłączeniem napięcia nie dotykać porażonego.*