

AGH

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Fizyka 2 - laboratorium 6

Ogniwo słoneczne

Ćwiczenie nr 134

5 listopada 2024

Aleksander Jóźwik

Adrian Krawczyk

Wydział WI	Imię i nazwisko 1. Aleksander Jóźwik 2. Adrian Krawczyk		Rok II	Grupa 3	Zespół 3
PRACOWNIA FIZYCZNA WFİİS AGH	Temat: Ogniwo słoneczne				Nr ćwiczenia 134
Data wykonania 05.11.2024	Data oddania 09.11.2024	Zwrot do popr.	Data oddania	Data zaliczenia	Ocena

1. Wprowadzenie

1.1. Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z różnymi rodzajami półprzewodnikowych ogniw słonecznych. Wyznaczenie charakterystyki prądowo-napięciowej i sprawności przetwarzania energii świetlnej na elektryczną.

1.2. Wstęp teoretyczny

Słońce to podstawowe źródło energii dla naszej planety. Promieniowanie słoneczne może być zamieniane np. na ciepło poprzez urządzenie zwane kolektorem słonecznym. Inny sposób przemiany tej energii oferuje ogniwo słoneczne, zwane także fotoogniwem. Jest urządzenie służące do bezpośredniej konwersji energii światła słonecznego na energię elektryczną. Proces ten zachodzi w półprzewodnikowym złączu p-n, które charakteryzuje się dużą powierzchnią. Złącze p-n jest kontaktem dwóch warstw półprzewodnika, jednej o przewodnictwie elektronowym (n), drugiej dziurowym (p). Po obu stronach styku metalu powstaje warstwa zubożona o niskiej koncentracji swobodnych elektronów i dziur, co prowadzi do wytworzenia silnego pola elektrycznego.

To właśnie w niej zachodzi proces zmiany światła na prąd elektryczny. Pod wpływem padającego promieniowania foton światła o energii $h\nu$ wzbudza elektron z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa, tworząc w ten sposób parę elektron-dziura, która jest podstawą przepływu prądu.

Krzem jest głównym materiałem używanym do produkcji ogniw słonecznych. Wykorzystywane są jego trzy odmiany - od najdroższego monokrystalicznego, przez polikrystaliczny, do najtańszego amorficznego. Niezależnie od rodzaju, każde ogniwo wymaga specjalnej konstrukcji bardzo blisko powierzchni, ponieważ światło wnika w krzem tylko na głębokość około 0.01 mm.

Na wierzchu znajduje się przezroczysta warstwa przewodząca (może to być np. cienka warstwa złota lub tlenków przewodzących), a z niej prąd zbierany jest przez metalowe paski.

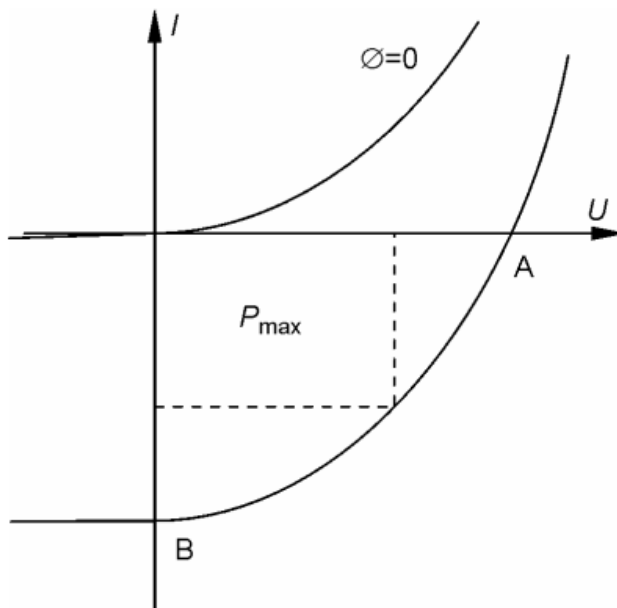
Charakterystyka prądowo-napięciowa fotoogniwa w ciemności przypomina charakterystykę diody półprzewodnikowej (suma skierowanych przeciwnie prądów dyfuzji i prądu dryfu). Generacja par elektron-dziura przez fotony powiększa jednak prąd dryfu diody o wartość proporcjonalną do natężenia światła Φ . W efekcie charakterystyka fotoogniwa wynosi:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eU}{mkT}\right) - 1 \right] - \text{const} \cdot \Phi$$

i jest ona efektem przesunięcia w dół charakterystyki ogniwa nieoświetlonego o składnik $-\text{const} \cdot \Phi$.

W powyższym wzorze:

- I - natężenie prądu złącza,
- U - napięcie polaryzacji zewnętrznej,
- I_S - teoretyczny prąd nasycenia złącza,
- m - współczynnik idealności złącza p-n,
- k - stała Boltzmanna,
- T - temperatura bezwzględna w kelwinach,
- e - ładunek elementarny elektronu.



Rysunek 1: Charakterystyki prądowo-napięciowe złącza p-n, ciemnego ($\Phi = 0$) i oświetlonego światłem (z zaznaczonym prostokątem mocy maksymalnej) [1]

Współczesne ogniwa krzemowe mogą osiągać maksymalną sprawność rzędu 25%, jednak w praktyce ich sprawność jest zwykle niższa.

W celu oceny sprawności ogniwa, natężenie światła można zmierzyć za pomocą luksomierza.

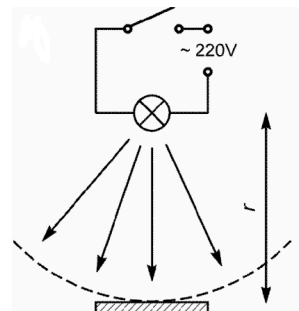
Sprawność energetyczna ogniwa jest definiowana jako stosunek mocy maksymalnej generowanej przez ogniwo do mocy padającego promieniowania, określonej wzorem:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{\Phi n S}$$

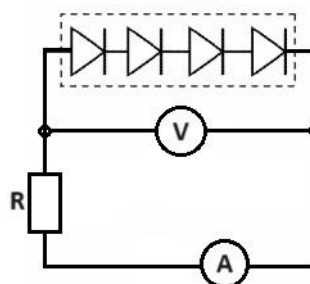
gdzie P_{\max} to moc maksymalna generowana przez ogniwo, Φ to natężenie światła, n to liczba sekcji, a S to powierzchnia pojedynczej sekcji ogniwa.

2. Układ pomiarowy

1. Fotoogniwa krzemowe: monokrystaliczne, polikrystaliczne, amorficzne
2. Żarówka jarzeniowa o charakterystyce widmowej zbliżonej do światła dziennego.
3. Woltomierz cyfrowy
4. Multimetr
5. Opornik o regulowanym oporze od 0 do 100 Ω
6. Luksomierz



Rysunek 2: Oświetlenie fotoogniwa lampą jarzeniową [1]



Rysunek 3: Układ elektryczny do badania charakterystyki prądowo-napięciowej [1]

3. Przebieg ćwiczenia

Na początku podłączono do ogniwa polikrystalicznego woltomierz oraz amperomierz, aby sprawdzić poprawność funkcjonowania układu pomiarowego. Włączono źródło światła i nakierowano na fotoogniwo. Następnie przeprowadzono testy w celu określenia zakresu napięcia przy minimalnym i maksymalnym oporze, co pozwoliło ustalić, jak często należy zapisywać wyniki w trakcie dalszych pomiarów. W kolejnych etapach wykonano kilkanaście pomiarów napięcia oraz natężenia prądu przy stopniowo zwiększonym oporze, równocześnie obliczając moc dla każdego punktu pomiarowego. W momencie, gdy moc osiągała wartość maksymalną, zagęszczono liczbę pomiarów, aby uzyskać dokładniejsze dane w tym zakresie. Całą procedurę przeprowadzono także dla dwóch pozostałych fotoogniw. Na koniec zmierzono natężenie światła emitowanego przez lampę.

4. Analiza danych pomiarowych

Zmierzone przy pomocy luksomierza natężenie światła wynosi:

$$\Phi = 130.6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

4.1. Ogniwo polikrystaliczne

Odczytana specyfikacja ogniwa polikrystalicznego:

Liczba sekcji $n = 8$

Powierzchnia 1 sekcji $S = 7.8 \text{ cm}^2$

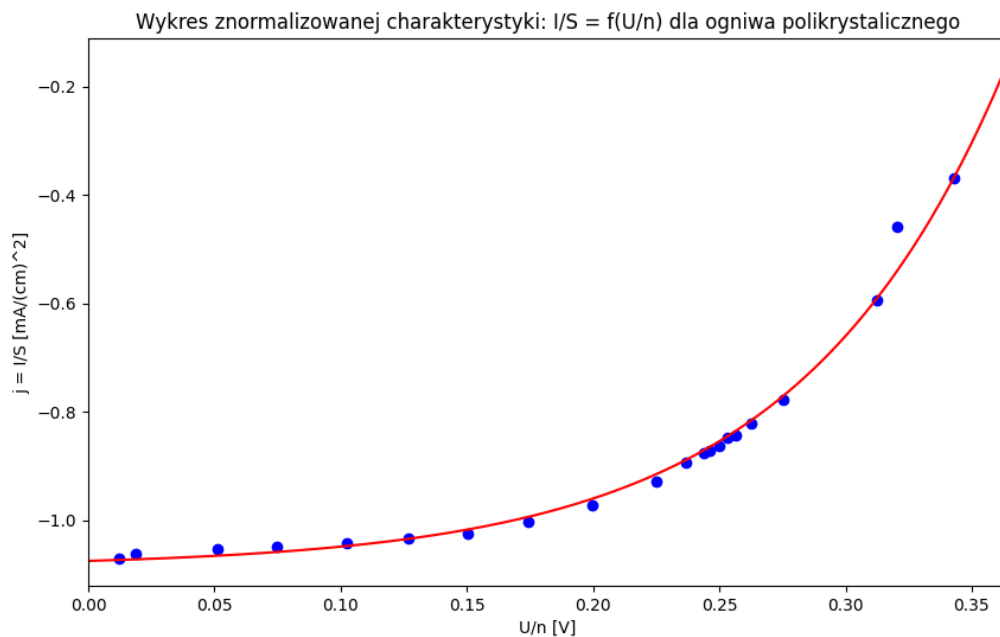
Powierzchnia całkowita $nS = 62.4 \text{ cm}^2$

Nr pomiaru	U [V]	I [mA]	$P = UI$ [mW]	$\frac{U}{n}$ [V]	$j = \frac{I}{S} [\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}]$
1	0.098	8.35	0.818	0.012	1.071
2	0.152	8.28	1.259	0.019	1.062
3	0.408	8.21	3.350	0.051	1.053
4	0.599	8.19	4.906	0.075	1.050
5	0.821	8.13	6.675	0.103	1.042
6	1.013	8.06	8.165	0.127	1.033
7	1.201	8.00	9.608	0.150	1.026
8	1.396	7.82	10.917	0.175	1.003
9	1.599	7.59	12.136	0.200	0.973
10	1.799	7.24	13.025	0.225	0.928
11	1.895	6.97	13.208	0.237	0.894
12	1.952	6.83	13.332	0.244	0.876
13	1.971	6.80	13.403	0.246	0.872
14	2.001	6.74	13.487	0.250	0.864
15	2.026	6.62	13.412	0.253	0.849
16	2.051	6.57	13.475	0.256	0.842
17	2.101	6.40	13.446	0.263	0.821
18	2.203	6.07	13.372	0.275	0.778
19	2.498	4.63	11.566	0.312	0.594
20	2.562	3.58	9.172	0.320	0.459
21	2.745	2.87	7.878	0.343	0.368
22	2.913	1.44	4.195	0.364	0.185

Tabela 1: Wyniki pomiarów i obliczeń dla ogniwa polikrystalicznego wraz z zaznaczoną na czerwono mocą maksymalną P_{\max}

$$P_{\max} = 13.487 \text{ mW}$$

Poniższe wykresy znormalizowanej charakterystyki $\frac{I}{S} = f(\frac{U}{n})$ wykonano przy pomocy bibliotek *matplotlib* oraz *numpy* języka *Python 3.12.6*. Współczynniki krzywej trendu $I(U) = a \cdot \exp(bU) + c$ zostały dopasowane numerycznie przy pomocy modułu *curve_fit* z biblioteki *scipy*. Zostały one zapisane pod wykresami. Znak gęstości prądu przyjęto zgodnie z charakterystyką prądowo-napięciową złącza p-n podaną we wstępie teoretycznym.



Rysunek 4: Wykres znormalizowanej charakterystyki: $\frac{I}{S} = f\left(\frac{U}{n}\right)$ dla ogniwa polikrystalicznego

Otrzymane współczynniki to:

$$\begin{cases} a = 1.10739638 \cdot 10^{-2} \\ b = 12.1669898 \\ c = -1.08628514 \end{cases}$$

Sprawność ogniwa można wyznaczyć korzystając ze wzoru:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{\Phi n S}$$

$$\eta_{\text{og.polikrystalicznego}} = \frac{13.487 \cdot 10^{-3} \text{ W}}{130.6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 8 \cdot 7.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 0.0165$$

$$\eta_{\text{og.polikrystalicznego}} \approx 1.65\%$$

4.2. Ogniwo monokrystaliczne

Odczytana specyfikacja ogniwa monokrystalicznego:

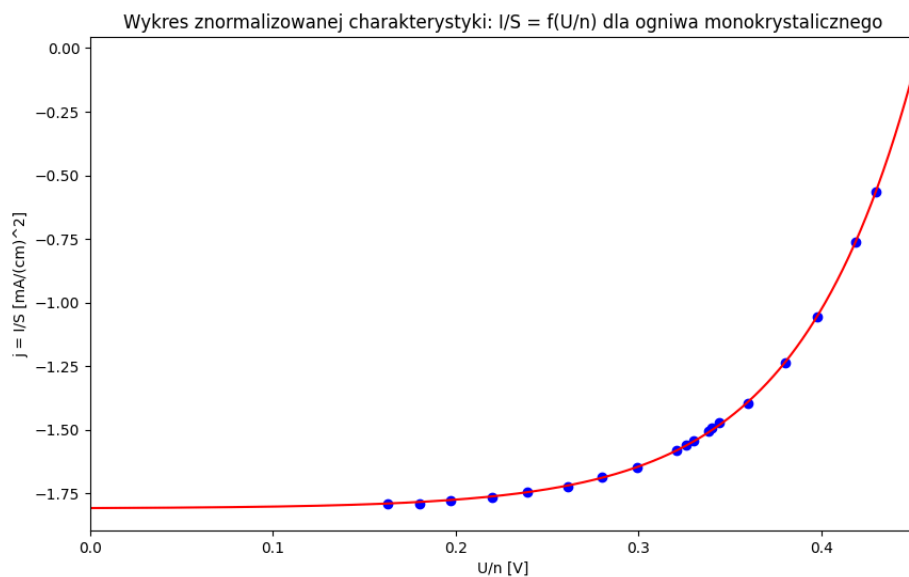
Liczba sekcji $n = 1$

Powierzchnia $S = 63 \text{ cm}^2$

Nr pomiaru	U [V]	I [mA]	$P = UI$ [mW]	$\frac{U}{n}$ [V]	$j = \frac{I}{S}$ [$\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$]
1	0.163	112.7	18.370	0.163	1.789
2	0.180	112.7	20.286	0.180	1.789
3	0.197	111.9	22.044	0.197	1.776
4	0.220	111.1	24.442	0.220	1.763
5	0.239	109.9	26.266	0.239	1.744
6	0.261	108.5	28.319	0.261	1.722
7	0.280	106.2	29.736	0.280	1.686
8	0.299	103.9	31.066	0.299	1.649
9	0.321	99.6	31.972	0.321	1.581
10	0.326	98.3	32.046	0.326	1.560
11	0.330	97.3	32.109	0.330	1.544
12	0.338	94.7	32.009	0.338	1.503
13	0.340	94.0	31.960	0.340	1.492
14	0.344	92.8	31.923	0.344	1.473
15	0.360	88.0	31.680	0.360	1.397
16	0.380	78.0	29.640	0.380	1.238
17	0.398	66.5	26.467	0.398	1.056
18	0.419	47.9	20.070	0.419	0.760
19	0.430	35.5	15.265	0.430	0.563
20	0.452	2.79	1.261	0.452	0.044

Tabela 2: Wyniki pomiarów i obliczeń dla ogniwa monokrystalicznego wraz z zaznaczoną na czerwono mocą maksymalną P_{\max}

$$P_{\max} = 32.109 \text{ mW}$$



Rysunek 5: Wykres znormalizowanej charakterystyki: $\frac{I}{S} = f(\frac{U}{n})$ dla ogniwa monokrystalicznego

Otrzymane współczynniki to:

$$\begin{cases} a = 1.53840048 \cdot 10^{-3} \\ b = 15.5796286 \\ c = -1.80879472 \end{cases}$$

$$\eta_{\text{og.monokrystalicznego}} = \frac{32.109 \cdot 10^{-3} \text{ W}}{130.6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 1 \cdot 63 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 0.039$$

$$\eta_{\text{og.monokrystalicznego}} \approx 3.9\%$$

4.3. Ogniwo amorficzne

Odczytana specyfikacja ogniwa amorficznego:

Liczba sekcji $n = 14$

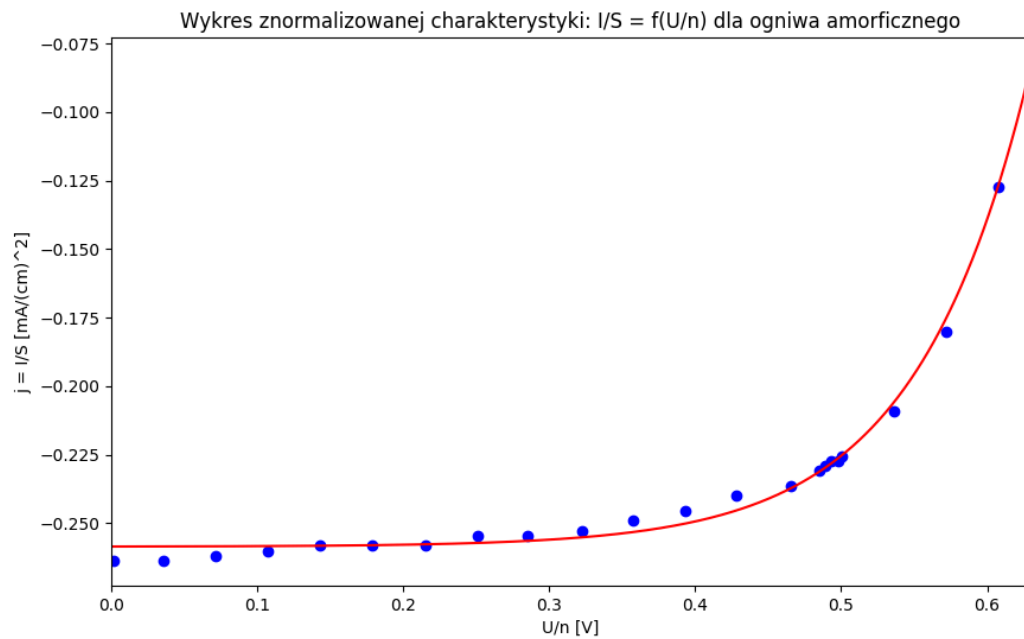
Powierzchnia 1 sekcji $S = 5.5 \text{ cm}^2$

Powierzchnia całkowita $nS = 77 \text{ cm}^2$

Nr pomiaru	U [V]	I [mA]	$P = UI$ [mW]	$\frac{U}{n}$ [V]	$j = \frac{I}{S}$ [$\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$]
1	0.022	1.45	0.032	0.002	0.264
2	0.506	1.45	0.734	0.036	0.264
3	1.001	1.44	1.441	0.072	0.262
4	1.505	1.43	2.152	0.108	0.260
5	2.005	1.42	2.847	0.143	0.258
6	2.505	1.42	3.557	0.179	0.258
7	3.010	1.42	4.274	0.215	0.258
8	3.511	1.40	4.915	0.251	0.255
9	3.996	1.40	5.594	0.285	0.255
10	4.515	1.39	6.276	0.323	0.253
11	5.000	1.37	6.850	0.357	0.249
12	5.510	1.35	7.439	0.394	0.245
13	5.990	1.32	7.907	0.428	0.240
14	6.520	1.30	8.476	0.466	0.236
15	6.790	1.27	8.623	0.485	0.231
16	6.848	1.26	8.628	0.489	0.229
17	6.903	1.25	8.629	0.493	0.227
18	6.970	1.25	8.713	0.498	0.227
19	7.010	1.24	8.692	0.501	0.225
20	7.501	1.15	8.626	0.536	0.209
21	8.001	0.99	7.921	0.572	0.180
22	8.502	0.70	5.951	0.607	0.127
23	8.814	0.45	3.966	0.630	0.082

Tabela 3: Wyniki pomiarów i obliczeń dla ogniwa amorficznego wraz z zaznaczoną na czerwono mocą maksymalną P_{max}

$$P_{\max} = 8.713 \text{ mW}$$



Rysunek 6: Wykres znormalizowanej charakterystyki: $\frac{I}{S} = f\left(\frac{U}{n}\right)$ dla ogniwa amorficznego

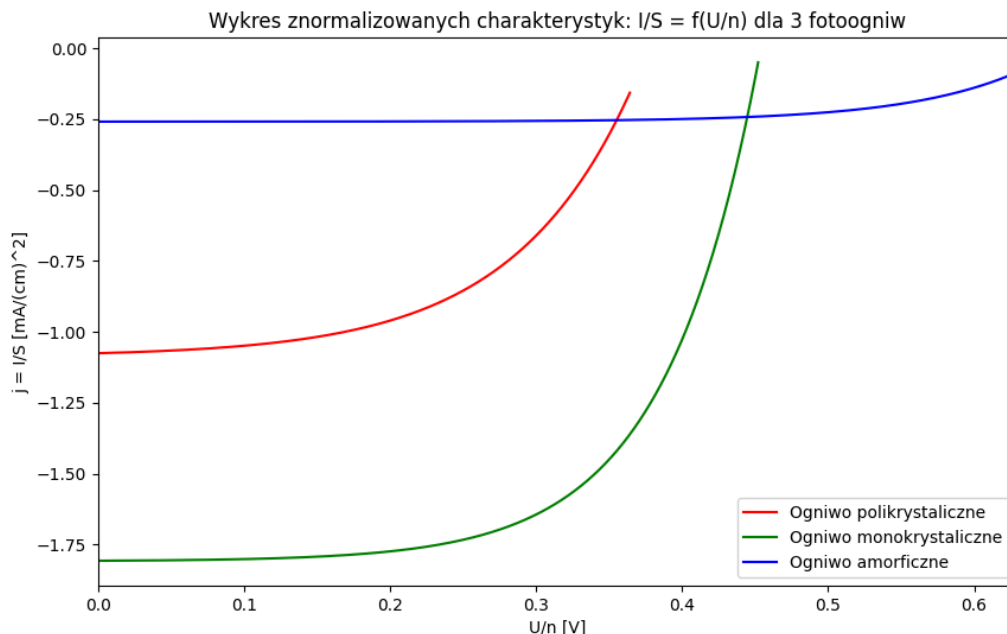
Otrzymane współczynniki to:

$$\begin{cases} a = 5.46337445 \cdot 10^{-5} \\ b = 12.8175339 \\ c = -2.58502015 \cdot 10^{-1} \end{cases}$$

$$\eta_{\text{og.amorficznego}} = \frac{8.713 \cdot 10^{-3} \text{ W}}{130.6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 14 \cdot 5.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 8.66 \cdot 10^{-3}$$

$$\eta_{\text{og.amorficznego}} \approx 0.87\%$$

4.4. Wspólny wykres znormalizowanych charakterystyk: $\frac{I}{S} = f\left(\frac{U}{n}\right)$ dla 3 fotoogniw



Rysunek 7: Wspólny wykres znormalizowanych charakterystyk: $\frac{I}{S} = f\left(\frac{U}{n}\right)$ dla 3 fotoogniw

5. Wnioski

Na podstawie wspólnego wykresu znormalizowanych charakterystyk oraz danych w tabelach można zauważyć, że największą wartość gęstości prądu zwarcia $j = 1.789 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$ posiada ogniwo monokrystaliczne, podczas gdy ogniwo amorficzne charakteryzuje największe napięcie przypadające na jedną sekcję $\frac{U}{n} = 0.63 \text{ V}$. W trakcie ćwiczenia wyznaczono następujące sprawności ogniw fotowoltaicznych:

$$\eta_{\text{og.amorficznego}} \approx 0.87\% \mid \eta_{\text{og.polikrystalicznego}} \approx 1.65\% \mid \eta_{\text{og.monokrystalicznego}} \approx 3.9\%$$

Wartości te potwierdzają, że największą sprawnością cechują się najdroższe ogniwa z krzemu monokrystalicznego, a najniższą najtańsze ogniwa amorficzne. Otrzymane sprawności są znacząco niższe od maksymalnej teoretycznej potencjalnej sprawności wynoszącej 25%. Ponieważ nie znamy rzeczywistej wartości sprawności ogniw, możemy jedynie przypuszczać, że zmierzona wartość może znacznie od niej odbiegać. Wynika to prawdopodobnie z budowy, jakości, stanu (liczne zarysowania) badanych ogniw oraz niedokładności pomiaru natężenia światła luksomierzem. Urządzenie to było bardzo czułe, a nawet niewielkie zmiany jego położenia powodowały różnice w zmierzonym natężeniu światła. Pomiary były prowadzone przez pewien czas bez przerwy, co mogło wpływać na wzrost temperatury opornika i obniżenie jego oporu, co z kolei ograniczało zakres wartości R , dla których wykonano pomiary.

Bibliografia

- AGH WFIS, „Opis ćwiczenia nr 134: Ogniwo słoneczne”. Dostęp: 8 listopad 2024. [Online].
[1] Dostępne na: https://pf.agh.edu.pl/home/wfis/pracfiz/Opisy_cwiczen/134.pdf