

Wydział WI	Imię i nazwisko Piotr Karamon Hubert Kasprzycki	Rok 2	Grupa 12	Zespół 5
PRACOWNIA FIZYCZNA WFiS AGH	Temat: Ogniowo słoneczne			Nr ćwiczenia 134
Data wykonania 14.11.2023	Data oddania 23.11.2023	Zwrot do popr.	Data oddania	Data zaliczenia
				OCENA

1 Cel ćwiczenia

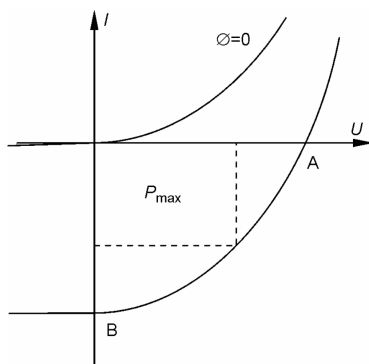
Zapoznanie się z różnymi rodzajami półprzewodnikowych ogniw słonecznych. Wyznaczenie charakterystyki prądowo-napięciowej i sprawności przetwarzania energii świetlnej na elektryczną.

2 Wstęp teoretyczny

W kolektorach słonecznych promieniowanie słoneczne zamienia się na ciepło, np. przez podgrzewanie przepływającej przez kolektor wody. Ogniwem słonecznym lub fotoogniwem nazywamy urządzenie, które przetwarza energię światła słonecznego na prąd elektryczny.

W półprzewodnikowym ogniwie słonecznym konwersja ta zachodzi w obszarze złącza p-n o dużej powierzchni. Złącze p-n jest kontaktem dwu warstw półprzewodnika - o przewodnictwie elektronowym (n) oraz dziurowym (p). W punkcie styku materiału typu n i p powstaje warstwa zubożona, w której koncentracja tak dziur, jak i swobodnych elektronów jest znikomo mała, ale powstaje w niej silne pole elektryczne. To w niej zachodzi proces zamiany światła na prąd elektryczny, co jest efektem przenoszenia elektronów przez fotony światła o energii $h\nu$.

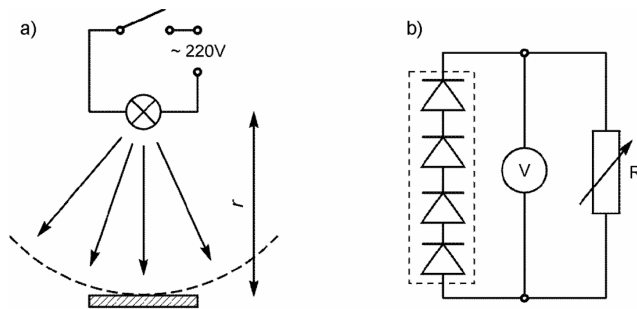
Najczęściej stosowanym materiałem do produkcji ogniw słonecznych jest krzem. Najdoskonalsze ogniwa budowane są z płytek krzemu monokrystalicznego. Tańsze technologie wykorzystują krzem polikrystaliczny oraz krzem amorficzny.



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

Charakterystyki prądowo-napięciowe ogniwa słonecznego przedstawia rysunek 1. Przy braku oświetlenia jest taka sama jak zwykłej diody półprzewodnikowej. Analiza procesu konwersji światła słonecznego na energię elektryczną wskazuje, że maksymalna sprawność ogniwa krzemowego wynosi około 25%. Budowane obecnie ogniwa mają sprawność o połowę niższą

3 Opis stanowiska i aparatury pomiarowej



Rysunek 2: Schemat układu eksperymentalnego: a) oświetlenie fotoogniwa lampą jarzeniową; b) układ elektryczny do badania charakterystyki prądowo-napięciowej

W skład układu pomiarowego wchodzi:

1. Fotoogniwa krzemowe:
 - monokrystaliczne
 - polikrystaliczne
 - amorficzne
2. Żarówka jarzeniowa o charakterystyce widmowej zbliżonej do światła dziennego.
3. Woltomierz cyfrowy i miernik cyfrowy

4 Przebieg doświadczenia

Po zestawieniu układu pomiarowego ustawiliśmy lampę w odległości około 25cm od ogniw. Za pomocą luksonierza dokonaliśmy pomiary natężenia światła Φ . Następnie wykonywaliśmy pomiary mocy ogniwa dla trzech rodzajów ogniw. Przeprowadziliśmy pomiary w całym dostępnym zakresie napięcia prądu.

5 Wyniki pomiarów

Tabela 1: Parametry badanych ogniw.

Typ ogniwa	Liczba sekcji n	Powierzchnia sekcji S [cm ²]	Powierzchnia całkowita nS [cm ²]
Monokrystaliczne	1	63	63
Polikrystaliczne	8	7.8	62.4
Amorficzne	14	5.5	77

Pomiaru natężenia światła wykonaliśmy przy użyciu elektronicznego luksonierza,

$$\Phi = 56.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}; \quad u(\Phi) = 0.50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Przyjęliśmy niepewności równą $0.50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, z racji trudności w ustawieniu luksonierza w dokładnie takiej odległości i położeniu od lampy jak badane ogniwo.

Poniżej znajdują się tabele z wynikami pomiarów. Zaznaczamy tutaj, że mierzone były jedynie kolumny U i I , reszta kolumn jest obliczona przy użyciu tych dwóch i parametrów poszczególnych ogniw.

Tabela 2: Wyniki pomiarów dla ogniwa monokrystalicznego

U [V]	I [mA]	$P = U \cdot I$ [mW]	R [Ω]	U/n [V]	$j = I/S$ [mA/cm ²]
0.467	-4.6	2.148	101.522	0.467	0.073
0.465	-4.8	2.232	96.875	0.465	0.076
0.465	-5.0	2.325	93.000	0.465	0.079
0.465	-5.3	2.464	87.736	0.465	0.084
0.464	-5.6	2.598	82.857	0.464	0.089
0.464	-6.0	2.784	77.333	0.464	0.095
0.463	-6.4	2.963	72.344	0.463	0.102
0.462	-6.9	3.188	66.957	0.462	0.110
0.462	-7.4	3.419	62.432	0.462	0.117
0.461	-8.1	3.734	56.914	0.461	0.129
0.461	-8.8	4.057	52.386	0.461	0.140
0.461	-9.8	4.518	47.041	0.461	0.156
0.460	-10.9	5.014	42.202	0.460	0.173
0.458	-12.3	5.633	37.236	0.458	0.195
0.457	-14.2	6.489	32.183	0.457	0.225
0.455	-16.8	7.644	27.083	0.455	0.267
0.451	-20.7	9.336	21.787	0.451	0.329
0.446	-25.9	11.551	17.220	0.446	0.411
0.434	-36.7	15.928	11.826	0.434	0.583
0.390	-57.0	22.230	6.842	0.390	0.905
0.369	-61.7	22.767	5.981	0.369	0.979
0.340	-66.1	22.474	5.144	0.340	1.049
0.305	-69.4	21.167	4.395	0.305	1.102
0.273	-71.3	19.465	3.829	0.273	1.132
0.216	-72.8	15.725	2.967	0.216	1.156
0.148	-73.3	10.848	2.019	0.148	1.163
0.118	-73.5	8.673	1.605	0.118	1.167

Tabela 3: Wyniki pomiarów dla ogniwa polikrystalicznego.

U [V]	I [mA]	$P = U \cdot I$ [mW]	R [Ω]	U/n [V]	$j = I/S$ [mA/cm ²]
2.725	-1.35	3.679	2018.519	0.341	0.173
2.711	-1.42	3.850	1909.155	0.339	0.182
2.698	-1.48	3.993	1822.973	0.337	0.190
2.683	-1.56	4.185	1719.872	0.335	0.200
2.669	-1.64	4.377	1627.439	0.334	0.210
2.654	-1.74	4.618	1525.287	0.332	0.223
2.637	-1.84	4.852	1433.152	0.330	0.236
2.616	-1.96	5.127	1334.694	0.327	0.251
2.592	-2.11	5.469	1228.436	0.324	0.271
2.563	-2.27	5.818	1129.075	0.320	0.291
2.526	-2.47	6.239	1022.672	0.316	0.317
2.486	-2.66	6.613	934.586	0.311	0.341
2.431	-2.94	7.147	826.871	0.304	0.377
2.394	-3.10	7.421	772.258	0.299	0.397
2.351	-3.28	7.711	716.768	0.294	0.421
2.320	-3.40	7.888	682.353	0.290	0.436
2.261	-3.63	8.207	622.865	0.283	0.465
2.213	-3.82	8.454	579.319	0.277	0.490
2.132	-4.09	8.720	521.271	0.267	0.524
2.020	-4.43	8.949	455.982	0.253	0.568
1.909	-4.72	9.010	404.449	0.239	0.605
1.709	-5.12	8.750	333.789	0.214	0.656
1.420	-5.51	7.824	257.713	0.177	0.706
1.088	-5.73	6.234	189.878	0.136	0.735
0.727	-5.88	4.275	123.639	0.091	0.754
0.340	-5.98	2.033	56.856	0.043	0.767
0.067	-6.02	0.403	11.130	0.008	0.772

Tabela 4: Wyniki pomiarów dla ogniwa amorficznego.

U [V]	I [mA]	$P = U \cdot I$ [mW]	R [Ω]	U/n [V]	$j = I/S$ [mA/cm ²]
9.735	-0.50	4.868	19470.000	0.695	0.091
9.695	-0.52	5.041	18644.231	0.693	0.095
9.678	-0.55	5.323	17596.364	0.691	0.100
9.638	-0.62	5.976	15545.161	0.688	0.113
9.588	-0.70	6.712	13697.143	0.685	0.127
9.520	-0.82	7.806	11609.756	0.680	0.149
9.420	-0.97	9.137	9711.340	0.673	0.176
9.255	-1.20	11.106	7712.500	0.661	0.218
9.120	-1.37	12.494	6656.934	0.651	0.249
8.926	-1.57	14.014	5685.350	0.638	0.285
8.623	-1.84	15.866	4686.413	0.616	0.335
8.055	-2.17	17.479	3711.982	0.575	0.395
6.728	-2.47	16.618	2723.887	0.481	0.449
6.250	-2.52	15.750	2480.159	0.446	0.458
5.407	-2.57	13.896	2103.891	0.386	0.467
4.877	-2.60	12.680	1875.769	0.348	0.473
4.389	-2.62	11.499	1675.191	0.314	0.476
3.818	-2.63	10.041	1451.711	0.273	0.478
3.275	-2.65	8.679	1235.849	0.234	0.482
2.519	-2.67	6.726	943.446	0.180	0.485
1.887	-2.68	5.057	704.104	0.135	0.487
1.284	-2.71	3.480	473.801	0.092	0.493
0.678	-2.72	1.844	249.265	0.048	0.495
0.058	-2.74	0.159	21.168	0.004	0.498
0.044	-2.72	0.120	16.176	0.003	0.495

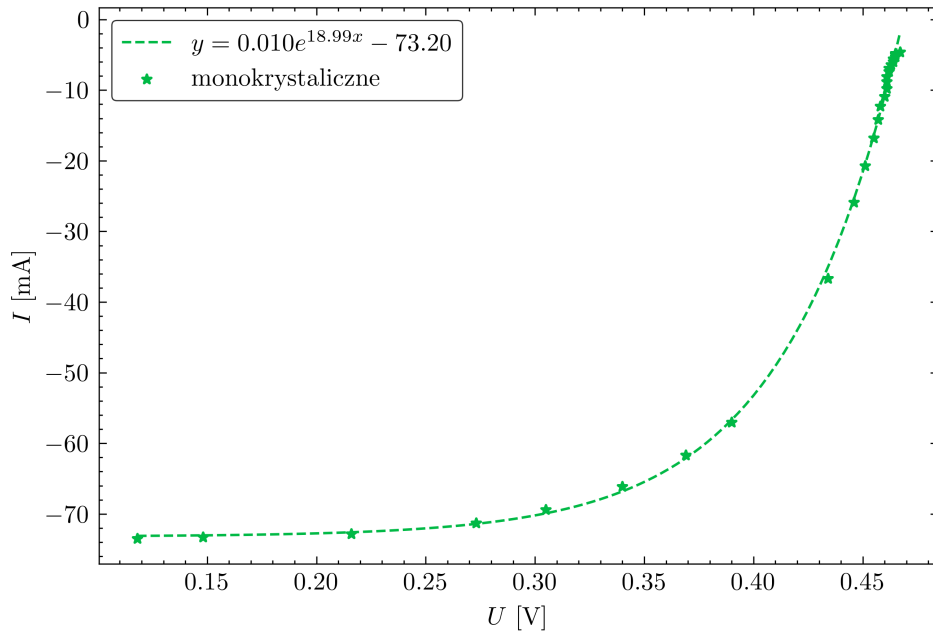
6 Opracowanie wyników

6.1 Badanie charakterystyki prądowo-napięciowej.

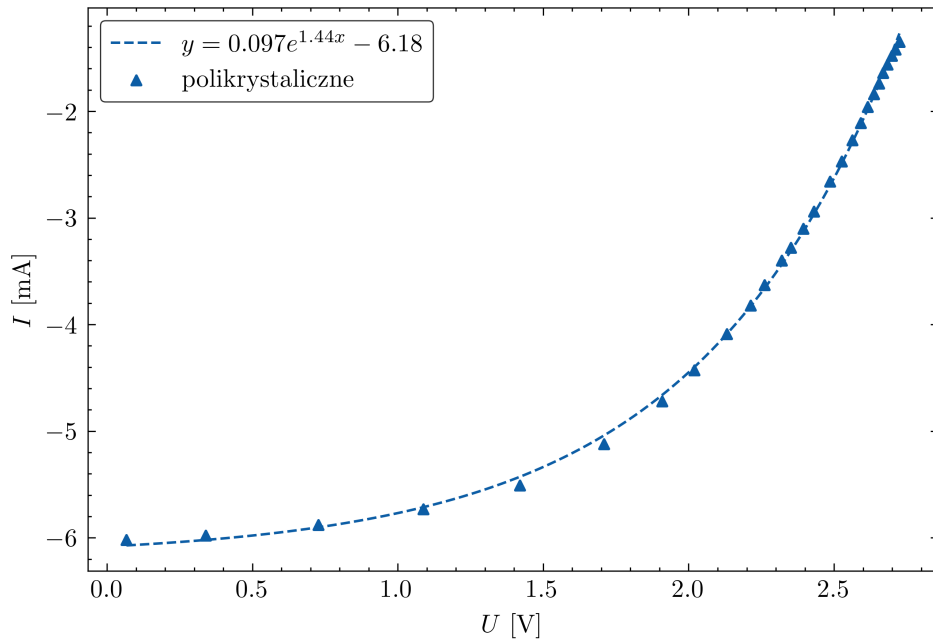
Charakterystyka prądowo-napięciowa fotoogniwa według teorii wyraża się wzorem:

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

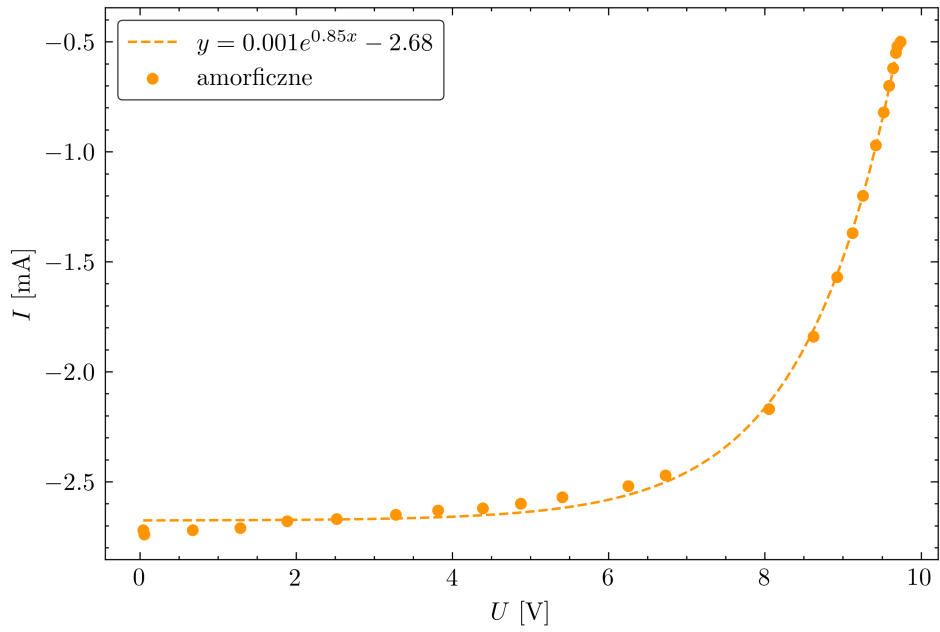
Zatem wykresy $I = f(U)$ dla poszczególnych ogniw powinny przyjmować kształt krzywej wykładniczej: $y = ae^{bx} + c$, by to sprawdzić rysujemy wykres $I = f(U)$ dla każdego ogniwa, a następnie dopasowujemy krzywą wykładniczą.



Rysunek 3: Charakterystyka prądowo-napięciowa dla ogniwa monokrystalicznego z dopasowaną krzywą wykładniczą.

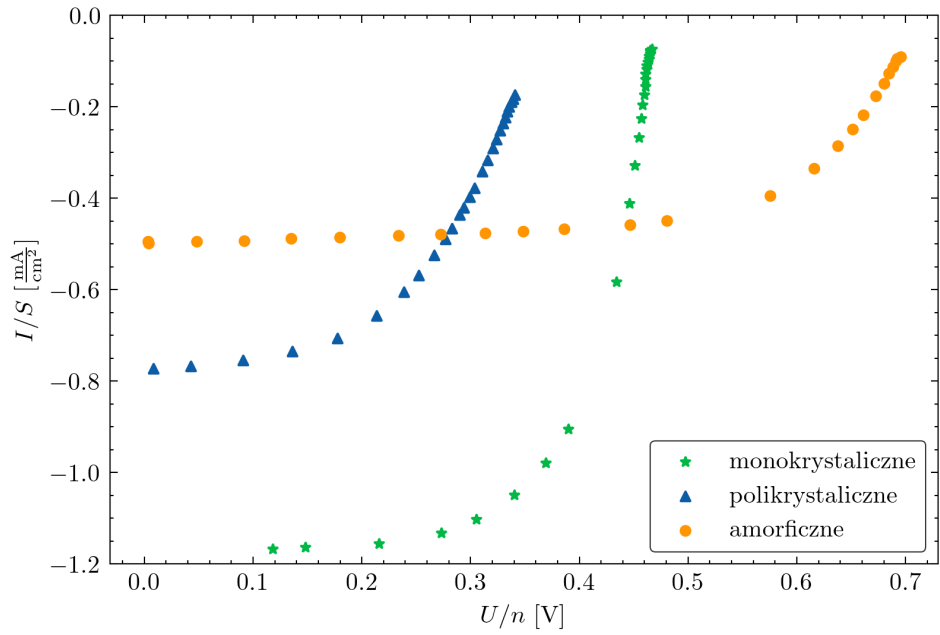


Rysunek 4: Charakterystyka prądowo-napięciowa dla ogniwa polikrystalicznego z dopasowaną krzywą wykładniczą.



Rysunek 5: Charakterystyka prądowo-napięciowa dla ogniwa amorficznego z dopasowaną krzywą wykładniczą.

W celu porównania charakterystyk pomiędzy fotoogniwami wykonujemy wspólny wykres $I/S = f(U/n)$.



Rysunek 6: Wspólny wykres znormalizowanych charakterystyk: $I/S = f(U/n)$

6.2 Sprawność ogniw

By obliczyć sprawność ogniwa potrzebujemy mocy maksymalnej. Moc maksymalną dla każdego fotoogniwa możemy odczytać z tabeli pomiarów. Uznajemy, że

- dla ogniwa polikrystalicznego i amorficznego $u(U) = 0.01 \text{ V}$; $U(I) = 0.02 \text{ mA}$
- dla ogniwa monokrystalicznego $u(U) = 0.01 \text{ V}$; $U(I) = 0.1 \text{ mA}$, niepewność I uznajemy za większą w porównaniu z innymi fotoogniwami, ponieważ musieliśmy użyć szerszego zakresu badając to ogniwo.

Wybraliśmy takie niepewności z racji wahań przyrządów pomiarowych.

Niepewność P_{\max} obliczamy z prawa przenoszenia niepewności:

$$u(P_{\max}) = \sqrt{\left[\frac{\partial P_{\max}}{\partial I} \cdot u(I)\right]^2 + \left[\frac{\partial P_{\max}}{\partial U} \cdot u(U)\right]^2} = \sqrt{[U \cdot u(I)]^2 + [I \cdot u(U)]^2}$$

Sprawność ogniwa wyraża się wzorem:

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

Zatem jej niepewność to :

$$u(\eta) = \sqrt{\left[\frac{\partial \eta}{\partial P_{\max}} u(P_{\max})\right]^2 + \left[\frac{\partial \eta}{\partial \Phi} u(\Phi)\right]^2} = \sqrt{\left[\frac{1}{\Phi n S} u(P_{\max})\right]^2 + \left[\frac{-P_{\max}}{\Phi^2 n S} u(\Phi)\right]^2}$$

Zatem dla ogniwa monokrystalicznego:

$$P_{\max} = 22.767 \text{ mW}$$

$$U = 0.369 \text{ V}$$

$$I = 61.7 \text{ mA}$$

$$\eta = \frac{22.767 \text{ mW}}{56.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 63 \text{ cm}^2} = 6.4188\%$$

$$u(P_{\max}) = \sqrt{(0.369 \text{ V} \cdot 0.1 \text{ mA})^2 + (61.7 \text{ mA} \cdot 0.01 \text{ V})^2} = 0.62 \text{ mW}$$

$$u(\eta) = \sqrt{\left(\frac{1}{56.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 63 \text{ cm}^2} \cdot 0.62 \text{ mW}\right)^2 + \left(\frac{-22.767 \text{ mW}}{(56.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2})^2 \cdot 63 \text{ cm}^2} \cdot 0.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)^2} = 0.19\%$$

Dla ogniwa polikrystalicznego:

$$P_{\max} = 9.010 \text{ mW}$$

$$U = 1.909 \text{ V}$$

$$I = 4.72 \text{ mA}$$

$$\eta = \frac{9.010 \text{ mW}}{56.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 62.4 \text{ cm}^2} = 2.5648\%$$

$$u(P_{\max}) = \sqrt{(1.909 \text{ V} \cdot 0.02 \text{ mA})^2 + (4.72 \text{ mA} \cdot 0.01 \text{ V})^2} = 0.061 \text{ mW}$$

$$u(\eta) = \sqrt{\left(\frac{1}{56.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 62.4 \text{ cm}^2} \cdot 0.061 \text{ mW}\right)^2 + \left(\frac{-9.010 \text{ mW}}{(56.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2})^2 \cdot 62.4 \text{ cm}^2} \cdot 0.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)^2} = 0.029\%$$

Dla ogniwa amorficznego:

$$\begin{aligned}
P_{\max} &= 17.479 \text{ mW} \\
U &= 8.055 \text{ V} \\
I &= 2.17 \text{ mA} \\
\eta &= \frac{17.479 \text{ mW}}{56.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 77 \text{ cm}^2} = 4.0320\% \\
u(P_{\max}) &= \sqrt{(8.055 \text{ V} \cdot 0.02 \text{ mA})^2 + (2.17 \text{ mA} \cdot 0.01 \text{ V})^2} = 0.17 \text{ mW} \\
u(\eta) &= \sqrt{\left(\frac{1}{56.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 77 \text{ cm}^2} \cdot 0.17 \text{ mW}\right)^2 + \left(\frac{-17.479 \text{ mW}}{(56.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2})^2 \cdot 77 \text{ cm}^2} \cdot 0.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)^2} = 0.052\%
\end{aligned}$$

Wyniki naszych obliczeń przedstawiamy w postaci tabeli:

Tabela 5: Moc maksymalna oraz sprawności dla poszczególnych ogniw

Typ ogniwa	P_{\max} [mW]	$u(P_{\max})$ [mW]	η [%]	$u(\eta)$ [%]
Monokrystaliczne	22.77 mW	0.62 mW	6.42%	0.19%
Polikrystaliczne	9.010 mW	0.061 mW	2.565%	0.029%
Amorficzne	17.48 mW	0.17 mW	4.032%	0.052%

Największą sprawność posiada ogniwo monokrystaliczne wynoszące 6.42%. Otrzymane wartości sprawności ogniw są niższe, niż przewidywane. Ogniwa monokrystaliczne uzyskując sprawność od 16 % do 22 %. Może to być spowodowane: wadami badanego układu, zanieczyszczeniom na powierzchni ogniw lub złym pomiarem natężenia światła. Warto zwrócić uwagę na fakt, iż doświadczenie było wykonywane w dużej sali fizycznej gdzie otaczające światło mogło się często zmieniać.

6.3 Gęstość prądu zwarcia oraz napięcie przypadające na sekcję

Tabela 6: Gęstość prądu zwarcia oraz napięcie przypadające na sekcję dla poszczególnych rodzajów ogniw.

Typ ogniwa	$j = \frac{I}{S}$ [$\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$]	$\frac{U}{n}$ [V]
Monokrystaliczne	0.979	0.369
Polikrystaliczne	0.605	0.239
Amorficzne	0.395	0.575

Ogniwo monokrystaliczne posiada największą gęstość prądu zwarcia, a ogniwo amorficzne ma największe napięcie przypadające na sekcję.

7 Wnioski

W wyniku doświadczenia obliczyliśmy sprawności różnych trzech różnych rodzajów fotoogniw. Otrzymane sprawności ogniw są niższe niż przewidywane (monokrystaliczne uzyskują zazwyczaj sprawność od 16% do 22% - u nas w doświadczeniu 6.42%). Może to być spowodowane wadami badanego układu, zanieczyszczeniom na powierzchni ogniw lub złym pomiarem natężenia światła. Z naszych obliczeń wynika, że największą sprawność spośród badanych ogniw ma ogniwo monokrystaliczne.

Posiada ono również najwyższą gęstość prądu zwarcia. Ogniwo amorficzne ma natomiast największe napięcie przypadające na sekcję.

Używając otrzymanych pomiarów stworzyliśmy wykresy zależności $I = f(U)$. Zgodnie z przewidywaniami wykresy te przyjmują kształt krzywej wykładniczej.