POLITECHNIKA WROCŁAWSKA	
Wydział PPT	KATEDRA INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ
Laboratorium	**PODSTAWY BIOFOTONIKI**
Ćwiczenie nr 4	**Pomiary fotometryczne - badanie właściwości fizycznych fotoogniw**

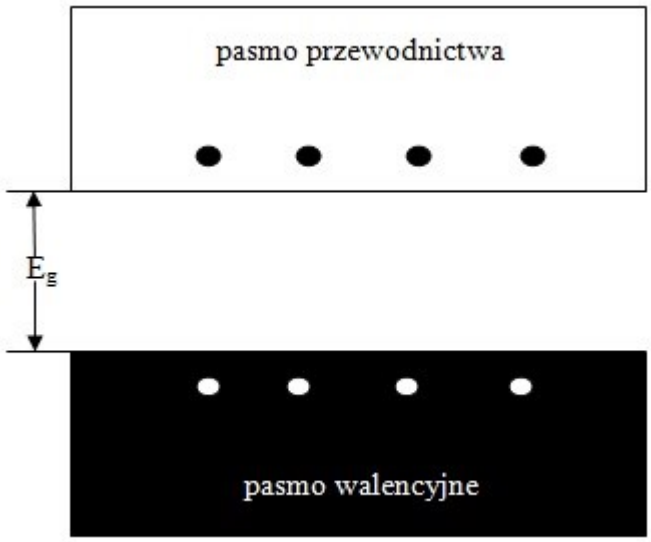
1. WSTĘP TEORETYCZNY

1.1. FOTOOGNIWO - PODSTAWY FIZYCZNE

Fotoogniwa są elementami półprzewodnikowymi, które dokonują konwersji energii świetlnej na energię elektryczną. Półprzewodniki możemy podzielić na:

- półprzewodniki samoistne,
- półprzewodniki domieszkowane [1].

Jak sama nazwa wskazuje - półprzewodniki samoistne nie zawierają domieszek. Charakteryzują się one tym, że w temperaturze zera bezwzględnego (0K) wiązania kowalencyjne, które łączą jądra kryształu są nienaruszone i wszystkie elektrony znajdują się w paśmie walencyjnym, nie ma natomiast żadnych elektronów w paśmie przewodnictwa. W takim przypadku można powiedzieć, że półprzewodnik jest izolatorem. Wraz ze wzrostem temperatury następuje rozrywanie wiązań i część elektronów pokonuje pasmo wzbronione E_g, czyli obszar między pasmem walencyjnym, a pasmem przewodnictwa, tym samym tworząc w paśmie walencyjnym dziury, czyli ładunki dodatnie (Rys. 1.1) [1, 2].

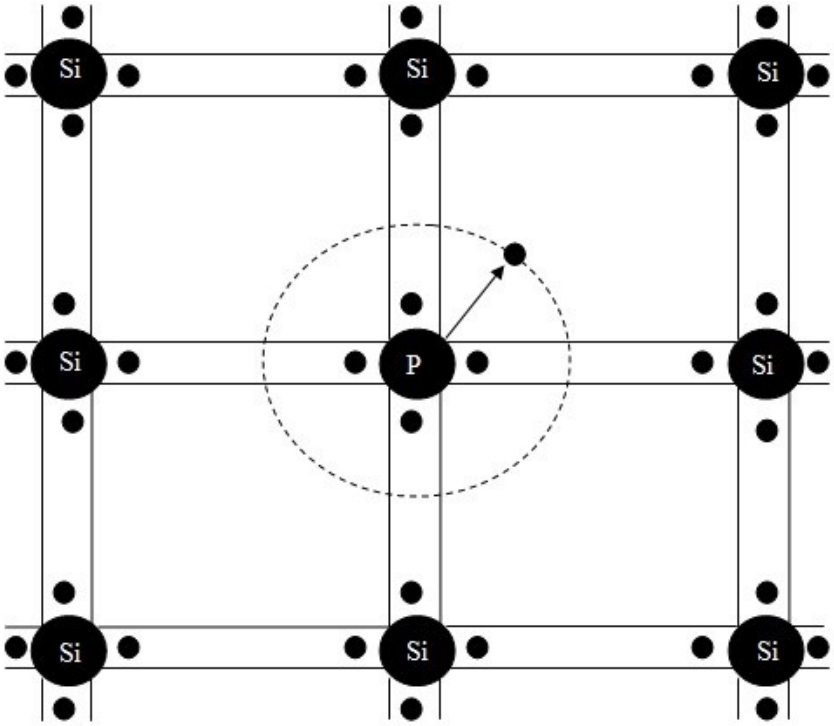


Rys. 1.1 Przejście elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa na skutek drgań termicznych (rysunek wykonany samodzielnie na podstawie [2]

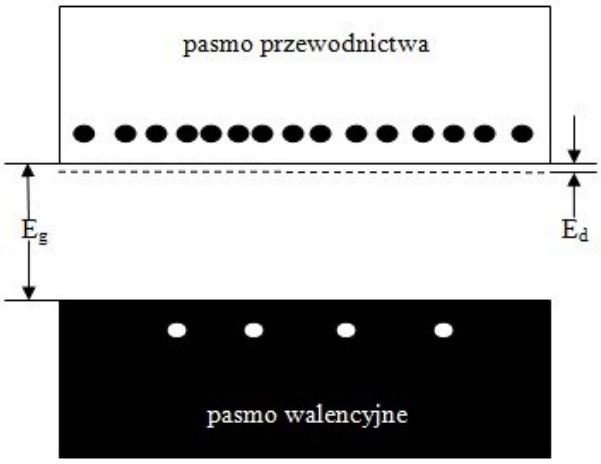
Okazuje się jednak, że poprzez wbudowanie w strukturę półprzewodnika domieszki, można uzyskać znacznie lepsze przewodnictwo elektryczne tego materiału. Stosując różne domieszki można uzyskać następujące rodzaje półprzewodników:

- półprzewodniki typu n,
- półprzewodniki typu p [1, 2].

Fotoogniwa najczęściej wykonuje się z krzemu, czyli półprzewodnika, posiadającego 4 elektrony walencyjne, dlatego na jego przykładzie wyjaśnię oba typy domieszkowania. Jeśli w strukturę krzemu wbudujemy pierwiastek z V grupy układu okresowego, czyli np. fosfor, który posiada 5 elektronów walencyjnych, to fosfor utworzy wiązania z czterema sąsiednimi atomami krzemu, a piąty elektron będzie bardzo słabo związany z rdzeniem jonu fosforu (Rys. 1.2). Dzięki temu elektron może łatwo zostać oderwany i przejść do pasma przewodnictwa. Mówi się, że te słabo związane elektrony obsadzają tak zwane poziomy donorowe, które znajdują się w niedużej odległości E_d od dna pasma przewodnictwa (Rys. 1.3). Z uwagi na to, że w tym przypadku atom fosforu łatwo dostarcza elektron do pasma przewodnictwa to nazywa się go donorem. Sam półprzewodnik z kolei określa się mianem półprzewodnika typu n (od angielskiego negative). W półprzewodnikach tego typu nośnikami większościowymi są elektrony, a mniejszościowymi dziury [1, 2].

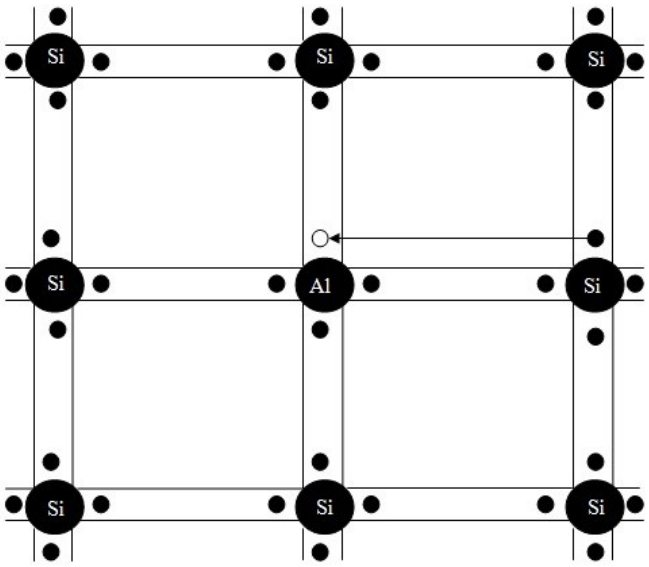


Rys. 1.2 Wbudowanie atomu fosforu w strukturę krzemu i prezentacja nadmiarowego elektronu (rysunek wykonany samodzielnie na podstawie [2])

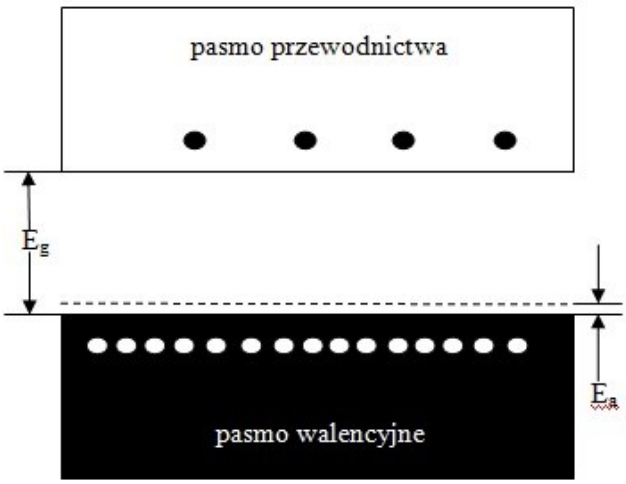


Rys. 1.3 Półprzewodnik typu n (rysunek wykonany samodzielnie na podstawie [2])

Półprzewodniki można również domieszkować za pomocą pierwiastków z III grupy układu okresowego. Takim pierwiastkiem jest np. glin, który posiada tylko 3 elektrony walencyjne. Jeśli w strukturę krzemu wbudujemy glin to w jednym z wiązań brakuje elektronu, czyli jest dziura (Rys. 1.4). Przy użyciu niewielkiej energii następuje wyrwanie elektronu z sąsiedniego wiązania pomiędzy atomami krzemu i zapełnienie tej dziury. Tworzy się kolejna dziura, która z kolei może być zapełniona przez elektron wyrwany z innego wiązania. Proces ten powtarza się co powoduje ruch dziury w paśmie walencyjnym półprzewodnika. Glin nazywa się w tym przypadku akceptorem, ponieważ łatwo przyjmuje on elektron z pasma walencyjnego krzemu. Tuż nad pasmem walencyjnym, w pewnej odległości E_a, tworzą się pasma akceptorowe gromadzące owe elektrony (Rys. 1.5). Dzięki temu w paśmie walencyjnym powstaje duża liczba dziur, które są tutaj nośnikami większościowymi, a co za tym idzie rośnie przewodnictwo elektryczne półprzewodnika. W tym przypadku elektrony pełnią rolę nośników mniejszościowych. Takie półprzewodniki nazywa się półprzewodnikami typu p (od angielskiego positive) [1, 2].



Rys. 1.4 Wbudowanie atomu glinu w strukturę krzemu i prezentacja zapełniania powstałej dziury (rysunek wykonany samodzielnie na podstawie [2])



Rys. 1.5 Półprzewodnik typu p (rysunek wykonany samodzielnie na podstawie [2])

Po połączeniu półprzewodnika typu n i typu p uzyskuje się złącze p-n, czyli element będący sercem wielu urządzeń półprzewodnikowych, np. fotoogniw. Po utworzeniu takiego złącza następuje dyfuzja nośników większościowych z obszaru półprzewodnika typu n do półprzewodnika typu p i odwrotnie. W obszarze półprzewodnika typu n jest duże nagromadzenie dodatnich jonów donorów. W samodzielnym półprzewodniku typu n ich ładunek jest kompensowany przez ujemnie naładowane elektrony znajdujące się w paśmie walencyjnym. Jednakże, gdy powstanie złącze p-n i elektrony z obszaru n dyfundują do obszaru p to dodatnio naładowane jądra donorów zostają unieruchomione blisko płaszczyzny złącza. Elektrony, które dotarły do obszaru p szybko rekombinują ze zjonizowanymi akceptorami, tworząc w ten sposób nieruchomy ładunek ujemny blisko płaszczyzny złącza od strony półprzewodnika typu p. Dziury dyfundujące z obszaru półprzewodnika typu p do obszaru półprzewodnika typu n działają podobnie. Dzięki dyfuzji nośników większościowych w płaszczyźnie złącza powstaje ładunek przestrzenny - ujemny od strony półprzewodnika typu p i dodatni od strony półprzewodnika typu n. Obszar tych ładunków nazywa się obszarem zubożonym, gdyż znajduje się tam mało ruchomych nośników ładunku. Dyfuzja nośników większościowych powoduje powstanie tak zwanego prądu dyfuzji. Powstająca w płaszczyźnie złącza bariera potencjału hamuje dyfuzję nośników większościowych. Jednakże nie jest przeszkodą dla nośników mniejszościowych. Różnica potencjałów powstała w obszarze złącza będzie powodować ruch nośników mniejszościowych przez płaszczyznę złącza. Taki ruch nośników mniejszościowych tworzy tak zwany prąd unoszenia, który jest skierowany przeciwnie do prądu dyfuzji. Oczywistym jest zatem, że w złączu p-n pozostającym w równowadze oba prądy się znoszą. W innym przypadku oznaczałoby to niekończący się ruch ładunku z jednej strony złącza na drugą [1, 2, 3, 4].

W celu wytworzenia swobodnego elektronu należy do półprzewodnika dostarczyć odpowiednią energię, która jest co najmniej równa (lub większa) energii przerwy wzbronionej. Taką energię można dostarczyć np. za pomocą fotonów, czyli z wykorzystaniem energii świetlnej. Jeśli foton spowoduje wyrwanie elektronu z pasma walencyjnego półprzewodnika, to występuje tak zwany efekt fotowoltaiczny. Efekt ten zachodzi, gdy spełniony jest następujący warunek:

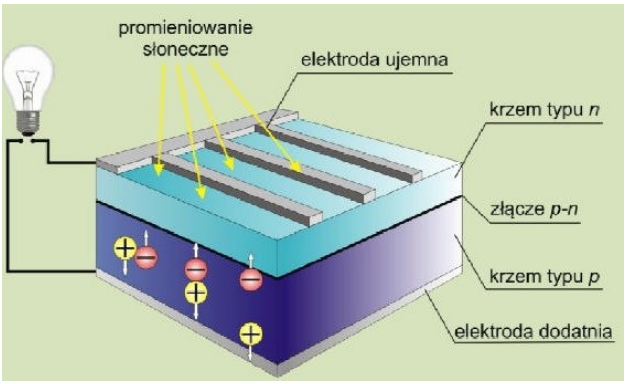
$$E_f = h\nu \geq E_g \tag{1.1}$$

Gdzie:
h - stała Plancka równa $6,62*10^{-34}$ [Js]
v - częstotliwość padającego fotonu [Hz]
E_f - energia padającego fotonu [J]
E_g - energia przerwy wzbronionej [J]

Jeżeli światłem oświetlone zostanie złącze p-n to zarówno w obszarze półprzewodnika typu p jak i półprzewodnika typu n powstaną pary elektron-dziura, oczywiście przy założeniu, że spełniony jest warunek (1.1). Dzięki barierze potencjałów występującej w płaszczyźnie złącza elektrony są przeciągane na stronę obszaru n, a dziury na stronę obszaru p. Tworzy się w ten sposób nierównowaga ładunkowa i tworzy się siła elektromotoryczna, której zamknięcie w zamkniętym obwodzie spowoduje przepływ prądu fotoelektrycznego [1, 5].

Budowa standardowego fotoogniwa jest bardzo prosta (Rys. 1.6). Składa się ono z następujących elementów:

- złącze p-n utworzone w polikrystalicznej lub monokrystalicznej płytce,
- elektroda górna i dolna (elektroda górna musi być odpowiednio skonstruowana, tak aby umożliwić światłu dotarcie do złącza p-n),
- warstwa antyrefleksyjna pokrywająca górną powierzchnię fotoogniwa (jej zadaniem jest zmniejszenie odbicia światła od powierzchni fotoogniwa, dzięki czemu więcej światła dociera do złącza p-n i wzrasta sprawność fotoogniwa) [1].

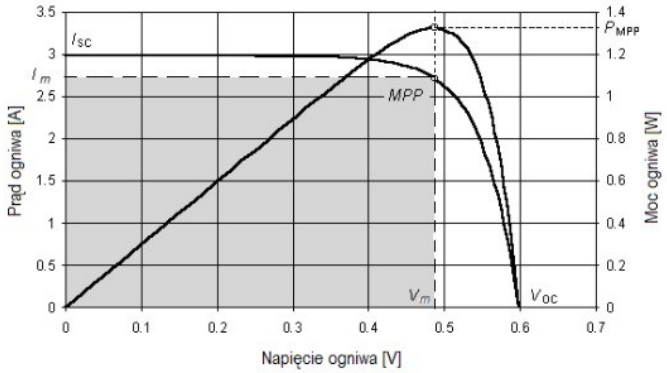


Rys. 1.6 Budowa fotoogniwa [6]

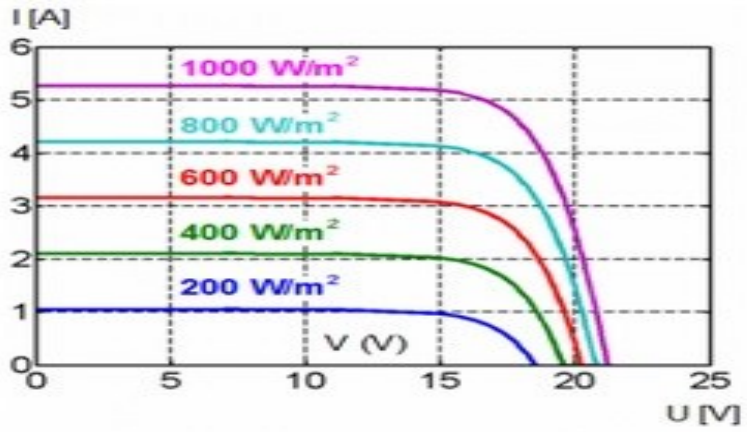
Dla fotoogniw, podobnie jak np. dla diod półprzewodnikowych, wykonuje się charakterystykę prądowo-napięciową, czyli zależność natężenia prądu przepływającego przez dany element obwodu od napięcia przyłożonego na końce tego elementu (Rys. 1.7). Wraz ze wzrostem natężenia oświetlenia padającego na fotoogniwo następuje duży wzrost natężenia prądu natomiast natężenie oświetlenia nie wpływa istotnie na napięcie (Rys. 1.8). Na wykresie przedstawiającym charakterystykę prądowo-napięciową można również umieścić zależność mocy fotoogniwa od napięcia, co pozwala na wyznaczenie kolejnego parametru jakim jest MPP, czyli punkt mocy maksymalnej. Punktowi mocy maksymalnej odpowiadają oczywiście odpowiednie współrzędne natężenia prądu (I_{MPP}) oraz napięcia (U_{MPP}). Kolejnymi ważnymi punktami na charakterystyce prądowo-napięciowej są napięcie obwodu otwartego (U_{OC}), czyli wartość napięcia przy której natężenie prądu jest równe 0, a także prąd zwarcia (I_{SC}), czyli wartość natężenia prądu przy której napięcie jest równe 0. Parametry te pozwalają na obliczenie współczynnika wypełnienia charakterystyki FF, który

określa jakość fotoogniwa. W idealnym przypadku, gdyby charakterystyka prądowo-napięciowa była prostokątem, to $U_{OC} = U_{MPP}$, a także $I_{SC} = I_{MPP}$, a zatem współczynnik FF wyniósłby 1. W praktyce, dla rzeczywistych fotoogniw ten współczynnik ma wartość zawsze mniejszą od 1 [1].

$$FF = \frac{U_{MPP} I_{MPP}}{U_{OC} I_{SC}} \tag{1.2}$$



Rys. 1.7 Charakterystyka prądowo-napięciowa oraz zależność mocy od napięcia dla fotoogniwa [7]



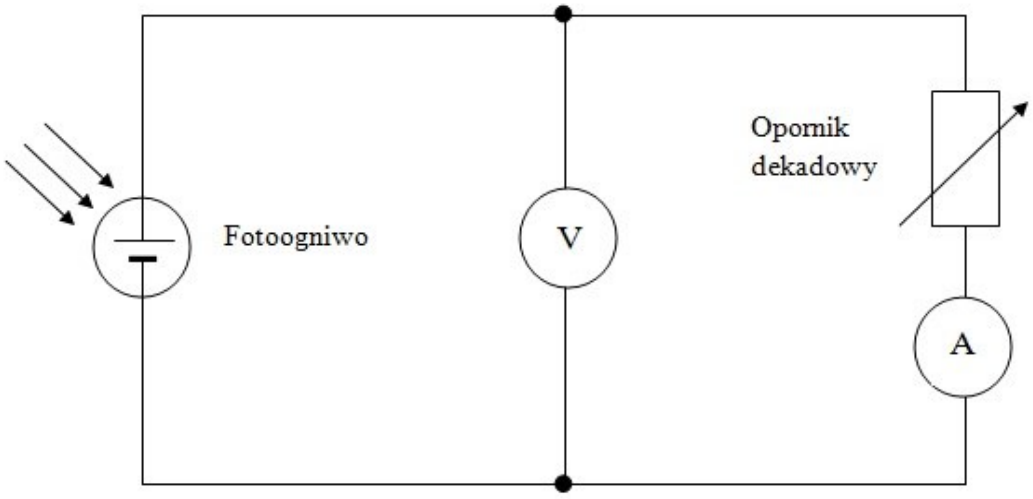
Rys. 1.8 Przebieg charakterystyki prądowo-napięciowej fotoogniwa w zależności od natężenia oświetlenia [8]

2. MATERIAŁY I METODY

Do skonstruowania układu pomiarowego (Rys. 1.9) należy wykorzystać następujące przyrządy:

- ława optyczna,
- multimetr Metex w roli woltomierza,
- multimetr Metex w roli amperomierza,
- opornik dekadowy
- oświetlacz halogenowy Fiber-Lite DC-950 o długości fali $\lambda > 370$ nm,
- krystaliczne ogniwo solarne Sol Expert SM1200 (długość netto: 60 mm, szerokość netto: 45 mm, napięcie znamionowe: 1 V, prąd znamionowy: 200 mA) [9],

- krystaliczne ogniwo solarne Sol Expert SM330 (długość netto: 60 mm, szerokość netto: 30 mm, napięcie znamionowe: 0,58 V, prąd znamionowy: 330 mA) [9],
- krystaliczne ogniwo solarne Sol Expert SM80L (długość netto: 45mm, szerokość netto: 25 mm, napięcie znamionowe: 0,5 V, prąd znamionowy: 80 mA) [9].



Rys. 1.9 Schemat układu pomiarowego

3. PRZEBIEG ĆWICZENIA

a) Złożyć układ według schematu (Rys. 1.9).
b) Ustawić lampę w odległości 30 cm od fotoogniwa. Zanotować wartość natężenia prądu (I_{SC}) dla rezystancji na rezystorze dekadowym R = 0Ω (U = 0V).
c) Zwiększać rezystancję na rezystorze dekadowym i znaleźć taki opór, dla którego pojawi się wskazanie woltomierza różne od 0V (opór ten dobrać możliwie jak najmniejszy).
d) Kontynuować zwiększanie rezystancji na rezystorze dekadowym i za każdym razem notować wskazania woltomierza i amperomierza (w zakresie 0-1000Ω co 50Ω, w zakresie 1000-10000Ω co 1000Ω, powyżej 10000Ω co 10000Ω; **UWAGA: każdy rodzaj fotoogniwa ma inną charakterystykę prądowo-napięciową, dlatego podczas pomiarów należy kontrolować czy zmiany napięcia i/lub natężenia pomiędzy kolejnym punktami pomiarowymi nie są zbyt duże. W takim wypadku punkty pomiarowe w danym zakresie należy zagęścić).**
e) Pomiar zakończyć w momencie, gdy amperomierz wskaże 0A i zanotować wartość napięcia otwartego obwodu U_{OC} (czyli wartość napięcia dla I = 0A).
f) Podpunkty b-e powtórzyć dla innych odległości lampy od fotoogniwa (np. 50 cm i 70 cm) oraz dla innych rodzajów fotoogniw dostarczonych przez prowadzącego.

3.1.1 Opracowanie wyników

a) Dla każdego fotoogniwa wyznaczyć charakterystyki prądowo-napięciowe dla różnych odległości lampy od fotoogniwa i umieścić je na wspólnym wykresie.

b) Dla każdego fotoogniwa wyznaczyć charakterystyki P(U) dla różnych odległości lampy od fotoogniwa i umieścić je na wspólnym wykresie (moc wyznaczyć na podstawie równania (3.1)). Zaznaczyć na wykresie punkty mocy maksymalnej (MPP).
c) Obliczyć współczynnik wypełnienia charakterystyki FF (1.2).
Na podstawie uzyskanych danych wyznaczono współczynnik wypełnienia charakterystyk, a także zależność mocy od napięcia, wykorzystując wzór na moc:

$$P = U * I \tag{3.1}$$

d) Wykonać rachunek niepewności pomiaru.
e) Sformułować wnioski.

Opracowanie: dr inż. Iwona Hołowacz

Katedra Inżynierii Biomedycznej Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej

[1] E. Klugmann-Radziemska, *Fotowoltaika w teorii i praktyce*, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2010
[2] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy fizyki*, tom 5, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003
[3] A. Kikukawa, S. Hosaka, R. Imura, *Silicon pn junction imaging and characterizations using sensitivity enhanced Kelvin probe force microscopy*, Applied Physics Letters, 1995, 66, 3510-3512
[4] W. Shockley, *The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors*, Bell System Technical Journal, 1949, 28, 435-489
[5] B. A. Gregg, M. C. Hanna, *Comparing organic to inorganic photovoltaic cells: Theory, experiment, and simulation*, Journal of Applied Physics, 2003, 93, 3605-3614
[6] http://www.instsani.pl/folowolt.htm
[7] http://www.dsod.pl/materials/PV05_A00.pdf
[8] http://www.freelight.eu/wikisolar/akademia-sloneczna/dlaczego-mppt-jest-taki-wazny/
[9] www.conrad.pl