

OGNIWA FOTOWOLTAICZNE - BUDOWA, DZIAŁANIE, RODZAJE

B. Chwieduk

Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska

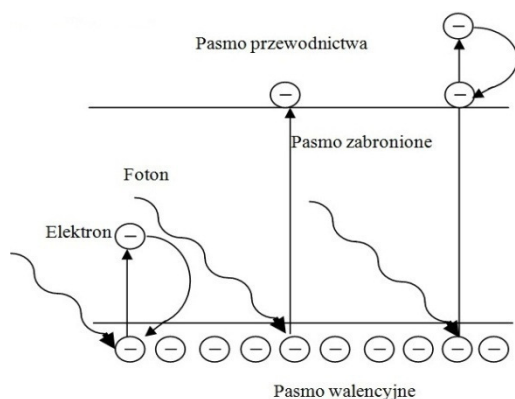
STRESZCZENIE

W artykule opisano sposób działania ogniw fotowoltaicznych wykorzystujących wewnętrzny efekt fotowoltaiczny. Opisano także w jakim celu stosuje się domieszkowanie ogniw fotowoltaicznych oraz jaki ma to wpływ na ich pracę. Przedstawiono charakterystyki pracy ogniw podczas różnych warunków meteorologicznych. Moc ogniw zmienia się w zależności od natężenia promieniowania słonecznego i temperatury otoczenia. W kolejnej części artykułu opisano rodzaje stosowanych ogniw fotowoltaicznych oraz jak rozwijała się fotowoltaika na przestrzeni ostatnich lat. W ostatniej części artykułu przedstawiono wnioski.

SPOSÓB DZIAŁANIA I BUDOWA OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH

W ogniwach fotowoltaicznych występuje bezpośrednia konwersja energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Działanie ogniw fotowoltaicznych opiera się na wewnętrznym efekcie fotowoltaicznym.

Najprostsze ogniwo fotowoltaiczne składa się z dwóch warstw półprzewodnika. Absorbowanie promieniowania słonecznego przez półprzewodnik powoduje przejście elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa lub zwiększenie energii wewnętrznej materiału. W miejscu wybitego elektronu pozostaje dziura, która również może być nośnikiem prądu. Na złączeniu obu półprzewodników (typu n i p) występuje warstwa zaporowa. Na styku półprzewodników o różnym typie przewodnictwa powstaje różnica potencjałów oraz związane z nią pole elektryczne. Generowane przez padające promieniowanie słoneczne elektrony i dziury rozdzielane są przez pole elektryczne i mogą dotrzeć do obwodu zewnętrznego.

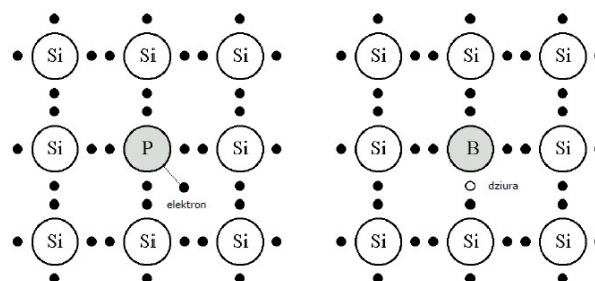


Rys.1. Schemat działania ogniw fotowoltaicznych

Po podłączeniu obciążenia nastąpi przepływ prądu elektrycznego. Ponieważ część fotonów ma mniejszą energię od szerokości przerwy energetycznej półprzewodnika nie wygenerują one par elektron-dziura. W momencie, gdy energia fotonów jest większa od przerwy energetycznej powstaje różnica potencjałów, ale nadwyżka energetyczna danego fotonu nad energię przerwy energetycznej zostaje oddana do otoczenia w postaci ciepła, to powoduje spadek sprawności fotoogniwa.

Domieszkowanie ogniw fotowoltaicznych

Najczęściej stosowanym materiałem przy budowie ogniw fotowoltaicznych jest krzem. Uzyskuje się go przetwarzając piasek (SiO_2). Z teorii wiadomo, że uzyskanie czystego krzemu jest niemożliwe, a materiał bez defektów jest materiałem niestabilnym. Ponadto z czasem pojawiają się w nim niedoskonałości. Do uzyskania odpowiedniej przewodności elektrycznej półprzewodnika typu p i n stosuje się domieszkowanie innymi pierwiastkami. W celu uzyskania półprzewodnika typu n dodajemy do krzemu atomy pierwiastków o większej liczbie elektronów walencyjnych od atomu krzemu (np. antymon, arsen, bizmut czy fosfor). Taką domieszkę nazywamy donorową. Analogicznie półprzewodnik typu p domieszkuje się atomami o mniejszej liczbie elektronów (większej liczbie dziur). Jest to domieszka akceptorowa. Najczęściej stosowane pierwiastki przy domieszkowaniu półprzewodnika typu p to: bor, glin, gal, ind i tal. Na rysunku 2 pokazano strukturę domieszkowanych półprzewodników. Półprzewodnik typu p domieszkowany jest borem, natomiast półprzewodnik typu n fosforem (Jastrzębska G., 2013).



Rys.2. Domieszkowanie półprzewodników

Domieszkowanie półprzewodników pozwala na utworzenia złącza p-n. Złącze to jest diodą, w której możliwa jest separacja ujemnych i dodatnich nośników energii przez występujące w nim pole elektryczne.

W przypadku braku złącza nośniki nie docierają do obwodu zewnętrznego, a jedynie rekombinowały.

OKREŚLANIE MOCY ORAZ SPRAWNOŚCI OGNIW

Aby umożliwić producentom i konsumentom porównywanie poszczególnych modułów fotowoltaicznych badania ich mocy i sprawności przeprowadza się w ściśle określonych warunkach. Jednocześnie przy określaniu mocy i sprawności tworzy się wykresy zależności napięcia od prądu tzw. charakterystyki napięciowo-prądowe oraz napięcia od mocy. Warunki STC (Standard Test Conditions) w jakich bada się ogniwa fotowoltaiczne są następujące (Szymański B., 2013):

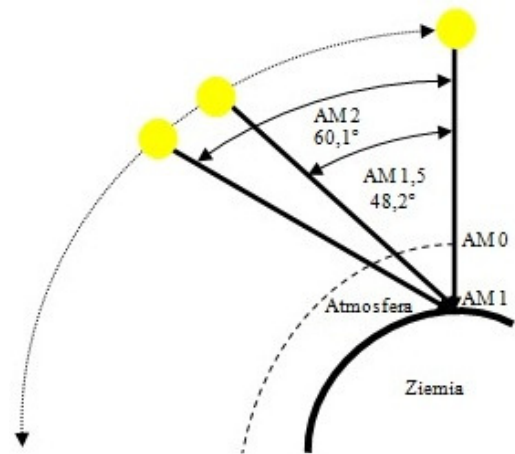
- natężenie promieniowania słonecznego podczas badania ogniwa wynosi 1000 W/m^2 ,
- temperatura otoczenia wynosi 25°C ,
- masa optyczna atmosfery wynosi AM 1,5.

Producenci modułów fotowoltaicznych często podają sprawność i moc modułów także w warunkach NOCT (Normal Operating Cell Temperature). Moc ogniwa fotowoltaicznego wyznaczana w warunkach NOCT jest niższa od mocy tego samego ogniwa badanego w warunkach STC. W przypadku badania ogniwa fotowoltaicznego w warunkach NOCT wyznaczana jest temperatura modułu przy następujących warunkach atmosferycznych:

- natężenie promieniowania słonecznego podczas badania ogniwa wynosi 800 W/m^2 ,
- temperatura otoczenia wynosi 20°C ,
- masa optyczna wynosi AM 1,5,
- prędkość wiatru 1 m/s .

Parametry modułów wyznaczone w warunkach NOCT są bliższe rzeczywistym, osiąganym podczas normalnego użytkowania.

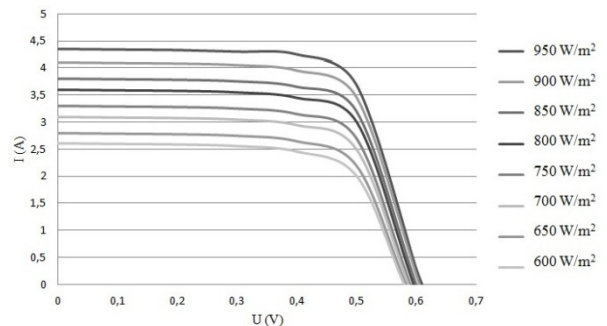
Współczynnik optycznej masy atmosfery (powietrza) (Air Mass) jest miarą długości drogi przebytej przez promieniowanie słoneczne w atmosferze. Natężenie promieniowania słonecznego słabnie w atmosferze, ponieważ podczas przechodzenia przez atmosferę ulega rozproszeniu, odbiciu oraz pochłonięciu. Im dłuższa droga promieniowania słonecznego docierającego do poziomu morza tym niższe jest jego natężenie. AM 0 dotyczy promieniowania poza atmosferą, AM równe jest 1 dla Słońca w zenicie, a AM równe 1,5 odpowiada kątowi wzniesienia Słońca równemu $48,2^\circ$, przy kącie azymutalnym równym 0° . Na rysunku 3 przedstawiono wartości współczynnika optycznej masy atmosfery dla wybranych kątów padania promieniowania słonecznego.



Rys.3. Współczynniki AM dla wybranych kątów padania promieniowania słonecznego

Charakterystyka napięciowo-prądowa oraz zależność napięcia od mocy

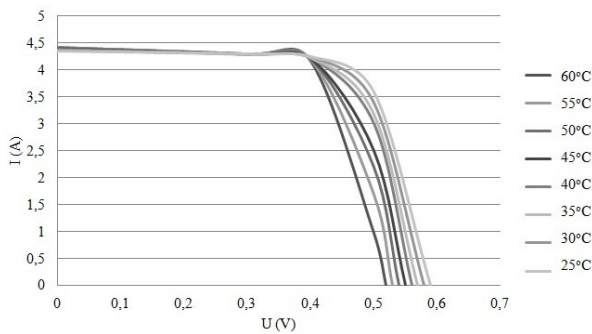
Z wykresu zależności napięcia od prądu odczytać można moc maksymalną ogniwa w rozpatrywanych warunkach natężenia promieniowania słonecznego i danej temperaturze. Ponieważ moc i sprawność modułu fotowoltaicznego zależą od natężenia promieniowania słonecznego i temperatury najczęściej tworzy się kilka wykresów dla różnych wartości tych parametrów. Na rysunku 4 przedstawiono wpływ natężenia promieniowania słonecznego na napięcie i natężenie prądu w ogniwie. Zmiana tych parametrów wpływa na moc maksymalną ogniwa słonecznego.



Rys.4. Wpływ natężenia promieniowania słonecznego na wielkość prądu i napięcia w ogniwie fotowoltaicznym

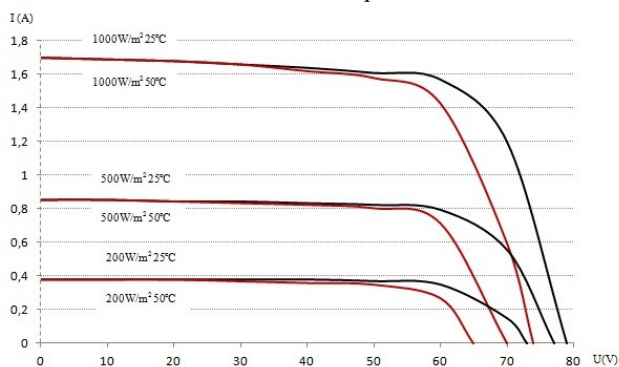
Zmiana natężenia promieniowania słonecznego ma wpływ głównie na natężenie prądu, co jest widoczne na rysunku 4.

Drugim czynnikiem wpływającym na kształt charakterystyki napięciowo-prądowej jest temperatura ogniwa (Rys.5.). Wraz ze wzrostem temperatury ogniwa maleje napięcie w danym ogniwie słonecznym, jednocześnie minimalnie rośnie prąd w ogniwie.



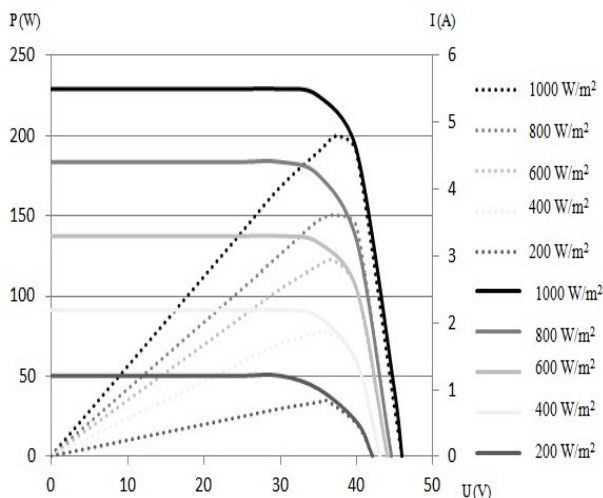
Rys.5. Wpływ temperatury na prąd i napięcie w ogniwie fotowoltaicznym

Na kolejnym wykresie (Rys.6.) porównano charakterystyki napięciowo-prądowe dla sześciu różnych przypadków. Dla natężeń promieniowania słonecznego wynoszących odpowiednio 1000W/m^2 , 500W/m^2 i 200W/m^2 oraz dla temperatur 25°C i 50°C .



Rys.6. Wpływ natężenia promieniowania słonecznego i temperatury na prąd i napięcie w ogniwie fotowoltaicznym

Wykres zależności napięcia od mocy ogniwa słonecznego dobrze pokazuje jaką moc aktualnie ma moduł fotowoltaiczny gdy znamy chwilowe napięcie. Na rysunku 7 pokazane są obie wyżej opisane charakterystyki.

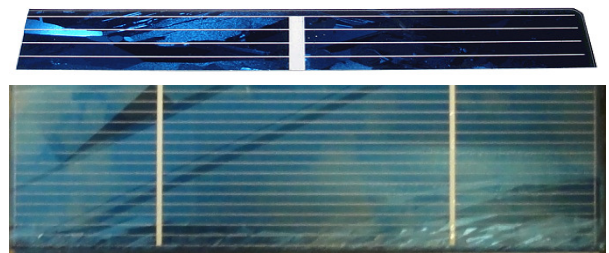


Rys.7. Charakterystyka napięciowo-prądowa oraz zależność napięcia od mocy w ogniwie fotowoltaicznym

RODZAJE OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH

Ogniwa fotowoltaiczne różnią się materiałem, z jakiego są wykonane oraz technologią produkcji dlatego dzieli się je na trzy generacje. Ogniwa z poszczególnych generacji różnią się sprawnością i ceną.

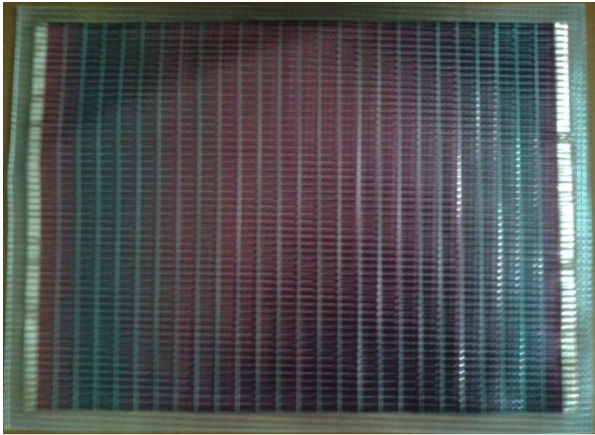
Do pierwszej generacji ogniw słonecznych zalicza się ogniwa z krzemu krystalicznego, stanowią one ponad 90% światowej produkcji. Ogniwa te dzielą się na mono i polikrystaliczne. Ich największymi zaletami jest wysoka sprawność przekraczająca 16% oraz dostępność materiału, z którego są zbudowane. Krzem jako składnik piasku jest jednym najpowszechniejszych pierwiastków występujących na ziemi. Wysoka sprawność ogniw krzemowych wynika między innymi z odpowiedniej przerwy energetycznej w ich budowie atomowej. Fotony o małej energii (około 1,1 eV) są w stanie wywołać efekt fotowoltaiczny. Ogniwa monokrystaliczne mają wyższą sprawność od polikrystalicznych. Sprawność tych pierwszych może wynosić nawet 18%. Niewątpliwą wadą ogniw z krzemu krystalicznego jest energochłonność procesu ich produkcji. Uzyskanie krzemu o dużej czystości jest z tego powodu bardzo drogie. Do produkcji ogniw krzemowych wykorzystuje się również znacznie więcej materiału. Krzem posiada niski współczynnik absorpcji, przez co konieczne jest wykonanie grubej warstwy, która zaabsorbuje promieniowanie słoneczne.



Rys.8. Ogniwa polikrystaliczne

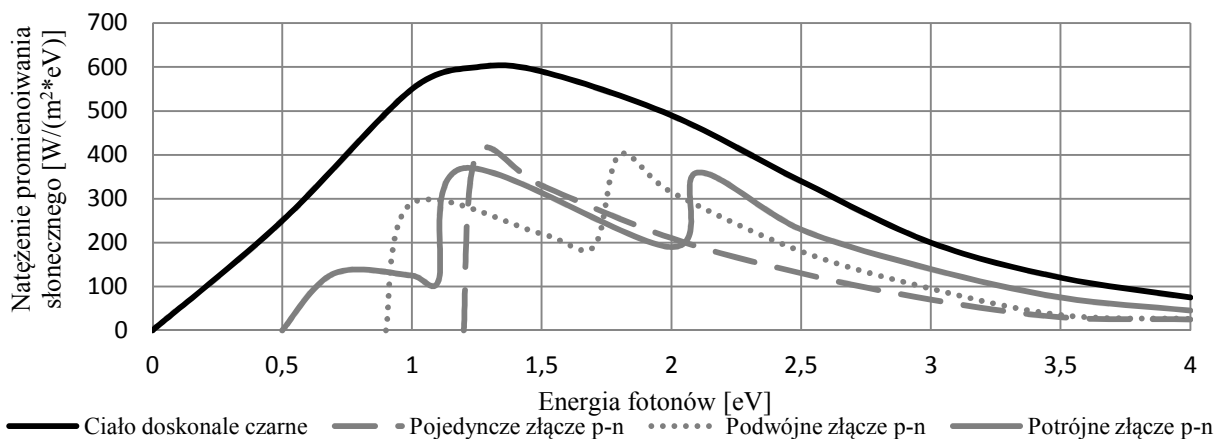
Drugą generację ogniw słonecznych stanowią ogniwa cienkowarstwowe. Najczęściej wykonuje się je z krzemu amorficznego, tellurku kadmu lub związków potrójnych lub poczwórnych miedzi, indu, galu i selenu. Krzem amorficzny jest to krzem o nieuporządkowanej strukturze. Posiada on wiele defektów przez co jego sprawność jest niższa od sprawności ogniw krystalicznych. Dodatkową wadą tych ogniw jest trwały spadek sprawności już po kilku dniach użytkowania. Spadek ten wynika z występowania niewielkich pustych przestrzeni w strukturze krzemu amorficznego. Część ładunków nie jest wykorzystywanych w procesie konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Podczas rekombinacji sieć krystaliczna zostaje uszkodzona. Sprawność ogniwa spada o około 20% początkowej wartości sprawności. Zaletą cienkowarstwowych ogniw słonecznych jest ich niska waga i możliwość montowania na giętkim podłożu. Ogniwa te mogą być instalowane w wielu miejscach, w których nie można zastosować cięższych ogniw z krzemu krystalicznego. Powodem coraz większej ich

popularności jest także cena. Ogniwa cienkowarstwowe w założeniu powinny być trzykrotnie tańsze niż ogniwa pierwszej generacji. Różnice cenowe nie są jednak tak duże, dlatego ogniwa pierwszej generacji wciąż dominują na rynku.



Rys.9. Ogniwa drugiej generacji z krzemu amorficznego

Trzecią generacją ogniw fotowoltaicznych są ogniwa tandemowe oraz ogniwa organiczne. Do budowy ogniw organicznych wykorzystuje się polimery. Zaletami tych ogniw jest bardzo niska cena związana z tanimi materiałami oraz prosta konstrukcja. Dużą wadą jest natomiast ich niska sprawność wynosząca tylko kilka procent. Przy małej powierzchni dostępnego terenu pod budowę systemu fotowoltaicznego ogniwa te nie sprawdzają się. W ogniwach wielozłączowych (tandemowych) wykorzystuje się przynajmniej dwa złącza p-n o różnych przerwach energetycznych. Materiały, z których zbudowane są ogniwa tandemowe absorbują energię promieniowania słonecznego o różnych długościach fal. Dzięki takiej budowie zwiększa się sprawność ogniw. Ogniwa tandemowe mogą zawierać więcej niż dwa złącza p-n. Im większy przedział długości fal jaka może być zaabsorbowana przez ogniwo słoneczne tym większa jego sprawność. Sprawność ogniw wielozłączowych sięga nawet 40% (Jastrzębska G., 2013, Chwieduk B., Chwieduk M., Duda M., Furła P., Koziół Ł., Pieczykolan B., Szmit M., Świątek B., 2010).



Rys.10. Energia jaką może zaabsorbować ogniwo jedno, dwu i trzy złączowe o różnych przerwach energetycznych

ROZWÓJ FOTOWOLTAIKI

W połowie dwudziestego wieku, kiedy opanowano technologię wytwarzania krzemu o wysokim stopniu czystości produkcją ogniw fotowoltaicznych zainteresowały się przedsiębiorstwa komercyjne. W latach pięćdziesiątych sprawność ogniw osiągnęła 6%. Pierwotnie ogniwa fotowoltaiczne wytwarzano z odpadów elektronicznych, jednakże w tej chwili krzem wytwarzany jest specjalnie na potrzeby fotowoltaiki (Jastrzębska G., 2013).

W latach 70-tych ubiegłego wieku nastąpił gwałtowny wzrostu ceny ropy naftowej. Wtedy zauważono możliwość wyczerpania się zasobów energetycznych świata. Zaczęto szukać niekonwencjonalnych rozwiązań, które w przyszłości mogłyby ustrzec świat przed podobnym kryzysem energetycznym. Duży potencjał zauważono w odnawialnych źródłach energii to jest energii wiatru, słońca, biomasy czy wody. Proces bezpośredniej konwersji energii słonecznej na

energię elektryczną był idealnym rozwiązaniem. Ogniwa słoneczne wykorzystujące wewnętrzny efekt fotowoltaiczny nie produkują żadnych zanieczyszczeń, do ich produkcji w większości przypadków wykorzystuje się materiały występujące w dużych ilościach na Ziemi. Duży wpływ na początkowy rozwój ogniw słonecznych miały także badania kosmiczne i wykorzystywanie ogniw do zasilania sond i satelitów. Czynniki ograniczającymi rozwój fotowoltaiki była niska sprawność ogniw oraz duża energochłonność procesu ich wytwarzania, a także ich koszt. Niskie ceny energii elektrycznej przez długi czas skutecznie hamowały rozwój fotowoltaiki na wielką skalę. Czas zwrotu nakładów inwestycyjnych instalacji często przekraczał jej żywotność. Dopiero w momencie, gdy w rachunku ekonomicznym instalacji zaczęto uwzględniać aspekt ekologiczny i wprowadzono systemy wsparcia dla instalacji zeroemisyjnych, nastąpił szybki rozwój fotowoltaiki. Jednocześnie w celu upowszechnienia

niekonwencjonalnych i odnawialnych źródeł energii prowadzono politykę taryf stałych. Polegało to na gwarantowanym zakupie energii elektrycznej z systemów fotowoltaicznych po wyższych cenach. Takie rozwiązania spowodowały szybki rozwój fotowoltaiki w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych dwudziestego wieku.

Polska jest krajem uzależnionym energetycznie od paliw kopalnych: węgla kamiennego i brunatnego. Aby sprostać wymogom Unii Europejskiej dotyczącym ograniczenia emisji dwutlenku węgla szuka się rozwiązań nisko bądź zeroemisyjnych. Jedną z możliwości jest zastosowanie fotowoltaiki. Jednak ze względu na warunki prawne i polityczne panujące

w Polsce rozwija się ona wolniej niż w państwach zachodniej europy. Mimo to w drugiej połowie 2014 roku w Polsce przybyło około 600 prosumenckich mikroinstalacji fotowoltaicznych o łącznej mocy 2,7 MWp. W 2015 roku łączna moc zainstalowana w ogniwach fotowoltaicznych w Polsce wyniosła 39,1 MWp (<http://www.rynekinstalacyjny.pl/aktualnosci/id7963,rozwoj-rynku-fotowoltaiki-w-polsce.-raport-ieo>). Oprócz mikroinstalacji do 40 kWp coraz więcej powstaje także tzw. farm fotowoltaicznych o mocy przekraczającej często 1 MWp. W tabeli 1 przedstawiono wybrane wielko powierzchniowe instalacje fotowoltaiczne wybudowane w ostatnich latach.

Tabela 1. Farmy fotowoltaiczne wybudowane w ostatnich latach

Inwestor	Miejsce	Moc	Informacje dodatkowe
Przsiębiorstwo Energetyczne Gubin	Gubin	1,5 MWp	5784 modułów fotowoltaicznych o mocy 260 Wp każdy.
Energa	Gdańsk	1,64 MWp	6292 modułów fotowoltaicznych zajmujących 25 tys. metrów kw. Szacowana produkcja energii to 1,5GWh/rok.
Energia Dolina Zielawy	Bordziłówka	1,4 MWp	5500 modułów fotowoltaicznych.
PL 2011	Guja	1 MWp	4000 modułów fotowoltaicznych.
Centrum Motoryzacji Czyżycki	Jadowniki	1 MWp	4000 modułów fotowoltaicznych na jednoosiowych trakerach.
MIWO Construction	Turośń	500 kWp	2000 modułów fotowoltaicznych.
AMB Energia	Kolno	1,8 MWp	7080 modułów fotowoltaicznych.
AMB Energia	Jedwabne	710 kWp	około 2700 modułów fotowoltaicznych.
AMB Energia	Lipsk	300 kWp	1120 modułów fotowoltaicznych.
ZWiK w Szczecinie	Szczecin	1,45 MWp	Szacowana ilość wyprodukowanej energii: 1,85 GWh/rok.
Energa	Czernikowo	4 MWp	3,5 GWh 16 tys. Modułów o moy 240 Wp 24 tys. M2
Prywaty Inwestor	Kopytnik	1 MWp	3996 modułów fotowoltaicznych.
Solartech Inwest	Wesołowo	674 kWp	2640 modułów fotowoltaicznych.
MARAND	Choroszcz	930 kWp	
Coral	Choroszcz	300 kWp	
MARAD	Sienkiewiczze	700 kWp	
Flora	Wasilków	1 MWp	
Eurowind Polska	Mirosław	2,5 MWp	10000 modułów fotowoltaicznych
ZWiK Mrągowo	Polska Wieś	500 kWp	
Stowarzyszenie HORYZONTY	Cieszanów	2 MWp	8333 modułów fotowoltaicznych o mocy 240 Wp każdy.
SolisEnergy	Wolica	798 kWp	
Sun-Eko	Krupiec	940 kWp	3690 modułów fotowoltaicznych
Maspex Tymbark	Tymbark	997 kWp	3836 modułów fotowoltaicznych o mocy 260 Wp każdy.
SIGMA-WOLTAIKA	Łazy	366 kWp	6112 modułów fotowoltaicznych o mocy 1,557 MWp.
SIGMA-WOLTAIKA	Łazy	548 kWp	
SIGMA-WOLTAIKA	Wólka Świętkowa	643 kWp	
KGHM Energetyka	Legnia	100 kWp	Testowa instalacja z modułami mono, poli krystalicznymi i CIGS.

LITERATURA

- Chwieduk B., Chwieduk M., Duda M., Furla P., Koziol Ł., Pieczykolan B., Szmit M., Świątek B., 2010, Sprawozdanie Merytoryczne z Grantu pt.: „Wykonanie stanowiska o charakterze modelowym do badania ogniw fotowoltaicznych” SKNEN, Warszawa
- <http://gramwzielone.pl>
- Jastrzębska G., 2013, *Ogniwa słoneczne. Budowa, technologia i zastosowanie*, WKŁ, Warszawa
- Szymański B., 2013, *Małe instalacje fotowoltaiczne*, Globenergia, Kraków