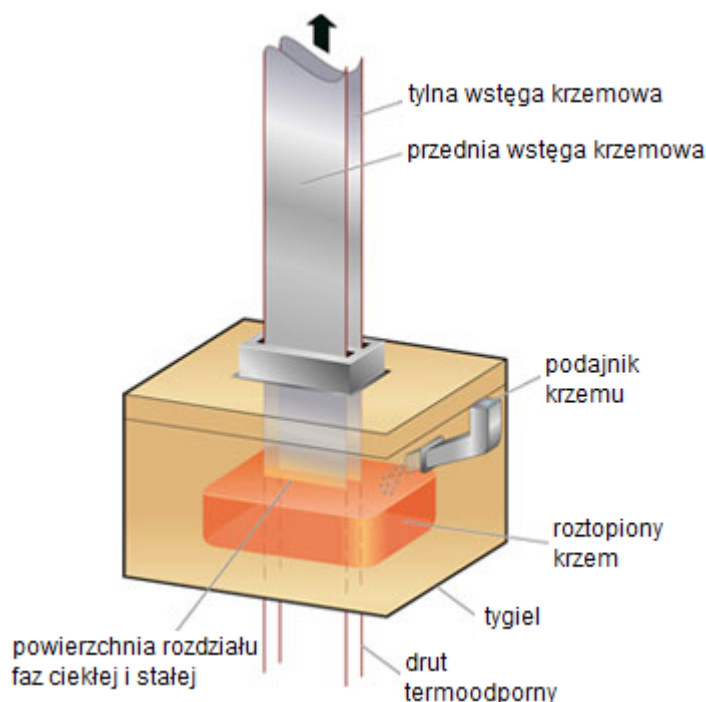


Przegląd dostępnych komercyjnie krzemowych ogniw PV

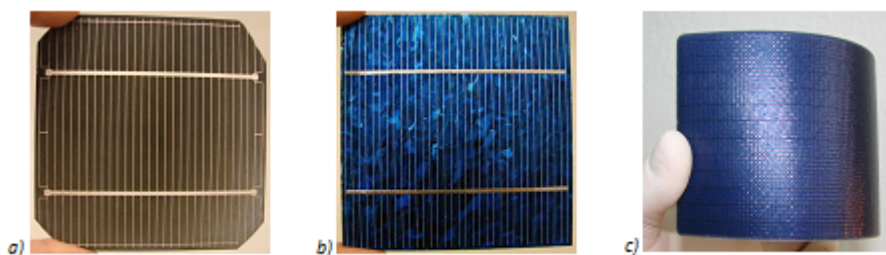
Istnieje wiele materiałów nadających się do zastosowania w fotowoltaice. Najbardziej popularnym i najczęściej stosowanym w produkcji ogniw słonecznych jest krzem. Inne rozwiązania, stanowią obecnie tylko kilka procent rynku. Krzem stosowany do produkcji przyrządów półprzewodnikowych powinien zawierać mniej niż 0,03 ppm (ppm = 10^{-4} %) zanieczyszczeń. Czystość krzemu stosowanego do produkcji ogniw słonecznych może być trochę mniejsza, nie powinien być to jednak materiał zawierający więcej niż 0,1 ppm zanieczyszczeń. W ogniwach dostępnych na rynku stosowane są trzy rodzaje krzemu. Najlepszy, ale i najdroższy, jest krzem monokrystaliczny. Zrobione z niego ogniwa osiągają w warunkach laboratoryjnych sprawności rzędu 24%, a produkowane masowo do 17%. Krzem monokrystaliczny charakteryzuje się jednorodnym rozmieszczeniem atomów w materiale, co jest otrzymywane dzięki wzrostowi całej struktury z tego samego zarodka monokrystalicznego. Taka jednorodność jest idealna dla efektywnego przepływu elektronów przez materiał. Jednakże, aby stworzyć skuteczne ogniwo słoneczne, krzem musi być dodatkowo domieszkowany innymi pierwiastkami w celu wytworzenia podłoża typu n lub p. Aby otrzymać monokrystaliczny krzem, należy najpierw roztopić czysty krzem polikrystaliczny, który następnie w bardzo powolnym procesie doprowadzany jest do krzepnięcia. Roztopiony krzem jest bardzo powoli schładzany w kontakcie z zarodkiem monokryształu tego materiału. Proces nazywany jest wzrostem monokryształu z fazy ciekłej krzemu. Dostępnych jest kilka metod produkcji krzemu monokrystalicznego. Najbardziej popularną i najstarszą techniką wzrostu monokryształu jest znana metoda Czochralskiego. Tak otrzymany krzem poddawany dalszej obróbce mechanicznej, mającej na celu wytworzenie płytek o określonym kształcie i grubości. Procesy te są bardzo dobrze rozwinięte, jednak dość złożone w etapach produkcyjnych, których przeprowadzenie wymaga wysokich kosztów. Aby zredukować koszty produkcji ogniw słonecznych, do ich wytwarzania można zastosować krzem polikrystaliczny. Ogniwa wykonane z tego materiału mają nieco niższe sprawności, które wynoszą 18% w warunkach laboratoryjnych i do 15% w panelach dostępnych komercyjnie. Mimo to otrzymywanie krzemu polikrystalicznego jest znacznie mniej skomplikowane, w związku z tym produkowane z niego ogniwa słoneczne są zdecydowanie łatwiejsze i tańsze w produkcji, dzięki czemu robione z nich panele są atrakcyjne cenowo. Krzem polikrystaliczny, w przeciwieństwie do monokrystalicznego, składa się z wielu małych kryształów lub ziaren. W zależności od wielkości tych ziaren i kryształów wyróżniane są trzy rodzaje takiej struktury: mikrokrystaliczna ($<1 \mu\text{m}$), polikrystaliczna ($1 \mu\text{m} - 1 \text{mm}$), multikrystaliczna ($1 \text{mm} - 10 \text{cm}$). Budowa polikrystaliczna wprowadza do struktury obszary graniczne między ziarnami i kryształami, które hamują przepływ elektronów i powodują ich rekombinację z dziurami. Przez to zredukowana jest moc wyjściowa ogniwa słonecznego, a co za tym idzie jego sprawność. Mimo to jednak, krzem polikrystaliczny jest częściej stosowany w masowej produkcji ze względu na dużo niższy koszt wytwarzania tego materiału. Najbardziej popularne metody wytwarzania polikryształu krzemu wykorzystują proces odlewania czy też krzepnięcia kierunkowego oraz techniki wzrostu wstęgowego. Godną uwagi jest ostatnia metoda, gdzie wyeliminowane zostały straty materiału, związane z koniecznością cięcia go na płytki. Jedną z technik otrzymywania wstęg krzemowych jest technika String Ribbon opatentowana przez firmę Evergreen Solar. Schemat procesu produkcji wstęg tą metodą przedstawia Rys 1.



Rys 1. Schemat procesu produkcji krzemu taśmowego metodą String Ribbon.

źródło: EvergreenSolar

Metoda ta polega na pionowym przeciąganiu przez płytkę warstwę roztopionego krzemu, dwóch równoległych drutów, odpornych na wysokie temperatury. Roztopiony krzem przechodzący przez obszar pomiędzy drutami ulega krzepnięciu tworząc wstęgę krzemową o określonych wymiarach. Proces ten jest ciągły, czysty i cichy. Druty rozwijane są ze szpuli i wyciągane do długich wstęg krzemowych poza obszarem roztopionego materiału. Wstęgi te z kolei są okresowo zbierane i cięte na mniejsze prostokąty nadające się do dalszej obróbki. Trzecią, mniej popularną odmianą krzemu jest krzem amorficzny. Pomimo, że materiał ten nie tworzy struktury krystalicznej i zawiera znaczną ilość defektów strukturalnych, za jego stosowaniem w przemyśle fotowoltaicznym przemawiają aspekty ekonomiczne. Krzem amorficzny absorbuje promieniowanie słoneczne z czterdziestokrotnie większą sprawnością w porównaniu do krzemu monokrystalicznego. W związku z tym warstwa o grubości zaledwie 1 μm wystarcza do zaabsorbowania ponad 90% energii słonecznej padającej na ogniwo, co jest jedną z głównych przyczyn obniżających koszty produkcji ogniw tego typu. Ponadto, wytwarzanie krzemu amorficznego może odbywać się w dużo niższych temperaturach, a warstwy mogą być osadzone na tanich podłożach, takich jak szkło, plastik czy metal. Dlatego też krzem amorficzny idealnie nadaje się do zastosowań w systemach fotowoltaicznych zintegrowanych z budownictwem. Niestety w ogniwach słonecznych tego typu występuje zjawisko powodujące ograniczenie zwane efektem Staeblera - Wrońskiego. Polega on na tym, że długotrwałe naświetlanie krzemu amorficznego wywołuje znaczny wzrost jego konduktywności. Jest to efekt całkowicie odwracalny, dlatego też materiał musi być regenerowany poprzez wygrzewanie go w ciemności. Efekt ten powoduje straty mocy wyjściowej sięgające 20% zanim materiał się ustabilizuje. Sposobem na osłabienie, jednak nie wyeliminowanie, tego efektu jest zastosowanie multizłącza. Porównanie pojedynczych ogniw fotowoltaicznych wykonanych z krzemu mono i polikrystalicznego oraz trójzłączonego, cienkowarstwowego ogniwa z krzemu amorficznego na elastycznym podłożu przedstawia Fot 1.



Fot 1. Porównanie ogniw PV z krzemu monokrystalicznego, polikrystalicznego i amorficznego na elastycznym podłożu ze stali nierdzewnej.

Rozwiązaniem alternatywnym do krzemu są cienkowarstwowe ogniwa słoneczne CdS/CdTe, CIS lub innych typów, jednak ze względu na skomplikowaną technologię wytwarzania, niską sprawność lub problemy związane z wdrożeniem do produkcji moduły tego typu są obecnie dopiero we wstępnej fazie komercjalizacji.

Badania instalacji fotowoltaicznych z różnych typów modułów krzemowych

Typowo instalacje fotowoltaiczne konstruowane są w oparciu o moduły słoneczne wykonane z materiału jednego typu i o takich samych lub zbliżonych parametrach prądowo-napięciowych. Przykładami mogą tu posłużyć zarówno instalacje zagraniczne (hale w Monachium) jak i pierwsze wielkopowierzchniowe inwestycje polskie. Na przykład instalacja wykonana na gmachu budynku Politechniki Warszawskiej o łącznej mocy 33,5kW składa się z jednakowych, popularnych modułów z krzemu multikrystalicznego o nominalnej mocy szczytowej 135W. Takie planowanie instalacji jest ekonomicznie i technicznie uzasadnione ponieważ:

- zapewnia jednakowe parametry mocy każdego modułu w łańcuchu, eliminując straty wynikłe z kompensacji różnic napięć przy łączeniu szeregowym i różnic prądowych przy łączeniu równoległym;
- umożliwia prostą konstrukcję łańcuchów o zbliżonych wielkościach mocy co pozwala na wykorzystanie falowników jednego typu, pracujących w optymalnym zakresie napięć i prądów wejściowych;
- umożliwia jednakową pracę całej instalacji w różnych warunkach pogodowych i w cyklu dobowym;
- zapewnia jednolity cykl życia całej instalacji;
- ułatwia zaplanowanie i wykonanie systemu połączeń elektrycznych i mechanicznych całej instalacji.

Dodatkowo współczesne komercyjne instalacje fotowoltaiczne wykonywane są z modułów o jak największej powierzchni w celu obniżenia kosztów za produkowaną jednostkę energii. Takie podejście nie umożliwia jednak obiektywnego porównania dostępnych obecnie modułów słonecznych wykonanych różnymi technologiami. Jedynie wykonanie instalacji złożonej z różnych typów ogniw, pracujących w jednakowych lub zbliżonych warunkach nasłonecznienia umożliwia ich obiektywne porównanie. Zadanie takie zostało zrealizowane w instalacji badawczo-demonstracyjnej Katedry Przyrządów Półprzewodnikowych Politechniki Łódzkiej. Instalacja ta została zaprojektowana w celu porównania pracy modułów różnej konstrukcji we wspólnym systemie energetycznym. Parametry instalacji zaprezentowane zostały w Tabeli 1, zaś schemat jej konstrukcji

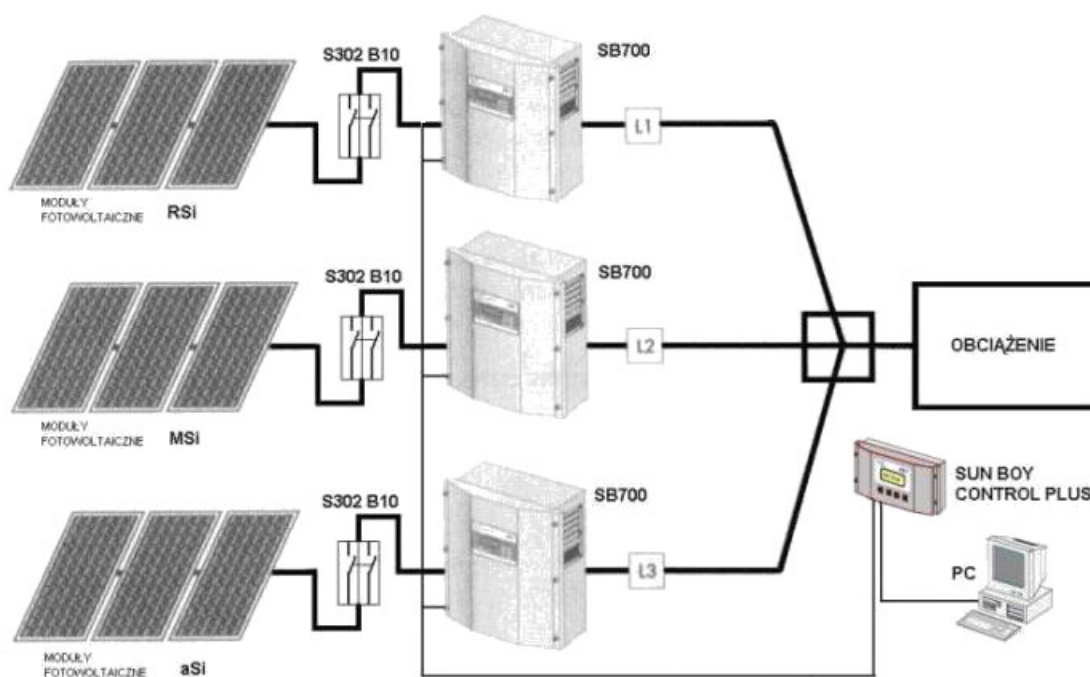
na

Rys

2.

Tabela 1. Parametry techniczne badanej fotowoltaicznej instalacji demonstracyjnej.

Moduły PV	Parametry
Moduły krzemowe IBC 120-SE	krzem <u>multikrystaliczny</u> ; moc szczytowa: 115Wp; napięcie wyjściowe: 12V; ilość: 6 <u>szt</u> , konfiguracja: szeregowo
Moduły krzemowe GEA 221	krzem <u>amorficzny</u> ; moc szczytowa: 64 Wp; napięcie wyjściowe: 12V; ilość: 6 <u>szt</u> , konfiguracja: szeregowo
Moduły krzemowe EC-110-GL	krzem <u>taśmowy (ribbon)</u> ; moc szczytowa: 110Wp, napięcie wyjściowe: 12V/24V; ilość: 6 <u>szt</u> konfiguracja: szeregowo
Osprzęt	Parametry
Falowniki fotowoltaiczne SB700	nominalna moc wejściowa: 700W, napięcie wyjściowe: 208/230V, częstotliwość: 50Hz, wyjście: 1 faza/3 fazy wyświetlacz, komunikacja PC.
Lokalizacja:	
Budynek Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki Informatyki i Automatyki PŁ, Łódź 51°47' N 19° 28' E , wysokość nad poziomem gruntu: 7 m, orientacja S, kąt nachylenia 30°.	



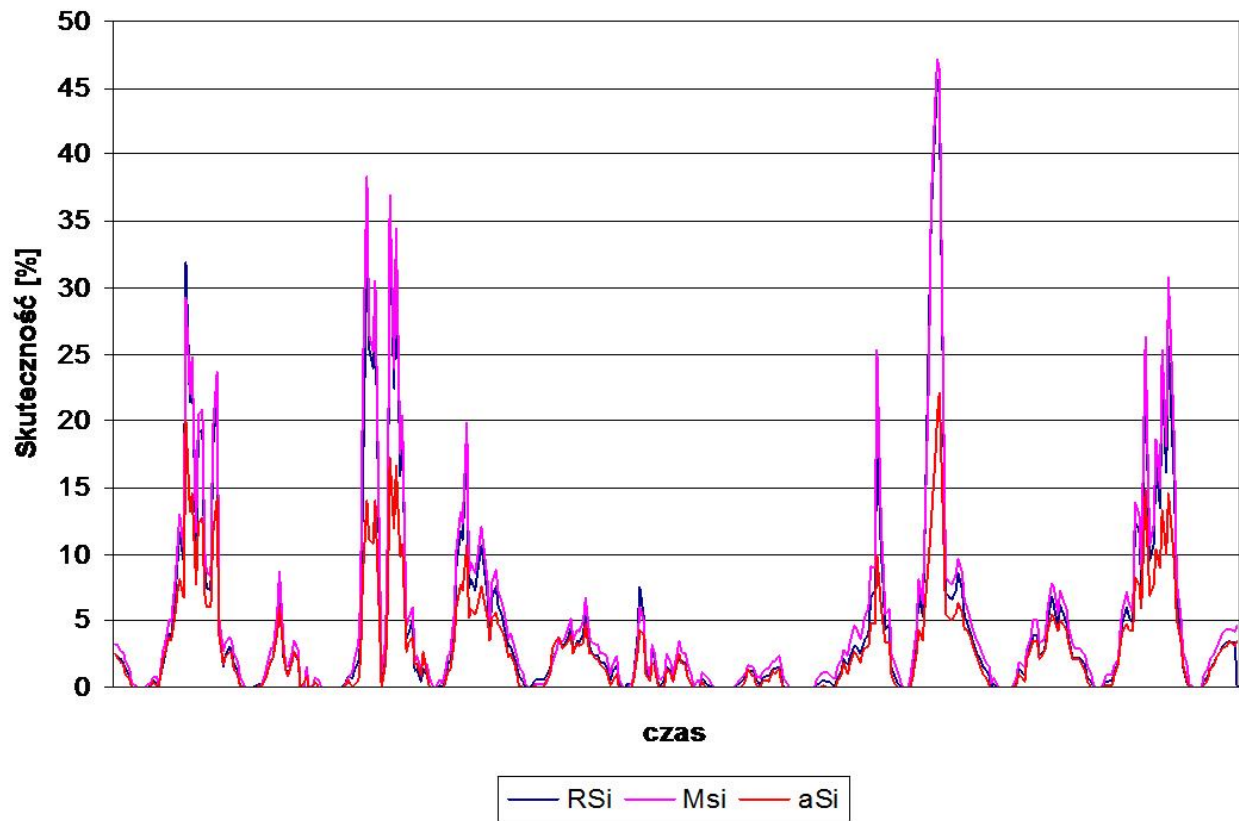
Rys 2. Schemat badanej instalacji fotowoltaicznej.
źródło: SMA



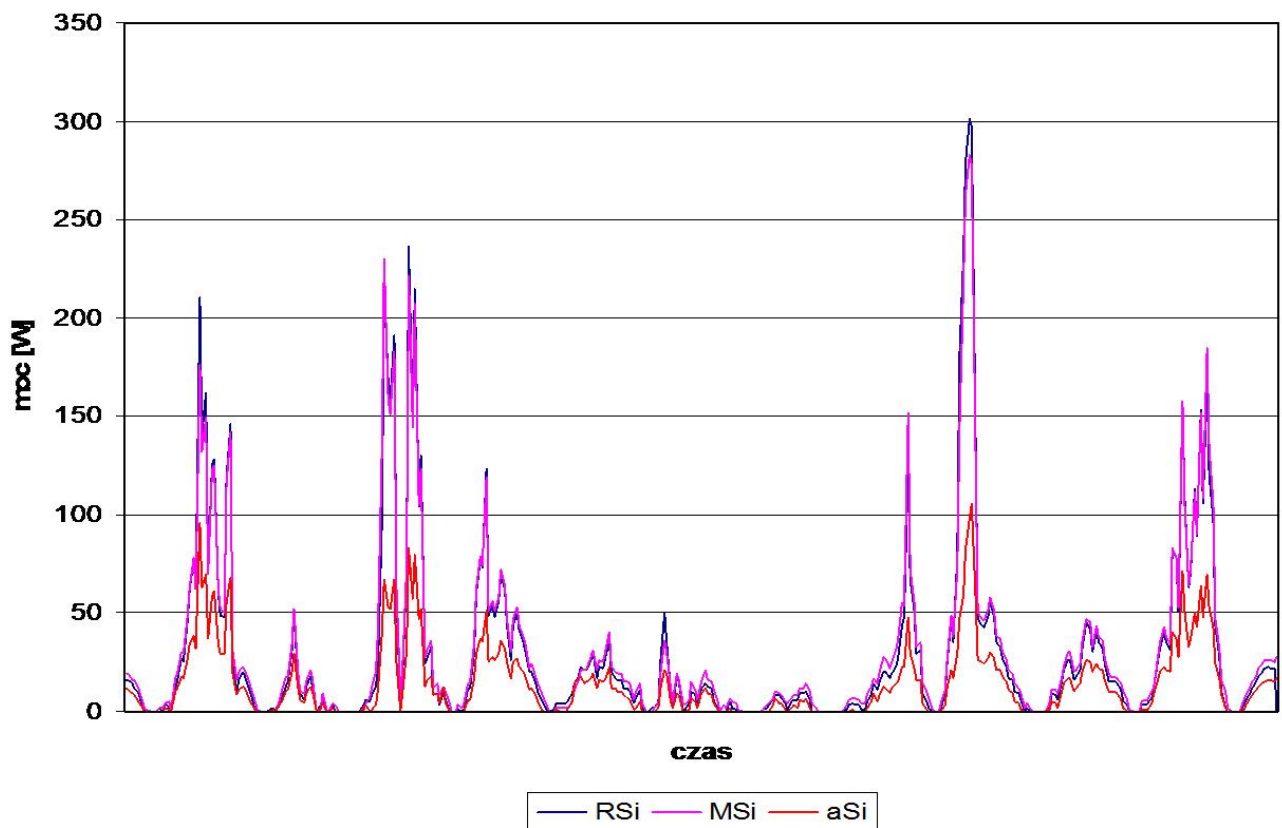
Fot 2. Wygląd konstrukcji badanej instalacji fotowoltaicznej.

Prezentowana instalacja posłużyła do przeprowadzenia badań dotyczących ilości produkowanej energii, sprawności fotokonwersji i sprawności łącznej systemu, a także niezawodności i warunków eksploatacyjnych. Celem tych prac była praktyczna weryfikacja własności modułów poszczególnych typów oraz ich przydatności do budowy prywatnych, przydomowych instalacji energetycznych małych i średnich mocy.

W celu miarodajnego porównania osiągalnych komercyjnie i zbliżonych cenowo modułów w pierwszej kolejności przeprowadzono testy ogni wykonane w trzech różnych technologiach z krzemu, połączonych szeregowo w poszczególnych łańcuchach. Testy te przeprowadzono w ciągu 14 dni, w najtrudniejszych warunkach klimatycznych. Przedmiotem testu było określenie, jaki jest stosunek sprawności rzeczywistej do nominalnej dla modułów badanych typów, oraz jaki jest przeciętny czas pracy modułów w badanym okresie. Uzyskane wyniki przedstawione są na Rys 3 i 4.

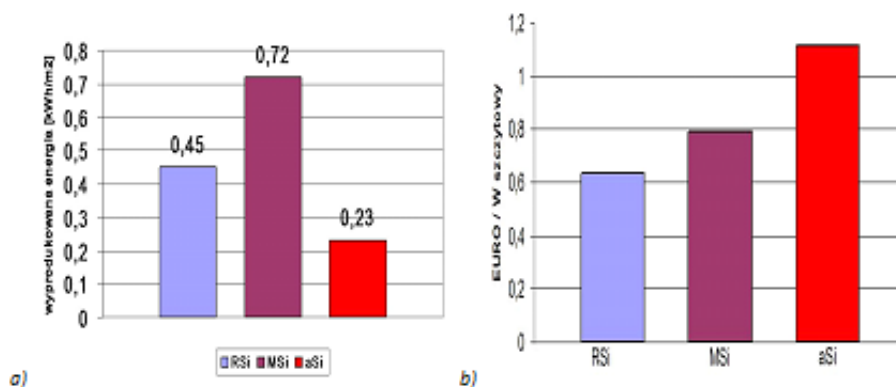


Rys 3. Sprawność względna modułów krzemowych w badanym okresie



Rys 4. Moc produkowana w modułach krzemowych w badanym okresie

Uzyskane wyniki wskazują na dużą zbieżność parametrów eksploatacyjnych modułów wykonanych z multikrystalicznego krzemu jak i z krzemu wstęgowego. Wyraźnie gorsze rezultaty osiągnęła część instalacji obsługiwana przez moduły amorficzne. W celu pełniejszej analizy parametrów użytkowych poszczególnych ogniw przeanalizowano również łączną ilość energii wyprodukowaną przez każdą z badanych części instalacji (Rys 5a). Niewątpliwie czynnikiem zasadniczym przy realizacji inwestycji fotowoltaicznej jest bilans ekonomiczny. W celu możliwie najbardziej obiektywnego porównania kosztów instalacji wykonanych z badanych ogniw, zestawiono ceny poszczególnych modułów w przeliczeniu na wat szczytowy generowanej mocy (Rys 5b).



Rys 5. a) łączna ilość energii wyprodukowana na powierzchni 1 m² w badanym okresie; b) koszt badanych modułów w przeliczeniu na nominalny wat szczytowy mocy

Analiza walorów aplikacyjnych modułów badanych typów

Należy podkreślić, że zaprezentowana analiza objęła wszystkie podstawowe odmiany cienkowarstwowych ogniw słonecznych wykonanych krzemu, a więc największej obecnie gałęzi wyrobów fotowoltaicznych. Badaniu nie zostały poddane moduły wykonane z ogniw monokrystalicznych, gdyż pomimo wysokiej sprawności ogniwa tego typu pozostają niekonkurencyjne cenowo, a technologia ich produkcji w ciągu pięćdziesięciu lat modyfikacji uzyskała obecnie stadium nasycenia. Ma to swoje odbicie w zmniejszającym się udziale ogniw tego typu w łącznej produkcji fotowoltaicznej. Spośród przebadanych modułów ogniwa multikrystaliczne są najbardziej rozpowszechnionym typem, co niewątpliwie znalazło uzasadnienie zarówno w uzyskanych przez nie wynikach pomiarów parametrów roboczych jak i stosunkowo niskiej cenie finalnej. Warty podkreślenia jest fakt, że ogniwa krzemowe wytwarzane w technologii taśmowej okazały się niemalże równorzędnym konkurentem modułów multikrystalicznych. Sprawność konwersji tych ogniw z jednostki powierzchni w badanym okresie okazała się o 37% gorsza, jednak zostało to przynajmniej w części zrekomensowane przez cenę, niższą o 20% od konkurentów. Warto zauważyć, że ogniwa taśmowe oferują możliwość wykonywania modułów o pełnej integracji monolitycznej, na podłożach różnego rodzaju, co może w przyszłości przynieść znaczną poprawę ich konkurencyjności. Technologia wytwarzania ogniw taśmowych jest także nadal modyfikowana w celu obniżenia kosztów energetycznych i materiałowych. Z drugiej strony ogniwa amorficzne, obciążone efektem redukcji sprawności, wywołanej zjawiskiem Steablera-Wrońskiego okazały się mało konkurencyjnym rozwiązaniem w warunkach eksploatacyjnych.

Bibliografia

- [1] T. Markwart, L. Castaner „Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation” Elsevier, Oxford 2005.
- [2] R. Bube “Photovoltaic materials” Imperial College Press London 1998.
- [3] A. Hunter, B. Dougherty, M. Davis, “Performance and characterization of Building Integrated Photovoltaic Panels” Photovoltaic Specialists Conference 2002.

- [4] D. King M. Quintana, J. Kratochvil, D. Elliebee, B. Hansen "Photovoltaic Module Performance and Durability Following Long-Term Field Exposure" National Center for Photovoltaics Conference Denver 1998.
- [5] Z. M. Jarzębski „Energia słoneczna, konwersja fotowoltaiczna” Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1990.
- [6] K. Zweibel, P. Hersch, „Basic Photovoltaic Principles and Methods” Van Nostrand Reinhold, New York 1984.
- [7] B. V. Zeghbroeck „Principles of Semiconductor Devices” Department of Electrical and Computer Engineering, University of Colorado at Boulder 2004.
- [8] T. Marcinkowski „Badanie efektywności różnych typów ogniw słonecznych w instalacji energetycznej” – praca magisterska Politechnika Łódzka 2007.
- [9] H. G. Wagemann, H. Eschrich “Grundlagen der photovoltaischen Energiewandlung”, B. G. Teubner Stuttgart 1994.
- [10] <http://www.pv.pl>
- [11] <http://www.eere.energy.gov>
- [12] <http://www.evergreensolar.com>

Artykuł recenzowany przez dr. Macieja Sibińskiego (Politechnika Łódzka).



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



*Publikacja powstała w ramach projektu "Bioenergia dla Regionu - Zintegrowany Program Rozwoju Doktorantów",
współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego*