

Sprawność konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną współczesnych ogniw i modułów fotowoltaicznych

Streszczenie. W artykule przeprowadzono analizę dynamiki wzrostu sprawności konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną, obejmującą lata 1997–2016, dla wybranych ogniw i modułów fotowoltaicznych. Przedstawiono obowiązujące procedury i standardy pomiarowe. Postęp sprawności sklasyfikowanych w grupy ogniw i modułów zilustrowano graficznie, przeprowadzono dyskusję wyników.

Abstract. This paper presents solar radiation conversion efficiency progress into electricity for selected photovoltaic cells and modules since 1997 till 2016. Described the existing procedures and measurement standards. Efficiency progress classified in a groups of cells and modules shows in the form of charts and discussed results. (**Solar radiation conversion efficiency into electricity modern photovoltaic cells and modules**).

Słowa kluczowe: sprawność ogniw i modułów fotowoltaicznych, konwersja energii

Keywords: efficiency solar cells and modules, energy conversion

Wstęp

Pozyskiwanie energii elektrycznej z promieniowania słonecznego jest coraz bardziej opłacalne. Ogólna powszechność i dostęp do promieniowania słonecznego oraz bezpośrednio, nieszkodliwa dla środowiska naturalnego, metoda jego konwersji na energię elektryczną niezwykle dynamicznie stymuluje rozwój sektora fotowoltaiki (PV).

Przetwornikami energii promieniowania słonecznego na prąd elektryczny są ogniwa fotowoltaiczne. Proces konwersji zachodzi w strukturze krystalicznej materiału, z którego zostało zbudowane ogniwo. O jakości ogniwa decyduje przede wszystkim jego sprawność, czyli ilość energii elektrycznej wytworzonej w ogniwie przy określonej energii strumienia promieniowania świetlnego padającego na ogniwo. Pojedyncze ogniwa, z punktu widzenia zastosowań w systemach zasilania w energię elektryczną, generują bardzo małą moc, dlatego łączy się je w większe układy zwane modułami. Moduły łączone są zaś w większe systemy mogące dostarczać dużych mocy.

Od wielu lat prowadzone są intensywne badania mające na celu systematyczne zwiększanie sprawności istniejących ogniw i modułów fotowoltaicznych. Kilkaście ostatnich lat zaowocowało pojawieniem się nowych materiałów półprzewodnikowych, procesów technologicznych oraz rozwiązań konstrukcyjnych.

W artykule przedstawiono tempo wzrostu sprawności konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną wybranych ogniw i modułów fotowoltaicznych w latach 1997 – 2016. Rozpatrywane ogniwa i moduły PV sklasyfikowano w czterech grupach, a dotyczące ich wyniki zilustrowano graficznie.

Metody pomiarów sprawności

Dokładne i rzetelne określenie sprawności konwersji dla wielu różnych, pod względem budowy i zastosowania, typów ogniw i modułów fotowoltaicznych jest istotne przy ustalaniu aktualnych rekordów oraz zestawianiu ich w różnego rodzaju rankingach. Konkurencja na rynku fotowoltaiki jest oczywista i może być postrzegana, jako swoiste koło zamachowe postępu technologicznego w tej dynamicznie rozwijającej się branży. Pomiarów parametrów i wynikających z nich wielkości przeprowadzane są w kilku autoryzowanych ośrodkach badawczych na świecie [1]:

1. European Solar Test Installation (ESTI), CEC Joint Research Centre, 21020 Ispra (Varese), Italy.
2. Fraunhofer-Institut for Solar Energy Systems (FhG-ISE), Freiburg, Germany.

3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Ibaraki, Japan.
4. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, USA.
5. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany.

Sposoby przeprowadzanych pomiarów sprawności opisano w normach międzynarodowych: IEC 60904-3 Ed.2 2008-04 (europejska) oraz ASTM G173-3 (amerykańska). Normy zostały oficjalnie przyjęte w kwietniu 2008 roku zastępując wcześniejsze wersje: 60904-3 Ed. 1: 1989, ASTM E891-87 (*Direct normal*) i ASTM E892-87 (*Global*) [2] [3] [4]. Wpływ nowego rozkładu spektralnego widma promieniowania świetlnego na procedury i wyniki pomiarów ogniw i modułów fotowoltaicznych omówiono w [5].

Do głównych czynników mających bezpośredni wpływ na wyniki pomiarów należy powierzchnia ogniwa lub modułu, natężenie i rozkład spektralny promieniowania świetlnego, oraz temperatura badanego elementu. Obliczenia sprawności η przeprowadza się na podstawie uzyskanej maksymalnej mocy elektrycznej P_{\max} , całkowitego natężenia promieniowania świetlnego E_{tot} i powierzchni całkowitej A :

$$(1) \quad \eta = \frac{P_{\max}}{E_{\text{tot}} \cdot A} \cdot 100$$

Pomiary wykonywane są w warunkach STC (*ang. Standard Test Conditions*). Jeżeli zostały przeprowadzone w innych warunkach, wyniki są korygowane do STC. Całkowite, wzorcowe widmo nazimowego promieniowania słonecznego zawiera widmo promieniowania bezpośredniego i rozproszonego - 1,5G (*ang. Global*). Składa się z trzech interwałów: 280nm do 400nm z krokiem 0,5nm, 401nm do 1700nm z krokiem 1nm, 1702nm do 4000 z krokiem 5nm. Przy pomiarach sprawności ogniw przeznaczonych dla koncentratorów promieniowania, wykorzystywane jest wzorcowe widmo promieniowania bezpośredniego – 1,5D (*ang. Direct*). Widmo to lepiej oddaje rzeczywiste warunki pracy tego typu ogniw. Rozkład widma promieniowania słonecznego podano w [2] [4].

Powierzchnia ogniwa lub modułu ma duży wpływ na wartości otrzymywanej sprawności. Różnice w interpretacji testowanych obszarów, wyznaczonych na powierzchni całkowitej, są powodem występowania największych różnic otrzymywanych wyników sprawności między różnymi grupami ogniw i modułów. Do celów pomiarowych przyjęto następującą klasyfikację [1]:

1. Powierzchnia całkowita ogniwa lub modułu (t), (*ang.*

total area) zawiera oprócz powierzchni czynnej, elementy połączeń elektrycznych i komponenty konstrukcyjne.

2. Obszar ogniwa lub modułu, wyznaczony z powierzchni całkowitej, obejmujący oprócz struktury półprzewodnikowej elementy połączeń elektrycznych takie jak metalowe kontakty i przewody zbiorcze (*ap*), (*ang. aperture area*). Pozostały obszar jest zakryty przesłoną i w trakcie pomiarów nie zachodzi tam generacja nośników prądu. Dla ogniwa współpracujących z koncentratorami w obszarze wyznaczonym do oświetlenia (*da*) nie powinny natomiast znajdować się kontakty, połączenia elektryczne i elementy konstrukcyjne.

3. Obszar ogniwa lub modułu, wyznaczony z powierzchni całkowitej, w której granicach jest widoczna tylko struktura półprzewodnikowa (*da*), (*ang. designated illumination area*). Pozostała część i elementy konstrukcyjne są przesłonięte.

Do celów pomiarowych wyznaczono wielkości obszarów powierzchni badanych ogniwa i modułów fotowoltaicznych. Znaczenie terminów moduł i submoduł wyjaśniono w [6]. Przyjęte zostały minimalne wielkości dla różnych typów ogniwa i modułów ze względu na ich zastosowanie i warunki pracy: $0,05\text{cm}^2$ – dla ogniwa pracujących z koncentratorami promieniowania słonecznego, 1cm^2 – dla autonomicznych ogniwa, 800cm^2 – dla modułów. Istotne jest, aby wyniki pomiaru wielkości tych obszarów miały tolerancję nie gorszą niż 0,5%. Jest to podział tymczasowy, który będzie modyfikowany w miarę postępu badań, rozwoju technologii oraz metod pomiarowych w fotowoltaice [7].

Określono jednostkę natężenia promieniowania świetlnego. Przyjęto wielkość 1Sun, której odpowiada natężenie strumienia świetlnego o wartości 1000Wm^{-2} i rozkładzie widmowym AM1,5G. Do otrzymanych wyników sprawności podawana jest liczba jednostek natężenia promieniowania, (szczególnie dla ogniwa i modułów współpracujących z koncentratorami promieniowania).

Procedury te w istotny sposób zapobiegają publikowaniu nieautoryzowanych, zazwyczaj zawyżonych wyników osiąganych sprawności. Należy jednak pamiętać, że praca w warunkach rzeczywistych odbiega od warunków STC, a w związku z tym faktyczna sprawność ogniwa, modułu albo systemu fotowoltaicznego jest funkcją współrzędnych jego ustawienia, całkowitego natężenia promieniowania, widmowego natężenia promieniowania, prędkości wiatru, temperatury otoczenia oraz ogniwa lub panelu, zabrudzenia i zaciemnienia powierzchni oraz innych czynników, które mają wpływ na straty konwersji energii w systemie.

Zestawienie wybranych ogniwa i modułów fotowoltaicznych

Ogniwa i moduły fotowoltaiczne wytwarzane są z różnorodnych materiałów półprzewodnikowych w zaawansowanych technologicznie procesach produkcyjnych. Zróżnicowane rozwiązania konstrukcyjne, w zależności od przeznaczenia, określają parametry charakterystyczne ogniwa takie jak: czułość widmowa, sprawność kwantowa, sprawność konwersji, napięcie obwodu otwartego, prąd zwarcia, współczynnik wypełnienia czy moc maksymalna.

Prezentowane ogniwa i moduły podzielono na cztery grupy. Do pierwszej grupy należą ogniwa i moduły krzemowe wykonane w różnych technologiach, jedno i wielozłączone. W drugiej grupie znajdują się ogniwa i moduły zbudowane z pierwiastków należących do grup 11-16 układu okresowego pierwiastków o strukturach: GaAs, GaInP, CdTe, InP, CIS (CuInSe_2), CIGS (CuInGaSe_2), CIGSS (CuInGaSSe_2), CZTSS ($\text{Cu}_2\text{ZnSn(SSe)}_4$) jedno i wielozłączone. Do trzeciej grupy należą ogniwa i moduły z materiałów organicznych, natomiast do czwartej grupy zalicza się ogniwa z półprzewodników nieorganicznych,

wykonane w różnych technologiach, przeznaczone do pracy z koncentratorami promieniowania słonecznego. Więcej informacji na temat budowy ogniwa i modułów można znaleźć w literaturze [8] [9] [10]. Poniżej zestawiono omawiane grupy ogniwa.

1. Ogniwa i moduły krzemowe (Si) jednozłączone

- Monokrystaliczne (c-Si),
- multikrystaliczne (m-Si),
- mikrokrystaliczne (u-Si),
- amorficzne (a-Si),
- amorficzne tandemowe,
- w technologii HIT (cienkowarstwowe),
- w technologii TFT (*thin film transfer*)

Moduły

- monokrystaliczne,
- duże monokrystaliczne,
- multikrystaliczne,
- amorficzne tandemowe.

2. Ogniwa i moduły pierwiastków grup 11-16 układu okresowego, jedno i wielozłączone

Ogniwa

- GaAs (monokrystaliczne),
- GaAs,
- CIGS,
- CdTe,
- Hybrydowe, związków z grupy perowskitów,
- CZTSS

Moduły (cienkowarstwowe)

- CIGS,
- CIGSS,
- GaAs,
- CdTe

3. Ogniwa organiczne oraz fotochemiczne

- Organiczne,
- organiczne (tandemowe),
- barwnikowe DSSC (*ang. dye-sensitized solar cell*)

4. Ogniwa koncentratorów promieniowania CPV (*ang. concentrator photovoltaics*) jedno i wielozłączone

- krzemowe, jednozłączone (1J),
- GaAs (1J),
- CIGS,
- dwuzłączone (2J),
- trzyzłączone (3J),
- cztero i pięcioletkowe (4J, 5J)

Użyte skróty struktur materiałów półprzewodnikowych:

c – monokrystaliczny, c:Cz – monokrystaliczny metoda Czochralskiego, m – multikrystaliczny, p – polikrystaliczny, n – nanokrystaliczny, u – mikrokrystaliczny, a – amorficzny, (np. c-Si oznacza krzem monokrystaliczny).

Dyskusja wyników

Na rysunku 1 przedstawiono dynamikę wzrostu sprawności konwersji wybranych ogniwa i modułów opartych na technologiach krzemowych (Si).

Jeszcze na początku 2014 roku najwyższą sprawność w tej grupie, mimo niskiego wzrostu sprawności (tylko o 1%), posiadały ogniwa z krzemem krystalicznym (c-Si) (wyk.2). W drugiej połowie 2014 roku zanotowano sprawność 25,6% dla ogniwa w technologii HIT (*ang. Heterojunction with Intrinsic Thin layer*) [11]. Warstwą substratu jest krzem krystaliczny o przewodności typu n, otrzymany za pomocą metody Czochralskiego (c-Si:Cz) z naniesionymi cienkimi warstwami (samoistną i oraz typu p) krzemu amorficznego. Ogniwo tego typu o powierzchni $143,7\text{cm}^2$ (*da*), wyprodukowano w firmie Panasonic (wyk.1)

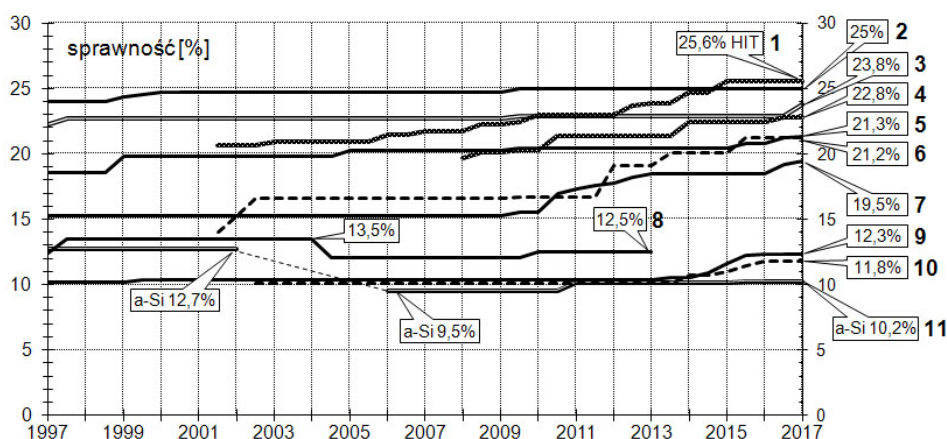
[12]. Pomiary wykonano w instytucie AIST. Sprawność ogni w technologii HIT wzrosła z 20,7% w 2001 roku do 25,6% w roku 2016.

Znaczny wzrost sprawności zanotowano dla ogniwa w technologii TFT (*ang. Thin Film Transfer*) [13], która wzrosła z 16,7% w 2011 roku do 21,2% (wyk.6) i może w najbliższym czasie przekroczyć poziom sprawności ogni multykryształicznych. Badane ogniwo o powierzchni 239,7cm² (ap) wyprodukowano w firmie Solexel. Testy wykonano w laboratorium NREL.

Ogniwa (m-Si) posiadają niewielki 2,6%-owy wzrost sprawności - wykres 5. Do 2014 roku testowano ogniwa o powierzchni 1cm² (ap), natomiast od roku 2015 rekordowa sprawność należy do firmy Trina Solar producenta ogniwa m-Si 243,4 cm² (t) i wynosi 21,3% [14]. Wyniki potwierdzono przez Fraunhofer Institut. Znacznie mniejszą sprawność mają ogniwa mikrokryształiczne (wyk.10), lecz w ostatnich latach można zauważyć trend wzrostowy. Najwyższą sprawność 11,8% posiada ogniwo 1cm² (da) wytworzone i przebadane w AIST. Dla ogniwo amorficznych a-Si (wyk.11) i tandemowych a-Si/a-Si/a-SiGe (wyk.8), odnotowano spadek sprawności konwersji, ponieważ wcześniejsze wyniki dotyczyły ogniwo, które nie były poddawane odpowiednio długiemu procesowi naświetlania. Sprawność ogniwo amorficznych bardzo szybko maleje w początkowym okresie pracy. Zjawisko to

pierwszy raz zaobserwowali w 1976 roku D.L. Staebler i C.R. Wronski i zostało nazwane Staebler-Wronski Effect (SWE) [15]. W 2005 roku dla ogniwa amorficznego a-Si otrzymano wartość sprawności 9,5%, wcześniej 12,7%. W wyniku naświetlania promieniowaniem o natężeniu 1Sun (AM1,5G) w czasie 800 godzin, w temperaturze 50°C ustabilizowano parametry ogniwa [16]. Aktualny, potwierdzony przez AIST, wynik sprawności dla ogniwa o powierzchni 1cm² (da) wynosi 10,2%.

Dla modułów z krzemu monokryształicznego c-Si widoczny jest niewielki wzrost o 0,9%, natomiast sprawność modułów krystalicznych o dużej powierzchni (powyżej 15·10³cm²), produkowanych przez SunPower wzrosła w latach 2008-2016 o 2,7%, co obrazują wykresy 3 i 4. Wysoki wzrost sprawności zanotowano dla modułów multykryształicznych mc-Si (wyk.7). W okresie ostatnich siedmiu lat, sprawność zwiększyła się z 15,3% do 19,5% i jest to największy progres wśród prezentowanych modułów krzemowych. Ostatnią pozycją jest moduł amorficzny tandemowy a-Si/nc-Si o dużej powierzchni powyżej 14·10³cm² (t), (wyk.9). Rekord sprawności potwierdzony przez ESTI wynosi 12,3%. Połączenie dwóch materiałów cienkowarstwowych o różnych przerwach energetycznych daje możliwość absorpcji większej części widma promieniowania słonecznego i wzrost sprawności konwersji.



Rys.1. Wykresy sprawności wybranych ogniw i modułów krzemowych (Si): 1 – ogniwo c-Si w technologii HIT, 2 – ogniwo c-Si, 3 – moduł krystaliczny c-Si, 4 – moduł c-Si (duża powierzchnia), 5 – ogniwo m-Si, 6 – ogniwo w technologii TFT, 7 – moduł m-Si, 8 – ogniwo a-Si tandemowe, 9 – moduł a-Si tandemowy, 10 – ogniwo u-Si, 11 – ogniwo a-Si

Na rysunku 2 zestawiono wykresy sprawności ogniwo i modułów jednozłączowych i wielozłączowych pierwiastków grup 11 do 16 układu okresowego oraz ogniwo hybrydowych z udziałem związków z grupy perowskitów.

Najwyższą sprawność 38,8% posiada ogniwo (5J) GaAs/InP o powierzchni 1,021cm² (da) (wyk.1), wyprodukowane w firmie Spectrolab [17]. Pomiary sprawności wykonano w NREL. Przerwy energetyczne dla poszczególnych sub-ogniw mają wartość: 2,2eV, 1,7eV, 1,4eV, 1,05eV oraz 0,73eV, co odpowiada spektrum absorbowanego promieniowania od ok. 300nm do przeszło 1700nm. Warstwy sub-ogniw otrzymano techniką epitaksji MOVPE na substratach GaAs i InP. Powstałe ogniwa połączono, zachowując dopasowanie siatki krystalicznej z wykorzystaniem techniki SBT (*ang. semiconductor bonded technology*). Kolejne wykresy 2 i 3 przedstawiają sprawność ogniwa 3J o strukturze InGaP/GaAs/InGaAs 37,9%, 1,047cm² (ap) (Sharp), oraz 2J GaInP/GaAs 31,6%, 0,999cm² (ap), Alta Devices [18]. Pomiary wykonano w NREL.

Każda z warstw ogniwo wielozłączowych (tandemowych)

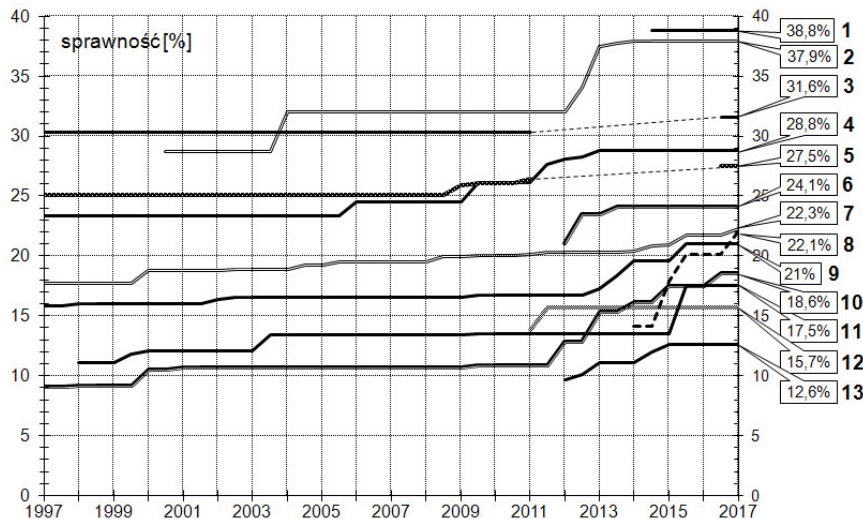
jest czuła na inny zakres spektralny promieniowania, co umożliwia projektowanie struktur absorbujących promieniowanie słoneczne w szerokim zakresie widma od ultrafioletu do bliskiej podczerwieni i osiąganie wysokich sprawności konwersji tego promieniowania. Teoretycznie, możliwe jest otrzymanie ogniwa wielozłączowego o sprawności przekraczającej 70% [19].

Cienkowarstwowe ogniwa z arsenku galu (GaAs) osiągają obecnie sprawność 28,8%, przy 0,993cm² (ap), potwierdzoną przez NREL (wyk.4), natomiast krystaliczne 1cm² (ap) 27,5% [20], (wyk.5). Znaczny wzrost sprawności jest widoczny dla ogniwa cienkowarstwowego z tellurku kadmu (p-CdTe) o powierzchni 1,062cm² (ap). Sprawność tego ogniwa wzrosła z 16,7% w 2012r. do 21% (wyk.9). Producentem jest firma FirstSolar, która jest światowym liderem technologii CdTe. Dużym wzrostem sprawności charakteryzuje się również ogniwo cienkowarstwowe CIGS od 17,7% w 1999 roku do 22,3% obecnie (wyk.7). Ogniwo o powierzchni 0,992cm² (ap) jest własnością firmy Solibro, natomiast wynik potwierdzono w FhG-ISE.

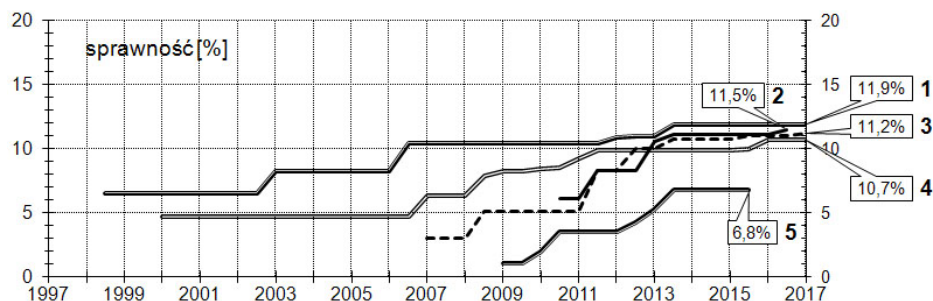
Nowością w branży jest ogniwo hybrydowe,

heterozłączowe, zbudowane z komponentów organicznych polimerowych i związków nieorganicznych z grupy perowskitów [21] (wyk.8). Zostało wykonane w Korean Research Institute of Chemical Technology, a testy przeprowadzono w Newport Technology and Applications Center CA USA. Technologia ta jest intensywnie rozwijana, jako alternatywa dla ogniw barwnikowych DSSC. W okresie 2014-2016 sprawność wzrosła o 8% - z 14,1% do 22,1% co jest najszybszym wzrostem w tej grupie. Ponieważ powierzchnia ogniwa jest bardzo mała, 0,046cm² (ap), wynik sprawności nie może zostać bezspornie uznany.

Dla modułów cienkowarstwowych CdTe, CIGSS, CIGS widoczny jest kilkuprocentowy wzrost sprawności i od 2011 roku wynosi odpowiednio: 7,7%, 4,0% i 2,2% (wyk.10,11,12). Ostatni, 13 wykres na rys.2, należy do ogniwa cienkowarstwowego CZTSS o powierzchni 0,421cm² (ap) i sprawności 12,6%. Pomiary wykonano w Newport. Warstwą absorbera jest półprzewodnik otrzymany z pierwiastków obficie występujących w skorupie ziemskiej: Cu, Zn, Sn, S, Se. Ogniwo opracowano w ramach wspólnego projektu między IBM Corp, Tokyo Ohka Kogyo Co. i Solar Frontier [22].



Rys.2. Porównanie sprawności wybranych ogniw i modułów jednozłączowych i wielozłączowych związków półprzewodnikowych pierwiastków 11-16 grupy układu okresowego: 1 – ogniwo (5J) GaAs/InP, 2 – ogniwo InGaP/GaAs/InGaAs 3J, 3 – ogniwo GaInP/GaAs 2J, 4 – ogniwo GaAs cienkowarstwowe, 5 – ogniwo c-GaAs, 6 – moduł c-GaAs, 7 – ogniwo CIGS, 8 – ogniwo hybrydowe z udziałem perowskitów, 9 – ogniwo p-CdTe, 10 – moduł CdTe, 11 – moduł CIGSS, 12 – moduł CIGS, 13 – ogniwo CZTSS



Rys.3. Sprawność wybranych technologii organicznych oraz fotochemicznych: 1 – ogniwo fotochemiczne barwnikowe, 2 – ogniwo polimerowe cienkowarstwowe (bardzo mała powierzchnia), 3 – ogniwo polimerowe cienkowarstwowe, 4 – minimoduł barwnikowy, 5 – submoduł organiczny polimerowy

Na rysunku 3 porównano wykresy sprawności ogniw organicznych (III-generacji). Ogniwa te mają niższą sprawność w porównaniu z ogniwami omówionymi wcześniej, ale niska cena materiałów wykorzystywanych do ich produkcji oraz tania, energooszczędna nanotechnologia umożliwiająca nakładanie cienkich warstw materiałów organicznych na różnego rodzaju podłoża, zadecyduje o opłacalności masowej produkcji w nadchodzących latach.

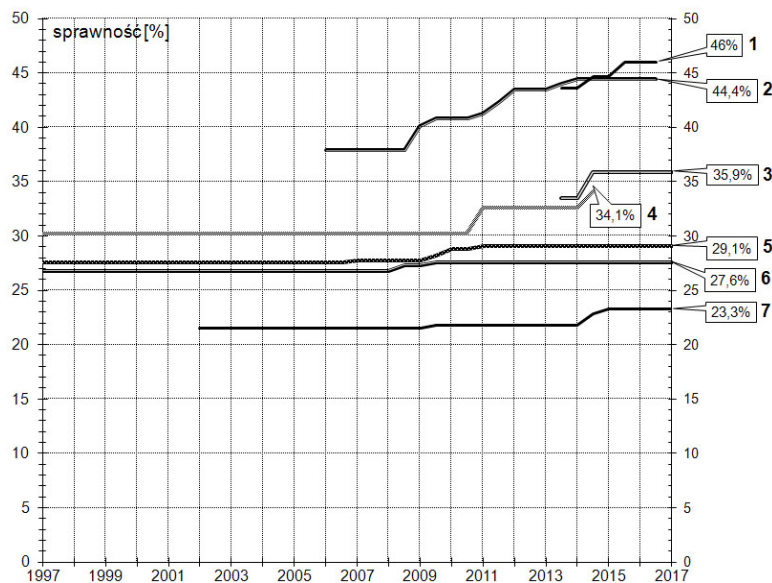
Najwyższą sprawność z prezentowanych technologii – 11,9%, posiada ogniwo fotochemiczne barwnikowe DSSC o powierzchni 1,005cm² (da) (wyk.1), wyprodukowane w firmie Sharp [23]. Pomiary wykonano AIST Ibaraki Japan. Następny wykres należy do ogniwa organicznego, cienkowarstwowego o powierzchni 0,043cm² (ap) wyprodukowanego w Hong Kong UST. Sprawność ogniwa wynosi 11,5%, a grubość warstwy absorbera 250nm. [24].

Testy przeprowadzono w Newport, lecz (jak również dla perowskitów) z powodu bardzo małej powierzchni (poniżej 0,05cm²) stabilności nie potwierdzono. Na wykresie 3 przedstawiono progres sprawności ogniwa polimerowego cienkowarstwowego, 0,992cm² (da), wyprodukowanego przez firmę Toshiba. Bieżący wynik 11,2% zatwierdziło AIST. Kolejną pozycją jest minimoduł barwnikowy firmy Sharp, złożony z siedmiu połączonych szeregowo ogniw o łącznej powierzchni 26,55cm² (da). Wynik sprawności 10,7% jest potwierdzony przez AIST. Ostatni wykres sprawności należy do submodułu polimerowego o powierzchni 395,9cm² (da), złożonego z piętnastu połączonych szeregowo ogniw. Producentem jest Toshiba, a sprawność wynosi 6,8%. Pomiary przeprowadzono w AIST Ibaraki, Japan.

Rysunek 4 przedstawia wyniki sprawności wybranych ogniw współpracujących z koncentratorami promieniowania słonecznego (CPV). Najwyższą sprawność, 46% w tej grupie ogniw, posiada ogniwo (4J) GaInP/GaAs; GaInAsP/GaInAs $0,052\text{cm}^2$ (da). Jest efektem współpracy pomiędzy Soitec, CEA-Leti oraz Fraunhofer-ISE [25]. Pomiar sprawności przeprowadzono przy natężeniu promieniowania świetlnego o wartości 508Suns. Następne ogniwo (3J) o strukturze: InGaP/GaAs/InGaAs i powierzchni $0,165\text{cm}^2$ (da), wyprodukowano w firmie Sharp (wyk.2). Wartość sprawności dla natężenia promieniowania 302Suns wynosi 44,4% [26]. Pomiary przeprowadzono w Fraunhofer Institute. Kolejny wynik sprawności-35,9% (wyk.3), dla modułu krzemowego (3J), 1092cm^2 (ap) z firmy Amonix [27], potwierdzony przez NREL. Wśród istniejących ogniw CPV (2J) najwyższą sprawność ma ogniwo

GaInP/GaAs-34,1%. Testy przeprowadzone w NREL dla wartości promieniowania 467Suns.

Ostatnie trzy wykresy na rysunku 4 należą do ogniw (1J). Dynamika wzrostu sprawności tych ogniw jest dużo mniejsza w porównaniu z wielozłączowymi, jednak w ostatnich latach, szczególnie dla ogniw CIGS, wyraźne widać tendencje wzrostowe. Najwyższą sprawność, 29,1% (wyk.5), ma ogniwo GaAs o powierzchni $0,0505\text{cm}^2$ (da). Ogniwo wykonano i przetestowano w Fraunhofer ISE. Kolejną pozycją jest ogniwo krzemowe (Si) (Amonix) $1,00\text{cm}^2$ (da) z 27,6%-ową sprawnością. Ostatnią niewielką zwykłą sprawności, o 0,8%, zanotowano w 2008 i 2009 roku. Pomiar sprawności przy 92Suns wykonano w Fraunhofer ISE. Zestawienie zamyka ogniwo CIGS o powierzchni $0,099\text{cm}^2$ (ap) i sprawności 23,3%. Pomiary ogniwa przy natężeniu promieniowania 15Suns potwierdzono w NREL.



Rys.4. Wykresy sprawności wybranych ogniw dla koncentratorów promieniowania: 1 – ogniwo 4J, 2 – ogniwo 3J, 3 – moduł krzemowy 3J, 4 – ogniwo 2J, 5 – ogniwo GaAs 1J, 6 – ogniwo krzemowe 1J, 7 – ogniwo CIGS 1J

Podsumowanie

W artykule przedstawiono i porównano osiągnięte sprawności wybranych ogniw i modułów fotowoltaicznych. Tempo zmian jest zróżnicowane w zależności od rodzaju półprzewodnika, technologii wytwarzania, konstrukcji przyrządu, wielkości powierzchni czynnej, przeznaczenia, warunków pracy itp. Większość prezentowanych ogniw i modułów (za wyjątkiem technologii monokrystalicznych) jest określana, ze względu na grubość absorbera, jako cienkowarstwowe. Literatura nie podaje jednoznacznie definicji oraz przedziału grubości, jako wyznacznika, umożliwiającego taką kwalifikację. Cienkie warstwy mają zwykle grubość od kilkunastu nanometrów do kilkudziesięciu mikrometrów. Do głównych zalet tych technologii należą: dostępna szersza gama materiałów półprzewodnikowych oraz tanie podłoża w tym również elastyczne, niewielka energochłonność procesu produkcji w porównaniu z technologią monokrystaliczną oraz rozmaite rozwiązania konstrukcyjne.

Porównując prezentowane dane można zauważyć wyraźne spowolnienie wzrostu sprawności dla technologii nieorganicznych monokrystalicznych (1J). Przyczyną może być m.in. zbliżanie się tego typu rozwiązań do teoretycznej granicy sprawności konwersji [28]. Zdecydowany wzrost sprawności jest widoczny natomiast dla nowych technologii jak np. wielozłączowe (tandemowe), HIT (połączenie krzemu c-Si:Cz z a-Si), TFT (ogniwa cienkowarstwowe

z krzemu c-Si), itp. Technologie te będą w najbliższych latach rozwijane w celu wdrożenia ich do produkcji na skalę przemysłową. Należy jednak podkreślić, że większość z prezentowanych wyników dotyczy konstrukcji o małej, bądź bardzo małej powierzchni, zatem informują o teoretycznych możliwościach danego rozwiązania. Przed wdrożeniem do produkcji należy opracować tanią technologię, wielko powierzchniowych struktur przy zachowaniu, otrzymanych wcześniej wyników sprawności.

Na rynku fotowoltaiki coraz większego znaczenia nabierają ogniwa i moduły cienkowarstwowe z pierwiastków 11 do 16 grupy układu okresowego na przykład: GaAs, CdTe, CIGS, CIGSS, CZTSS. Wysoki współczynnik absorpcji światła dla zakresu długości fali od 300nm do przeszło 1100nm, umożliwia konwersję tej części widma słonecznego na energię elektryczną w strukturach cienkowarstwowych. Półprzewodniki te są coraz częściej stosowane do budowy ogniw wielozłączowych dla koncentratorów promieniowania i osiągają bardzo dobre rezultaty sprawności. Szybki trend wzrostowy osiąganych wyników sprawności, przy niskiej cenie materiałów może zdecydować w niedalekiej perspektywie o rozpoczęciu seryjnej produkcji.

Ogniwa organiczne oraz fotochemiczne są istotną, tańszą alternatywą na rynku PV. Głównymi zaletami są m.in. niskie koszty wytwarzania, tanie komponenty oraz możliwość nanoszenia na lekkich, elastycznych podłożach.

W ostatnich latach nastąpił wyraźny postęp technologiczny zwłaszcza dla rozwiązań tandemowych oraz hybrydowych. W bieżącym roku wielozłączowe ogniwo organiczne firmy Heliatek osiągnęło rekordową sprawność 13,2% [29].

W nadchodzących latach w branży PV będzie jednak nadal dominował krzem, jego technologie monokrystaliczne i cienkowarstwowe, które będą rozwijane w kierunku podniesienia sprawności konwersji i obniżenia kosztów produkcji. Jest to związane z tanim surowcem (SiO_2), bardzo dobrze rozwiniętym zapleczem badawczym, technologicznym i produkcyjnym oraz poniesionymi znacznymi nakładami inwestycyjnymi w produkcję opartą na krzemie.

W najbliższej przyszłości można się spodziewać wielu zmian. Prowadzone, intensywne badania fizyko-chemiczne struktur materiałów półprzewodnikowych oraz poszukiwanie nowych rozwiązań technologicznych i konstrukcyjnych z pewnością zaowocują nowymi, wymiernymi osiągnięciami w tej dziedzinie nauki i techniki.

Wykresy sprawności ogniw i modułów fotowoltaicznych opracowano na podstawie „*Progress in Photovoltaics Res. Appl.*” od wydania: Solar Cell Efficiency Tables (Ver.9), 5 (1997) 51-54, do wydania: Solar Cell Efficiency Tables (Ver.48), 24 (2016), 905-913.

Autor: mgr inż. Przemysław Korasiak, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Instytut Automatyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole.
E – mail: p.korasiak@po.opole.pl

LITERATURA

- [1] Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E., Solar Cell Efficiency Tables (Version 39), *Progress in Photovoltaics Res. Appl.*, 20 (2012), 12-20
- [2] ASTM G173-03: Terrestrial Reference Spectra for Photovoltaic Performance Evaluation, <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5> Dostęp 15.11.2016
- [3] Gueymard C. A., Myers D., Emery K., Proposed Reference Irradiance Spectra For Solar Energy Systems Testing, *Solar Energy*, 73 (2002) n.6, 443-467
- [4] International Standard IEC 60904-3, Ed.2.0, 2008-04, Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data
- [5] Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Solar Cell Efficiency Tables (Version 33), *Progress in Photovoltaics Res. Appl.*, 17 (2009), 85-94
- [6] Emery K., Measurement and Characterization of Solar Cells and Modules, in Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Edition 2 ed., H. S. Luque A., Ed., John Wiley & Sons, (2011)
- [7] Green M.A., Emery K., King D.L., Igari S., Solar Cell Efficiency Tables (Version 15), *Progress in Photovoltaics Res. Appl.*, 8 (2000), 187-195
- [8] Luque A., Hegedus S., Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2 ed., John Wiley & Sons, (2011)
- [9] Jastrzębska G., Ogniwa słoneczne. Budowa, technologia i zastosowanie, Warszawa WKŁ, (2013)
- [10] Sadao Adachi, Earth-Abundant Materials for Solar Cells, John Wiley & Sons, (2015)
- [11] Maruyama E. et al., Sanyo's challenges to the development of highefficiency HIT solar cells and the expansion of HIT business, *4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCEP-4)*, Hawaii, (2006)
- [12] <http://news.panasonic.com/global/press/data/2014/04/en140410-4/en140410-4.html>, dostęp 9.11.2016
- [13] Bergmann R.B., Rinke T.J., Wagner T.A., Werner J.H., Thin film solar cells on glass based on the transfer of monocrystalline Si films. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 65 (2001), 355-361
- [14] http://www.trinasolar.com/us/about-us/newinfo_978.html, dostęp 15.11.2016
- [15] Staebler D.L., Wronski C.R., Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si, *Applied Physics Letters*, 31 (1977), n.4, 292-294
- [16] Meier J., et al., Potential of amorphous and microcrystalline silicon solar cells, *Thin Solid Films*, 451-452 (2004), 518-524
- [17] Chiu P.T. et al., Direct Semiconductor Bonded 5J Cell For Space And Terrestrial Applications, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4, (2014) n.1, 493-497
- [18] <http://www.altadevices.com/press-releases/alta-devices-achieves-new-solar-energy-efficiency/> dostęp 9.11.2016
- [19] Yastrebova N.V., High-efficiency multi-junction solar cells: Current status and future potential, Centre for Research in Photonics, University of Ottawa, (2007)
- [20] <http://www.eupvsec-planner.com/presentations/c36603/> dostęp 9.11.2016
- [21] Jin Hyuck Heo, et al., Efficient inorganic-organic hybrid heterojunction solar cells containing perovskite compound and polymeric hole conductor, *Nature Photonics*, 7 (2013), 486-491
- [22] Wang W., et al., Device Characteristics of CZTSSe Thin-Film Solar Cells with 12.6% Efficiency, *Advanced Energy Materials*, vol. 4 (2014), n.7
- [23] Komiya R. et al., Improvement of the conversion efficiency of a monolithic type dye-sensitized solar cell module, *21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference*, Fukuoka (2011)
- [24] Huawei Hu, et al., Terthiophene-Based D-A Polymer with an Asymmetric Arrangement of Alkyl Chains That Enables Efficient Polymer Solar Cells, *Journal of American Chemical Society*, 137 (2015), n.44, 14149-14157
- [25] <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/press-releases-2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent> dostęp 9.11.2016
- [26] <http://www.sharp-world.com/corporate/news/130614.html> dostęp 07.11.2016
- [27] <http://www.businesswire.com/news/home/20130820005361/en/Amonix-Achieves-World-Record-35.9-PV> dostęp 04.11.2016
- [28] Shockley W., Queisser H.J., Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells, *Journal of Applied Physics*, 32 (1961), 510-519
- [29] <http://www.heliatek.com/en/news/news/details/heliatek-sets-new-organic-photovoltaic-world-record-efficiency-of-13-2-228> dostęp 17.11.2016