

Tadeusz RODZIEWICZ¹, Aleksander ZAREMBA² i Maria WACŁAWEK¹

POSTĘPY W FOTOWOLTAICE W POLSCE I NA ŚWIECIE

PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS IN POLAND AND IN THE WORLD

Abstrakt: W artykule przedstawiono postęp w zakresie uzyskiwanych sprawności przez ogniwa i moduły fotowoltaiczne (PV) wykonane z różnych materiałów i za pomocą różnych technologii. Zawarto w nim szczegółowe zestawienia tabelaryczne sprawności oraz ich parametrów technicznych. Zwrócono uwagę na nowe obiecujące technologie, które jeszcze nie mają rekordowych sprawności, ale z uwagi na proces ich wytwarzania roszą nadzieje na uzyskanie bardzo dużych sprawności albo tanich wielkopowierzchniowych modułów do komercyjnego zastosowania. Ponadto, omówiono ekonomiczne skutki wdrożenia nowo zawartych zapisów w uchwalonej w lutym 2015 r. Ustawie o Odnawialnych Źródłach Energii (OZE) dla rozwoju rozproszonych instalacji prosumenckich w Polsce.

Słowa kluczowe: ogniwa słoneczne, moduły słoneczne, sprawność ogniw, sprawność modułów PV, Ustawa o Odnawialnych Źródłach Energii

Wprowadzenie

Konwersja fotowoltaiczna (PV) jest najdoskonalszym sposobem przetwarzania energii słonecznej na elektryczną, gdyż jest to konwersja bezpośrednia. Używane w niej ogniwa i moduły słoneczne z roku na rok cieszą się coraz większą popularnością, wynikającą z rozwoju technologii ich wywarzania. Skutkuje to wzrostem ich sprawności, nowoczesnym wzornictwem i ciekawą kolorystyką. Spadek cen oraz wzrost ich sprawności powoduje zanik ekonomicznej bariery w powszechnym zastosowaniu w szeregu nowych obszarach. I tak np. duży postęp w technologii wytwarzania wysokosprawnych źródeł światła opartych na LED-ach, zwiększający bardzo ich energooszczędność - doposażonych w małe turbiny wiatrowe [1], a także użycie cienkowarstwowych ogniw fotowoltaicznych do zasilania energooszczędnej elektroniki z ciekłokrystalicznymi wyświetlaczami powoduje wręcz „wysyp” wszelkiego rodzaju autonomicznych instalacji oświetleniowych przejsz przez jezdnię, oświetlanych znaków drogowych oraz inteligentnych tabliczek cenowych stosowanych w supermarketach. Natomiast wdrożenie narodowych programów wsparcia OZE powoduje zmianę polityki wykorzystywania fotowoltaiki do rozproszonej produkcji energii elektrycznej przez ich użytkowników (osoby fizyczne). Możliwość wykorzystania sieci energetycznej jako układu do akumulacji w okresach dużych wartości napromieniowania, tj. okresach dużej produkcji przez rozproszone systemy fotowoltaiczne, bez stosowania drogich systemów akumulatorowych znacznie zwiększa celowość ich użycia w instalacjach konsumenckich (brak korelacji okresu maksymalnej produkcji energii przez system PV z jego zapotrzebowaniem przez użytkownika systemu PV). Dodatkowo, możliwość odsprzedaży tzw. czystej energii po gwarantowanych cenach preferencyjnych

¹ Zakład Badań Fizykochemicznych, Samodzielna Katedra Biotechnologii i Biologii Molekularnej, Uniwersytet Opolski, ul. kard. B. Kominka 6, 45-032 Opole, tel. 77 401 60 42, fax 77 401 60 51, email: trodziewicz@wp.pl, maria.waclawek@o2.pl

² Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Wydział Elektryczny, Politechnika Częstochowska, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, tel. 34 325 08 27, email: zaremba@el.pcz.czyst.pl

* Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'15, Jarnołtówek, 14-16.10.2015

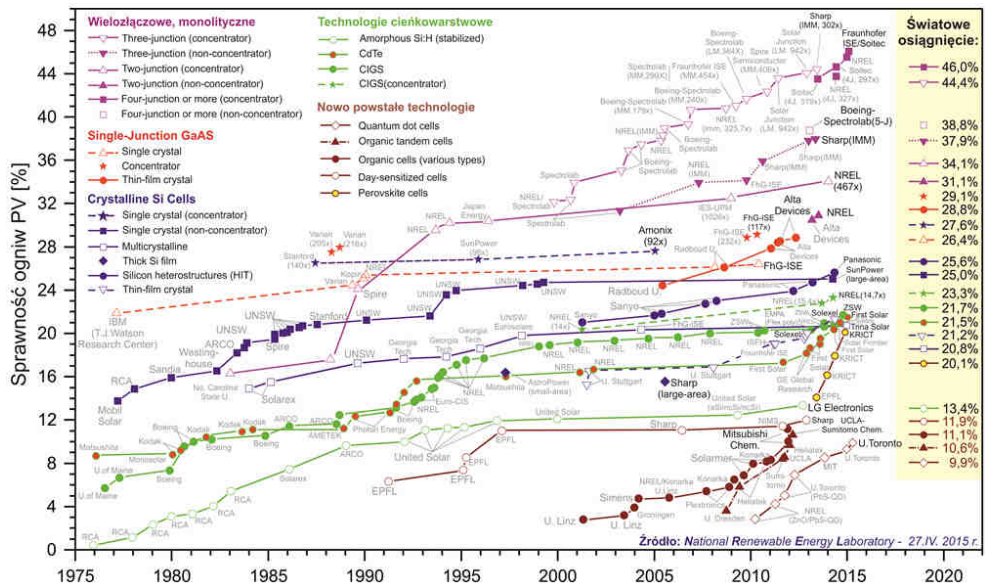
powoduje zmianę przekonania społeczeństwa co do opłacalności ww. inwestycji. Panujące do niedawna ogólne przekonanie o braku ekonomicznej opłacalności stosowania instalacji PV w naszych szerokościach geograficznych ze względu na duże ceny ogniw/modułów, jak również występujące niskie wartości nasłonecznienia powoli traci rację bytu.

W artykule podjęto próbę przedstawienia ostatnich uzyskanych rekordowych osiągnięć w zakresie różnych technologii i materiałów wytwarzania ogniw i modułów PV. Przedstawiono nowe, obiecujące technologie, które jeszcze nie mają rekordowych sprawności, ale z uwagi na sam proces ich wytwarzania roszą nadzieje na uzyskanie tych sprawności albo tanich wielkopowierzchniowych modułów do komercyjnego zastosowania. Ponadto, omówiono ekonomiczne skutki wdrożenia nowo zawartych zapisów w ostatnio uchwalonej ustawie o OZE dla rozwoju rozproszonych instalacji prosumenckich w Polsce.

Najnowsze rekordy świata w zakresie sprawności ogniw i modułów PV

Od wielu lat trwa współzawodnictwo między producentami ogniw i laboratoriami badawczymi o ustanowienie rekordu świata (ang. *World Record*, WR) w zakresie ich sprawności (rys. 1). W kwietniu 2013 r. laboratorium Fraunhofera (FhG-ISE) potwierdziło uzyskanie przez wielozłączowe monolityczne ogniwo firmy Sharp, o konstrukcji InGaP/GaAs/InGaAs, światowego rekordu wynoszącego 44,4% dla światła skoncentrowanego (302x) o rozkładzie AM1,5 [2, 3]. We wrześniu 2014 r. światowy rekord sprawności ogniw PV wynosił 44,7% dla koncentracji światła (297x) [2], natomiast już w listopadzie 2014 r. osiągnął on 46% dla koncentracji światła (508x) [2, 4]. Do 27 kwietnia 2015, tj. przeprowadzenia ww. analizy, stanowił on światowy rekord sprawności ustanowiony dla wielozłączowych ogniw monolitycznych przeznaczonych do pracy ze skoncentrowanym promieniowaniem słonecznym.

To współzawodnictwo jest kołem napędowym postępu w rozwoju ogniw i modułów słonecznych. Jest pierwszym etapem na drodze do wytworzenia ogniwa idealnego. W większości przypadków podawane na rysunku 1 sprawności dotyczą uzyskanych sprawności struktury małopowierzchniowej i informują tylko o możliwości praktycznego wykorzystania określonej technologii, danego absorbera bądź konstrukcji ogniwa. Następnym etapem jest opanowanie technologii umożliwiającej przełożenie tej struktury małopowierzchniowej na moduł wielkopowierzchniowy z zachowaniem, w miarę możliwości, wcześniej uzyskiwanej rekordowej sprawności. Przetwarzanie to odbywa się na zasadzie optymalizacji powierzchni modułu kosztem jej początkowej wartości sprawności. Etapem docelowym jest opanowanie technologii seryjnej produkcji komercyjnych, tanich, wysokosprawnych modułów PV do powszechnego zastosowania, z zachowaniem powtarzalności uzyskiwanych wartości sprawności. Tu również należy się spodziewać, że technologia wysokoseryjnej produkcji będzie optymalizowana z uwzględnieniem kosztów jej produkcji, tak aby cena 1 Wp tego wysokosprawnego modułu była konkurencyjna do cen panujących na rynku. Wiadomo, że w niektórych przypadkach, np. do zastosowań specjalnych (tj. do zastosowań niekomercyjnych), mogą być wykorzystywane moduły bez optymalizacji cenowej, czyli wszędzie tam, gdzie sprawność oraz niezawodność jest najistotniejsza, jak np. w zastosowaniach kosmicznych.



Rys. 1. Wzrost sprawności różnych typów ogniw PV wg National Renewable Energy Laboratory z 27.04.2015 r. Objaśnienie oznaczeń: (4J, 297x) - pierwszy człon w nawiasie dotyczy budowy ogniw, drugi człon wartość koncentracji promieniowania słonecznego w koncentratorze, np. ogniwo 4-złączowe do pracy w systemie z koncentratorom promieniowania słonecznego równym 297 słońc (5J - 5-złączowe, 4J - 4-złączowe, LM - dopasowane sieciowo, MM - metamorficzne, IMM - odwrótne metamorficzne) [2]

Fig. 1. The increase in the efficiency of different types of PV cells by National Renewable Energy Laboratory in 27.04.2015. Explanation of indications: (4J, 297x) - the first term in brackets - concerns the construction of the cell, the second term the value of concentration of solar radiation in a system with concentrator of solar radiation equal to 297 suns (5J - five-junction, 4J - four-junction, LM - lattice matched, MM - metamorphic, IMM - inverted, metamorphic) [2]

Reasumując, przedstawiony na rysunku 1 postęp uzyskiwanych wartości sprawności różnych typów ogniw PV wg National Renewable Energy Laboratory z 27.04.2015 r. nie w pełni odzwierciedla rzeczywisty stan rozwoju fotowoltaiki w świecie i wymaga uzupełnienia publikacji rekordów zawartych w tabelach Martina A. Greena. Warunkiem opublikowania osiągnięć/rekordów sprawności dla ogniw, minimodułów i modułów PV jest [2, 3]:

1. weryfikacja uzyskanej sprawności przez niezależne i autoryzowane laboratorium pomiarowe, wyszczególnione we właściwym dokumencie,
2. posiadanie przez testowy obiekt wartości obszaru aktywnej powierzchni apertury, wynoszącej nie mniej niż:
 - 0,05 cm² dla ogniw przeznaczonych do pracy z koncentracją promieniowania słonecznego (np. ogniwo o powierzchni $S = 0,0520 \text{ cm}^2$ i o sprawności $\eta = 46\%$ w systemie z koncentracją 508 słońc uzyskuje, w warunkach STC, moc nominalną równą $P = 1,21 \text{ Wp}$);

- 1 cm² dla ogniw i submodułów przeznaczonych do pracy bez koncentracji promieniowania słonecznego;
- 800 cm² dla modułów.

Zestawienie ostatnich światowych rekordów sprawności (z podaniem daty ogłoszenia przez laboratorium pomiarowe) ogniw i modułów PV wraz z ich parametrami i krótką charakterystyką oraz technologią, w której zostały wykonane, przedstawiono w tabelach 1-4. W tabeli 1 zebrano uzyskane wartości sprawności ogniw i minimodułów PV do zastosowań naziemnych, mierzone w warunkach STC, w tabeli 2 - modułów, a w tabeli 4 - sprawności dla ogniw i modułów przeznaczonych do zastosowań w naziemnych systemach z koncentracją promieniowania słonecznego.

Tabela 1

Wartości sprawności ogniw i minimodułów PV do zastosowań naziemnych, mierzone w warunkach STC (IEC 60904-3: 2008, ASTM G-173-03 global) [3, 4]

Table 1

The values of the efficiency of PV cells and minimodules for terrestrial applications, measured in STC conditions (IEC 60904-3: 2008, ASTM G-173-03 global) [3, 4]

Typ ¹⁾	<i>Eff</i>	<i>S</i> ²⁾	<i>V_{oc}</i>	<i>J_{sc}</i>	<i>FF</i>	Laboratorium badające ³⁾ (data)	Opis ³⁾
	[%]	[cm ²]	[V]	[mA/cm ²]	[%]		
<i>Krzem:</i>							
Si (krystaliczny)	25,6±0,5	143,7 (da)	0,740	41,8	82,7	AIST (2/14)	Panasonic HIT, z tylnym złączem [5]
Si (multikrystaliczny)	20,4 ± 0,5	1,002 (ap)	0,664	38,0	80,9	NREL (5/04)	FhG-ISE [6]
1) Si (multikrystaliczny)	20,8 ± 0,6	243,9 (ap)	0,6626	39,03	80,3	FhG-ISE (11/14)	Trina Solar [7]
Si (cienkowarstwowy)	20,1 ± 0,4	242,6 (ap)	0,682	38,14	77,4	NREL (10/12)	Solexel (43 μm grubości) [8]
2) Si (cienkowarstwowy)	21,2 ± 0,4	239,7 (ap)	0,687	38,50	80,3	NREL (4/14)	Solexel (35 μm grubości) [9]
<i>Ogniwa z absorberem typu III-V</i>							
GaAs (cienkowarstwowy)	28,8 ± 0,9	0,9927 (ap)	1,122	29,68	86,5	NREL (5/12)	Alta Devices [10]
GaAs (multikrystaliczny)	18,4 ± 0,5	4,011 (t)	0,994	23,2	79,7	NREL (11/95)	RTI, Ge podłoże [11]
InP (krystaliczny)	22,1 ± 0,7	4,02 (t)	0,878	29,5	85,4	NREL (4/90)	Spire, epitaksjalny [12]
<i>Cienkowarstwowe polikrystaliczne ogniwa</i>							
CIGS (ogniwo)	20,5±0,6	0,9882 (ap)	0,752	35,3	77,2	NREL (3/14)	Solibro, na szkle [13]
CIGS (minimoduł)	18,7 ± 0,6	15,892 (da)	0,701	35,29	75,6	FhG-ISE (9/13)	Solibro, 4 ogniwa szeregowo [14]
CdTe (ogniwo)	19,6 ± 0,4	1,0055 (ap)	0,8573	28,59	80,0	Newport (6/13)	GE Global Research [15]
3) CdTe (ogniwo)	21,0 ± 0,4	1,0623 (ap)	0,8759	30,25	79,4	Newport (8/14)	First Solar, na szkle [16]
<i>Amorficzne/mikrokrystaliczne Si</i>							
Si (amorficzny)	10,1 ± 0,3	1,036 (ap)	0,886	16,75	67,8	NREL (7/09)	Oerlikon Solar Lab, Neuchatel [17]

Typ ¹⁾	<i>Eff</i>	<i>S</i> ²⁾	<i>V_{oc}</i>	<i>J_{sc}</i>	<i>FF</i>	Laboratorium badające ³⁾ (data)	Opis ³⁾
	[%]	[cm ²]	[V]	[mA/cm ²]	[%]		
4) Si (amorficzny)	10,2 ± 0,3	1,001 (ap)	0,896	16,36	69,8	AIST (7/14)	AIST [18]
Si (mikrokryształiczny)	11,0±0,3	1,045 (da)	0,542	27,44	73,8	AIST (1/14)	AIST [19]
5) Si (mikrokryształiczny)	11,4 ± 0,3	1,046 (da)	0,535	29,07	73,1	AIST (7/14)	AIST [20]
<i>Fotowoltaiczne ogniwa uczulane barwnikiem</i>							
Ogniwo uczulane barwnikiem	11,9 ± 0,4	1,005 (da)	0,744	22,47	71,2	AIST (9/12)	Sharp [21]
Minimoduł uczulany barwnikiem	29,9 ± 0,4	17,11 (ap)	0,719	19,4	71,4	AIST (8/10)	Sony, 8 ogniw połączonych równolegle [22]
7) Minimoduł uczulany barwnikiem	10,0 ± 0,4	24,19 (da)	0,718	20,46	67,7	AIST (6/14)	Fujikura/Tokyo. U. Science [23]
Submoduł barwnikowy	8,8 ± 0,3	398,8 (da)	0,697	18,42	68,7	AIST (9/12)	Sharp, 26 ogniw szeregowych [24]
<i>Fotowoltaiczne ogniwa organiczne</i>							
8) Cienkowarstwowe organiczne	11,0 ± 0,3	0,993 (da)	0,793	19,40	71,4	AIST (9/14)	Toshiba [25]
Minimoduł organiczny	9,1±0,3	25,04 (da)	0,794	17,06	67,5	AIST (2/14)	Toshiba (4 ogniwa szeregowo) [26]
9) Minimoduł organiczny	9,5 ± 0,3	25,05 (da)	0,789	17,01	70,9	AIST (8/14)	Toshiba (4 ogniwa szeregowo) [25]
Submoduł organiczny	6,8 ± 0,2	395,9 (da)	0,798	13,50	62,8	AIST (10/12)	Toshiba (15 ogniw szeregowych) [26]
<i>Wielozłączowe</i>							
InGaP/GaAs/InGaAs	37,9 ± 1,2	1,047 (ap)	3,065	14,27	86,7	AIST (2/13)	Sharp [27]
a-Si/nc-Si/nc-Si (cienkowarstwowy)	13,4 ± 0,4	1,006 (ap)	1,963	9,52	71,9	NREL (7/12)	LG Electronics [28]
a-Si/nc-Si (cienkowarstwowe ogniwo)	12,3 ± 0,3	0,962 (ap)	1,365	12,93	69,4	AIST (7/11)	Kaneka [29]
6) a-Si/nc-Si (cienkowarstwowe ogniwo)	12,7 ± 0,4	1,000 (da)	1,342	13,45	70,2	AIST (10/14)	AIST [30]
a-Si/nc-Si (cienkowarstwowy minimoduł)	11,8 ± 0,6	40,26 (ap)	1,428	12,27	67,5	FhG-ISE (4/14)	TEL Solar, Trubbach Labs (10 ogniw szeregowych) [31]

- 1) CIGS - CuInGaSe₂, a-Si - krzem amorficzny/stop wodorowy, nc-Si - krzem nanokryształiczny lub mikrokryształiczny
- 2) ap - powierzchnia apertury; da - zaprojektowany obszar do oświetlenia; t - całkowita powierzchnia
- 3) FhG-ISE - Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme; AIST - Japanese National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Pewnym odstępstwem od przedstawionej powyżej reguły publikacji światowych rekordów sprawności są dane z tabeli 3. Jest to spowodowane tym, że dla niektórych obiektów, mimo niespełnienia ww. wymogów, występuje uzasadniona konieczność przedstawienia ich w wykazie osiągnięć (np. pojawiająca się nowa technologia rokująca nadzieje wytwarzania tanich ogniw do komercyjnego zastosowania). Wtedy to, ponieważ

nie mogą one być traktowane jako rekordy klas, ogniw i modułów, są one publikowane w tabeli 3 w wykazie tzw. „Godnych uwagi wyjątków”.

Tabela 2

Potwierdzone wartości uzyskanych sprawności modułów PV do zastosowań naziemnych, mierzone w warunkach STC (IEC 60904-3: 2008, ASTM G-173-03 global) [3, 4]

Table 2

Confirmed the values obtained efficiency of the PV modules for terrestrial applications, measured in STC conditions (IEC 60904-3: 2008, ASTM G-173-03 global) [3, 4]

Typ ¹⁾	<i>Eff</i>	<i>S</i> ²⁾	<i>V_{oc}</i>	<i>J_{sc}</i>	<i>FF</i>	Laboratorium badające ³⁾ (data)	Opis
	[%]	[cm ²]	[V]	[mA/cm ²]	[%]		
Si (krystaliczny)	22,9 ± 0,6	778 (da)	5,60	3,97	80,3	Sandia (9/96)	UNSW/Gochermann [32]
Si (krystaliczny duży)	22,4 ± 0,6	15775 (ap)	69,57	6,341	80,1	NREL (8/12)	SunPower [33]
Si (multikrystaliczny)	18,5 ± 0,4	14661 (ap)	38,97	9,149	76,2	FhG-ISE (1/12)	Q-Cells (60 ogniw szeregowych) [34]
Si (cienkowarstwowy polikrystaliczny)	8,2 ± 0,2	661 (ap)	25,0	0,320	68,0	Sandia (7/02)	Pacific Solar (< 2 m na szkło) [35]
GaAs (cienkowarstwowy)	24,1 ± 1,0	858,5 (ap)	10,89	2,255	84,2	NREL (11/12)	Alta Devices [36]
CdTe (cienkowarstwowy)	17,5±0,7	7021 (ap)	103,1	1,553	76,6	NREL (2/14)	First Solar, monolityczny [37]
CIGS (cienkowarstwowy)	15,7 ± 0,5	9703 (ap)	28,24	7,254	72,5	NREL (11/10)	Miasole [38]
CIGSS (wolny od Cd)	13,5 ± 0,7	3459 (ap)	31,2	2,18	68,9	NREL (8/02)	Showa Shell [38]
10) CIGS (wolny od Cd)	17,5 ± 0,5	808 (da)	47,6	0,408	72,8	AIST (6/14)	Solar Frontier (70 ogniw) [39]
a-Si/nc-Si (tandem)	11,6±0,5	14250 (t)	198,5	1,254	66,2	ESTI (12/13)	TEL Solar, Trubbach Labs [31]
11) a-Si/nc-Si (tandem)	12,2 ± 0,3	14322 (t)	202,1	1,261	68,8	ESTI (6/14)	TEL Solar, Trubbach Labs [40]
12) Organiczny	8,7 ± 0,3	802 (da)	17,47	0,569	70,4	AIST (5/14)	Toshiba [25]

- 1) CIGSS - CuInGaSSe; a-Si - krzem amorficzny/stop wodorowy, nc-Si - krzem nanokrystaliczny lub mikrokrystaliczny
- 2) ap - powierzchnia apertury; da - zaprojektowany obszar do oświetlenia; t - całkowita powierzchnia
- 3) AIST - Japanese National Institute of Advanced Industrial Science and Technology; NREL - National Renewable Energy Laboratory; FhG-ISE - Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme; ESTI - European Solar Test Installation

W ww. tabelach wytuszczoną czcionką wyróżniono konstrukcję ogniwa/modułu, dla którego od ostatniej, ubiegłorocznej kwietniowej publikacji nastąpił postęp w zakresie uzyskiwanych sprawności. Dodatkowo, w celu zobrazowania tego postępu oraz jego dynamiki (tj. o ile wzrosła ta sprawność i jak długo trwało jej pobicie) rozszerzono te tabele o ubiegłoroczne dane dla aktualnie pobitych wartości sprawności. I tak np. w tabeli 1, w grupie ogniw z krystalicznego krzemu, rekordową sprawność o wartości 25,6% na powierzchni 143,7 cm² ma ogniwo HIT Panasonic zmierzone w Japońskim Narodowym Instytucie Nauki i Technologii AIST (Advanced Industrial Science and Technology) w lutym 2014 r. Z uwagi, iż dane te były publikowane we wcześniejszym zestawieniu

rekordów tj. w 2014 r., a do kwietnia 2015 r. nie nastąpił ich wzrost - to w aktualnym zestawieniu nie są one wyłuszczone, a tylko zaznaczone jako wciąż panujący rekord dla danej kategorii ogniw.

Tabela 3

„Godne uwagi wyjątki” - wyniki pomiarów małopowierzchniowych ogniw i modułów, mierzonych w warunkach STC (IEC 60904-3: 2008, ASTM G-173-03 global) [3, 4]

Table 3

“Notable exceptions” of results from measurements of cells and modules, measured in STC conditions (IEC 60904-3: 2008, ASTM G-173-03 global) [3, 4]

Typ ¹⁾	<i>Eff</i>	<i>S</i> ²⁾	<i>V_{oc}</i>	<i>J_{sc}</i>	<i>FF</i>	Laboratorium badające ³⁾ (data)	Opis ⁴⁾
	[%]	[cm ²]	[V]	[mA/cm ²]	[%]		
<i>Ogniwa krzemowe</i>							
Si (krystaliczne)	25,0±0,5	4,00 (da)	0,706	42,7	82,8	Sandia (3/99)	UNSW PERL, z górnymi i tylnymi kontaktami [41]
Si (krystaliczny duży)	25,0±0,7	120,94 (t)	0,726	41,5	82,8	FhG-ISE (2/14)	SunPower, z tylnym złączem [42]
Si (multikrystaliczny duży)	19,5 ± 0,4	242,7 (t)	0,652	39,0	76,7	FhG-ISE (3/11)	Q-Cells, kontakty wypalane laserowo [43]
<i>Ogniwa z absorberem typu III-V</i>							
GaInP	20,8 ± 0,6	0,2491 (ap)	1,4550	16,04	89,3	NREL (5/13)	NREL, o dużej przerwie energetycznej [44]
<i>Cienkowarstwowe polikrystaliczne ogniwa</i>							
CIGSS (wolny od Cd)	20,9±0,7	0,5192 (ap)	0,6858	39,91	76,4	FhG-ISE (3/14)	Showa Shell na szkle [45-46]
CIGSS (wolny od Cd)	19,7 ± 0,5	0,496 (da)	0,683	37,06	77,8	AIST (11/12)	Showa Shell/Tokyo U. of Science [45]
CIGSS (moduł wolny od Cd)	16,6±0,8	660,3 (ap)	26,7	0,895	69,5	NREL (1/14)	Avancis (monolityczny) [3]
13) CIGS (cienkowarstwowy)	21,7 ± 0,7	0,4972 (da)	0,7963	36,59	79,3	FhG-ISE (9/14)	ZSW na szkle [47]
CdTe (cienkowarstwowy)	20,4±0,5	0,4778 (da)	0,8717	29,47	79,5	Newport (12/13)	First Solar na szkle [48]
CZTSS (cienkowarstwowy)	12,6±0,3	0,4209 (ap)	0,5134	35,21	69,8	Newport (7/13)	IBM, z osadzeniem roztworowym [49]
CZTS (cienkowarstwowy)	8,5 ± 0,2	0,2382 (da)	0,708	16,83	70,9	AIST (1/13)	Toyota Central R&D Labs [50]
<i>Pozostałe ogniwa</i>							
Perowskit (cienkowarstwowe)	17,9±0,8	0,0937 (ap)	1,1142	21,8	73,6	Newport (4/14)	KRICT [51]
14) Perowskit (cienkowarstwowe)	20,1 ± 0,4	0,0955 (ap)	1,059	24,65	77,0	Newport (11/14)	KRICT [4,51]
Organiczne (cienkowarstwowe)	11,1 ± 0,3	0,159 (ap)	0,867	17,81	72,2	AIST (10/12)	Mitsubishi Chemical [52]

1) CIGSS, CuInGaSSe; CZTSS, Cu₂ZnSnS_{4-y}Se_y; CZTS, Cu₂ZnSnS₄

2) ap - powierzchnia apertury; da - zaprojektowany obszar oświetlenia; t - całkowita powierzchnia

3) AIST - Japanese National Institute of Advanced Industrial Science and Technology; NREL - National Renewable Energy Laboratory; FhG-ISE - Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme; ESTI - European Solar Test Installation;

4) KRICT - Korean Research Institute of Chemical Technology

Tabela 4

Sprawności ogniw i modułów, przeznaczonych do naziemnych systemów z koncentracją promieniowania słonecznego i mierzonych zgodnie z normą ASTM G-173-03 (tj. z użyciem składowej bezpośredniej promieniowania słonecznego o rozkładzie typu AM1.5 B i odniesieniu pomiaru do temperatury 25°C) [3, 4]

Table 4

Efficiencies of cells and modules intended for use in terrestrial systems with concentration of solar radiation, measured in accordance with ASTM G-173-03, ie with a direct component of solar radiation, distribution AM1.5 B type and with reference to the measurement in cells/modules temperature of 25°C [3, 4]

Typ	Eff	S ¹⁾	Intensywność ²⁾	Laboratorium badające ³⁾ (data)	Opis ³⁾
	[%]	[cm ²]	[słońce]		
<i>Pojedyncze ogniwa</i>					
GaAs	29,1 ± 1,3	0,0505 (da)	117	FhG-ISE (3/10)	Fraunhofer ISE [3]
Si	27,6 ± 1,2	1,00 (da)	92	FhG-ISE (11/04)	Amonix, z tylnym kontaktem [53]
CIGS (cienkowarstwowy)	23,3 ± 1,2	0,09902 (ap)	15	NREL (3/14)	NREL [4, 54]
<i>Wielozłączowe ogniwa</i>					
InGaP/GaAs/InGaAs	44,4 ± 2,6	0,1652 (da)	302	FHG-ISE (4/13)	Sharp, inverted metamorphic [55]
17) GaInP/GaAs; GaInAsP/GaInAs	46,0 ± 2,2	0,0520 (da)	508	AIST (10/14)	Soitec/CEA/FhG-ISE bonded [4, 56]
<i>Submoduł</i>					
GaInP/GaAs; GaInAsP/GaInAs	38,5 ± 1,9	0,202 (ap)	20	NREL (8/08)	DuPont et al., z podziałem widma [57]
15) GaInP/GaInAs/Ge; Si	40,4 ± 2,8	287 (ap)	365	NREL (11/14)	UNSW z podziałem widma [58]
<i>Moduły</i>					
Si	20,5 ± 0,8	1875 (ap)	79	Sandia (4/89)	Sandia/UNSW/ENTECH (12 ogniw) [59]
Trzy złączowy	35,9 ± 1,8	1092 (ap)	N/A	NREL (8/13)	Amonix [60]
16) Czterozłączowy	36,7 ± 2,6	829,6 (ap)	N/A	FhG-ISE (5/14)	Fraunhofer ISE [61]
<i>Godne uwagi</i>					
Si (duży)	21,7 ± 0,7	20,0 (da)	11	Sandia (9/90)	UNSW, z laserowym wyłabianiem [62]
Submoduł luminescencyjny	7,1 ± 0,2	25 (ap)	2,5	ESTI (9/08)	ECN Petten, GaAs cells [63]

1) ap - powierzchnia apertury; da - zaprojektowany obszar do oświetlenia

2) jedno słońce odpowiada promieniowaniu składowej bezpośredniej o wartości 1000 Wm⁻²

3) AIST - Japanese National Institute of Advanced Industrial Science and Technology; NREL - National Renewable Energy Laboratory; FhG-ISE - Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme; ESTI - European Solar Test Installation

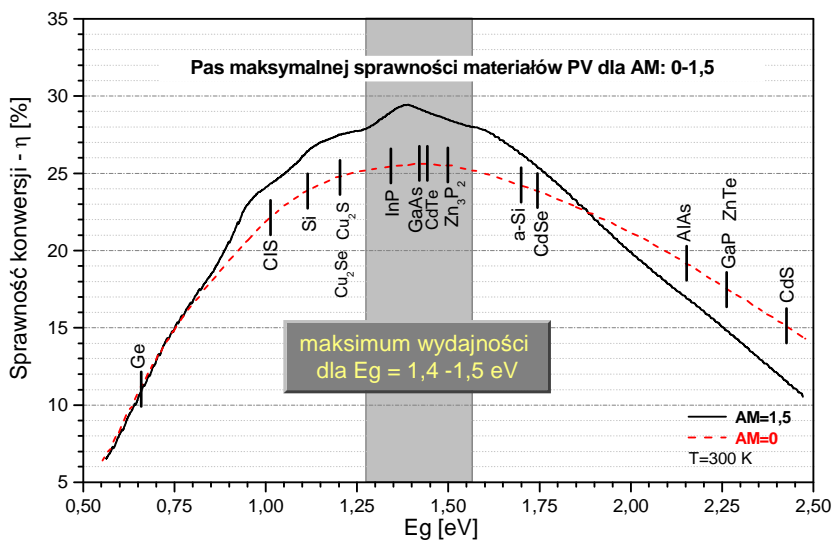
Pokrótce omówiono niektóre z uzyskanych cenniejszych osiągnięć zawartych w omawianych tabelach.

- Pierwszy nowy wynik w tabeli 1, oznaczony jako pozycja 1, informuje o nowym rekordzie dla multikrystalicznych ogniw krzemowych. Jest to typ ogniw ogniw produkowanych obecnie w największej ilości. Sprawność 20,8% została zmierzona przez Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (FhG-ISE) dla

pełnowymiarowego ogniwa (244 cm^2) wykonanego przez Trina Solar [7] na typowej płycie z multikrystalicznego krzemu o wysokiej czystości z użyciem technologii PERC (passivated emitter and rear cell - pasywacja emitera z tyłu ogniwa). Postęp dla tej kategorii bardziej się odnosi do przełożenia uzyskanej uprzednio sprawności (20,4% w 05.2004 r.) na strukturę o większej powierzchni ogniwa, tj. z $1,002 \text{ cm}^2$ na $243,9 \text{ cm}^2$.

- Drugi nowy wynik (poz. 2) dotyczy cienkowarstwowego submodułu na bazie cienkowarstwowej struktury krystalicznego krzemu (c-Si). Poprawa efektywności 21,2% (poprzedni rekord o wartości 20,1% na powierzchni $242,6 \text{ cm}^2$ struktury krystalicznej o grubości $45 \mu\text{m}$ uzyskany w 10.2012 r.) została zmierzona przez Narodowe Laboratorium Energii Odnawialnej (NREL) z dość niedużego obszaru (240 cm^2) submodułu wykonanego przez Soixel [9] z ogniw krzemowych o grubości tylko 35 mikronów.
- Trzeci nowy wynik (poz. 3) dotyczy uzyskania sprawności 21,0% dla ogniwa wykonanego z CdTe o powierzchni $1,06 \text{ cm}^2$ przez First Solar i zweryfikowane przez laboratorium Newport Technology and Applications Center w Newport (USA). Uzyskany wynik stanowi najwyższą potwierdzoną wartość sprawności dla cienkowarstwowego ogniwa polikrystalicznego tych rozmiarów.
- Nastąpiła nieznaczna poprawa ustabilizowanej sprawności do 10,2% dla ogniwa o powierzchni 1 cm^2 na bazie amorficznego krzemu (a-Si - wykonanego i zmierzonego przez Japoński Narodowy Instytut Nauki i Technologii - AIST) (poz. 4). Uzyskano większy wzrost sprawności (11,4%) ogniwa o powierzchni 1 cm^2 , wykonanego z mikrokrystalicznego krzemu, nazywanego również nanokrystalicznym ogniwem (nc-Si) wykonanym i zmierzonym w AIST (poz. 5).
- Prowadzone prace z poz. 5 i 4 skutkowały uzyskaniem w tym samym Instytucie innego nowego rekordu wyszczególnionego w tabeli 1, tj. ustabilizowanej sprawności 12,7% dla ogniwa tandemowego a-Si/nc-Si o powierzchni 1 cm^2 (poz. 6). Kolejna niewielka poprawa i przełamanie progu 10,0% sprawności dotyczy 24 cm^2 cienkowarstwowego minimodułu uczulanego barwnikiem wykonanego w Fujikura/Tokyo University of Science, a zweryfikowanego w AIST (poz. 7).
- Uzyskano duży przyrost początkowej wydajności do 11,0% dla 1 cm^2 cienkowarstwowego organicznego ogniwa wykonanego przez firmę Toshiba i zweryfikowanego w AIST (poz. 8). Ponadto, Toshiba wykonała ulepszoną wersję 25 cm^2 minimodułu organicznego o sprawności 9,5% zweryfikowaną w AIST, poprawiając w ten sposób poprzedni wynik tej firmy (poz. 9). Przy czym weryfikacja wyników pomiarowych dla ogniw uczulanych barwnikiem nie obejmowała badań dot. trwałości i stabilności (tj. oparto się na danych zgłaszanych i prezentowanych w innych publikacjach).

Warto zauważyć, że dla ogniwa z absorberem krystalicznym InP najlepszy wynik, wynoszący 22,1% dla powierzchni $4,02 \text{ cm}^2$, nie został pobity od 1990 roku. Może to być spowodowane znacznym zbliżeniem się do teoretycznej wartości konwersji fotowoltaicznej, której wykres dla jednozłączowych struktur homozłączowych został określony w 1956 r. wykresem Loferskiego (rys. 2), brakiem postępów bądź wstrzymaniem prac w przełożeniu ww. wyników na konstrukcje wielkopowierzchniowe.



Rys. 2. Zależność sprawności konwersji fotowoltaicznej od przerwy energetycznej ogniwa PV dla warunków AM0-AM1,5 [64, 65]

Fig. 2. The dependence of photovoltaic conversion efficiency of the PV cell energy gap for conditions AM0-AM1.5 [64, 65]

Pojawiły się trzy nowe rekordy dot. modułów PV, które wyróżnione zostały w tabeli 2, a mianowicie:

- Uzyskanie sprawność 17,5% dla małego modułu z CIGS-u wolnego od kadmu, o powierzchni 808 cm², wykonanego przez Solar Frontier i potwierdzonego pomiarem w laboratorium pomiarowym AIST (poz. 10).
- Drugi bardzo znaczący nowy rekord w tabeli 2 dotyczy modułu wielkopowierzchniowego (1,4 m²) - heterostruktury na bazie amorficznego krzemu/nanokrystalicznego krzemu (a-Si/nc-Si). Moduł wykonany przez TEL Solar, Trübbach Labs o potwierdzonej przez laboratorium w ESTI sprawności 12,2%. Moduł składa się z 142 ogniwo wielozłączowych połączonych szeregowo o ustabilizowanej sprawności (poz. 11).
- Trzeci istotny nowy rekord dotyczy uzyskania 8,7% początkowej sprawności dla małego modułu z ogniwami organicznymi o powierzchni 802 cm², wykonanego przez firmę Toshiba, a potwierdzony przez laboratorium AIST9 (poz. 12). Jest on pierwszym modułem organicznym o takim rozmiarze, który został opublikowany w prezentowanych tabelach rekordów. Tak jak poprzednio, stabilność modułu nie była badana, oparto się na publikacjach w innych wiarygodnych dokumentach.

W tabeli 3 pojawiły się dwa nowe wyniki dotyczące tzw. *godnych uwagi wyjątków* odnoszących się do obiektów o małych powierzchniach, a mianowicie:

- Pierwszy wynik dokumentuje duży wzrost (do 21,7%) sprawności ogniwa na małej powierzchni (0,5 cm²) wykonanego z CIGS-u przez Zentrum für

Sonnenenergie-Forschung und Wasser (ZSW) zmierzonego przez laboratorium FhG-ISE (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems) - pozycja 13.

- Drugi nowy wynik z tabeli 3 dotyczy uzyskania 20,1% sprawności na bardzo małej powierzchni ($0,1 \text{ cm}^2$) ogniwa z perowskitu, wykonanego z halogenków organiczno-nieorganicznych przez Koreański Instytut Technologii Chemicznej (KRICT) i potwierdzonej przez laboratorium w Newport (USA) sprawności - pozycja ogniwa o porównywalnej wartości powierzchni. Na uwagę zasługuje bardzo duża dynamika wzrostu uzyskiwanych przez nie sprawności. Ogniwa z tej grupy, dla których początkowe wartości sprawności wynosiły 3,8% w 2009 r. [66], w kwietniu 2014 r. uzyskały już wartość sprawności 17,9%, a po siedmiu miesiącach przekroczyły 20,1%. Wytwarzane ogniwa charakteryzują się wysoką wydajnością i niskim kosztem.

W tabeli 4 pojawiły się trzy nowe rekordy dla modułów i submodułów z koncentracją promieniowania słonecznego, o sprawnościach wyznaczonych na podstawie pomiarów zewnętrznych, a mianowicie:

- Pierwszy rekord to przekroczenie progu 40,4% sprawności dla wielozłączonego komercyjnego submodułu (poz. 15). Został on zarejestrowany na podstawie pomiarów modułu wykonanego w Uniwersytecie Nowej Południowej Walii (UNSW) z komercyjnych ogniw GaInP/GaInAs/Ge i Si wytwarzanych przez Spectrolab i SUNPOWER, wykonanych w warunkach otwartej przestrzeni w laboratorium NREL (powierzchnia apertury koncentratora światła słonecznego wynosiła 287 cm^2).
- Nowy rekord (36,7%) odnotowano w przypadku czterozłączonego submodułu o powierzchni 830 cm^2 (poz. 16). Moduł został wykonany i zmierzono jego sprawność w Instytucie Fraunhofera Systemów Energii Słonecznej (FhG-ISE). Jest to do tej pory najwyższa wydajność uzyskana z modułów o tak dużych rozmiarach.
- Trzeci rekord to przekroczenie 46% sprawności dla ogniwa czterozłączonego o strukturze GaInP/GaAs; GaInAsP/GaInAs, przy koncentracji promieniowania słonecznego 508 słońc (poz. 17). Poprzedni, ustanowiony w kwietniu 2013 r., rekord wynoszący 44,4% dla koncentracji 302 słońc odnosił się do ogniwa trójzłączonego firmy Sharp o strukturze InGaP/GaAs/InGaAs.

Co nowego wniosła nowo uchwalona ustawa o OZE w Polsce dla rozwoju fotowoltaiki prosumenckiej?

W lutym 2015 r. Sejm RP przyjął Ustawę o Odnawialnych Źródłach Energii (OZE) w ostatecznym kształcie [67]. Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii po podpisaniu w kwietniu br. przez Prezydenta RP częściowo już weszła w życie, a częściowo wejdzie od 01.01.2016 r. Ustawa wprowadza długo oczekiwany system wsparcia dla inwestorów zainteresowanych m.in. budową własnych elektrowni słonecznych. Wartość oraz forma wsparcia zależna będzie od wielkości instalacji, a mianowicie:

1. **Mikroinstalacje** budowane na potrzeby użytkowników nazywane jako prosumenckie (tzn. jednoczesnych konsumentów i producentów energii w małych instalacjach), o mocy do 10 kW otrzymają możliwość sprzedaży nadwyżek energii po taryfach gwarantowanych w wysokości:
 - 0,75 zł / kWh dla instalacji o mocy do 3 kW, oraz

- 0,65 zł / kWh dla instalacji o mocy 3-10 kW.

Przy czym:

- Ze stawek tych korzystać mogą zarówno osoby fizyczne (bez konieczności zakładania działalności gospodarczej), jak i firmy (bez konieczności uzyskiwania koncesji).
 - Maksymalna moc instalacji, które będą mogły korzystać z tej formy wsparcia, nie może przekroczyć 300 MW dla instalacji o mocy do 3 kW oraz 500 MW dla instalacji o mocy 3-10 kW.
2. Pozostałe instalacje będą mogły nabyć prawo do sprzedaży energii po stawkach wyższych niż rynkowe w wyniku aukcji, które będą organizowane minimum raz na rok.

W obydwu przypadkach nabyte prawo do sprzedaży energii obowiązywać będzie przez 15 lat od chwili uruchomienia instalacji, nie dłużej niż do 31.12.2035 r.

Wymieniony w ustawie z dnia 20.02.2015 r. o OZE system aukcyjnego zakupu energii z OZE charakteryzuje się tym, że:

1. W systemie aukcyjnym to rząd ma decydować, ile energii odnawialnej potrzebuje - m.in. dla spełnienia celów polityki klimatycznej UE - i rozpisywać aukcje na jej dostarczenie dla poszczególnych technologii OZE i wielkości źródeł.
2. Zgodnie z projektem, aukcje co najmniej raz w roku ma ogłaszać, organizować i przeprowadzać prezes Urzędu Regulacji Energetyki.
 - Na co najmniej 30 dni przed rozpoczęciem aukcji będzie on musiał zamiesić w BIP URE ogłoszenie o aukcji.
 - Aukcje wygrywają uczestnicy, którzy zaoferowali najniższą cenę sprzedaży energii elektrycznej z OZE.
 - W zamian otrzymują gwarancję wsparcia przez 15 lat. Cena kupowanej energii będzie waloryzowana o poziom inflacji.
 - Aukcje będą oddzielne dla instalacji o mocy powyżej i poniżej 1 MW, przy czym co najmniej 25% puli wsparcia będzie zarezerwowane dla tych mniejszych. Minister gospodarki będzie podawał tzw. "cenę referencyjną", czyli maksymalną, za jaką będzie można zakupić w danym roku energię z OZE.
3. Systemem aukcyjny ma zastąpić od 1 stycznia 2016 r. dotychczasowy system (tzw. **zielone certyfikaty**), a inwestorzy, których projekty wygrały aukcje, otrzymają prawo do odsprzedaży jej do sieci po stałej cenie.

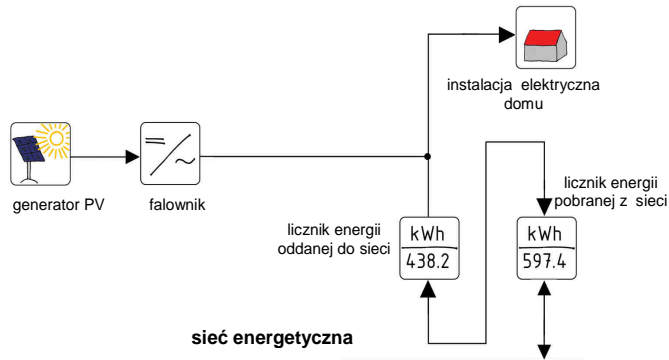
Ze względu na przedłużający się proces legislacyjny ustawy o OZE latem 2013 roku w Sejmie RP uchwalona została ustawa o zmianie ustawy - Prawo energetyczne oraz niektórych innych ustaw, tzw. mały trójpak. Ten akt prawny wprowadził w życie niektóre rozwiązania, które pierwotnie miały zostać wprowadzone ustawą o Odnawialnych Źródłach Energii oraz nowym Prawem Energetycznym i Prawem Gazowym, tzw. dużym trójpakiem. Z punktu widzenia fotowoltaiki najistotniejsze zmiany, które już weszły w życie, to:

- definicja mikroinstalacji - jako instalacji produkującej energię ze źródeł odnawialnych o mocy do 40 kW i podłączonych do sieci o napięciu niższym niż 110 kV,
- definicja małej instalacji - jako instalacji produkującej energię ze źródeł odnawialnych o mocy do 200 kW i podłączonych do sieci o napięciu niższym niż 110 kV,

- zwolnienie z obowiązku uzyskania pozwolenia na budowę oraz zgłaszania zamiaru budowy systemu fotowoltaicznego o mocy do 40 kW,
- obowiązek nałożony na przedsiębiorstwo energetyczne podłączenia do sieci mikroinstalacji, których moc nie przekracza mocy przyłączeniowej do budynku (na podstawie zgłoszenia złożonego przez Inwestora, bez konieczności wcześniejszego uzyskiwania warunków przyłączenia czy też zgody na przyłączenie),
- przeniesienie kosztu montażu układu zabezpieczającego oraz układu pomiarowo-rozliczeniowego na przedsiębiorstwo energetyczne,
- umożliwienie sprzedaży nadwyżki energii do sieci z mikroinstalacji bez konieczności rozpoczynania działalności gospodarczej,
- zwolnienie z opłat za przyłączenie do sieci mikroinstalacji oraz obniżenie do połowy opłaty za przyłączenie do sieci instalacji o mocy do 5 MW (ustalonej na podstawie rzeczywistych nakładów).

Analiza rentowności inwestycji dla systemu PV w warunkach klimatu południowej Polski

Do analizy rentowności inwestycji przyjęto odpowiednio: 2,8/9,9 kWp system fotowoltaiczny dołączony do sieci energetycznej, z modułami ukierunkowanymi na południe o stałym nachyleniu do płaszczyzny horyzontu 38°. System zbudowany jest z ogólnodostępnych multikrystalicznych (do symulacji przyjęto moduł z mc-Si ze względu na potwierdzoną długoterminową stałość parametrów oraz ich niezawodność pracy, tak aby koszty ewentualnych napraw/prac serwisowych były minimalne) modułów PV i jednego odpowiednio: 2,5/8,5 kW falownika 1- lub 3-fazowego. Roczny uzysk energetyczny dla mc-Si dla obszarów południowej Polski jest nie mniejszy niż **942 kWh/1kWp** mocy zainstalowanego systemu [68].



Rys. 3. Schemat blokowy podłączenia systemu fotowoltaicznego z możliwością odsprzedaży nadwyżki energii do sieci energetycznej przedsiębiorstwa energetycznego

Fig. 3. The block diagram of photovoltaic system connections with the ability to resell exceeding energy to the grid of power company

Ponadto, zgodnie z zawartymi zapisami w Ustawie o OZE, założono możliwość sprzedaży nadwyżek energii po taryfach gwarantowanych w wysokości:

- 0,75 zł/kWh dla instalacji o mocy do 3 kW,
- 0,65 zł/kWh dla instalacji o mocy 3-10 kW.

Przy czym, na potrzeby ww. symulacji założono, że średnie zużycie energii przez pojedyncze gospodarstwo domowe jest na poziomie **200 kWh/miesiąc**.

Koszty inwestycji (Symulacje przeprowadzono z cenami i kursem wymiany walut aktualnym na dzień 1.06.2015 r.):

1. Wersja do 3 kWp (tj. 2,8 kWp):

Moduły fotowoltaiczne 255 Wp polikrystaliczne + transport 500 €

typ: Yingli Solar YL255P-29b (255 Wp) Poly (<http://pvshop.eu>):

$$207,01 \text{ €} \times 11 + 500 = 2777,11 \text{ €}$$

Inwerter fotowoltaiczny: jednofazowy 2,5 kW:

typ: ABB Power-One Aurora UNO 2.5-I-OUTD (S) (<http://pvshop.eu>):

1033,3€

Transport: 500,0 €

Razem

brutto: 4310,41 €

brutto (1€ = 4,13 zł) = 17 802 zł

2. Wersja do 10k Wp (tj. 9,9 kWp):

Moduły fotowoltaiczne 255 Wp polikrystaliczne + transport 500 €

typ: Yingli Solar YL255P-29b (255 Wp) Poly (<http://pvshop.eu>):

$$207,01 \text{ €} \times 39 + 500 = 8573,39 \text{ €}$$

Inwerter fotowoltaiczny: trzyfazowy 8,5 kW:

typ: ABB Power-One Aurora UNO 8,5 -I-OUTD (S) (<http://pvshop.eu>):

1 972,67 €

Transport: 500,0 €

Razem

brutto: 11 046,06 €

brutto (1€ = 4,13 zł) = 45 620 zł.

Rentowność systemu PV:

1. Wersja 2,8 kWp systemu PV (tj. do 3 kWp):

dla ceny 1Wh = 0,75 zł

Koszt instalacji: ----- 17 802 zł _ bez robocizny

Roczny zysk systemu PV o mocy 2,8 kWp:

Wartość produkcji energii 2,8 x 942 kWh/rok = 2 637,6 kWh

Zużycie własne energii 12 x 200 kWh/ miesiąc = 2 400 kWh

Zysk: 2 400 x 0,56 + (2 637-2 400)x 0,75 = 1 521,75 zł

Taryfa stała na 15 lat ----- 15 x 1521 zł = 22 826,25 zł

Zysk: 22 826 - 17 802 = 5 024,25 zł

Czas zwrotu inwestycji ----- 17 802/1 521 = 11,7 lat

Gwarantowany roczny stopień rentowności inwestycji:

$$100\% \times (5 024,25 / 17 802) / 15 \text{ lat} = \underline{1,88\%}$$

2. Wersja 9,9 kWp systemu PV (tj. do 10 kWp):

dla ceny 1Wh = 0,65 zł

Koszt instalacji: ----- 45 620 zł _ bez robocizny

Roczny zysk systemu PV o mocy 9,9 kWp:

Wartość produkcji energii 9,9 x 942 kWh/rok = 9 325,8 kWh

Zużycie własne energii 12 x 200kWh/ miesiąc = 2 400 kWh

Zysk: 2400 x 0,56 + (9 325,8 - 2 400) x 0,65 = 5 845,8 zł

Taryfa stała na 15 lat ----- 15 x 5 845,8 zł = 87 686,55 zł

Zysk: 87 686,55 – 45 620 = 42 066,55 zł

Czas zwrotu inwestycji ----- 45 620 / 5 845,8 = 7,8 lat

Gwarantowany roczny stopień rentowności inwestycji:

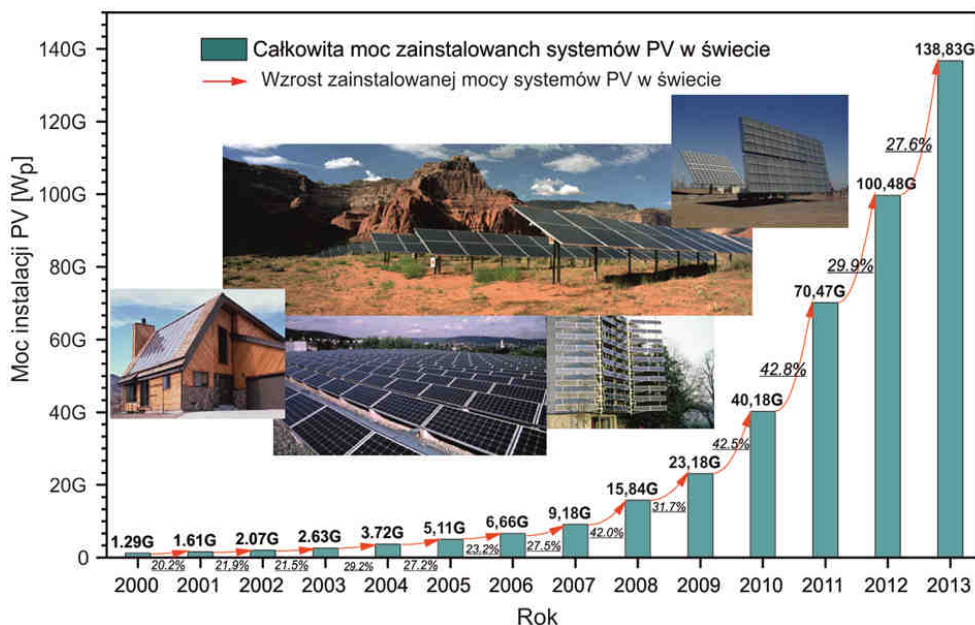
100% x (42 066,55 / 45 620) / 15 lat = 6,14%**Uwaga:**

W przeprowadzonych wyżej analizach nie uwzględniono kosztów: obsługi kredytu bankowego, okablowania, okuć instalacyjnych modułów PV dla instalacji dachowej bądź stelaży mocujących oraz kosztów samej robocizny, zakładając wariant optymistyczny, że sam konsument posiada wiedzę i umiejętności w tym zakresie. Uwzględniono ceny hurtowego zakupu elementów systemu PV u jednego z najtańszych w Polsce dystrybutorów tego sprzętu oraz nawet nie uwzględniono kosztów serwisowania ww. instalacji, tak aby określić teoretyczną granicę rentowności tej inwestycji.

Uwzględniając, że mamy zakupione multikrystaliczne moduły PV o gwarantowanym dla nich 25-30-letnim okresie utrzymania swojej sprawności energetycznej/mocy, mamy jeszcze 10-15 lat pełnosprawny system PV produkujący energię elektryczną, jednakże bez możliwości odsprzedaży po cenie promocyjnej lub kumulacji energii w sieci - **w tym okresie eksploatacji system ten traci rację bytu!**

Wnioski

Obserwowalny ostatnio dynamiczny postęp w konstrukcji wysokosprawnych ogniw i modułów słonecznych w świecie bezpośrednio przekłada się na wzrost ich sprawności oraz jakości w wykonaniu do komercyjnych zastosowań. I tak np. opracowanie technologii wykonania czterozłączowego ogniwa o rekordowej sprawności 44,7% (Lab. ISC, Soitec, CEA, HZB) pozwoliło na powstanie technologii seryjnej produkcji tych ogniw do komercyjnego zastosowania, posiadających sprawności w granicach 38-42%. Natomiast opracowanie technologii wykonania czterozłączowego wielkopowierzchniowego modułu o sprawności 36,7% (ISE, Soitec, CEA) umożliwiło opanowanie technologii wykonywania tych modułów w produkcji seryjnej - uzyskujących sprawności z zakresu 26-32%, co umożliwi w konsekwencji uzyskiwanie sprawności komercyjnych systemów z zakresu 24-28% [69]. Ogniwa i moduły te, mimo że mają bardzo duże sprawności i są w sprzedaży, nie są jeszcze ekonomicznie dostępne. Występujący w ostatnim czasie dynamiczny rozwój produkcji ogniw i modułów, ich różnorodność konstrukcyjna oraz optymalizacja do różnych warunków działania (np. do pracy ze światłem sztucznym z wykorzystaniem cienkowarstwowych struktur napyłanych na różne podłoża) powoduje stały spadek ich cen oraz gwałtownie poszerza obszar ich stosowania.



Rys. 4. Wzrost mocy zainstalowanych systemów PV w latach 2000-2013 [70]

Fig. 4. The increase in the power of installed PV systems in the years 2000-2013 [70]

Potencjał fotowoltaiki i jej dynamiczny postęp jest dostrzegany przez Unię Europejską. Polityka energetyczna stała się jednym z jej kluczowych obszarów działalności. W wielu krajach europejskich już wprowadzono przepisy dotyczące zeroemisyjnych budynków. Dzięki wykorzystaniu dachów energia produkowana jest w bezpośredniej bliskości miejsca, gdzie zostanie zużyta, ograniczając w ten sposób obciążenie sieci energetycznej. Przeprowadzona symulacja dla Polski wykazuje, że gdyby teoretycznie chcieć pokryć całe zapotrzebowanie Polski np. z roku 2010, wynoszące 128,7 TWh, należałoby pokryć systemami fotowoltaicznymi 0,44% powierzchni Polski (zał.: roczny uzysk energii elektrycznej - 942 kWh z 1 kWp mocy systemu PV, wymagana powierzchnia modułów - 10 m² na każdy 1 kWp mocy systemu PV).

Wzrost podaży modułów PV wpływa na spadek ich cen. Jednakże wzrost produkcji jest określany przez popyt na rynku, który zależy od przedsięwzięć promujących i wspierających fotowoltaikę. Dlatego też od wielu lat są podejmowane przez władze wielu krajów odpowiednie działania w tym zakresie. Na rysunku 4 przedstawiono dynamiczny wzrost mocy zainstalowanych systemów PV na świecie.

Takim przykładem wparcia w naszych warunkach powinna być ostatnio uchwalona przez Sejm RP w lutym 2015 r. i długo oczekiwana Ustawa o Odnawialnych Źródłach Energii. Podstawowym celem tej ustawy było spełnienie wymogów UE w zakresie wdrożenia ustawy o OZE oraz zabezpieczenie się przed budową instalacji fotowoltaicznych przez prosumentów do celów zarobkowych - umożliwiając im tylko sprzedaż ewentualnych nadwyżek wyprodukowanej energii. Przy tak dobranych w ustawie wielkościach

mikroinstalacji propagowana przez twórców ustawy tzw. idea promocji oszczędnych wytwórców energii dotyczy w zasadzie tych, którzy sami nie korzystają w ogóle z energii czyli siedzą w Polsce w XXI wieku przy przysłowiowej świeczce.

Uchwalona ustawa zawiera wiele niejasności i nieścisłości [71]. Analizując jej wpływ na program „Prosument” można stwierdzić, że nie zawiera ona wskazań dotyczących sposobu określania i możliwości łączenia pomocy inwestycyjnej (dotacji) i operacyjnej (taryf gwarantowanych) dla mikroinstalacji. Dlatego też nie można określić, czy inwestorzy, którzy otrzymują dofinansowanie do instalacji z NFOŚiGW, będą mogli korzystać z taryf gwarantowanych. Ustawa nie wskazuje również na możliwość wyboru przez prosumenta formy pomocy, z której chce skorzystać. Wyjaśnienie wyżej wymienionych zagadnień oraz analiza opłacalności budowy mikroinstalacji dla beneficjentów będzie podstawą do podjęcia decyzji przez NFOŚiGW w zakresie potrzeby dostosowania wysokości, formy oraz zakresu wsparcia w ramach programu „Prosument”.

Nota bene, dopiero co uchwaloną i podpisaną przez prezydenta ustawę, którą twórcy pięć lat opracowywali i uzgadniali, od razu po jej opublikowaniu wg **strony rządowej trzeba koniecznie nowelizować!** Opracowano już zakres nowelizacji i skierowano go do zaopiniowania pozaresortowego. Najważniejszy problem, jaki tu został zidentyfikowany po analizie przez Instytut Energetyki Odnawialnej (IEO) [72], polega na tym, że nowela proponuje obniżenie wysokości pierwotnych taryf bazowych dla wybranych technologii, a jednocześnie - przy określonej wysokości taryf - nowymi przepisami zwiększa koszty dla wszystkich technologii (bez zwiększenia wysokości pierwotnych taryf). Oba czynniki działające jednocześnie powodują, że inwestycje prosumenckie obiektywnie **stają się całkowicie nieopłacalne** - uważa IEO. Przyczyną tworzenia złego prawa mogą być przyjęte przez autorów nowelizacji **nierealne założenia** co do opłacalności realizacji inwestycji prosumenckich. Skutkiem uchwalenia takiego prawa mogłoby być zatrzymanie rozwoju energetyki prosumenckiej na dłuższy czas.

Ministerstwo Gospodarki proponuje wprowadzenie przedziałów taryf gwarantowanych dla mikroinstalacji fotowoltaicznych (od 0,64 zł do 0,75 zł za 1 kWh dla instalacji o mocy do 3 kW oraz 0,49 do 0,65 zł za 1 kWh dla instalacji o mocy od 3 do 10 kW), instalacji o mocy od 3 do 10 kW. Przy czym, taryfy powyżej minimalnych będzie można uzyskać tylko po uzasadnieniu wyższych kosztów wytworzenia energii w instalacji. Koszty mają być wyliczone według skomplikowanego wzoru uwzględniającego koszty kapitałowe, inwestycyjne, stałe i zmienne przy zadanej stopie dyskonta w wysokości 3,58%. Według PIGEOR (Polskiej Izby Gospodarczej Energetyki Odnawialnej i Rozproszonej), wzór nie uwzględnia jednak ryzyka inwestycyjnego, które w przypadku polskiego, mało rozwiniętego rynku instalacji OZE jest stale wysokie. Ponadto algorytm jest bardzo skomplikowany, dla przeciętnego obywatela niezrozumiały i przez to trudny w stosowaniu [73]. System ten nie jest jasny, przejrzysty i przyjazny. Jeżeli podczas kontroli wystąpi jakaś nieścisłość, to cena zakupu energii spada do wartości średniej ceny sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym (obecnie ok. 16 gr/kWh). W takim przypadku osoba, która zainwestowała w mikroinstalację, może nie mieć możliwości spłaty kredytu według zaplanowanego harmonogramu.

Reasumując, w dobie dzisiejszego dynamicznego postępu rozwoju fotowoltaiki w świecie, zachodzące zmiany w tym obszarze w Polsce są bardziej „pozorne i mgliste”. Opublikowana Ustawa o OZE w zakresie wsparcia prosumenckich systemów

fotowoltaicznych daje minimalne wskaźniki rentowności tych inwestycji. Graniczna wartość rentowności inwestycji wyznaczona dla obszaru Polski wynosi 1,88% (dla systemów do 3kWp) i 6,14% (dla systemów o mocach od 3 do 10 kWp) i to bez uwzględnienia innych realnych kosztów tj.: obsługi kredytu bankowego, okablowania systemu, okuć instalacyjnych dla modułów PV koniecznych do wykonania instalacji dachowych, najprostszych stelaży mocujących moduły PV oraz kosztów samej robocizny, zakładając wariant optymistyczny, że sam użytkownik ma wiedzę i umiejętności w tym zakresie. Dodatkowo, przyjęto do symulacji ceny hurtowego zakupu elementów systemu PV u jednego z najtańszych w Polsce dystrybutorów oraz pominięto nawet koszty serwisowania ww. instalacji. Uzyskane w ten sposób graniczne wartości rentowności poszczególnych instalacji i tak są znacznie niższe od założonych przez autorów noweli jako 8-10% i stanowiących podstawę do wyznaczenia nowych taryf gwarantowanych [74]. Przy czym, nawet gdyby realna stopa zwrotu inwestycji wynosiła 8-10% to i tak byłaby ona zbyt mała, jeśli uwzględnimy bardzo wysokie ryzyko regulacyjne i fakt, że inwestorami mają być zwykli ludzie. Dla porównania, średnie stopy zwrotu w Niemczech to właśnie 8-10%, w Wielkiej Brytanii 8-20%, a w Japonii 12-20% [74].

Konkludując, w realiach polskich nie należy się spodziewać w najbliższej przyszłości znacznego postępu dotyczącego liczby powstałych prosumenckich instalacji fotowoltaicznych, a przyjęte w ustawie progi ograniczające wsparcie dla pierwszych 300 MW dla instalacji o mocy do 3 kW oraz 500 MW dla instalacji o mocy 3-10 kW chyba bardzo długo nie będą osiągnięte.

Literatura

- [1] Popławski T, Szelań P, Catus D, Głowiński C, Adamowicz Ł. Użycie metod grupowania do prognozowania generacji wiatrowej. *Rynek Energii*. 2013;5(108).
- [2] http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.
- [3] Green MA, Emery K, Hishikawa Y, Warta W, Dunlop ED. Solar cell efficiency tables (version 44). *Progr Photovolt: Res Appl*. 2014;22:701-710. DOI: 10.1002/pip.2525.
- [4] Green MA, Emery K, Hishikawa Y, Warta W, Dunlop ED. Solar cell efficiency tables (version 45). *Progr Photovolt: Res Appl*. 2015;23:1-9. DOI: 10.1002/pip.2573.
- [5] Panasonic Press Release, 10 April 2014. Panasonic HIT® solar cell achieves world's highest energy conversion efficiency of 25.6% at research level. <http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/2014/04/en140410-4/en140410-4.html> (dostęp 24.04.2014).
- [6] Schultz O, Glunz SW, Willeke GP. Multicrystalline silicon solar cells exceeding 20% efficiency. *Progr Photovolt Res Appl*. 2004;12:553-558. DOI: 10.1002/pip.583.
- [7] Verlinden P, Deng W, Zhang X, Yang Y, Xu J, Shu Y, et al. Strategy: Development and Mass Production of High-Efficiency Crystalline Si PV Modules. Paper 4sMoO.1.4. 6th World Conf. on PV Energy Conversion. Kyoto, November 2014.
- [8] Moslehi MM, Kapur P, Kramer J, Rana V, Seutter S, Deshpande A, et al. World record 20.6% efficiency 156 mm x 156 mm full-squaresolar cells using low-cost kerfless ultrathin epitaxial silicon & porous silicon lift-off technology for industry-leading high-performance smart PV modules. *PV Asia Pacific Conference (APVIA/PVAP)*, 24 October 2012.
- [9] Roselund C. The disruptive potential of thin and kerfless wafers. *PV Magazine*. 2014;September:60-63. http://www.pv-magazine.com/archive/articles/beitrag/the-disruptive-potential-of-thin-and-kerfless-wafers-_100016427/86/?tx_tnews%5BbackCat%5D=248&cHash=4cb9a5153dd6d10526f35c9ff676c161#axzz46THOCFgC.
- [10] Keevers MJ, Young TL, Schubert U, Green MA. 10% Efficient CSG minimodules. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, September 2007.
- [11] Venkatasubramanian R, O'Quinn BC, Hills JS, Sharps PR, Timmons ML, Hutchby JA, et al. 18.2% (AM1.5) Efficient GaAs solar cell on optical-grade polycrystalline Ge substrate. *Conference Record*,

- 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, May 1997; 31-36. DOI: 10.1109/PVSC.1996.563940.
- [12] Keavney CJ, Haven VE, Vernon SM. Emitter structures in MOCVD InP solar cells. Conference Record, 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Kissimmee, May, 1990; 141-144.
- [13] Osborne M. Hanergy's solibro has 20.5% CIGS solar cell verified by NREL, 8 April 2014. http://www.pv-tech.org/news/hanergys_solibro_has_20.5_cigs_solar_cell_verified_by_nrel (dostęp 24.04.2014).
- [14] Wallin E, Malm U, Jarmar T, Lundberg O, Edoff M, Stolt L. World-record Cu (In,Ga)Se₂-based thin-film sub-module with 17.4% efficiency. *Progr Photovolt Res Appl.* 2012;20:851-854. DOI: 10.1002/pip.2246.
- [15] www.ge-energy.com/products_and_services/products/solar_power/cdte_thin_film_solar_module78.jsp (dostęp 13.11.2012).
- [16] First Solar Press Release, August 5, 2014.
- [17] Benagli S, Borrello D, Vallat-Sauvain E, Meier J, Kroll U, Hötzel J, et al. High-efficiency amorphous silicon devices on LPCVD-ZNO TCO prepared in industrial KAI-M R&D reactor. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Hamburg, September 2009. https://www.researchgate.net/publication/237150668_High_efficiency_amorphous_silicon_devices_on_LP-CVD_TCO_prepared_in_industrial_Kai-M_RD_reactor.
- [18] Matsui T, Sai H, Suezaki T, Matsumoto M, Saito K, Yoshida I, et al. Development of highly stable and efficient amorphous silicon based solar cells. *Proc 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2013; 2213-2217. DOI: 10.4229/28thEUPVSEC2013-3DO.7.2.
- [19] Sai H, Koida T, Matsui T, Yoshida I, Saito K, Kondo M. Microcrystalline silicon solar cells with 10.5% efficiency realized by improved photon absorption via periodic textures and highly transparent conductive oxide. *Applied Physics Express*. 2013;6:104101-1-104101-6. DOI: 10.7567/APEX.6.104101.
- [20] Sai H, Matsui T, Matsubara K, Kondo M, Yoshida I. 11.0%-efficient thin-film microcrystalline silicon solar cells with honeycomb textured substrates. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2014;1349-1353. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6901203>.
- [21] Komiya R, Fukui A, Murofushi N, Koide N, Yamanaka R, Katayama H. Improvement of the conversion efficiency of a monolithic type dye-sensitized solar cell module. *Technical Digest, 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference*, Fukuoka, November 2011: 2C-50-08.
- [22] Morooka M, Ogura R, Orihashi M, Takenaka M. Development of dye-sensitized solar cells for practical applications. *Electrochemistry*. 2009;77:960-965.
- [23] Ozawa H, Okuyama Y, Arakawa H. Dependence of the efficiency improvement of black-dye-based dye-sensitized solar cells on alkyl chain length of quaternary ammonium cations in electrolyte solutions. *Chem Phys Chem* 2014;15:1201-1206. DOI: 10.1002/cphc.201301025.
- [24] Kawai M. High-durability dye improves efficiency of dyesensitized solar cells. *Nikkei Electronics* 2013; Feb. 1 (http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20130131/263532/) (dostęp 23.10.2013).
- [25] Hosoya M, Oooka H, Nakao H, Mori S, Gotanda T, Shida N, et al. Module development for polymer solar cells. Abstract O-PV-6-2, *Grand Renewable Energy Conference*, Tokyo, July 2014; 21-37.
- [26] Hosoya M, Oooka H, Nakao H, Gotanda T, Mori S, Shida N, et al. Organic thin film photovoltaic modules. *Proc 93rd Annual Meeting Chem Soc Japan*. 2013;21-37.
- [27] Sasaki K, Agui T, Nakaido K, Takahashi N, Onitsuka R, Takamoto T. *Proc 9th Inter Conf Concent Photovolt Systems*. Miyazaki, Japan 2013.
- [28] Ahn SW, Lee SE, Lee HM. Toward commercialization of triple-junction thin-film silicon solar panel with >12% efficiency. 27th Europ Photovolt Solar Energy Conf, 3AO5.1, Frankfurt, September 2012.
- [29] <http://www.kaneka-solar.com>.
- [30] Matsui T, Sai H, Saito K, Kondo M. High-efficiency thin-film silicon solar cells with improved light soaking stability. *Progr Photovolt: Res Appl.* 2013; 21: 1363. DOI: 10.1002/pip.2300.
- [31] <http://www.solar.tel.com> (dostęp 24.04.2014).
- [32] Zhao J, Wang A, Yun F, Zhang G, Roche DM, Wenham SR, et al. 20,000 PERL silicon cells for the "1996 World Solar Challenge" solar car race. *Progr Photovolt*. 1997;5:269-276.
- [33] Swanson R. The role of modeling in SunPower's commercialization efforts. Presented at *Challenges in PV Science, Technology, and Manufacturing: A workshop on the role of theory, modeling and simulation*. Purdue University, August 2-3, 2012.
- [34] www.pvtech.org/news/q_cells_sets_two_new_world_records_for_multi_crystalline_and_quasi_mono_sol.
- [35] Basore PA. Pilot production of thin-film crystalline silicon on glass modules. *Conf. Record, 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, New Orleans, May, 2002, 49-52.

- [36] Mattos LS, Scully SR, Syfu M, Olson E, Yang L, Ling C, et al. New module efficiency record: 23.5% under 1-sun illumination using thin-film singlejunction GaAs solar cells. Proc 38th IEEE Photovolt Specialists Conf. 2012. DOI: 10.1109/PVSC.2012.6318255.
- [37] First Solar press release, 19 March 2014.: First Solar Sets Thin-Film Module Efficiency World Record of 17.0 Percent. <http://investor.firstsolar.com/releases.cfm?sect=all> (dostęp 24.04.2014).
- [38] <http://www.miasole.com>.
- [39] Sugimoto H. High efficiency and large volume production of CIS-based modules. 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Denver, June 2014. DOI: 10.1109/PVSC.2014.6925503.
- [40] TEL Solar Press Release, July 9, 2014.
- [41] Zhao J, Wang A, Green MA, Ferrazza F. Novel 19.8% efficient “honeycomb” textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells. Appl Phys Lett. 1998;73:1991-1993. DOI: 10.1063/1.122345.
- [42] Cousins PJ, Smith DD, Luan HC, Manning J, Dennis TD, Waldhauer A, et al. Gen III: improved performance at lower cost. 35th IEEE PVSC, Honolulu, HI, June 2010.
- [43] Engelhart P, Wendt J, Schulze A, Klenke C, Mohr A, Petter K, et al. R&D pilot line production of multi-crystalline Si solar cells exceeding cell efficiencies of 18%. Energy Procedia, 1st Inter Conf Silicon Photovolt, Freiburg, 17-20 April, 2010. www.Elsevier.com/locate/procedia. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.06.142.
- [44] Geisz JF, Steiner MA, Garcia I, Kurtz SR, Friedman DJ. Enhanced external radiative efficiency for 20.8% efficient single-junction GaInP solar cells. Appl Phys Lett. 2013;103(4):041118-1-041118-3.
- [45] Solar Frontier Press Release, 2 April 2014. Solar frontier sets thin-film PV world record with 20.9% CIS cell. <http://www.solar-frontier.com/eng/news/2014/C031367.html> (dostęp 24.04.2014).
- [46] Nakamura M, Yamaguchi K, Chiba Y, Hakuma H, Kobayashi T, Nakada T. Achievement of 19.7% efficiency with a small-sized Cu (InGa) (SeS)₂ solar cells prepared by sulfurization after selenization process with Zn-based buffer. 39th IEEE PVSC, Tampa, USA, June 18, 2013. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=6744278>.
- [47] Powalla M, Jackson P, Hariskos D, Paetel S, Witte W, Würz R, et al. CIGS Thin-Film Solar Cells with an Improved Efficiency of 20.8%. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3AO.4.2. Amsterdam, September 2014.
- [48] First Solar press release. 25 February, 2014. First solar sets world record for CdTe solar cell efficiency. <http://investor.firstsolar.com/releases.cfm?sect=all> (dostęp 24.09.2015).
- [49] Wang W, Winkler MT, Gunawan O, Gokmen T, Todorov TK, Zhu Y, et al. Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency. Adv Energy Mater. 2013;4:1-5. DOI: 10.1002/aenm.201301465.
- [50] Eguchi T, Maki T, Tajima S, Ito T, Fukano T. Cu₂ZnSnS₄ solar cells with 7.6% efficiency. Technical Digest. 21st Inter Photovolt Sci Eng Conf, Fukuoka, November 2011: 4D-3P-24.
- [51] Noh JH, Im SH, Heo JH, Mandal TH, Seok SI. Chemical management for colorful, efficient, and stable inorganic-organic hybrid nanostructured solar cells. Nano Lett. 2013; 13; 1764-1769. DOI: 10.1021/nl400349b.
- [52] Service R. Outlook brightens for plastic solar cells. Science 2011;332(6027):293. DOI: 10.1126/science.332.6027.293.
- [53] Slade A, Garboushian V. 27.6% efficient silicon concentrator cell for mass production. Technical Digest, 15th Inter Photovolt Sci Eng Conf, Shanghai, October 2005; 701. https://www.researchgate.net/publication/267779112_276_Efficient_Silicon_Concentrator_Solar_Cells_for_Mass_Production.
- [54] Ward JS, Ramanathan K, Hasoon FS, Coutts TJ, Keane J, Contreras MA, et al. 21.5% efficient Cu (In,Ga)Se₂ thin-film concentrator solar cell. Progr Photovolt: Res Appl. 2002;10:41-46. <http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31144.pdf>.
- [55] Release P, Corporation S, 31 May 2012. <http://sharp-world.com/corporate/news/120531.html> (dostęp 5.06.2013).
- [56] Press Release, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 1 December 2014. <http://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/pressreleases-2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent> (dostęp 7.12.2014).
- [57] McCambridge JD, Steiner MA, Unger BA, Emery KA, Christensen EL, Wanlass MW, et al. Compact spectrum splitting photovoltaic module with high efficiency. Progr Photovolt Res Appl. 2011;19:352-360. DOI: 10.1002/pip.1030.

- [58] Keevers MJ, Lau CFJ, Thomas I, Lasich JB, King RR, Green MA. High Efficiency Spectrum Splitting Prototype Submodule Using Commercial CPV Cells. Paper 5WeO.4.4, 6th World Conf PV Energy Conversion, Kyoto, November 2014. <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63395.pdf>.
- [59] Chiang CJ, Richards EH. A 20% efficient photovoltaic concentrator module. Conf. Record, 21st IEEE Photovolt Specialists Conf, Kissimmee, May 1990: 861-863.
- [60] <http://amonix.com/pressreleases/amonix-achieves-worldrecord-359-module-efficiency-rating-nrel-4> (dostęp 23.10.2013).
- [61] Steiner M, Bösch A, Dilger A, Dimroth F, Dörsam T, Müller M, et al. FLATCON® CPV module with 36.7% efficiency equipped with four-junction solar cells. Progr Photovolt: Res Appl. 2014;23(10). DOI: 10.1002/pip.2568.
- [62] Zhang F, Wenham SR, Green MA. Large area, concentrator buried contact solar cells. IEEE Trans Electron Dev. 1995;42:144-149. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=370024>.
- [63] Slooff LH, Bende EE, Burgers AR, Budel T, Pravettoni M, Kenny RP, et al. A luminescent solar concentrator with 7.1% power conversion efficiency. Phys Status Solidi (RRL). 2008;2(6):257-259. DOI: 10.1002/pssr.200802186.
- [64] Loferski J. Theoretical considerations governing the choose of the optimum semiconductor for photovoltaic solar energy conversion. J Appl Phys. 1956;27:777-784. <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/27/7/10.1063/1.1722483>.
- [65] Waclawek M., Rodziewicz T. Ogniwa słoneczne, Wpływ środowiska naturalnego na ich pracę. Warszawa: WNT; 2011.
- [66] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, Miyasaka T. Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. J Amer Chem Soc. 2009;131(17):6050-6051. DOI: 10.1021/ja809598r. <http://isap.sejm.gov.pl/DetailsServlet?id=WDU20150000478>.
- [67] Rodziewicz T, Zaremba A, Waclawek M. Technical and Economic Aspects of Photovoltaic Conversion of Southern Poland. Ecol Chem Eng S. 2014;21(2):337-351. DOI: 10.2478/eces-2014-0026. <http://www.ise.fraunhofer.de/en/renewable-energy-data>, 19.06.2015.
- [70] EPIA - Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018, <http://www.epia.org/home/> 09.11.2014.
- [71] <https://www.nfosigw.gov.pl/oferta-finansowania/srodki-krajowe/programy-priorytetowe/prosument-dofinansowanie-mikroinstalacji-oze/aktualnosci/art,14,ustawa-oze-a-program-prosument.html>.
- [72] <http://www.reo.pl/uwagi-ieo-do-nowelizacji-ustawy-o-oze>.
- [73] <http://www.reo.pl/pigeor-nowelizacja-ustawy-o-oze-budzi-watpliwosci>.
- [74] <http://wysokienapiecie.pl/prawo-energetyczne/736-ustawa-o-oze-nowelizacja-zmiana-taryf>.

PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS IN POLAND AND IN THE WORLD

¹ Division of Physicochemical Research, Faculty of Natural Sciences and Technology, Opole University

² Institute of Industrial Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering
Czestochowa University of Technology

Abstract: The article presents progress in efficiency achieved by PV cells and modules made of different materials and technologies. The detailed tabular compilations of performance and technical specifications were included. Attention is paid to promising new technologies that do not yet have a record performance, but because of the very process of their manufacture - augur hope for a very high performance or low-cost large-area modules for commercial use. Moreover, it discusses the economic impact of the implementation of the newly set records in the recently passed (February 2015) Act on Renewable Energy Sources for the development of distributed prosumer systems in Poland.

Keywords: solar cells and modules, the efficiency of PV cells and modules, the law on renewable energy sources