

Marek GODLEWSKI  
Grzegorz ŁUKA  
Rafał PIETRUSZKA  
Łukasz WACHNICKI  
Bartłomiej S. WITKOWSKI

## ZnO DLA FOTOWOLTAIKI

**STRESZCZENIE** *Mimo znaczącej redukcji kosztów paneli fotowoltaicznych (PV), cena energii wytwarzanej przez baterie słoneczne ciągle jest za wysoka. Możliwe są dwie strategie rozwiązania tej sytuacji – (a) podniesienie wydajności konwersji światła w komórkach fotowoltaicznych lub/i (b) obniżenie kosztów paneli PV poprzez zastosowanie tańszych materiałów lub technologii. W referacie omówione są prace mające na celu: (a) zastąpienie zbyt drogiego ITO warstwami ZnO o przewodnictwie metalicznym, (b) uproszczenie konstrukcji komórek PV oraz (c) znalezienie alternatywnych materiałów.*

**Słowa kluczowe:** *fotowoltaika, tlenek cynku*

### 1. WSTĘP

---

W wyniku niekontrolowanego wzrostu ludności świata (podwojenie w ciągu półwiecza) oraz wzrostu stopy życiowej gwałtownie rośnie zapotrzebowanie na energię elektryczną. Przewiduje się, że w ciągu najbliższych 40 lat zapotrzebowanie to prawie podwoi się – z około 16,5 TW w roku 2010 do około 30 TW w roku 2050 [1].

W chwili obecnej blisko 85% energii wytwarzanej jest z paliw nieodnawialnych [węgiel, gaz, ropa naftowa oraz z pierwiastków radioaktywnych (energetyka jądrowa)]. Tylko 15% pochodzi ze źródeł odnawialnych – głównie z biomasy, ale także z elektrowni wodnych i energii wiatrów (wiatraki).

Formalnie nie ma powodów do niepokoju. Nawet, jeśli nie zmienimy źródeł energii, to odkryte zasoby paliw kopalnych starczą na pokrycie rosnącego zapotrzebowania przez najbliższych kilkaset lat.

---

**prof. dr hab. Marek GODLEWSKI, dr Grzegorz ŁUKA**  
**mgr Rafał PIETRUSZKA, mgr Łukasz WACHNICKI, dr Bartłomiej S. WITKOWSKI**  
e-mail: [godlew; gluka; pietruszka; lwachn; bwitkow]@ifpan.edu.pl

Instytut Fizyki, Polska Akademia Nauk  
al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 264, 2014

Tak nie jest, jeśli rozważymy następstwa rosnącego spalania paliw kopalnych. W latach 1860 do 1990 do atmosfery wypuszczono 185 mld ton CO<sub>2</sub> ze spalania węgla. Zaburzyło to naturalny cykl przyrody CO<sub>2</sub> – tlen. Nadwyżka emisji CO<sub>2</sub> wynosi około 8,5 mld ton rocznie, a to spowodowało rosnącą koncentrację CO<sub>2</sub> w atmosferze. Coraz więcej danych wskazuje na zagrożenie efektem cieplarnianym, który może doprowadzić do katastrofalnych zmian w przyrodzie i, co gorsza, zagrozić istnieniu ludzi na Ziemi.

Te alarmujące dane generują gwałtowne poszukiwania „czystych” źródeł energii. Najbardziej dostępną z nich jest energia słoneczna w różnych postaciach – radiacji, wiatru, biomasy, energii wodnej, energii oceanów itp.

W artykule skupimy się na wykorzystaniu jednej z form tej energii – na fotowoltaice, czyli na konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną w bateriach słonecznych.

## 2. ENERGIA SŁONECZNA

---

Słońce emituje  $3,8 \times 10^{23}$  kW energii i będzie tak emitować przez kolejne kilka miliardów lat. Do Ziemi, odległej od Słońca o 150 milionów km, dociera  $1,8 \times 10^{14}$  kW, z czego część jest odbijana, ale około 60% ( $1,08 \times 10^{14}$  kW) dociera do powierzchni. Jeśli nauczymy się wykorzystywać 0,1% tej energii urządzeniami o wydajności 10%, otrzymamy 4 razy więcej energii, niż używamy obecnie [1].

Jak już wspomniano powyżej, są różne wersje korzystania z dostępnej energii słonecznej. Jedną z nich (najmniej wykorzystywaną obecnie) jest fotowoltaika.

Efekt fotowoltaiczny (PV) odkryty został w roku 1839 przez Becquerela. Pierwszą baterię PV skonstruował w latach 70. XIX wieku Hertz. Pierwsza bateria krzemowa (o wydajności 4%) powstała w roku 1954 w laboratoriach firmy Bell, a do gwałtownego rozwoju fotowoltaiki przyczyniła się astronautyka. Pierwsza bateria słoneczna wyniesiona została w kosmos w ramach misji Vanguard w roku 1958. Kolejnym ważnym impulsem do rozwoju fotowoltaiki był pierwszy kryzys naftowy w latach 70. XX wieku.

W chwili obecnej skomercjalizowane są dwie generacje paneli PV – komórki słoneczne pierwszej i drugiej generacji. Te pierwsze wykorzystują krystaliczny krzem i dominują na rynku PV. Te drugie to baterie cienkowarstwowe oparte o amorficzny krzem, CdTe i CIS lub CIGS (C – Cu, miedź, I – In, ind, G – Ga, gal, S – Se, selen). Jako przezroczystej elektrody używa się w bateriach słonecznych ITO, czyli tlenku indowo-cynowego.

Ceny paneli spadają praktycznie cały czas. Z 5-10\$/W<sub>p</sub> w roku 2006 na rynku USA do około 1\$/W<sub>p</sub> w roku 2013, gdzie W<sub>p</sub> oznacza 1 Wat w maksimum ekspozycji słonecznej. Do tego należy dodać koszty instalacji, co podnosi koszty dwu-, trzykrotnie. Niestety, produkcja energii elektrycznej z paneli słonecznych jest ciągle za droga, aby fotowoltaika stała się alternatywą dla „klasycznych” źródeł energii opartych o paliwa kopalne.

Cena 1\$/W<sub>p</sub> oznacza jednak możliwość spłacenia inwestycji w czasie krótszym, niż czas życia baterii. To tłumaczy obserwowany ostatnio gwałtowny wzrost zainstalowanej mocy w bateriach PV. Na przykład, w roku 2000 przewidywano, że za 10 lat moc zainstalowanych paneli PV będzie między 2 a 4,5 GW energii, a osiągnięto ponad 12 GW.

Są dwa scenariusze odpowiedzialne za ten i dalszy postęp. Praktycznie co roku poprawiane są rekordy wydajności baterii, zarówno laboratoryjne, jak i produkowanych paneli [2]. W 2012 roku te rekordy wynosiły odpowiednio: ~25% dla baterii na krzemie krystalicznym, ~19% dla baterii na krzemie polikrystalicznym, ~29% dla GaAs, ~20% dla CIGS i ~17% dla CdTe, a w przypadku produkowanych paneli: ~21% dla baterii na krzemie krystalicznym, ~8% dla baterii na krzemie polikrystalicznym, ~23,5% dla GaAs, ~16% dla CIGS i ~15% dla CdTe.

Niestety, w wielu przypadkach dalsze podniesienie wydajności jest trudne i kosztowne. Ten fakt tłumaczy dużą wagę alternatywnego podejścia, polegającego na próbach obniżenia kosztów paneli, poprzez zmianę architektury lub wprowadzenie alternatywnych materiałów.

### 3. NOWE MATERIAŁY, KOMÓRKI NOWYCH GENERACJI

---

Dominujące rynek baterie oparte są o „grube” (kilkaset mikronów) warstwy krystalicznego krzemu. To jest jednak rozwiązanie generujące wysokie koszty baterii słonecznych pierwszej generacji. Konieczność użycia „grubych” warstw wynika z właściwości krzemu, który jest półprzewodnikiem o skośnej przerwie energetycznej. Dlatego poszukuje się alternatywnych materiałów o prostej przerwie, takich jak CdTe czy też CIS, CIGS. W tym przypadku możliwe jest użycie znacznie cieńszych warstw, a tym samym obniżenie kosztów.

Jako przezroczystej elektrody używa się obecnie ITO. To jest również drogie rozwiązanie ze względu na stale rosnącą cenę indu. Ten ostatni fakt tłumaczy skoncentrowane badania alternatywnych materiałów, nazywanych TCO od nazwy angielskiej *transparent conductive oxides*.

Poniżej omawiamy prace mające na celu znalezienie alternatywnych rozwiązań, zarówno do tych opartych na krzemie krystalicznym, jak i dla ITO – nowego typu warstwy TCO.

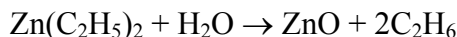
#### 3.1. Przezroczyste elektrody

---

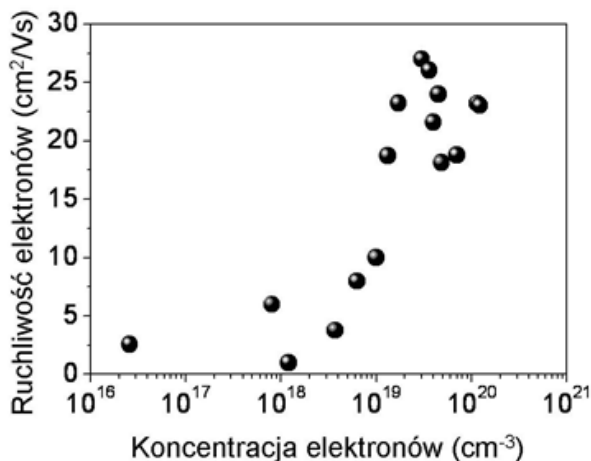
Jako materiały TCO do zastosowań PV badane są materiały tlenkowe o przewodnictwie metalicznym, z koncentracją nośników pomiędzy kilka razy  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  i  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , i przezroczyste dla światła widzialnego [3]. Co ważniejsze, można będzie je zastosować nie tylko w bateriach słonecznych, ale także w optoelektronice, w wyświetlaczach itp. Jest to więc potencjalnie duży rynek.

Badane jest wiele alternatywnych tlenków dla zastosowań TCO. Są to  $\text{SnO}_2$  (TO), a w zasadzie jest to powrót do tego materiału, który był pierwszym materiałem TCO,  $\text{In}_2\text{O}_3$  (IO),  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (FTO),  $\text{ZnO}:\text{Al}$  (AZO),  $\text{Cd}_2\text{SnO}_4$  (CTO),  $\text{GaInO}_3$ ,  $\text{ZnSnO}_3$ ,  $\text{Cd}_2\text{Sb}_2\text{O}_6:\text{Y}$ ,  $\text{Zn}_2\text{SnO}_4$ ,  $\text{MgIn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{In}_4\text{SnO}_{12}$  i wiele innych [3].

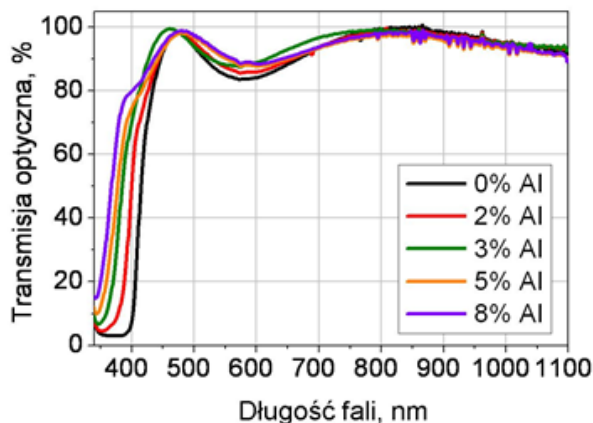
Z tych materiałów najbardziej ostatnio badanym jest ZnO, wytwarzany w naszym przypadku metodą osadzania warstw atomowych (ALD) z użyciem organicznych prekursorów. Najwydajniejszym prekursorem cynku jest dietylcynk (DEZn,  $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ ) w procesie, w którym użyliśmy wody jako prekursora tlenu:



Otrzymane w tym procesie warstwy ZnO mają wymagane koncentracje elektronów, nawet bez konieczności intencjonalnego domieszkowania ZnO [4-6], jak pokazano na rysunku 1. W naszych pracach zaobserwowaliśmy korelację pomiędzy temperaturą wzrostu warstw a ich przewodnictwem elektrycznym [6]. Warstwy wytworzone w wyższych temperaturach (250-300°C) wykazują przewodnictwo metaliczne.



Rys. 1. Korelacja pomiędzy ruchliwością nośników a koncentracją elektronów w warstwach ZnO otrzymanych w procesach ALD



Rys. 2. Transmisja światła dla warstw AZO otrzymywanych w procesie ALD

Rysunek 1 pokazuje także niezwykle ciekawą właściwość warstw ZnO otrzymywanych w procesach ALD. Wyższa koncentracja swobodnych elektronów oznacza silniejsze domieszkowane (nieintencjonalne), a tym samym silniejsze rozpraszanie na zjonizowanych domieszkach.

W większości przypadków powinno to prowadzić do spadku ruchliwości nośników. Tak jednak nie jest w przypadku warstw ALD, dla których dominuje rozpraszanie na granicach ziaren [7], a nie na zjonizowanych domieszkach. Warstwy ZnO wykazują wzrost kolumnowy. Wyższa temperatura wzrostu prowadzi do większych kolumn, a tym samym do słabszego rozpraszania. Ten mechanizm tłumaczy dane na rysunku 1.

Jeszcze lepsze parametry warstw osiągnięto po domieszkowaniu ZnO glinem. Tak otrzymane warstwy TCO mają wysoką transmisję światła (rys. 2), lepszą niż w przypadku warstw ITO [8].

Otrzymane warstwy AZO testowaliśmy z dobrym rezultatem do zastosowań PV, zarówno w komórkach pierwszej, drugiej, jak i trzeciej i czwartej.

### 3.2. Fotowoltaiczne struktury pierwszej generacji

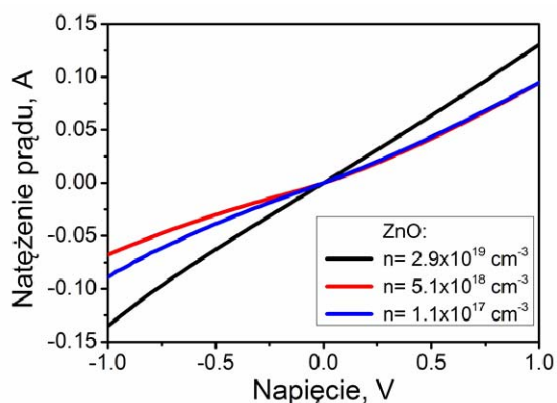
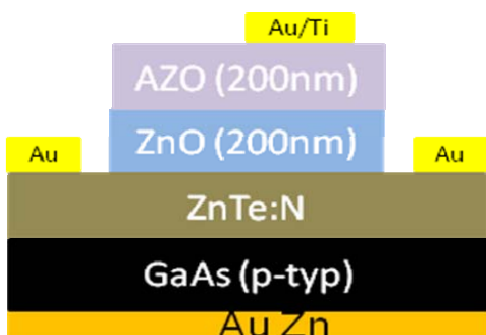
Komórki PV pierwszej generacji oparte są o krzem krystaliczny – materiał wysokiej jakości i drogi. W tej chwili testuje się możliwość zastąpienia drogiego krzemu (jakości elektronicznej) tańszym o gorszych parametrach elektrycznych. Tę opcję testowaliśmy, konstruując proste komórki fotowoltaiczne z p-typu krzemem

pokryte n-typu warstwą ZnO, a następnie warstwą AZO. Osiągnięte wydajności wskazują na możliwość wdrożenia takich tanich struktur PV wykorzystujących krzem niższej jakości.

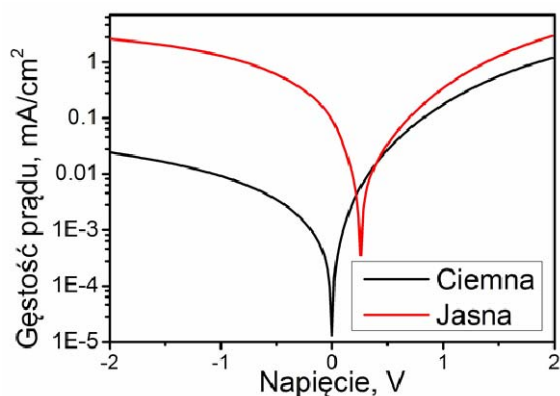
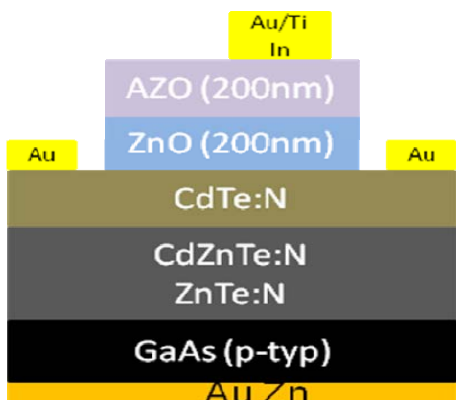
### 3.3. Fotowoltaiczne struktury drugiej generacji

CdTe jest jednym z materiałów używanych do produkcji cienkowarstwowych komórek słonecznych drugiej generacji. Posiada prostą przerwę energetyczną 1,45 eV, czyli bliską optymalnej wymaganej do wysokiej wydajności konwersji energii słonecznej [3]. Problemem pozostającym do rozwiązania jest kontakt omowy do p-typu CdTe [3]. Te stosowane wytwarzane są na przykład z  $Sb_2Te_3$ ,  $As_2Te_3$  lub z zastosowaniem przejścia z CdTe do ZnTe z gradientem składu.

Ważną obserwacją jest możliwość użycia n-typu ZnO jako kontaktu do p-typu ZnTe [9]. Wynika to z układu pasm CdTe, ZnTe i ZnO umożliwiającego tunelowanie z obszaru CdTe/ZnTe do pasma przewodnictwa ZnO [9]. Nasze prace potwierdziły skuteczność tego rozwiązania. Odpowiednie wyniki pokazujemy na rysunku 3.



Rys. 3. Testowana struktura i parametry elektryczne wytwarzanego kontaktu do warstwy ZnTe p-typu



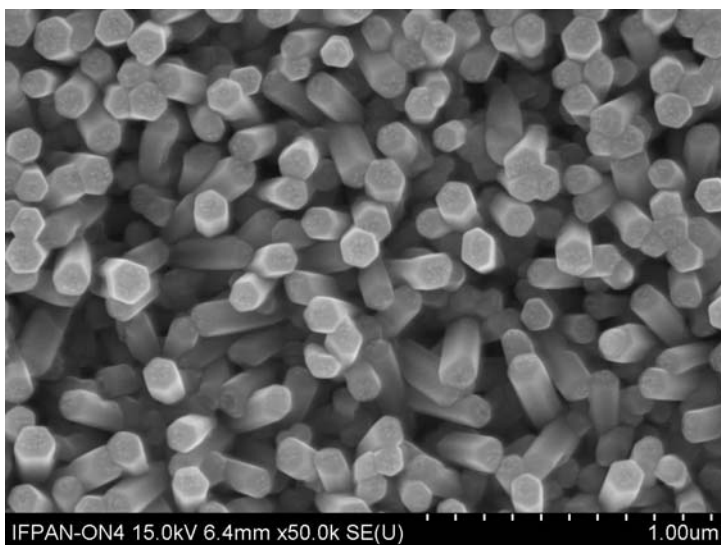
Rys. 4. Testowana struktura PV drugiej generacji i zmiana charakterystyki prądowo-napięciowej w wyniku oświetlenia

Wykazaliśmy również możliwość znacznego obniżenia kosztów wytwarzania struktur PV CdTe/CdS/ZnO, w których warstwy CdTe i CdS otrzymano przez naporowanie [10]. Mimo prostoty testowanego rozwiązania i nieoptymalnej grubości warstw, otrzymaliśmy kilkuprocentową wydajność konwersji światła, co jest wynikiem bardzo obiecującym.

W alternatywnym podejściu (rys. 4) zastąpiliśmy warstwę CdS warstwą ZnO, wytworzoną metodą ALD, pokrytą następnie warstwą AZO. Tak otrzymana struktura PV wykazała jednakowoż niższą wydajność od tych z warstwą CdS.

### 3.4. Fotowoltaiczne struktury trzeciej i czwartej generacji

Trzecia generacja komórek PV wytwarzana jest z materiałów organicznych, których cena jest znacznie niższa, niż materiałów nieorganicznych. Materiały te cechuje jednak niska stabilność czasowa w kontakcie z powietrzem i parą wodną [11]. Tym samym interesująca jest możliwość niskotemperaturowego pokrywania materiałów organicznych (folie, polimery itp.) warstwami tlenkowymi w procesie ALD. Tak otrzymane struktury hybrydowe wykazują bardzo dobre parametry elektryczne [5], optyczne [12] oraz poprawioną stabilność czasową [13].



**Rys. 5. Układ nanosłupków ZnO otrzymanych w procesie hydrotermalnym opisanym w pracy [21]**

CdTe/ZnO [20] oraz na strukturach wykorzystujących nanodrutu ZnO, wytworzonych metodą hydrotermalną (rys. 5).

W kolejnych etapach opracowaliśmy metodę (w procesie ALD) pokrywania nanodrutów nanometrycznymi warstwami AZO tworzącymi przezroczysta elektrodę. Tak przygotowane struktury będą testowane w najbliższym czasie do zastosowań w komórkach czwartej generacji.

Parametrem limitującym wydajność struktur trzeciej generacji jest bardzo mała droga dyfuzji nośników (pojedyncze nanometry). Dlatego też pracuje się obecnie nad komórkami czwartej generacji opartymi o nanostruktury – struktury 3D drutów kwantowych. Wykorzystanie nanostruktur w komórkach PV testowane było dla nanodrutów krzemowych, CdSe i ZnO [14-19]. W naszych pracach skupiliśmy się na dwóch rozwiązaniach – układach typu „core-shell”

## 4. PODSUMOWANIE

Trudno dzisiaj ocenić, które z rozwijanych rozwiązań decydować będzie o przyszłości fotowoltaiki. W przypadku masowej produkcji należy także wziąć pod uwagę dostępność poszczególnych pierwiastków. Na przykład jest za mało telluru, aby komórki drugiej generacji oparte o CdTe totalnie zdominowały rynek fotowoltaiki. To samo dotyczy indu; zarówno w przezroczystych elektrodach (ITO), jak i w komórkach drugiej generacji, ind powinien zostać zastąpiony innymi pierwiastkami.

Wielka nadzieja związana jest z bateriami trzeciej generacji, ze względu na bardzo niskie koszty materiałowe. Aby to zrealizować, potrzebne są dalsze prace nad optymalizacją architektury takich komórek słonecznych, użytych materiałów, jak i ich stabilności.

### *Podziękowania*

*Badania współfinansowane przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka POIG 1.1.2 – Nowoczesne Materiały i Innowacyjne Metody dla Przetwarzania i Monitorowania Energii (MIME) (POIG 01.01.02-00-108/09), ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (PBS1/A5/27/2012) oraz Narodowego Centrum Nauki (2012/06/A/ST7/00398).*

## LITERATURA

1. Dane według Survey of Energy Resources World Energy Council.
2. Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D.: Solar cell efficiency tables (version 40), Prog. Photovolt: Res. Appl. 20, 606 (2012).
3. Bosio A., Romeo N., Mazzamuto S., Canevari V.: Polycrystalline CdTe thin films for photovoltaic applications, Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 52, 247 (2006).
4. Wójcik A., Godlewski M., Guziewicz E., Minikayev R., Paszkowicz W.: Controlling of preferential growth mode of ZnO thin films grown by Atomic Layer Deposition, J. Cryst. Growth 310, 284 (2008).
5. Huby N., Ferrari S., Guziewicz E., Godlewski M., Osinniy V.: Electrical behaviour of zinc oxide layers grown by low temperature Atomic Layer Deposition, Appl. Phys. Lett. 92, 023502 (2007).
6. Guziewicz E., Kowalik I.A., Godlewski M., Kopalko K., Osinniy V., Wójcik A., Yatsunencko S., Łusakowska E., Paszkowicz W.: Extremely low temperature growth of ZnO by Atomic Layer Deposition, J. Appl. Phys. 103, 033515 (2008).
7. Krajewski T., praca przygotowywana do druku.
8. Godlewski M., Guziewicz E., Łuka G., Krajewski T., Łukasiewicz M., Wachnicki Ł., Wachnicka A., Kopalko K., Sarem A., Dalati B.: ZnO layers grown by Atomic Layer Deposition a new material for Transparent Conductive Oxide, Thin Solid Films 518, 1145 (2009).
9. Späth B., Fritsche J., Säuberlich F., Klein A., Jaegermann W.: Studies of sputtered ZnTe films as interlayer for the CdTe thin film solar cell, Thin Solid Films 480-481, 204 (2005).

10. Semikina T.V., Mamykin S.V., Godlewski M., Łuka G., Pietruszka R., Kopalko K., Krajewski T.A., Gierałtowska S., Wachnicki Ł., Shmyryeva L.N.: ZnO as a conductive layer prepared by ALD for solar cells based on n-CdS/n-CdTe/p-Cu<sub>1.8</sub>S heterostructure, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* 16, (2), 111 (2013).
11. Krebs F.C.: Air stable polymer photovoltaics based on a process free from vacuum steps and fullerenes, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92, 715 (2008).
12. Łuka G., Stakhira P., Cherpak V., Volynyuk D., Hotra Z., Godlewski M., Guziewicz E., Witkowski B., Paszkowicz W., Kostruba A.: The properties of tris (8-hydroxyquinoline) aluminum organic light emitting diode with undoped zinc oxide anode layer, *J. Appl. Phys.* 108, 064518 (2010).
13. Stakhira P.Y., Grygorchak I.I., Cherpak V.V., Ivastchyshyn F.O., Volynyuk D.Y., Łuka G., Godlewski M., Guziewicz E., Pakhomov G.L., Hotra Z.Y.: Long time stability of ITO/NiPc/ZnO/Al devices with ZnO buffer layer formed by atomic layer deposition technique-impedance spectroscopy analysis, *Mat. Sci. Eng. B* 172, 272 (2010).
14. Tsakalacos L., Balch J., Fronheiser J., Korevaar B.A., Sulima O., Rand J.: Silicon nanowire solar cells, *Appl. Phys. Lett.* 91, 233117 (2007).
15. Huynh W.U., Dittmer J.J., Alivisatos A.P.: Hybrid Nanorod-Polymer Solar Cells, *Science* 295, 2425 (2002).
16. Law M., Greene L.E., Johnson J.C., Saykally R., Yang P.: Nanowire dye-sensitized solar cells, *Nat. Mater.* 4, 455 (2005).
17. Baxter J.B., Aydil E.S.: Nanowire-based dye-sensitized solar cells, *Appl. Phys. Lett.* 86, 053114 (2005).
18. Gur I., Fromer N.A., Geier M.L., Alivisatos A.P.: Air-Stable All-Inorganic Nanocrystal Solar Cells Processed from Solution, *Science* 310, 462 (2005).
19. Tian B., Zheng X., Kempa T.J., Fang Y., Yu N., Yu G., Huang J., Lieber C.M.: Coaxial silicon nanowires as solar cells and nanoelectronic power sources, *Nature* 449, 885 (2007).
20. Szczepanik A., Wachnicki Ł., Godlewski M., Guziewicz E., Kopalko K., Janik E., Łusakowska E., Czerwiński A., Płuska M., Yatsunenko S.A.: ZnO nanostructures by Atomic Layer Deposition method, *J. Phys: Conf. Ser.* 146, 012017 (2009).
21. Witkowski B.S., Wachnicki Ł., Gierałtowska S., Dłużewski P., Szczepańska A., Kaszewski J., Godlewski M.: *International Journal of Nanotechnology*, Ultra-fast growth of the monocrystalline zinc oxide nanorods from the aqueous solution – przyjęta do druku.

*Rękopis dostarczono dnia 12.03.2014 r.*

## ZnO FOR PHOTOVOLTAICS

Marek GODLEWSKI, Grzegorz ŁUKA, Rafał PIETRUSZKA  
Łukasz WACHNICKI, Bartłomiej WITKOWSKI

**ABSTRACT** *Despite of a large reductions of costs energy produced by solar panels is still too expensive. There are two approaches to change this situation: by (a) increase of device output and/or (b) reduction of device*



*costs by use of cheaper alternative materials. In this article we discuss the latter approach – (a) replacement of ITO by ZnO with metallic conductivity, (b) change of device architecture, and (c) use of alternative materials.*

**Keywords:** *photovoltaics, zinc oxide*

**Prof. dr hab. Marek GODLEWSKI** jest pracownikiem Instytutu Fizyki PAN w Warszawie. Tam stworzył pierwsze w Polsce laboratorium technologii ALD. W laboratorium tym z grupą swoich współpracowników pracuje nad nowymi strukturami fotowoltaicznymi, materiałami dla przezroczystej elektroniki oraz sensorami.



**Dr Grzegorz ŁUKA** jest pracownikiem Instytutu Fizyki PAN w Warszawie. Zajmuje się technologią ALD warstw tlenku cynku do zastosowań jako przezroczyste elektrody. Prowadzi badania nad organicznymi i hybrydowymi przyrządami elektronicznymi z wykorzystaniem nowych materiałów otrzymywanych w procesie ALD.

**Mgr Rafał PIETRUSZKA** jest doktorantem w grupie badawczej prof. Marka Godlewskiego w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie. Tam pracuje w laboratorium technologii wzrostu cienkich warstw osadzanych metodą ALD. W laboratorium tym pracuje nad innowacyjną metodą otrzymywania ogniw fotowoltaicznych drugiej generacji.



**Mgr Łukasz WACHNICKI** jest doktorantem w grupie badawczej prof. Marka Godlewskiego w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie. Zajmuje się charakteryzacją strukturalną cienkich warstw i nanostruktur tlenkowych przy użyciu dyfrakcji rentgenowskiej. Specjalizuje się w technologii osadzania warstw atomowych metodą Osadzania Warstw Atomowych (Atomic Layer Deposition).

**Dr Bartłomiej S. WITKOWSKI** jest pracownikiem w grupie badawczej prof. Marka Godlewskiego w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie. Zajmuje się charakteryzacją strukturalną i optyczną nanostruktur przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej. Jest również jednym z twórców nowatorskiej metody otrzymywania nanosłupków tlenku cynku wysokiej jakości z roztworu wodnego.



