

Rafał PIETRUSZKA
Grzegorz ŁUKA
Bartłomiej S. WITKOWSKI
Krzysztof KOPALKO
Eunika ZIELONY
Piotr BIEGAŃSKI
Ewa PŁACZEK-POPKO
Marek GODLEWSKI

STRUKTURY FOTOWOLTAICZNE OPARTE O HETEROZŁĄCZE ZnO/Si

STRESZCZENIE *Warstwy tlenku cynku otrzymane metodą osadzania warstw atomowych ALD zostały użyte jako n-typu partner dla p-typu krzemu. Jako przezroczystą górną elektrodę wybrano warstwę tlenku cyku domieszkowaną glinem (tak zwana warstwa TCO – Transparent Conductive Oxide). Użyto tanich podłoży krzemowych o nieoptymalizowanej dla zastosowań fotowoltaicznych grubości. W niniejszej pracy badano proste struktury fotowoltaiczne ZnO/Si w celu redukcji kosztów produkcji energii elektrycznej pozyskiwanej za pomocą ogniw fotowoltaicznych. Zmierzona sprawność zoptymalizowanych częściowo (warstwy ZnO) ogniw fotowoltaicznych wyniosła 6%.*

Słowa kluczowe: *fotowoltaika, tlenek cynku, metoda osadzania warstw atomowych*

1. WSTĘP

Ogniwa fotowoltaiczne (PV) przetwarzają energię słoneczną bezpośrednio na prąd elektryczny. Są one intensywnie badane jako alternatywne źródło energii odnawialnej. W niedalekiej przyszłości odnawialne źródła energii, w szczególności energii

mgr Rafał PIETRUSZKA, dr Grzegorz ŁUKA, dr Bartłomiej S. WITKOWSKI

mgr Krzysztof KOPALKO, prof. dr hab. Marek GODLEWSKI

e-mail: [pietruszka; gluka; bwitkow; kopal; godlew]@ifpan.edu.pl

Instytut Fizyki, Polska Akademia Nauk

al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

dr inż. Eunika ZIELONY, dr inż. Piotr BIEGAŃSKI, dr hab. Ewa PŁACZEK-POPKO

e-mail: [eunika.zielony; piotr.bieganski; ewa.popko]@pwr.wroc.pl

Instytut Fizyki, Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

pozyskiwanej z ogniw PV, powinny zastępować tradycyjne źródła oparte o paliwa kopalne. Od czasu, kiedy zostało skonstruowane pierwsze ogniwo fotowoltaiczne w Bell Laboratories [1], obserwujemy burzliwą rewolucję rynku fotowoltaicznego. Obecnie produkowane są homo- i heterozłącza PV oparte o takie materiały, jak krzem, arsenek galu czy tellurek kadmu. Najwydajniejsze ogniwa fotowoltaiczne osiągają sprawności ponad 40% w warunkach laboratoryjnych [2, 3] przy oświetleniu skoncentrowanym. Dla najwydajniejszych testowych ogniw fotowoltaicznych InGaP/GaAs/-/InGaAs użyta intensywność promieniowania wynosiła 302 „słońca”, odbiega więc od warunków, w jakich pracują produkowane ogniwa. Produkowane moduły PV osiągają sprawności rzędu 22% dla monokrystalicznego krzemu i około 17% dla cienkowarstwowych ogniw opartych o tellurek kadmu [4, 5].

Niestety, masowy rozwój przemysłu fotowoltaicznego jest ograniczony przez wciąż wysokie koszty pozyskiwania energii z modułów PV. Szacowany czas zwrotu kosztów instalacji PV w Polsce to około 15-20 lat. Tym samym fotowoltaika nadal czeka na rewolucję materiałową, która w znaczący sposób obniżyłaby koszty pozyskiwania energii. Jedną z najbardziej skutecznych metod obniżenia kosztów energii elektrycznej pozyskiwanej za pomocą ogniw PV jest poszukiwanie tańszych materiałów, które zastąpią monokrystaliczny krzem wykorzystywany w tradycyjnych komórkach PV. Dodatkowym zachęcającym faktem do dalszej pracy z ogniwami fotowoltaicznymi jest to, że są one przyjazne środowisku i nie potrzebują żadnych mechanicznych urządzeń do przetwarzania energii.

Jednym z obiecujących materiałów, który może w niedalekiej przyszłości zrewołucjonizować rynek PV, jest tlenek cynku (ZnO). Posiada on prostą przerwę energetyczną równą 3,37 eV w temperaturze pokojowej oraz wysoką energię wiązania ekscytonu równą 60 meV [6]. Wykazuje również silne przewodnictwo typu n, niezależnie od metody wzrostu [7, 8, 9, 10].

W niniejszej pracy użyto metody osadzania warstw atomowych (ang. ALD – *Atomic Layer Deposition*) w celu otrzymania warstw ZnO. Technika ALD zapewnia jednorodne pokrycie powierzchni cienką warstwą z nanometrową precyzją grubości [11, 12, 13]. Metoda ALD umożliwia ponadto precyzyjną kontrolę parametrów elektrycznych wzrastających warstw, co jest istotne dla różnych zastosowań, takich jak pamięci typu „cross-bar” [14], przezroczyste przewodzące elektrody (TCO) dla ogniw PV [15], czy jako elektrody do emiterów światła [16].

Tlenek cynku domieszkowany pierwiastkami grupy III (Al, In oraz Ga) jest powszechnie używany jako przezroczysta elektroda zwana AZO (Glin Cynk Tlen), IZO (Ind Cynk Tlen), GZO (Gal Cynk Tlen) [17], która wypiera coraz droższe ITO (Indium Tin Oxide). W zastosowaniach fotowoltaicznych ZnO może zostać także wykorzystany jako n-typu partner dla p-typu krzemu, arsenku galu czy tellurku kadmu.

W niniejszej pracy badano elektryczne i optyczne właściwości heterozłącza ZnO:Al/n-ZnO/p-Si/Al. Tlenek cynku wzrastany był przy użyciu techniki osadzania cienkich warstw atomowych ALD. Niskie koszty osadzania, bardzo wysoka transmisja w zakresie widzialnym oraz metaliczne n-typu przewodnictwo czyni ZnO wzrastane metodą ALD idealnym materiałem dla zastosowań PV. W artykule omówiony został wpływ różnych parametrów elektrycznych ZnO na właściwości elektryczne złącza p-n oraz na sprawność fotowoltaiczną wytwarzanych struktur.

2. EKSPERYMENT

Dwie serie ogniw fotowoltaicznych zawierających warstwy tlenku cynku są przedmiotem badań. W serii A badano wpływ parametrów elektrycznych warstw na sprawność fotowoltaiczną ogniwa. Użyto dostępnych na rynku tanich płytek krzemowych o rezystywności $10 \Omega\text{cm}$ i grubości $360 \mu\text{m}$. Niestety, ta grubość nie jest optymalna z punktu widzenia pracy struktur PV. Bazując na tej serii pomiarów, określono optymalne parametry elektryczne warstwy ZnO dla zastosowań fotowoltaicznych. Następnie w serii B zbadano wpływ grubości warstwy tlenku cynku na sprawność fotowoltaiczną.

Tlenek cynku został osadzony metodą osadzania warstw atomowych (ALD) na reaktorze Savannah-100 (Cambridge Nano Tech). Użyto wysoko reaktywnych prekursorów chemicznych. Wybrano dietylczinc ($\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$) jako prekursor cynkowy oraz wodę dejonizowaną jako prekursor tlenu. Grubość warstw była mierzona przy użyciu reflektometru Mikropack Nanocalc 2000. Zmieniając temperaturę wzrostu od 80 do 160°C otrzymano warstwy ZnO od wysoko rezystywnych do przewodzących (seria A). W serii B zbadano wpływ grubości osadzonej warstwy na sprawność fotowoltaiczną.

Jako przezroczysty górny kontakt wybrano metaliczną warstwę tlenku cynku domieszkowanego glinem. Temperatura wzrostu ZnO:Al wynosiła 160°C , a grubość była równa 300 nm . Dalsze parametry wzrostu ZnO:Al zostały opisane w pracy [18]. Optymalna temperatura wzrostu warstwy TCO wyniosła 160°C . Niska temperatura wzrostu warstw ZnO:Al może prowadzić do obniżenia kosztów produkowanych ogniw fotowoltaicznych, ponieważ umożliwia wytwarzanie ich na przezroczystych foliach.

Kontakt omowy do warstw ZnO oraz płytek krzemowych osadzony był metodą rozpylania katodowego przy użyciu systemu PVD 75, Kurt Lasker. Wybrano Al jako omowy kontakt dla n-typu warstw ZnO:Al oraz dla p-typu krzemu. Elektryczne parametry warstw (koncentracja nośników, ruchliwość nośników oraz rezystywność) były mierzone przy użyciu systemu RH2035 Phys_tech GmbH o wartości pola magnetycznego $B = 0,4 \text{ T}$. Sprawność fotowoltaiczna mierzona była przy użyciu symulatora słońca klasy AAA, przy gęstości pobudzenia 100 mW/cm^2 . Sprawność kwantowa była mierzona przy użyciu systemu PV Quantum efficiency (300-1100 nm) Bentham, U.K.

3. WYNIKI

3.1. Wpływ parametrów elektrycznych warstwy ZnO na heterozłącze ZnO/Si

W serii pomiarowej A zbadano cztery rodzaje ogniw fotowoltaicznych Al/AZO(200 nm)/ZnO(200 nm)/Si/Al, oznaczonych symbolami od A1 do A4. Badane struktury zawierały warstwy ZnO o różnych rezystywnościach (od $\sim 10^2 \Omega\text{cm}$ do $\sim 10^{-2} \Omega\text{cm}$). Dla porównania przygotowano również próbkę zawierającą tylko warstwę tlenku cynku domieszkowaną glinem na płycie krzemowej (o rezystywności $10^{-3} \Omega\text{cm}$).

Próbka ta została oznaczona symbolem A5. Głównym celem tak przygotowanej próbki było zbadanie wpływu warstwy ZnO:Al na sprawność fotowoltaiczną. Porównując wyniki otrzymane na próbkach A1-A4 z tymi na próbce A5, określono najkorzystniejszy układ warstw ZnO i ZnO:Al na płycie krzemowej. Elektryczne parametry warstw ZnO i użytych płytek krzemu zostały podsumowane w tabeli 1.

TABELA 1
Elektryczne parametry badanych struktur

Lp.	Warstwa	ρ (Ωcm)	n, p (cm^{-3})	μ (cm^2/Vs)
A1	ZnO (200 nm)	131,16	$4,6 \times 10^{17} (n)$	0,1
A2		26,79	$1,3 \times 10^{17} (n)$	1,8
A3		0,198	$5,1 \times 10^{18} (n)$	6,2
A4		0,009	$2,9 \times 10^{19} (n)$	22,6
A1-A4	AZO (200 nm)	0,001	$3,0 \times 10^{20} (n)$	12,8
A5	AZO (300 nm)	0,001	$3,7 \times 10^{20} (n)$	13,5
A1-A5	Si (360 μm)	10,3	$1,8 \times 10^{15} (p)$	336

ρ – rezystywność warstwy; n, p – koncentracja elektronów i dziur; μ – ruchliwość

Parametry wzrostu warstw ZnO i ZnO:Al prowadzące do uzyskania odpowiednich parametrów elektrycznych zostały opisane w poprzednich artykułach [16, 18, 19]. Zmieniając temperaturę w zakresie od 80°C do 160°C, otrzymano warstwy o różnej koncentracji nośników (od $\sim 10^{17}$ do 10^{19} cm^{-3}) i ruchliwości nośników (od 0,1 do $23 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$), zmierzonej w pokojowej temperaturze. Wysokie przewodnictwo n-typu warstw ZnO:Al otrzymano, wprowadzając domieszkę glinu. W ten sposób uzyskano warstwy o relatywnie wysokiej koncentracji nośników $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ i niskiej rezystywności $10^{-3} \Omega\text{cm}$.

Otrzymanie warstwy ZnO o różnych parametrach elektrycznych umożliwiło zbadanie wpływu warstwy ZnO na parametry złącza oraz na sprawność fotowoltaiczną. Ciemne charakterystyki prądowo-napięciowe heterostruktur zostały pokazane na rysunku 1a i były one analizowane przy użyciu zmodyfikowanego równania diody [20, 21]:

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{q(V - JR_s)}{\eta kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

gdzie: J_s – prąd nasycenia, V – napięcie zasilania, q – wartość ładunku elementarnego, R_s – opór szeregowy, η – współczynnik idealności diody, k – stała Boltzmanna, T – temperatura w K.

Prąd nasycenia można wyrazić wzorem:

$$J_s = SA^* \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \quad (2)$$

gdzie: S – powierzchnia aktywna, A^* – stała Richardsona (dla ZnO $A^* = 32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ [22]), ϕ_b – wysokość bariery.

Parametry dopasowania zostały podsumowane w tabeli 2.

TABELA 2

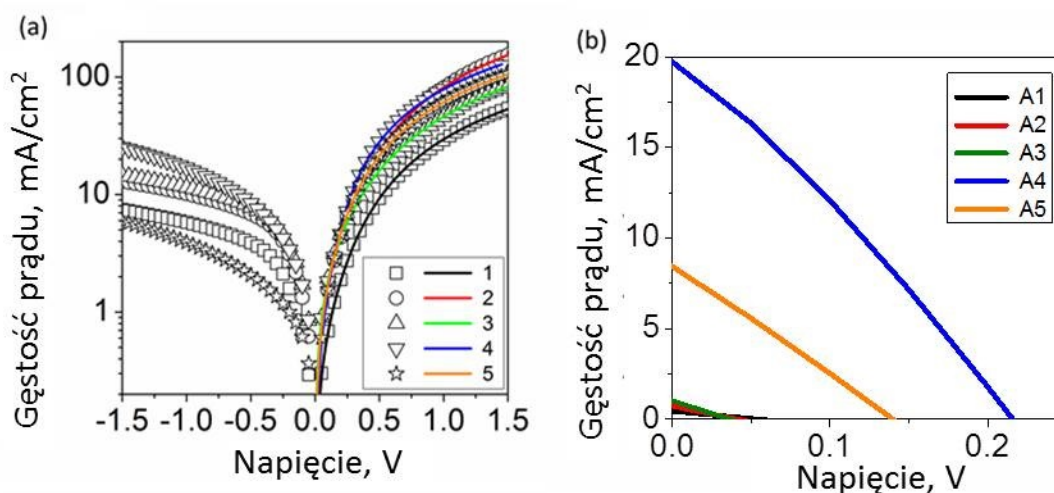
Modelowane parametry badanych ogniw fotowoltaicznych w serii A

Lp.	Struktura	I_{on}/I_{off} 1,5 V	J_s (mA/cm ²)	R_s (Ω cm ²)	η	ϕ_b (eV)
A1	AZO/ZnO/Si/Al	8,6	0,6	18,1	4,6	0,58
A2		10,7	1,7	5,8	5,2	0,55
A3		7	3,5	10,7	7,4	0,53
A4		3,7	0,6	8,5	2,6	0,58
A5	AZO/Si/Al	17,8	1,3	10,0	3,9	0,56

I_{on}/I_{off} - współczynnik prostowania złącza

Dla wszystkich badanych struktur zaobserwowano niski współczynnik prostowania rzędu 10^1 . Dla struktury A4 zauważono najniższą wartość współczynnika prostowania równą 3,7. Analizując wyniki z tabeli 2 wnoskujemy, że zmiana parametrów elektrycznych warstwy ZnO nie wpływa na wartość oporu szeregowego, jak również na wartość bariery na złączu, która zmienia się w zakresie od $\sim 0,53$ - $0,58$ eV.

Na rysunku 1b zostały pokazane charakterystyki prądowo-napięciowe mierzone przy gęstości pobudzenia 100 mW/cm^2 . W tabeli 3 zostały podsumowane parametry fotowoltaiczne zbadanych ogniw fotowoltaicznych. Struktury zawierające wysoko rezystywne warstwy ZnO (A1, A2 i A3) wykazały niskie sprawności rzędu $10^{-3}\%$. Zmierzone wartości V_{OC} dla tych próbek są podobne i mieszczą się w przedziale $0,03$ - $0,05$ V. Próbką A4 zawierającą warstwę ZnO o największej ruchliwości i relatywnie wysokiej koncentracji nośników wykazała sprawność rzędu $1,2\%$.



Rys. 1. Charakterystyki prądowo-napięciowe heterozłącza ZnO/Si:
a) charakterystyki ciemne, b) charakterystyki jasne

TABELA 3

Fotowoltaiczne parametry badanych struktur

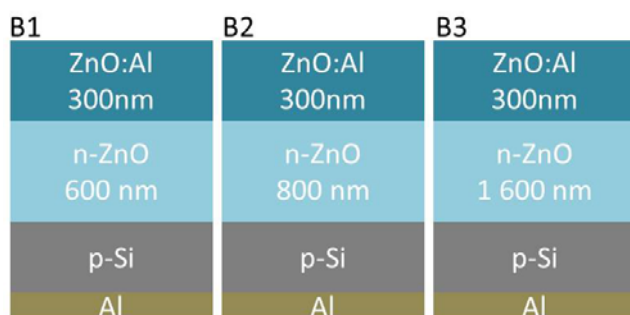
Lp.	S (cm^2)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	E_{ff} (%)
A1	1,2	0,05	0,4	32	$6,4 \times 10^{-3}$
A2	1,6	0,04	0,7	28	$7,9 \times 10^{-3}$
A3	1,2	0,03	1	32	$9,7 \times 10^{-3}$
A4	1,2	0,21	19,5	30	1,2
A5	1,4	0,14	8,4	26	0,3

S – powierzchnia ogniwa PV; V_{oc} – napięcie obwodu otwartego; J_{sc} – prąd zwarcia; FF – współczynnik wypełnienia; E_{ff} – sprawność ogniwa

W tej części pracy zostały zoptymalizowane parametry elektryczne warstwy ZnO. Zauważono, że sprawność ogniw fotowoltaicznych zależy od współczynnika idealności, ruchliwości oraz koncentracji nośników. Dla struktury A4 zaobserwowano najlepszy współczynnik idealności oraz najwyższą ruchliwość i koncentrację nośników.

3.2. Wpływ grubości warstwy ZnO na efekt fotowoltaiczny

W serii B zbadano trzy typy struktur fotowoltaicznych pokazane na rysunku 2. Zostały one oznaczone symbolami B1, B2 i B3. Próbkę zawierającą warstwę ZnO o różnej grubości (B1 = 600 nm, B2 = 800 i B3 = 1600 nm) badano w warunkach ciemnych, jak również w warunkach oświetlenia światłem o natężeniu $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$.

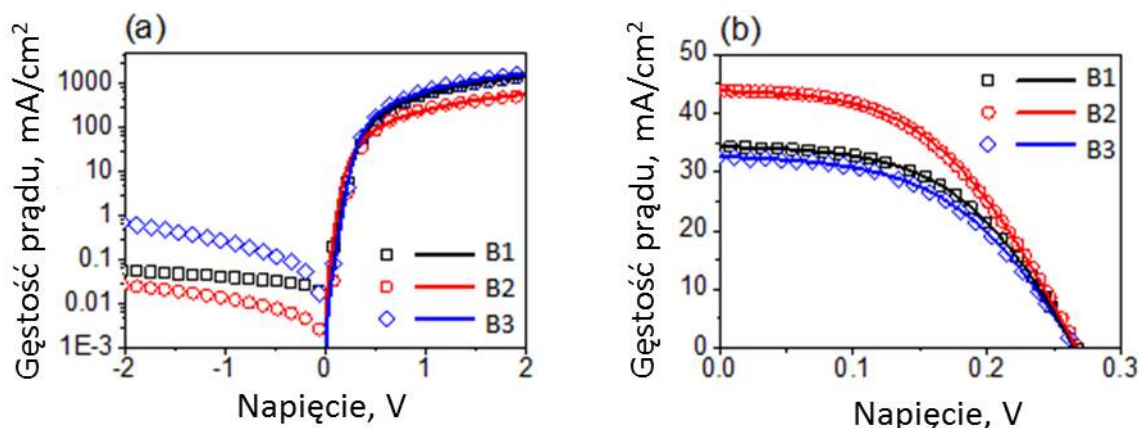


Rys. 2. Schemat badanych ogniw fotowoltaicznych zawierających tlenek cynku (grubości warstw nieskalowane)

Elektryczne parametry warstwy tlenku cynku zostały wybrane z serii pomiarowej A (próbka A4). Na rysunku 3 zostały pokazane charakterystyki prądowo-napięciowe badanych struktur, mierzone w warunkach ciemnych 3a oraz jasnych 3b. Dla struktury B2 zaobserwowano najniższą wartość prądu mierzoną w kierunku zaporowym. Ten fakt może zostać wyjaśniony wartością oporu upływu w badanych strukturach. Dla próbek B1 i B3 wartości oporu upływu są stosunkowo niskie w porównaniu do struktury B2. Niska wartość oporu upływu kreuje na złączu rekombinacyjne ścieżki, które w znaczący sposób wpływają na parametry elektryczne i fotowoltaiczne złącza.

Elektryczne parametry warstwy tlenku cynku zostały wybrane z serii pomiarowej A (próbka A4).

Na rysunku 3 zostały pokazane charakterystyki prądowo-napięciowe badanych struktur, mierzone w warunkach ciemnych 3a oraz jasnych 3b. Dla struktury B2 zaobserwowano najniższą wartość prądu mierzoną w kierunku zaporowym. Ten fakt może zostać wyjaśniony wartością oporu upływu w badanych



Rys. 3. Charakterystyki prądowo-napięciowe heterozłącza ZnO/Si:
a) charakterystyki ciemne, b) charakterystyki jasne

TABELA 4

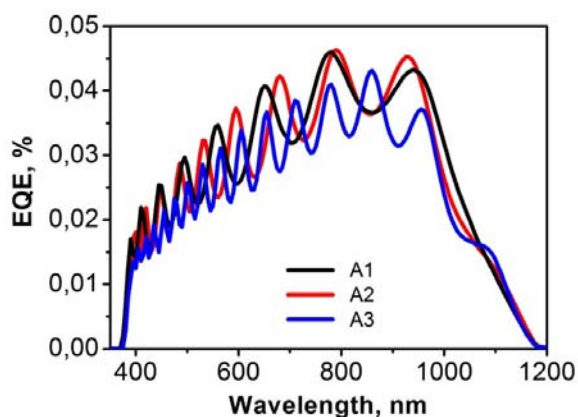
Fotowoltaiczne parametry badanych struktur serii B

Lp.	R_{sh} [Ω]	R_s [Ω]	I_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [V]	I_m [mA/cm ²]	V_m [V]	P_m [mW]	FF [%]	E_{ff} [%]
B1	3,48E + 6	7,6	34	0,27	27	0,17	0,9	50	5,0
B2	6,33E + 6	8,0	44	0,27	34	0,17	1,1	48	6,0
B3	2,15E + 6	7,8	32	0,27	25	0,17	0,8	50	4,6

Na rysunku 3b pokazano charakterystyki I-V mierzone w warunkach oświetlenia i analizowane przy użyciu modelu dwudiodowego (DEM). Parametry dopasowania zostały podsumowane w tabeli 4. Zauważono zależność pomiędzy parametrami dopasowania a zmierzoną sprawnością ogniwa fotowoltaicznego.

Dla próbek B1 i B3 wartość oporu upływu jest niska, co wpływa na wartość prądu zwarcia. Dla struktury B3 wartość R_{sh} była najwyższa i zmierzony prąd zwarcia wzrósł od ~ 32 mA/cm² do 44 mA/cm².

Jest to już dobry wynik, porównywalny lub nawet lepszy od raportowanego przez innych autorów [4]. Natomiast wartość oporu szeregowego wpłynęła na zmierzony współczynnik wypełnienia. Dla próbek B1 i B3 o niskiej wartości R_s współczynnik wypełnienia (FF) jest równy 50%, dla próbki B2 FF obniża się do wartości 48%. Najlepszą sprawność wykazała próbka B2, zawierająca warstwę ZnO o grubości 800 nm i warstwę ZnO:Al o grubości 300 nm. Zmierzona wydajność tej struktury wyniosła 6%.



Rys. 4. Pomiar sprawności kwantowej badanych struktur

Na rysunku 4 przedstawiono wykres pomiaru zewnętrznej sprawności kwantowej badanych struktur. Dla wszystkich badanych struktur zaobserwowano piki interferencyjne pochodzące od odbicia od warstwy tlenku cynku i krzemu.

Pomiar zewnętrznej sprawności kwantowej (EQE) został przeprowadzony w zakresie spektralnym 350-1200 nm. Ogniwa fotowoltaiczne bazujące na heterozłączu ZnO/Si wykazały szeroką spektralną odpowiedź w zakresie długości fal od 380 nm do 1180 nm. Tym samym, na sumaryczną sprawność fotowoltaiczną ma wpływ zarówno warstwa ZnO, jak i płytka Si. W krótkich długościach fal padające fotony są absorbowane na poziomach defektowych tlenku cynku. W miarę przechodzenia w dłuższe długości fal, dominującą warstwą aktywną jest krzem. W zakresie długości fali od 750 do 950 nm zaobserwowano najwydajniejszą fotogenerację par elektron – dziura w badanych ogniwach. Dla struktury B3 zmierzona sprawność kwantowa jest najmniejsza, co można powiązać z niską wartością oporności upływu.

4. PODSUMOWANIE

Warstwy tlenku cynku wzrastane były metodą osadzania warstw atomowych (ALD) w celu wytworzenia prostych ogniw fotowoltaicznych na płytkach krzemowych. Jako transparentną przezroczystą elektrodę górną wybrano warstwę tlenku cynku domieszkowaną glinem. Zbadano dwie serie ogniw fotowoltaicznych zawierających warstwy ZnO osadzone metodą ALD. W części pomiarowej A badano wpływ parametrów elektrycznych warstw ZnO na właściwości elektryczne złącza oraz na sprawność fotowoltaiczną. Następnie zbadano wpływ grubości warstwy ZnO zoptymalizowanych w części pomiarowej A na sprawność fotowoltaiczną. Częściowo zoptymalizowane ogniwa fotowoltaiczne AZO/ZnO/Si/Al wykazały sprawność 6%.

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), grant NCBiR PBS1/a5/27/2012 oraz (E. Zielony, P. Biegański i E. Płaczek-Popko) Narodowe Laboratorium Technologii Kwantowych (POIG 02.02.00-00-003/08-00).

LITERATURA

1. Chapin D.M., Fuller C.S., Pearson G.L., J. Appl. Phys., 74, p. 230, 1954.
2. King R.R., Law D.C., Edmondson K.M., Fetzer C.M., Kinsey G.S., Yoon H., Sherif R.A., Karam N.H.: Appl. Phys. Lett. 90, 183516, 2007.

3. Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D.: *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 20:12-20, 2012.
4. Descoedres A., Holman Z.C., Barraud L., Morel S., De Wolf S., Ballif C.: *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 3, no.1, 2013.
5. Gupta A., Compaan A.D., *Appl. Phys. Lett.* 85, 684, 2004.
6. Chen Y., Bagnall D.M., Koh H.-J., Park K.-T., Hiraga K., Zhu Z.-Q., Yao T.: *J. Appl. Phys.* 84, 3912, 1998.
7. Huang J.S., Lin C.F., *Journal of Applied Physics*, 103, 014304, 2008.
8. Hiramatsu T., Furuta M., Furuta H., Matsuda T., Hirao T.: *Japanese Journal of Applied Physics*, 46, (Pt 1) 3319, 2007.
9. Lin H., Zhou S., Zhou J., Liu X., Gu S., Zhu S., Xie Z., Han P., Zhang R.: *Thin Solid Films* 516, 6079, 2008.
10. Guziewicz E., Kowalik I.A., Godlewski M., Kopalko K., Osinniy V., Wojcik A., Yatsunenko S., Lusakowska E., Paszkowicz W., Guziewicz M., *Journal of Applied Physics*, 103, 033515, 2008.
11. Gieraltowska S., Wachnicki L., Witkowski B.S., Guziewicz E., Godlewski M.: *Chemical Vapor Deposition*, 19, 213-220, 2013.
12. Gieraltowska S., Wachnicki L., Witkowski B.S., Godlewski M., Guziewicz, E.: *Optica Applicata*, 43, 17-25, 2013.
13. Mroczynski R., Taube A., Gieraltowska S., Guziewicz E., Godlewski M.: *Applied Surface Science*, 258, 8366-8370, 2012.
14. Katsia E., Huby N., Tallarida G., Kutrzeba-Kotowska B., Perego M., Ferrari S., Krebs F.C., Guziewicz E., Godlewski M., Łuka G.: *Applied Physics Letters*, 94, 143501, 2009.
15. Stakhira P.I., Pakhomov G.L., Cherpak V.V., Volynyuk D., Luka G., Godlewski M., Guziewicz E., Hotra Z.Y.: *Central European Journal of Physics*, 8, 798, 2010.
16. Luka G., Stakhira P., Cherpak V., Volynyuk D., Hotra Z., Godlewski M., Guziewicz E., Witkowski B., Paszkowicz W., Kostruba A.: *Journal of Applied Physics*, 108, 064518, 2010.
17. Gordillo G., Grizalez M., Moreno L.C., and F. Landazabal, *Phys. Status Solidi B* 220, 215, 2000.
18. Luka G., Krajewski T.A., Witkowski B.S., Wisz G., Virt I.S., Guziewicz E., Godlewski M.: *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* 2011, 22, 1810. doi: 10.1007/s10854-011-0367-0
19. Godlewski M., Guziewicz E., Kopalko K., Łuka G., Lukasiewicz M.I., Krajewski T., Witkowski B.S., Gieraltowska S.: *Low Temperature Physics.* 2011, 37, 301-307. doi: 10.1063/1.3570930
20. Sze S.: *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, Inc., New York 2002.
21. Sharma G.D., Saxena D., Roy M.S.: *Synthetic Metals*, 123, 189, 2001.
22. Von Wenckstern H., Kaidashev E.M., Lorenz M., Hochmuth H., Biehne G., Lenzner J., Gottschalch V., Pickenhain R., Grundmann M.: *Appl. Phys. Lett.* 84, 2004, 79.

PHOTOVOLTAIC STRUCTURES BASED ON HETEROJUNCTION ZnO/Si

Rafał PIETRUSZKA, Grzegorz ŁUKA
Bartłomiej S. WITKOWSKI, Krzysztof KOPALKO
Eunika ZIELONY, Piotr BIEGAŃSKI
Ewa PŁACZEK-POPKO, Marek GODLEWSKI

ABSTRACT *We report on the properties of photovoltaic (PV) structures based on thin films of n-type zinc oxide grown by atomic layer deposition method on a cheap silicon substrate. Thin films of ZnO are used as n-type partner to p-type Si (110) and, when doped with Al, as a transparent electrode. PV structures with different electrical parameters and thicknesses of ZnO layers were deposited to determine the optimal performance of PV structures. The best response we obtained for the structure with ZnO layer thickness of 800 nm. The so-obtained PV structures show 6% efficiency.*

Keywords: *photovoltaic, zinc oxide*



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

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.



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.

Mgr Krzysztof KOPALKO jest pracownikiem Instytutu Fizyki PAN w Warszawie. Od roku 2001 pracuje w Laboratorium ALD. Zajmuje się technologią wzrostu warstw oraz osadzania na nich kontaktów omowych do pomiarów elektrycznych.



Dr inż. Eunika ZIELONY jest pracownikiem Instytutu Fizyki Politechniki Wrocławskiej. Pracuje w zespole zajmującym się badaniem struktur półprzewodnikowych na bazie związków II-VI oraz III-V metodami elektrooptycznymi. Jej głównym zainteresowaniem są materiały półprzewodnikowe mające zastosowanie w przemyśle fotowoltaicznym.

Dr inż. Piotr BIEGAŃSKI jest pracownikiem Instytutu Fizyki Politechniki Wrocławskiej. Pracował w zespole zajmującym się otrzymywaniem i badaniem własności nieciągłych warstw metali. Aktualnie zajmuje się otrzymywaniem warstw z tlenków metali ziem rzadkich oraz określaniem ich własności optycznych i fizycznych. Specjalizuje się w pomiarach spektrofotometrycznych oraz badaniu struktury powierzchni przy użyciu mikroskopu sił atomowych.



Dr hab. Ewa PŁACZEK-POPKO jest pracownikiem Instytutu Fizyki Politechniki Wrocławskiej. Jest kierownikiem laboratorium badania właściwości elektrycznych półprzewodników. Wraz z grupą swoich współpracowników zajmuje się charakteryzacją struktur półprzewodnikowych.

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.



