

Louisville, 15 maja, 2024 r.

Dr. Jacek B. Jasinski

Conn Center for Renewable Energy Research

University of Louisville

Louisville, KY 40292, USA

Tel: +1-502.852.6338 | E-mail: jacek.jasinski@louisville.edu

**Recenzja pracy doktorskiej Pana mgr Macieja Krajewskiego, pt.
„Improved Light Management and Photogenerated Carrier Collections
Concepts for Third Generation Solar Cells”**

Praca doktorska Pana mgr Macieja Krajewskiego, zatytułowana „Improved Light Management and Photogenerated Carrier Collections Concepts for Third Generation Solar Cells”, wykonana została w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem Pani profesor UW, dr hab. Anety Drabińskiej i Pana dr. Piotra Wróbla. Praca ta, której polski tytuł to „Koncepcje na poprawę zarządzania światłem oraz zbierania fotowzbudzonych nośników ładunku w ogniwach słonecznych trzeciej generacji” napisana jest w języku angielskim, skupia się na badaniach mających na celu rozwiązanie istotnego problemu naukowego, a jej wyniki to znaczący przyczynek do wiedzy umożliwiającej dalszy rozwój i udoskonalanie niezmiernie ważnej z punktu widzenia społecznego technologii, a mianowicie technologii ogniw słonecznych.

Aby lepiej zrozumieć wagę badań nad odnawialnymi źródłami energii, w tym nad poprawą wydajności ogniw słonecznych, warto uzmysłowić sobie zagrożenia dla całej biosfery związane z obecnym – gwałtownym w skalach geologicznych - globalnym ociepleniem wywołanym przez działalność człowieka. Oczywiście jednym z najbardziej widocznych efektów jest topnienie pokryw lodowych co w połączeniu z rozszerzalnością cieplną wody prowadzi do podnoszenia się poziomu oceanów, erozji wybrzeży i stanowi bezpośrednie zagrożenie dla ludności zamieszkującej rejony wybrzeży, co według szacunków ONZ wynosi niemal 40% populacji. Poważnym zagrożeniem są również zmiany warunków klimatycznych, prowadzące do coraz częstszych i bardziej ekstremalnych zjawisk pogodowych, jak również do coraz większych strat w środowisku naturalnym, a w szczególności do niszczenia szlaków pokarmowych i cykli życiowych wielu gatunków roślin i zwierząt. Skutki globalnego ocieplenia w postaci coraz częstszych i bardziej ekstremalnych zjawisk pogodowych, destabilizacji produkcji rolnej, a także masowych migracji i wojen odczuwane są już również także przez coraz liczniejsze rzesze ludności.

Z drugiej strony wiadomo, że aby spowolnić globalne ocieplenie i ograniczyć skalę wynikających z niego zagrożeń, konieczne jest jak najszybsze odejście od spalania paliw kopalnych na rzecz czystych źródeł energii. Dlatego prace nad rozwojem technologii fotowoltaicznych i opracowanie tanich, wydajnych i trwałych ogniw słonecznych jest nie tylko pożądane ale wręcz niezbędne. Dodatkowe korzyści z rozwoju technologii fotowoltaicznych to także potencjalnie nowe miejsca pracy, dodatkowe innowacje technologiczne i większe bezpieczeństwo energetyczne wielu regionów świata. W tym kontekście praca doktorska Pana Macieja poświęcona zrozumieniu absorpcji światła, foto-generacji nośników prądu i efektywnemu ich zbieraniu w celu zwiększenia wydajności ogniw słonecznych trzeciej generacji przyczynia się do pogłębienia wiedzy w tej dziedzinie i dalszego rozwoju tej technologii.

W swoich badaniach Pan Maciej skoncentrował się na poprawie efektywności ogniw słonecznych poprzez optymalizację dwóch górnych warstw ogniwa, a mianowicie warstwy antyodbiciowej i znajdującej się poniżej przezroczystej elektrody, która z jednej strony ma umożliwiać jak największe przenikanie światła do warstwy aktywnej, a z drugiej efektywnie zbierać generowane nośniki ładunku. Dużą zaletą podjętych badań jest ich kompleksowe podejście do problemu. W szczególności w przypadku przezroczystej elektrody, Pan Maciej wdrożył szereg obiecujących strategii, poczynając od optymalizacji samego materiału, tak aby uzyskać warstwę o pożądanym własnościach optycznych i wysokim przewodnictwie elektrycznym, poprzez zastosowanie układów wielowarstwowych i inżynierię międzypowierzchni w celu dalszej optymalizacji własności optycznych, czy wreszcie poprzez nanostrukturyzację elektrody. Co istotne, badania te oparte były na wnikliwym zrozumieniu fizyki układu, zastosowaniu odpowiednich modeli teoretycznych i symulacjach komputerowych pozwalających przewidzieć zmiany własności optoelektronicznych modyfikowanych struktur. Podobne podejście Pan Maciej zastosował również przy opracowaniu wydajnej warstwy antyodbiciowej.

Co do formy i treści, to omawiana rozprawa doktorska, składa się kolejno ze strony tytułowej, podziękowań, streszczenia w języku angielskim i polskim, spisu treści, zwięzłego planu pracy oraz wykazu stosowanych skrótów. Dalej w rozdziałach 1-6, znajduje się główna część rozprawy, omówiona szerzej poniżej natomiast podsumowuje najważniejszych wniosków z przeprowadzonych badań zamieszczone zostało w rozdziale 7. Na końcu rozprawy znajduje się spis publikacji Pana Macieja, a dalej wykaz zamieszczonych rysunków i bibliografia, zawierająca 252 odnośniki literaturowe.

Rozdział 1, stanowiący wstęp do głównej części rozprawy, zawiera bardzo dobre wprowadzenie do zagadnień związanych z fotowoltaiką. Zamieszczone jest tu najpierw uzasadnienie wyboru podjętej tematyki, gdzie zarysowany został problem zmian klimatu, konieczności przejścia na odnawialne źródła energii i roli jaką w tej transformacji odgrywa fotowoltaika. Przedstawione są także dane i prognozy makroekonomiczne na temat malejących kosztów ogniw słonecznych i szybko rosnącej z roku na rok ilości instalowanych paneli. Dalej rozdział 1 omawia budowę i zasadę działania ogniwa słonecznego, w tym pracę złącza p-n i charakterystyki prądowo-napięciowe dla idealnego i rzeczywistego ogniwa. Omówione jest również widmo słoneczne, pojęcie wydajności ogniwa, a także czynniki wpływające na zmniejszenie wydajności ogniwa, wynikające z niedopasowania własności optycznych, jak również z oporów elektrycznych i strat związanych ze zbieraniem nośników ładunku. Rozdział 1 zamyka omówienie istniejących trzech generacji ogniw słonecznych.

Rozdział 2 to dalsza część wprowadzenia, przy czym koncentrująca się już na tematyce przezroczystych elektrod. Wśród najbardziej obiecujących materiałów na tego typu elektrody wymienione są tu tlenek cynku (ZnO), tlenek indowo-cynowy (ITO) oraz tlenek kadmowo-cynowy (CTO) czyli materiały charakteryzujących się wysokim współczynnikiem transmisji i dobrym przewodnictwem elektrycznym. Rozdział omawia również zagadnienia związane z transmisją, odbiciem i absorpcją światła w przezroczystych elektrodach, podkreślając rolę optymalizacji tych parametrów w celu zwiększenia wydajności ogniwa. Podobnie omówione jest również przewodnictwo elektryczne jego związek z koncentracją i ruchliwością nośników. W rozdziale omówione są także strategie poprawy wydajności, w tym wykorzystanie interferencji od cienkich warstw w celu zmniejszenia strat odbicia i wydłużenia

drogi optycznej w warstwie aktywnej. Omawiane są również warstwy antyodbiciowe i strukturyzacja elektrod w celu lepszego pułapkowania światła i minimalizacji strat związanych z odbiciem.

Rozdział 3 przedstawia opis metod wykorzystanych w badaniach. Omówiona jest najpierw szczegółowo technika osadzania warstw atomowych (ALD), która stosowana była w doktoracie do wytwarzania cienkich przezroczystych warstw ZnO domieszkowanych Al (AZO) i podwójnie domieszkowanych Al i Hf (HAZO). Omówiona jest również technika litografii metodą nanoodciskania (*ang.*, nanoimprint lithography), zastosowana w doktoracie do wytwarzania wydajnych warstw antyodbiciowych. Rozdział 3 poświęcony jest również omówieniu metod charakteryzacji warstw, a w szczególności skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM), dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), pomiarom widm optycznych w zakresie UV-Vis-NIR, a także pomiarom elektrycznym takim jak efekt Hall, charakterystyki prądowo-napięciowe i wyznaczanie wydajności kwantowej ogniwa (EQE). Poza tym opisane są także metody numeryczne takie jak metoda macierzy przejścia oraz analizę ściśle sprzężonych fal stosowanych w badaniach do wyliczania widm optycznych projektowanych elektrod i optymalizacji układów warstw.

Rozdział 4 omawia przeprowadzone w doktoracie badania, poświęcone uzyskaniu wydajnych przezroczystych elektrod przewodzących (TCE), opartych na cienkich warstwach ZnO wytwarzanych metodą ALD. Po pierwsze przeprowadzone zostały systematyczne badania wzrostu warstw AZO i wyznaczone trendy zmian własności elektrycznych i optycznych takich warstw w funkcji koncentracji aluminium i parametrów technologicznych w tym temperatury, czasów pulsacji dietylozynku (DEZ) i trimetyloalu (TMA), a także czasu oczyszczania komory. Badania te pozwoliły na precyzyjną kontrolę procesu domieszkowania poprzez dostrojenie proporcji między prekursorami TMA i DEZ, a także na uzyskanie warstw AZO o wysokim przewodnictwie elektrycznym i wysokim współczynniku transmisji światła. Badany był też wpływ domieszkowania na strukturę krystaliczną i morfologię warstw, a także ich właściwości optyczne i elektryczne. W dalszej części doktoratu, badania te rozszerzone też zostały na podwójne domieszkowanie Al i Hf, a otrzymane najlepsze warstwy HAZO okazały się jeszcze lepsze od najlepszych warstw AZO. Dla obu typów warstw, badania wykazały systematyczne znaczące poszerzanie się przerwy energetycznej i poprawę przewodnictwa elektrycznego w stosunkowo szerokim zakresie domieszkowania. Ponadto, przeprowadzone badania dostarczyły szeregu ważnych danych na temat warstw HAZO i wykazały duży potencjał takich warstw do zastosowań jako przezroczyste elektrody.

Ostatnia część rozdziału 4, poświęcona była badaniom bardziej jeszcze zaawansowanych struktur elektrody, w szczególności strukturze typu tlenek-metal-tlenek. Przeprowadzonych zostało szereg symulacji numerycznych, jak i ich weryfikacji eksperymentalnej w modelowym układzie cienkich warstw srebra (Ag) umieszczonych pomiędzy warstwami AZO. Symulacje te miały na celu optymalizację grubości warstw i składu AZO, w celu maksymalizacji transmisji elektrody i i redukcji jej odbicia. Wyniki tych symulacji pokazały, że dodanie cienkiej warstwy metalu, takiego jak srebro, może znacząco poprawić charakterystyki transmisji elektrody. Połączenie technik ALD i PVD zastosowane zostało do otrzymania najlepszych elektrod wielowarstwowych wskazanych poprzez symulacje. W tym celu cienkie warstwy srebra nanoszone były za pomocą systemu odparowania wiązki elektronów w celu utworzenia struktur AZO/Ag/AZO o parametrach zbliżonych do optymalnych wartości wyznaczonych z symulacji. Pomiary optyczne takich struktur pokazały jednak

znacznie gorsze widma od tych przewidzianych w symulacjach, co zinterpretowane zostało jak wynik utraty ciągłości warstwy Ag w wyniku aglomeracji i tworzenia wysp Ag pomiędzy warstwami AZO.

Rozdział 5 poświęcony jest nowatorskim badaniom mającym na celu opracowanie i zastosowanie w ogniwie perowskitowym wydajnej warstwy antyodbiciowej przygotowanej metodą litografii nanoodciskania i zbadaniu jej wpływu na sprawność ogniwa. W celu określenia najbardziej obiecującej struktury przetestowane zostały trzy podstawowe reżimy litografii nanoodciskania, przedstawione schematycznie na Rys. 70. Badane były także różne tekstury warstwy, różniące się m.in. rozmiarem, symetrią i morfologią. Właściwości antyodbiciowe zaprojektowanych i uzyskanych warstw oraz ich zdolności do pułapkowania światła w warstwie aktywnej ocenione zostały na podstawie pomiarów widma odbicia. Wyselekcjowa w ten sposób najbardziej obiecująca struktura, którą okazała się tzw. struktura plastra miodu, została następnie użyta do integracji z ogniwem perowskitowym. W rozdziale opisana jest szczegółowo procedura przenoszenia takiej warstwy na powierzchnię ogniwa, podkreślając jednocześnie wyzwania związane z adaptacją procesu z podłoża szklanych lub krzemowych na delikatny materiał perowskitowy. W celu oceny wpływu warstwy antyodbiciowej na zmodyfikowane tak ogniwo perowskitowe, ogniwo to zmierzone i porównane zostało z ogniwami kontrolnymi nie posiadającymi żadnej warstwy antyodbiciowej lub powszechnie stosowaną warstwą antyodbiciową MgF_2 . Badania te pokazały, że ogniwo z warstwą wykonaną metodą litografii nanoodciskania daje znacznie mniejsze odbicie niż ogniwa kontrolne, jak również ma wyższą sprawność konwersji energii (PCE), co wynika z lepszego pułapkowania światła w warstwie aktywnej. Badania te wykazały zatem duży potencjał litografii nanoodciskania jako metody do wytwarzania wydajnych warstw antyodbiciowych dla perowskitowych i cieszących się ostatnio dużym zainteresowaniem tandemowych ogniw krzemowo-perowskitowych.

Rozdział 6 omawia nowatorskie badania nad zastosowaniem i optymalizacją metalowej nanosiatki wewnątrz górnej przezroczystej przewodzącej elektrody tlenkowej (TCO). W pracach tych oprócz tradycyjnych siatek prostokątnych czy liniowych, badane były też bardziej zaawansowane konfiguracje, takie np. jak geometrie fraktalne. Do analizy numerycznej projektowanych układów zaproponowany został trójwymiarowy model, wykraczający znacznie poza aspekty czysto geometryczne nanosiatki, a uwzględniający także ważne parametry ogniwa takie jak grubość warstwy aktywnej, droga dyfuzji fotogenerowanych nośników mniejszościowych czy współczynnik załamania materiału. Model ten stanowił podstawę oceny i optymalizacji projektowanych elektrod z wbudowanymi nanosiatkami. W sumie przeanalizowanych została liczna grupa (ponad 1000 różnych konfiguracji) najbardziej obiecujących struktur elektrod. Struktury te poddane zostały gruntownej ocenie wpływu geometrii i rozmiaru nanosiatki na sprawność ogniw trzeciej generacji, tzn. ogniw perowskitowych i organicznych. Ostatnia część rozdziału omawia badania numeryczne właściwości optycznych ogniwa bez i z użyciem nanosiatki w górnej elektrodzie przewodzącej. Analizowany był również wpływ zastosowania warstwy antyodbiciowej. Badania te, wykonane przy użyciu metody ściśle sprzężonych fal (RCWA), wykazały, że zastosowanie nanosiatki może prowadzić do niepożądanego wzrostu współczynnika odbicia i wskazały na konieczność minimalizowania tego efektu poprzez stosowanie nanosiatek o małej gęstości. Jednakże co ciekawe pokazały również, że zastosowanie wydajnej warstwy antyodbiciowej może kompensować niekorzystny efekt zwiększonego odbicia wywołanego obecnością nanosiatki.

Podsumowując całość rozprawy to przedstawia ona bardzo dobrze zaplanowany i wykonany kompleksowy projekt badawczy w obrębie ważnej dziedziny, związanej zarówno z fizyką półprzewodników i urządzeń optoelektronicznych, jak również z jedną z kluczowych technologii niezbędnych przy przechodzeniu na odnawialne źródła energii i gospodarkę niskomisijną. Projekt ten, dotyczący przezroczystych przewodzących elektrod do zastosowań w ogniwach fotowoltaicznych trzeciej generacji, koncentrował się na szczegółowych i kompleksowych badaniach ważnych, a jednocześnie w dużym stopniu nowatorskich strategii opracowania takich elektrod, co w rezultacie doprowadziło do szeregu ważnych wyników, wśród których wymienić należy:

- Optymalizacja metody ALD wytwarzania domieszkowanych cienkich warstw tlenku cynku i obszerne badania właściwości optoelektronicznych otrzymywanych w ten sposób warstw, pokazujące m.in., że w stosunkowo szerokim zakresie składu zarówno pojedyncze domieszkowanie Al, jak i podwójne domieszkowanie Al i Hf prowadzi do wzrostu przewodności i zwiększenia przerwy energetycznej materiału. Wykazanie ponadto, że zoptymalizowane podwójne domieszkowanie Al i Hf daje warstwy HAZO o doskonałych właściwościach optoelektronicznych pasujących niemal idealnie do zastosowań jako wysokiej jakości przezroczyste elektrody.
- Przeprowadzone wysoce obiecujące badania numeryczne struktur elektrod przezroczystych typu tlenek-metal-tlenek w układzie AZO/Ag/AZO i wyznaczenie optymalnych parametrów dla takiego układu.
- Przeprowadzone szczegółowe badania nanostruktur do zastosowań w warstwach antyodbiciowych, w tym określenie optymalnych parametrów wysoce obiecującej nanostruktury w formie tzw. plastra miodu i eksperymentalna weryfikacja jej doskonałych właściwości poprzez zastosowanie metody litografii nanoodciskania i udane zintegrowanie otrzymanej warstwy z ogniwem perowskitowym.
- Zaproponowanie nowego zaawansowanego modelu do oceny przezroczystych elektrod przewodzących z wbudowanymi nanosiatkami metalowymi i zastosowanie go do kompleksowych badań numerycznych szeregu najbardziej obiecujących klas takich elektrod w ogniwach perowskitowych i organicznych.

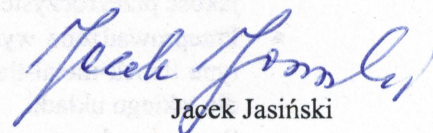
Generalnie mimo kilku uwag i pytań, których listę zamieszczam na końcu tej recenzji, to w mojej ocenie rozprawa doktorska Pana mgr Macieja Krajewskiego, wykonana pod kierunkiem Pani profesor UW, dr hab. Anety Drabińskiej i Pana dr Piotra Wróbla spełnia wszystkie warunki wymagane w § 21 pkt 2–4 Załącznika nr 1 do uchwały nr 157 Senatu Uniwersytetu z dnia 29 czerwca 2022 r., dotyczące określenia sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora oraz stopnia doktora habilitowanego na Uniwersytecie Warszawskim.

Tytułem uzasadnienia chciałbym podkreślić, że rozprawa ta prezentuje wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej Pana Macieja w dziedzinie fizyki ciała stałego i urządzeń optoelektronicznych, a także bardzo dobre zrozumienie zjawisk i procesów zachodzących w strukturach półprzewodnikowych i fotonicznych, w szczególności procesów takich jak absorpcja i pułapkowanie światła w nanostrukturach, fotogeneracja i separacja nośników ładunku w obszarze złącza p-n, czy transport nośników w strukturach półprzewodnikowych i efektywne wychwytywanie ich na elektrodach. O wysokiej wiedzy Pana Macieja świadczą również zaproponowane

modele numeryczne i wykorzystanie ich do zaawansowanej analizy szerokiej klasy przezroczystych przewodzących elektrod, jak i przeprowadzenie zaawansowanych badań eksperymentalnych potwierdzających główne przewidywania modeli.

Ponadto, zgodnie z wymaganymi kryteriami, przedmiotem omawianej rozprawy jest oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego, a mianowicie kompleksowe zbadanie wpływu górnej przezroczystej elektrody ogniwa na zarządzanie światłem, a w szczególności jego transmisję i pułapkowanie wewnątrz warstwy aktywnej oraz zbieranie fotowzbudzonych nośników ładunku. Jak już wcześniej kilkakrotnie podkreśliłem, przeprowadzone i opisane w doktoracie badania stanowią znaczący wkład w lepsze zrozumienie tych procesów i zaowocowały szeregiem omówionych powyżej ważnych wyników, w tym opracowaniem wydajnych przeroczystych elektrod o doskonałych właściwościach optoelektronicznych. Należy również dodać, że część opisanych w rozprawie badań została już opublikowana w bardzo dobrych recenzowanych czasopismach, takich jak *Advanced Materials Interfaces* i *ACS Omega*,

Podsumowując, bardzo pozytywnie oceniam rozprawę doktorską Pana mgr Macieja Krajewskiego i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Jacek Jasiński

Komentarze i pytania:

1. W rozdziale 1.4., omawiającym 3 generacje ogniw słonecznych zabrakło trochę dobrego porównania zalet i wad każdej z tych generacji, jak również informacji na temat ich potencjalnego rozwoju i ewentualnych strategii niwelowania barier technologicznych czy ekonomicznych. Zestawienie tego typu informacji np. w postaci tabeli, porównującej te trzy generacje byłoby wartościowe.
2. Odnośnie rozdziału 2.1., wiedząc, że monowarstwa grafenu przepuszcza prawie 98% światła, to czy i na ile prowadzone są badania nad stosowaniem materiałów dwuwymiarowych (2D) do przezroczystych elektrod? Na ile jest to obiecująca strategia i jakie są ewentualne związane z nią problemy?
3. Odnośnie zdania "*As the thickness increases, so does the absorption and depending on the interference conditions, also reflection, inducing losses in the optical transparency.*" na stronie 25, to z grubością warstwy wzrasta także ilość defektów. Jak wygląda problem defektów (np. typ, koncentracja, wpływ an własności optyczne i elektryczne, itd.) w stosowanych powszechnie warstwach elektrodowych?
4. Odnośnie zdania "*Therefore, the coverage equal to 1 does not necessarily mean the saturation of all free sites with the cation atom.*" na stronie 41, to po raz pierwszy pojawia się tu bez wcześniejszego odpowiedniego wprowadzenia pojęcie kationu i tylko z kontekstu można domyślać się, że chodzi o kation cząsteczki prekursora. Dlatego warto byłoby dodać już tutaj schemat, przedstawiający krok-po-kroku, na poziomie molekularnym proces ALD.

5. Rysunek 33 na stronie 44 ilustruje process nakładania warstw Al pomiędzy warstwy ZnO. Nie jest to domieszkowanie w tradycyjnym tego słowa znaczeniu. Czy zatem jest możliwe i jeśli tak to jak wyglądałby schemat procesu ALD, w którym domieszkowanie ma charakter czysto losowy i od razu powstaje związek mieszany typu $Al_xZn_{1-x}O$, zamiast naprzemiennych warstw poszczególnych tlenków?
6. Odnośnie zdania „*Such metallic pads provide ohmic contact minimizing parasitic resistances.*” na stronie 58, to czy i jak sprawdzana była liniowość tych kontaktów, a także czy w metodzie van der Pauw’a liniowość kontaktów jest istotna?
7. Odnośnie oscylacji interferencyjnych widocznych w widmach transmisji na rysunku 54, to czy były one analizowane w celu wyznaczenia np. grubości warstw i jeśli tak, to jak otrzymane wyniki mają się do wyników z SEM?
8. Odnośnie rysunku 56, to ciekawe jest to że dla niskich koncentracji domieszkowania wydłużone ziarna wyraźnie składają się z kilku mniejszych domen (najwyraźniej widać to dla próbki Al 1.9% Hf 1.9%). Czy wiadomo coś więcej na ten temat?
9. Odnośnie zdania „*Both morphology studies indicate that aluminum and hafnium are incorporated in similar manner, without forming non-stoichiometric aggregates and other phases.*” na stronie 83, to na podstawie samych badań morfologii trudno określić czy tworzą się wydzielienia dodatkowych faz. Czy w związku z tym były wykonane jeszcze jakieś dodatkowe pomiary?
10. Odnośnie rysunku 59, to ciekawy jest wynik dla warstwy AZO 9.8%. Czy wyraźnie dominujący pik przy około 35° , to wynik zmiany orientacji ziaren dla tej próbki czy może jednak tego, że w tej warstwie zamiast fazy heksagonalnej o strukturze wurcytu dominującą fazą jest materiał kubiczny o strukturze blendy cynkowej, a ten pik to pik (111) od takiej struktury?
11. Odnośnie zdania „*Some subtle shifts are present for the (002) and (110) peaks at 6.1% and 9.8% aluminum content in AZO samples, possibly due to the slight lattice changes.*” na stronie 85, to pytanie czy te przesunięcia nie są kolejnym przejawem pojawiania się fazy kubicznej w tych wysoko domieszkowanych warstwach?
12. Odnośnie zdania „*Furthermore, the absolute intensity of the peaks is attenuated with the higher dopant addition, implying an ongoing amorphization process.*” na stronie 85, to powiedzenie, że materiał ulega procesowi amorfizacji jest dosyć niefortunne. Tak naprawdę większa koncentracja domieszki jest przyczyną większej ilości defektów w strukturze pojawiających się podczas wzrostu warstw. W rezultacie ziarna są mniejsze i być może bardziej zdefektowane ale nie ulegają amorfizacji.
13. Odnośnie stwierdzenia „*As the cation concentration increases, a noticeable blueshift of the absorption edge is visible due to bandgap widening, caused mostly by the Burstein-Moss effect...*”, na stronie 88, to skąd wiadomo, że domieszkowanie na takim wysokim poziomie ma niewielki wpływ na strukturę pasmową i przerwę energetyczną?
14. Odnośnie stwierdzenia „*Another undesired effect is the agglomeration of silver into larger islands that disrupt the continuity of the thin film.*” Na stronie 100, to jaki jest mechanizm tego niepożądanego procesu i czy są jakieś strategie aby ten proces ewentualnie zablokować?

Dodatkowe uwagi redakcyjne:

- Strona 5, linia 3 od dołu: Zamiast „*in built*” powinno być „*built-in*”.
- Strona 19, linia 7 od dołu: Brak kropki na końcu zdania.
- Strona 20, linia 7 od dołu: Zamiast „*manufacture*” powinno być „*manufacturing*”.
- Strona 31, linia 13 od dołu: Brak kropki na końcu zdania.
- Strona 19, linia 7 od dołu: Brak spacji pomiędzy „*[111]*” i „*presented*” w pierwszym zdaniu pod rysunkiem 23.
- Następujący fragment: „*The description of ALD process in previous section provides fundamental and illustrative form. In reality, this requires certain growth conditions, several requirements for precursors and reaction types. n principle, this requires certain growth conditions and reaction types to be fulfilled.*” na stronie 37 jest bardzo niejasny i zbyt ogólnikowy.
- Strona 39: Zamiast „*deposition speed*” powinno być raczej „*deposition rate*”.
- Strona 54, ostatnia linia przed rysunkiem 39: Zamiast „*XRD spectrum*” powinno być „*XRD pattern*”.
- Strona 54, pierwsza linia podpisu rysunku 39: Zamiast „*X-ray light*” powinno być „*X-ray light beam*”.
- Strona 54, ostatnia linia: Zamiast „*depending*” powinno być „*depend*”.
- Strona 55, linia 9: Zamiast „*X-ray light source*” powinno być „*X-ray source*”.
- Strona 55, linia 14: Zamiast „*monochromatic light beam*” powinno być „*monochromatic beam*”.
- W równaniu (33) na stronie 63 zarówno wektor falowy jak i współczynnik ekstynkcji ośrodka oznaczone są niefortunnie symbolem *k*.
- Strona 66, linia 1: Zamiast „*manufacture*” powinno być „*fabrication*”.
- Strona 67, linia 1: Zamiast „*The researches described here were*” powinno być „*The research described here was*”.
- Strona 67, linia 4 rozdziału 4.1.: Zamiast „*The c-axis is usually a preferential growth*” powinno być „*The c-axis is usually a preferential growth direction*”.
- Strona 68, linie 10-11: Zamiast „*Zinc oxide exhibits an abundance of different defects*” powinno być „*Zinc oxide exhibits an abundance of different defect states*”.
- Strona 75, linia 5 od dołu: Zamiast „*a tight-packed picture*” powinno być „*a tight-packed morphology*”.
- Strona 75, linia 4 od dołu: Zamiast „*This picture seems*” powinno być „*This morphology seems*”.
- Strona 79, linia 6 od dołu: Zamiast „*remain*” powinno być „*remains*”.
- Strona 116, linia 4: Zamiast „*manufacture*” powinno być „*manufacturing*”.