

Dr hab. inż. Barbara SWATOWSKA, prof. AGH
Katedra Elektroniki
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków 12.05.2020

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY NAUKOWEJ KOLEGIUM NAUK PRZYRODNICZYCH
UNIwersytetu RZESZOWSKIEGO**

Tytuł rozprawy:

***Cienkowarstwowe ogniwa słoneczne na bazie struktur
tlenku tytanu i tlenku miedzi***

Autor rozprawy:

mgr inż. Paulina Sawicka-Chudy

Promotor z dyscypliny nauki fizyczne: *prof. dr hab. Marian Cholewa*

Promotor z dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika: *dr hab. inż. Maciej Sibiński, prof. PŁ*

Promotor pomocniczy: *dr Grzegorz Wisz*

Ekologiczne metody wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej, w tym te z wykorzystaniem energii słonecznej, bez wątpienia stanowią bardzo obiecującą alternatywę dla konwencjonalnych źródeł energii. Energetyka może zostać wzbogacona nowymi materiałami, bądź też nowymi połączeniami znanych materiałów, dotychczas nie stosowanymi w fotowoltaice. Nowy typ cienkowarstwowych ogniw fotowoltaicznych, wytworzonych na bazie tlenku tytanu oraz tlenku miedzi, daje nadzieję na niższe koszty produkcji ogniw, a także istotnie mniejszą wagę instalowanych modułów, co nie jest bez znaczenia w konkretnych zastosowaniach.

Rozprawa stanowi spójny tematycznie cykl 6 publikacji angielskojęzycznych, opublikowanych w latach 2018-2020 w czasopiśmie ujętych w bazie *Journal Citation Report*. Zbiór publikacji poprzedzono wstępem, opisem symulacji numerycznych oraz technologii funkcjonalnych struktur cienkowarstwowych, metodologią ich charakteryzacji, analizą praktycznych eksperymentów, prowadzących do wytworzenia ogniw fotowoltaicznych, a także podsumowaniem i wnioskami końcowymi. Ta część posiada 47 odnośników literaturowych. Do rozprawy dołączono również oświadczenia współautorów publikacji, zawierające zakres ich wkładu merytorycznego do każdego z artykułów.

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Rozprawa doktorska ma zarówno charakter teoretyczny, jak i doświadczalny, a opisane działania świadczą o jej interdyscyplinarności. Z jednej strony praca dotyczy teoretycznej weryfikacji

aplikacyjnych możliwości struktur TiO_2/CuO oraz $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{O}$, a z drugiej obejmuje próby technologiczne otrzymywania cienkowarstwowych ogniw na bazie tlenku tytanu i tlenku miedzi, innych niż w doniesieniach literaturowych. Podjęte działania pokazują, że Doktorantka ma świadomość, iż sprawność całego ogniwa wynika zarówno z rodzaju i jakości jego elementów składowych, jak i efektywności procesów zachodzących na wszystkich interfejsach i we wszystkich obszarach.

Autorka rozprawy definiuje cel i tezy pracy w osobnym rozdziale (rozdział 4) na stronach 14-15. Celem pracy była teoretyczna analiza jakości struktur TiO_2/CuO oraz $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{O}$ w kontekście możliwości stosowania w nowym typie cienkowarstwowych ogniw słonecznych. Konsekwencją tych działań był wybór konkretnej metody otrzymywania materiałów oraz wyselekcjonowanie optymalnych warunków technologicznych, które stworzą realną szansę na wytworzenie efektywnie działającej struktury fotowoltaicznej. Na potrzeby realizacji pracy postawiono dwie tezy. Teza pierwsza to stwierdzenie, że możliwe jest opracowanie i zastosowanie modeli analitycznych do symulacji parametrów pracy ogniw cienkowarstwowych TiO_2/CuO oraz $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{O}$, z uwzględnieniem analiz numerycznych zjawisk fizycznych, zachodzących w tym rodzaju struktur. W tezie drugiej zaś Autorka zakłada, że cienkowarstwowe struktury fotowoltaiczne na bazie tlenku tytanu i tlenku miedzi, efektywnie działające, można otrzymać za pomocą standardowych technologii próżniowych.

Problemy naukowe oraz zakres prac eksperymentalnych zostały trafnie i jasno sprecyzowane.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Autorka w bibliografii przytacza 47 źródeł, z których najstarsza jest z roku 1982, a ponad połowa z lat 2012-2020. Ranga wielu z cytowanych czasopism jest bardzo wysoka, a zakres tematyczny obejmowany przez cytowane czasopisma jest również bardzo rozległy. Świadczy to o ujęciu w rozprawie aktualnych doniesień literaturowych i potwierdza znajomość Doktorantki współczesnej literatury, związanej z tematyką rozprawy.

Z informacji podanych przez Doktorantkę wynika ponadto, że wyniki swoich badań prezentowała na dziesięciu konferencjach. Analizy symulacyjne, a także struktury na bazie tlenku tytanu oraz tlenku miedzi i ich właściwości, opracowane w ramach niniejszej pracy, stały się także przedmiotem 20 recenzowanych artykułów, w tym 6 z listy JCR.

Reasumując należy stwierdzić, że Autorka posiada bardzo dobre rozeznanie w tematyce związanej z doktoratem.

3. Czy autorka rozwiązała postawione zagadnienia, czy użyła właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Przyjęty przez Autorkę program badań w świetle sformułowanych założeń jest uzasadniony. Badania udowadniające postawione tezy zostały szczegółowo opisane w publikacjach Doktorantki. Wykonana symulacja (program SCAPS) pozwoliła zweryfikować i porównać potencjalne możliwości struktur TiO_2/CuO oraz $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{O}$ w zastosowaniach fotowoltaicznych. Na jej podstawie opracowana została kompozycja oraz technologia wytwarzania półprzewodnikowych struktur cienkowarstwowych na bazie tlenku tytanu i tlenku miedzi. Wybrano metodę reaktywnego stałoprądowego rozpylania magnetronowego. Autorka przeprowadziła kompleksową charakteryzację otrzymanych struktur dzięki zastosowaniu wielu metod pomiarowych: XDR, SEM, EDS, AFM, pomiary optyczne i elektryczne. Wymienione metody krótko scharakteryzowała w rozprawie. Sposób prezentacji uzyskanych

rezultatów zarówno w publikacjach, jak i w rozprawie, jest czytelny i jednoznaczny.

Wobec powyższego, można z całą pewnością stwierdzić, że Doktorantka zastosowała właściwe metody technologiczno-pomiarowe, a tym samym, że posiada umiejętności planowania i prowadzenia badań naukowych.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Za oryginalne należy uznać przede wszystkim otrzymanie warstw tlenku tytanu i tlenku miedzi o właściwościach predysponujących je do zastosowań w fotowoltaice, z wykorzystaniem metody reaktywnego stałoprądowego rozpylania magnetronowego.

Wytworzone wg. opracowanej technologii warstwy wykazują dobrą adhezję do podłoża, zadowalający stopień krystaliczności oraz transmisję na poziomie 80% w zakresie światła widzialnego. Zrealizowane pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych (I-V) oraz pojemnościowo-napięciowych (C-V) dobrze rokują do dalszych modyfikacji materiału, w kierunku poprawy jakości złącza z niego wykonanego. W szeregu symulacji pokazano, że ogniwa ze strukturą typu TiO_2/CuO lub $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{O}$ są w stanie osiągać sprawności nawet na poziomie 20%.

Szczegółowe badania związane z procesem technologicznym wytwarzania funkcjonalnych cienkowarstwowych struktur fotowoltaicznych oraz z ich właściwościami dostarczyły szeregu informacji praktycznych, które mogą być wykorzystane podczas kontynuacji tych badań. Pokazano m.in., że dobór właściwej temperatury podłoża, wielkości przepływu tlenu oraz czasu trwania procesu to najistotniejsze parametry technologiczne w kierunku otrzymywania struktur o coraz większej efektywności.

5. Czy autorka wykazała umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Język rozprawy jest poprawny, zasadniczo bez istotnych błędów gramatycznych czy stylistycznych. Zauważalne są jedynie pewne braki interpunkcyjne. Ponadto w niektórych miejscach wyjaśnienia nowo wprowadzanych terminów są trochę lakoniczne, ogólnikowe. Obecne w pracy nieliczne określenia slangowe i literówki nie wpływają na całościową ocenę rozprawy, a także ogólną wysoką staranność i rzetelność w przygotowaniu tekstu, wykresów i tabel.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

W rozprawie nie zauważono istotnych błędów rzeczowych. Jednakże Autorka nie ustrzegła się kilku niedomówień czy drobnych pomyłek. Oto ich wykaz:

- ✓ W zestawieniu Symboli brak kilku oznaczeń, które pojawiają się w pracy, np. symbolu k – współczynnik ekstynkcji czy też STC – Standard Test Conditions.
- ✓ Str. 9 – W tym samym zestawieniu pojawia się dość nietypowe tłumaczenie skrótu XRD jako „rentgenografia strukturalna” – raczej stosuje się nazwę „dyfrakcja rentgenowska” lub „dyfrakcja promieni rentgenowskich”.
- ✓ Str. 13 – Autorka pisze: „Wyniki laboratoryjne dla urządzeń krzemowych podano dla pojedynczych

ogniów w standardowych warunkach testowych”, a nie wyjaśnia co konkretnie oznaczają standardowe warunki testowe.

- ✓ Str. 16 – „Jako warstwa pasywująca i antyreflekcyjna w klasycznych krzemowych modułach fotowoltaicznych” – prawda, ale brak odnośnika, w którym takie zastosowania są opisane.
- ✓ Str. 18 – niejednolita pisownia: Motta-Schottky’ego
- ✓ Str. 22 – nieprawidłowa pisownia Sigma-Aldrich
- ✓ Str. 23 – zarówno w tekście, jak i przy tabeli nieprawidłowy jej numer – powinien być „4” a nie 3
- ✓ Str. 24 – na dole: „Sądźmy, że jest on spowodowany niewłaściwymi ...” – dość dziwna forma jak na pracę doktorską pisaną we własnym imieniu.
- ✓ Str. 25 – na dole: „W celu zwiększenia krystaliczności warstw oraz uniknięcia...” – należało napisać bardziej jednoznacznie, na którym etapie możliwe jest wygrzewanie ogniów i w jakich warunkach.
- ✓ Str. 26 – pomyłony numer tabeli – powinno być „Tabela 5”. Ta błędna numeracja tabel utrzymuje się już od końca pracy.
- ✓ Str. 26 – nieprawidłowy podpis Tabeli 5: „Wartości krystaliczności oraz amorficzności ...” – raczej mówi się o „stopniu” krystaliczności lub amorficzności, a nie wartości.
- ✓ Str. 28 – na dole: „Na podstawie wielu przeprowadzonych przez nasz zespół doświadczeń i ich analiz ...” – dość dziwna forma jak na pracę doktorską pisaną we własnym imieniu.
- ✓ Str. 29 – wyboldowany fragment: „Według naszej najlepszej wiedzy, ogniwo ...” – czyjej wiedzy ??
- ✓ Str. 29 – Tabela 6
- ✓ Str. 31 – Tabela 7
- ✓ Str. 31 – na dole: „Uzyskana struktura PV może być punktem wyjścia do dalszego jej ulepszania” – w jakim kontekście??
- ✓ Str. 32 – na zdjęciach SEM brak informacji o powiększeniu, w jakim je wykonano
- ✓ Str. 33 – Rozumiem, że prezentowany na Rys. 15 dyfraktogram jest przedrukowany z artykułu [D5], ale chyba jednak w tekście powinna być choćby krótka wzmianka, które piki miałyby informować o obecności fazy Cu_2O , a także gdzie można je obserwować? Jakie fazy dominują?
- ✓ Str. 34 – podpis do Rys. 16 niejednoznaczny.
- ✓ Podsumowanie rozprawy jest na tyle istotnym elementem, że powinno być wyeksponowane na oddzielnej stronie.
- ✓ Doktorantka przyjęła trochę niefortunne oznaczanie warstw Cu_2O oraz TiO_2 – P1, P2, P4 – co w niektórych fragmentach utrudnia rozróżnienie, które warstwy są właśnie analizowane.
- ✓ Szkoda, że w rozprawie brak powołań na własne prace, spoza listy artykułów, stanowiących spójny tematycznie cykl – oprócz D1-D6.

Wymienione usterki nie wpływają na wysoką ocenę redakcji całej rozprawy.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

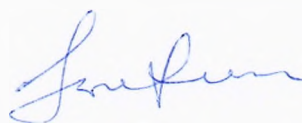
Praca Mgr inż. Pauliny Sawickiej-Chudy ma bardzo wyraźny charakter aplikacyjny, gdyż zrealizowane badania jednoznacznie wskazują na możliwość stosowania wytworzonych struktur w aplikacjach fotowoltaicznych. Sprawności opracowanych ogniów TiO_2/CuO oraz $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{O}$ na tym etapie nie są imponujące (poniżej 1%), jednakże napięcie obwodu otwartego wygląda bardzo obiecująco – nawet 0,64 V. Dodatkowo możliwość dalszych modyfikacji pewnych etapów technologii daje nadzieję na wytwarzanie zdecydowanie bardziej efektywnych struktur tego rodzaju.

Szereg zastosowanych procedur i modyfikacji eksperymentalnych omówiono na tyle dokładnie i rzeczowo, że można w przyszłych badaniach skorzystać z wniosków wyciągniętych przez Autorkę. Uzasadnia to całkowicie przydatność rozprawy dla nauk technicznych.

8. Ocena końcowa

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa prezentuje wymagany poziom naukowy, a przedstawione wyniki badań są oryginalnym dorobkiem Doktorantki. Mgr inż. Paulina Sawicka-Chudy bardzo dobrze rozwiązała postawione sobie zadania, a jednocześnie wykazała się wiedzą oraz umiejętnościami, wymaganymi dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych z uwzględnieniem interdyscyplinarności zrealizowanej pracy: w obszarze fizyki, a także w obszarze automatyki, elektroniki i elektrotechniki.

Recenzowana rozprawa doktorska w pełni **spełnia wymagania** wynikające z Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki z 14 marca 2003 roku, wraz z późniejszymi zmianami i na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Pauliny Sawickiej-Chudy do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Barbara Swatowska, prof. AGH