

Warszawa 23 kwietnia 2017

Prof. dr hab. Marek Godlewski
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej Tomasza Drobiazga

Magister Tomasz Drobiazg wykonał pracę doktorską zatytułowaną „Impact of Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film Growth Process on the Electrical Metastabilities of Related Solar Cells” pod kierunkiem profesor Małgorzaty Igalson (promotor) i dr Pawła Zabierowskiego (promotor pomocniczy) z Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej. Praca napisana w języku angielskim liczy 177 stron i 145 referencji do prac w dziedzinie rozprawy.

Pracę rozpoczyna wstęp teoretyczny, w którym autor rozprawy opisuje historię badań nad zjawiskiem generacji energii elektrycznej ze światła – opisuje historię badań nad efektem fotowoltaicznym. Autor podkreśla olbrzymi potencjał w tej dziedzinie energetyki.

W następnej części autor przedstawia cel rozprawy. Głównym celem było wyjaśnienie roli defektów metastabilnych i wpływu parametrów procesu otrzymywania warstw na efekty metastabilności limitujące wydajność konwersji światła w bateriach słonecznych wykorzystujących warstwę Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS). Oczywistym celem było podniesienie wydajności CIGS-owskich systemów fotowoltaicznych.

Kolejny rozdział (**rozdział trzeci**) to bardzo obszerny opis CIGS-owskich komórek słonecznych, w którym opisane są właściwości materiału, defekty, a następnie sposób wykonania struktur fotowoltaicznych. W szczególności, w oparciu o zaawansowane prace teoretyczne, natura defektów odpowiedzialnych za p-typ warstw CIGS, efekty kompensacji i zjawiska metastabilne zaczyna być dopiero wyjaśniana. Mimo 40tu lat intensywnych badań wiele z tych zjawisk jest jeszcze nie wyjaśnionych!

W dalszej części rozdziału trzeciego autor rozprawy opisuje technologię otrzymywania warstw CIGS. Ten opis wyjaśnia dlaczego wiele zjawisk wymaga jeszcze badania. Sam proces otrzymywania warstw o danej stechiometrii jest skomplikowany, a odstępstwa od stechiometrii mają istotny wpływ na strukturę defektów i wydajność konwersji światła na elektryczność. Technologia otrzymywania dalszych warstw CdS, oporowy ZnO i AZO jest znacznie prostsza.

W końcowej części rozdziału trzeciego autor rozprawy przedstawia modele umożliwiające opis ilościowy obserwowanych charakterystyk prądowo-napięciowych i opis wpływu defektów na działanie CIGS-owskich komórek fotowoltaicznych.

W **rozdziale czwartym** autor opisuje użyte techniki do charakteryzacji badanych struktur fotowoltaicznych. Badania te pozwalają między innymi przeprowadzić analizę stanów defektowych, ich rozkładu, jak i wpływu na parametry badanych złącz.

Kolejny rozdział (**piąty**) robi bardzo duże wrażenie. Autor omawia bardzo zaawansowaną analizę charakterystyk prądowo-napięciowych, znacznie modyfikując „książkowy” model stosowany w większości prac innych autorów. To samo można powiedzieć na temat analizy widm XRD przedstawionej w **rozdziale szóstym**. Ponownie autor rozprawy prezentuje bardzo oryginalny model użyty do wyjaśnienia obserwowanych widm XRD.

Uzyskane wyniki eksperymentalne przedstawione są w **rozdziale siódmym**, w którym autor zestawia wyniki uzyskane dla trzech typów struktur fotowoltaicznych – A, B i C.

Pierwszy zestaw próbek (typ A) badano w celu określenia wpływu zawartości miedzi na obserwowane parametry komórek fotowoltaicznych. Badania wykonano dla czterech próbek otrzymanych przy różnych parametrach procesu technologicznego. Kluczowym wynikiem było wskazanie metod osiągnięcia wyższej wydajności badanych struktur fotowoltaicznych i omówienie korelacji pomiędzy procesem technologicznym a zawartością sodu w warstwie CIGS.

Drugi zestaw (seria B) obejmował 6 próbek z różnymi przerwami wzbronionymi (B1 – B3) lub z gradientem składu (B4 – B6). Badany był wpływ zmiany przerwy wzbronionej na wydajność konwersji światła przez komórki fotowoltaiczne. Wykonano pełny zestaw pomiarów (podobnie jak dla serii A).

Najważniejsze obserwacje dla tej serii próbek to:

- 1) właściwości strukturalne (dominująca orientacja) zależy od przerwy wzbronionej, a dla próbek z gradientem składu ta korelacja zanika
- 2) wydajność konwersji światła może być zwiększana dobierając odpowiedni profil gradientu składu (przerwy wzbronionej)
- 3) koncentracja płytkich akceptorów jak i metastabilnych defektów rośnie wraz z wielkością przerwy wzbronionej
- 4) koncentracja metastabilnych defektów jest najniższa w próbkach z gradientem składu

Trzeci zestaw (seria C) obejmował 8 próbek z różnymi koncentracjami sodu przygotowanych z lub bez gradientu składu. Badany był wpływ zmiany koncentracji sodu

na wydajność konwersji światła przez komórki fotowoltaiczne. Wykonano pełny zestaw pomiarów (podobnie jak dla serii A i B).

Najważniejsze obserwacje dla tej serii próbek to:

- 1) dla próbek bez sodu obserwowano mniejsze wartości V_{oc} , współczynnika wypełnienia i mniejszą wydajność konwersji światła
- 2) koncentracja akceptorów (a także defektów odpowiedzialnych za efekty metastabilne) rośnie w próbkach z większą zawartością sodu.

Praca kończy się analizą wyników otrzymanych dla serii A, B i C (**rozdział ósmy**), krótkim podsumowaniem (**rozdział dziewiąty**) oraz dwoma aneksami.

Ocena końcowa pracy

Praca zawiera olbrzymi materiał badawczy. O ile pierwsze dwa-trzy rozdziały są dosyć standardowe, kolejne są już na najwyższym poziomie, a zawarte w nich informacje przekonują, że autor bardzo dogłębnie rozumie badane zjawiska.

Struktury fotowoltaiczne CIGS badane są od wielu lat. Obserwowany postęp czasami jest przypadkowy (patrz korzyści z wymiany podłoża szklanego na szkło sodowe kiedy wykryto korzystny wpływ sodu na wydajność komórek CIGS-owskich), w innych przypadkach wynika ze żmudnej pracy badawczej. Przykładem jest bieżąca rozprawa doktorska, w której wykonano bardzo systematyczne badania wpływu wielu parametrów na wydajność konwersji światła.

Praca napisana jest bardzo starannie. Nie dostrzegłem istotnych błędów. Jedyna krytyczna uwaga to ta, że w pracy zabrakło podsumowania efektów wynikających z

przeprowadzonych badań. Oczekiwałem, że autor zaproponuje kroki, które mogłyby doprowadzić do dalszej poprawy CIGS-owskich układów fotowoltaicznych.

Podsumowanie

Podsumowując uważam, że przedstawiona rozprawa i dorobek mgr Tomasza Drobiazga w pełni uzasadniają nadanie kandydatowi stopnia naukowego doktora. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie kandydata do publicznej obrony rozprawy.

Jest to bardzo dobra rozprawa zawierająca olbrzymi materiał badawczy i zaawansowaną analizę uzyskanych wyników. Dlatego wnioskuję o wyróżnienie tej rozprawy.

