

Łódź, dnia 13.05.2024

**dr hab. Paweł Kowalczyk, prof. UŁ**  
**Kierownik Katedry Fizyki Ciała Stałego**  
Uniwersytet Łódźski  
ul. Pomorska 149/153  
90-236 Łódź  
pawel.kowalczyk@uni.lodz.pl

**Ocena rozprawy doktorskiej mgr. Macieja Krajewskiego**

**pt. „Improved Light Management and Photogenerated Carrier Collections Concepts for Third Generation Solar Cells”**

W przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej wykonanej pod kierunkiem Pani promotor dr hab. Anety Drabińskiej, prof. UW oraz promotora pomocniczego dr. Piotra Wróbka z Uniwersytetu Warszawskiego, mgr Maciej Krajewski podejmuje tematykę związaną z konstrukcją ogniw fotowoltaicznych. W moim odczuciu badania omówione w dysertacji są bardzo ciekawe oraz zostały dobrze przemyślane i przeprowadzone w systematyczny sposób. Z informacji zawartych w rozprawie wynika, iż pan Maciej Krajewski jest współautorem 7 prac z czego w czterech jest pierwszym Autorem. Trzy z tych prac stanowią podstawę ocenianej rozprawy doktorskiej

Dysertacja napisana została w języku angielskim, liczy ona 174 strony i podzielona została na siedem rozdziałów oraz spisy dorobku Autora i literatury (zawierający 252 pozycje piśmiennicze). Rozłożenie treści na poszczególne rozdziały jest dobrze wyważone i czytelny jest stopniowo wprowadzany w tematykę pracy (rozdziały 1 i 2), metodologię pomiarową (rozdział 3). W rozdziałach 4-6 Doktorant opisał przeprowadzone przez siebie badania. Wspólnym rdzeniem są tu badania poświęcone poprawie jakości ogniw fotowoltaicznych jednak każdy z rozdziałów jest niezależną częścią właściwie nie powiązaną z pozostałymi. W szczególności w rozdziale 4 Autor dysertacji skupił się na wzroście przewodzącej elektrody z wykorzystaniem ALD, w rozdziale 5 na wytwarzaniu powłok antyrefleksyjnych na panelach perowskitowych i w ostatnim szóstym rozdziale na obliczeniach sprawności ogniw pokrytych elektrodami metalicznymi o strukturach regularnych i fraktalnych.

Stronę formalną przedstawionej do recenzji rozprawy oceniam dobrze. Praca jest bardzo estetyczna a rysunki dobrej jakości i czytelne. Język używany w pracy jest poprawny a drobne uchybienia gramatyczne i ortograficzne nie wpływają na generalnie bardzo pozytywny odbiór treści. W trakcie lektury dostrzegłem kilka drobiazgów, na które chciałem zwrócić uwagę:

- Autor nie opisuje niektórych rysunków w treści pracy, a tym samym stają się one integralną jej częścią i wymuszają na czytelniku ich analizę oraz zapoznanie się z podpisami.

- Odnośniki do niektórych równań rozpoczynają się od dwóch nawiasów, np. odwołania do równań (27) i (28) na stronie 60.
- Czy na rys. 89a (str. 128) nie zabrakło danych dla średniej drogi swobodnej wynoszącej 4000 nm?

Merytoryczną stronę pracy oceniam na bardzo dobrą. W rozdziałach pierwszym i drugim Autor wprowadza czytelnika w tematykę rozprawy oraz przedstawia ją na tle badań światowych. W rozdziale trzecim przedstawiona została metodologia pomiarowa. Główna część badań prowadzonych przez Doktoranta opisana została w rozdziałach od czwartego do szóstego. W rozdziale czwartym Autor skupił się na opisie wzrostu oraz na charakteryzacji warstw tlenkowych. Rozdział ten jasno pokazuje ilość pracy jaką wykonał Doktorant aby zoptymalizować wzrost tlenków. Wskazuje również jasno na bardzo systematyczne podejście do prowadzonych badań. Ta mozolna praca bardzo rzetelnie wykonana przez Pana Macieja Krajewskiego pozwoliła mu określić optymalne warunki wzrostu oraz najlepsze grubości warstw tlenku cynku do zastosowań w fotowoltaice. W rozdziale piątym Doktorant opisuje warstwy antyrefleksyjne, których zadaniem jest zminimalizować prawdopodobieństwo odbicia się światła od urządzenia fotowoltaicznego a tym samym wzrost efektywności generacji nośników. Autor rozprawy mierzył się tu z prawdziwie technologicznymi problemami takimi jak niszczenie perowskitowych paneli poprzez stemplowanie warstw antyrefleksyjnych. Problem ten został rozwiązany przez wykorzystanie technologii nanoszenia warstw za pomocą nakładania ich z rolki. Pozwoliło to na wytworzenie różnych wzorów na warstwie refleksyjnej i przebadanie refleksyjności a także własności elektrycznych ogniw z wytworzonymi pokryciami. Mi personally eksperymenty opisane w tym rozdziale, opis problemów i sposoby ich rozwiązania - bardzo się podobały. Część ta jasno wskazuje, że Doktorant jest wytrwałym i pełnym zapału badaczem, który potrafi rozwiązywać problemy jakie pojawiają się w jego badaniach. Świadczy to również o dużej samodzielności w prowadzeniu badań naukowych. W ostatnim, poświęconym merytorycznym zagadnieniom rozdziale szóstym Autor dysertacji pokazuje, że nie tylko doskonale opanował aspekty eksperymentalne ale również z dużym powodzeniem potrafi prowadzić obliczenia teoretyczne. W rozdziale tym zaprezentował model teoretyczny pozwalający mu obliczyć efektywność działania paneli fotowoltaicznych w funkcji rozłożenia planarnego zakończeń elektrody metalicznej, grubości tych elektrod, drogi swobodnej elektronów w warstwie aktywnej. Po przeczytaniu tego rozdziału jestem pod bardzo dużym wrażeniem całej przeprowadzonej analizy. Główną konkluzją z przeprowadzonych badań numerycznych jest stwierdzenie, że głównym problemem jest spadek efektywności w symulowanych ogniwach na skutek obecności cienia powstałego poprzez obecność elektrod metalicznych. Wydaje się jednak, że poprzez zastosowanie odpowiednich powłok antyrefleksyjnych wydajność ogniw może zostać poprawiona mimo obecności stosunkowo gęstej sieci elektrod.

W trakcie lektury przedstawionej do recenzji pracy nasunął mi się szereg uwag i pytań, które wymienione są poniżej:

- Na stronie 68 Autor podkreśla, że w tej rozprawie zdecydował się stosować notację Krögera-Vinka. Z czego wynika ten wybór i jakie konsekwencje dla wyników przedstawionych w rozprawie miałby inny wybór?
- Na rysunku 54 (str. 78) pokazane zostały transmitancje światła dla różnych grubości pokryć. Jak wyjaśnić można nie intuicyjny wynik, że średnia transmisyjność dla warstwy o grubości 500 nm jest większa niż dla 400 nm?

- Na rysunku 58 (str. 84) pokazane zostały obrazy AFM powierzchni badanych próbek. Morfologia uzyskana z tych pomiarów jest inna niż ta uzyskana za pomocą SEM. Z czego może wynikać ta różnica i czy w związku z tym wyniki AFM są miarodajne?
- W podrozdziale 4.4 (str. 94) wykonane zostały symulacje i eksperymenty dla układów tlenek – metal – tlenek. W jaki sposób eksperymentalnie określono grubość warstwy metalu?
- Z czego wynikają różnice w widmach dla szkła pokazane na rysunkach 73 (str.107) i 74 (str. 108)?
- Zaproponowany w podrozdziale 6.2 (strona 123) model zakłada, że górna elektroda znajduje się w punkcie o współrzędnych (0, 0, 0) co wynika z równania na  $d_1$  (definicja na stronie 124). W jaki sposób model uwzględnia wymiary elektrod?
- Na stronie 127 Autor informuje że dla średniej drogi swobodnej wynoszącej 1500 nm osiągnięta jest saturacja pokazana na rysunku 88b. Nie do końca rozumiem to stwierdzenie.
- Na rysunku 92 (str. 133) pokazane zostały bardzo ciekawe wyniki pozwalające porównać efektywność symulowanych paneli w funkcji średniej drogi swobodnej nośników oraz typu i gęstości rozlokowania elektrod metalicznych. Co należałoby zrobić aby wyniki można było porównywać między wykresami? Unormowana efektywność nie wydaje się być najlepszą miarą ponieważ, jeśli dobrze zrozumiałem, dane normowane są w ramach jednego wykresu. Potrafię wyobrazić sobie sytuację, w której np. Heksagonalne wypełnienie dla średniej drogi swobodnej wynoszącej 1200 nm może być jednak lepsze niż np. Proste linie dla 200 nm. Czy można te dane zkwantyfikować aby można je było przedstawić na wspólnej osi?

### Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. Macieja Krajewskiego związana jest z konstrukcją nowoczesnych ogniw fotowoltaicznych. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje jednoznacznie o dogłębnej wiedzy w dyscyplinie oraz o zdolności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta. Niewielkie uchybienia edytorskie występujące w rozprawie nie wpływają znacząco na jej poziom naukowy i moją jej pozytywną ocenę. Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. Macieja Krajewskiego spełnia warunki stawiane przez artykuł 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dziennik Ustaw z 2020 roku pozycja 85, z późniejszymi zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony rozprawy. Jednocześnie biorąc pod uwagę wyróżniającą się działalność naukową doktoranta, a w szczególności Jego dorobek publikacyjny, na który składa się w sumie sześć opublikowanych artykułów i jeden złożony do czasopisma, z pośród których w czterech jest pierwszym Autorem wnioskuję do Rady Dyscypliny Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego o wyróżnienie rozprawy.

dr hab. Paweł Kowalczyk, prof. UŁ