

Poznań, 16.12.2023 r.

dr hab. Arkadiusz Józefczak

prof. uczelni

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra Antona Markovskiy

pt. „**Właściwości optyczne i mechaniczne konwerterów diod białych na bazie warstw monokrystalicznych i kryształów granatów**”

„**Optical and mechanical properties of phosphor converters for white LEDs based on the single crystalline films and single crystals of garnets**”

wykonanej na Uniwersytecie Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy,
pod kierunkiem prof. dr hab. Yuriya Zorenko oraz dra hab. Michała Pakuły, prof. uczelni.

Rozprawa doktorska przedstawiona przez mgr. Antona Markovskiy dotyczy badań strukturalnych, mechanicznych, luminescencyjnych oraz fotokonwersyjnych właściwości struktur epitaksjalnych granatów, które znajdują zastosowanie jako monokrystaliczne konwertery w elektroluminescencyjnych diodach emitujących światło białe. Głównym celem pracy prezentowanej przez mgr. Antona Markovskiy było poszerzenie wiedzy na temat właściwości luminescencyjnych materiałów w postaci warstw monokrystalicznych i wybranych kryształów granatu, które stanowią podstawę efektywnych luminoforów w diodach emitujących światło białe. Dodatkowym celem Doktoranta była optymalizacja właściwości fotokonwersyjnych tych materiałów, aby uzyskać wydajne źródło światła białego. Uważam, że tematyka rozprawy doktorskiej jest bardzo interesująca i potrzebna w świetle poszukiwań lepszych źródeł światła białego, a do jej wykonania niezbędna była znajomość zagadnień związanych z fizyką, chemią i akustyką.

Przedstawiona do recenzji rozprawa została napisana w języku angielskim i posiada typowy układ dla prac eksperymentalnych z zakresu nauk ścisłych i przyrodniczych. Struktura jest logiczna i czytelna. Całość rozprawy liczy 131 stron maszynopisu i podzielona jest na 7 głównych rozdziałów oraz wprowadzenia, wniosków i bibliografii. Każdy rozdział kończy się podsumowaniem, co znacznie ułatwia zrozumienie przedstawionych wyników. Praca zawiera 71 rysunków i 11 tabel, a także wykaz skrótów i oznaczeń stosowanych w pracy. Spis literatury zawiera 166 pozycji a większość z nich to publikacje z ostatnich dziesięciu lat, co świadczy o

tym, że temat pracy podjęty przez Doktoranta jest nowatorski oraz cieszy się bardzo dużym zainteresowaniem w środowisku naukowym. Praca została napisana poprawnym językiem.

W rozdziale 1 Autor przedstawił teoretyczne wiadomości o właściwościach struktury kryształu granatu, właściwościach luminescencyjnych jonów Ce^{3+} w luminoforach granatu oraz zasady działania i konstruowania diodowych źródeł światła białego.

W rozdziale 2 Doktorant skupił się na szczegółach technologii wytwarzania luminoforów na bazie granatu do potencjalnego zastosowania w diodach światła białego. Autor wykorzystał metodę epitaksji w fazie ciekłej do uzyskania różnych warstw monokrystalicznych wybranych granatów domieszkowanych jonami Ce^{3+} . Uzyskano fotokonwertery o różnych grubościach w zakresie 19-160 μm , na różnych podłożach. Podkreślono znaczenie wyboru odpowiedniego podłoża monokrystalicznego do wzrostu epitaksjalnego. Rozdział kończy się opisem krytycznych aspektów procesu produkcji luminoforów przy wykorzystaniu metody epitaksji w fazie ciekłej.

By dokładnie poznać i zrozumieć działanie wytworzonych warstw–konwerterów wykorzystano szeroki zakres technik eksperymentalnych, które odegrały kluczową rolę w charakteryzowaniu materiałów i odkrywaniu ich właściwości strukturalnych, mechanicznych i optycznych. W rozdziale 3 szczegółowo zostały omówione zastosowane metody pomiarowe. W badaniach wykorzystano skaningową mikroskopię transmisyjną (STEM), analizę dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), mikroskopię ultradźwiękową, spektroskopię luminescencyjną oraz metody kalorymetryczne do pomiaru i charakteryzacji właściwości barwnych materiałów. Wyjaśnienia wymaga jednak opis akustycznej mikroskopii:

- Jaka była grubość warstwy „binding medium” podczas mikroskopii akustycznej?
- Z opisu wynika, że były używane dwa przetworniki (transducer and receiver) – na rysunku 3.4 jest jednak tylko jeden. Czy pracował on w dwóch trybach?

Rozdział 4 i 5 dotyczy mechanicznych własności luminoforów. Z mojego punktu widzenia, nowatorskie wykorzystanie fal ultradźwiękowych do badań własności mechanicznych wytworzonych materiałów jest najciekawszą częścią pracy. W ramach badań teoretycznych i numerycznych opracowano model opisujący propagację fal ultradźwiękowych w warstwowych strukturach epitaksjalnych. Model ten pozwolił na identyfikację właściwości sprężystych warstw i podłoży opartych na granatach. Przeprowadzono również badania eksperymentalne struktur epitaksjalnych z wykorzystaniem mikroskopii ultradźwiękowej w szerokim zakresie częstotliwości (35-200 MHz). W celu identyfikacji właściwości mechanicznych (sprężystych) badanych warstw i podłoży, wyniki badań mikroskopii ultradźwiękowej zostały poddane analizie za pomocą algorytmu optymalizacyjnego, z wykorzystaniem opracowanego mikroskopowego modelu propagacji fali oraz analizę numeryczną. Wyjaśnienia wymaga jednak kilka zagadnień:

- Prędkość fali ultradźwiękowej silnie zależy od temperatury. Czy stabilizowano temperaturę próbki podczas pomiarów? Interesujące jest też, jak własności akustyczne zmieniają się podczas nagrzewania luminoforu?
- Skąd wiadomo, że propagowały się fale Rayleigha? Czy w warstwie próbki nie mogły powstać inne rodzaje fal np. fale Lamba?

- Zastanawiający jest duży błąd pomiaru prędkości fazowej fali ultradźwiękowej. Co jest przyczyną tego błędu?
- Zaobserwowano dyspersję prędkości fazowej fali ultradźwiękowej? Co jest przyczyną tego zjawiska? Co autor miał na myśli pisząc, że jest to rezultat „the complex interaction of the surface acoustic waves with the layered structure of the material”?
- Czy w przypadku gdy prędkość propagacji fali ultradźwiękowej zależy od częstotliwości, można wykorzystać pomiary akustyczne do obliczenia parametrów mechanicznych, takich jak moduł Younga czy współczynnik Poissona.

W kolejnych dwóch rozdziałach przedstawiono strukturalne, mechaniczne, luminescencyjne oraz fotokonwersyjne właściwości luminoforów (konwerterów) w postaci warstw monokrystalicznych (rozdział 6), jak i kompozytowych konwerterach typu "warstwa-kryształ" (rozdział 7). W pracy zaprezentowano wyniki badań właściwości optycznych granatów poprzez pomiar ich widm absorpcji, katodoluminescencji oraz fotoluminescencji. Analiza ta pozwoliła na ocenę spektralnych charakterystyk luminescencyjnych tych materiałów, które są istotne dla ich zastosowania w diodach emitujących światło białe. Przeprowadzono także pomiary współrzędnych barwowych (CC), temperatury barwowej (CCT), wskaźnika oddawania barw (CRI) oraz wydajności świetlnej (LE) zarówno dla warstw, jak i kompozytowych konwerterów co pozwoliło na określanie jakości barwowej, temperatury i wydajności emitowanego światła i optymalizację składu konwerterów opartych na strukturach epitaksjalnych granatów do zastosowań w źródłach światła białego. Autor rozprawy doktorskiej stworzył także prototypy źródeł światła białego z fotokonwerterami opartymi na domieszkowanych jonami Ce^{3+} warstwach monokrystalicznych granatów o różnej grubości, a także kompozytowych o różnym stężeniu ceru i grubości. Dodatkowo przeprowadzono badania fotokonwersyjnych właściwości opracowanych warstwowych i kompozytowych konwerterów oraz wybrano najlepsze składniki tych konwerterów.

Warto podkreślić, że podczas całego procesu badawczego wytworzono materiał badawczy (próbki), zbadano jego właściwości, praktycznie zastosowano w konwerterach i sprawdzono ich działanie. Doktorant uczestniczył w formułowaniu zadań badawczych i osobiście uzyskał większość wyników eksperymentalnych oraz wykonał ich analizę.

Wartość merytoryczną rozprawy mgr. Antona Markovskiy potwierdza fakt, że jej główne wyniki zostały już opublikowane w 6 artykułach, a więc przeszły przez gęste sito wnikliwych recenzji specjalistów w dziedzinie. We wszystkich tych publikacjach Doktorant jest pierwszym autorem. Warto wspomnieć, że Pan Anton Markovskiy jest współautorem kolejnych 9 artykułów naukowych oraz europejskiego patentu. Doktorant brał także aktywny udział w prezentowaniu wyników podczas ośmiu konferencji naukowych, a także uczestniczył jako wykonawca w realizacji dwóch projektów badawczych.

W podsumowaniu chciałbym podkreślić wysoki poziom badań przeprowadzonych przez doktoranta oraz duży nakład systematycznych prac eksperymentalnych jaki wykonał Pan Anton Markovskiy w swojej pracy. Uważam, że tematyka pracy doktorskiej jest bardzo interesująca i potrzebna. Praca doktorska została dobrze zaplanowana a wyniki dobrze przedyskutowane i zinterpretowane. Rozprawa mgr. Antona Markovskiy zawiera oryginalny, bogaty i wartościowy materiał. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną

doktoranta ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i Przyrodniczych oraz wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Biorąc pod uwagę powyższe fakty, oraz zapoznaniu się z wynikiem badania rozprawy w Jednolitym Systemie Antyplagiatowym, stwierdzam, że przedłożona do oceny rozprawa spełnia ustawowe i zwyczajowe kryteria stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z wymaganiami artykułu 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 1668 z późn. zm.). Wnoszę do Rady Dziedziny Nauk Ścisłych i Przyrodniczych Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy o dopuszczenie mgra Antona Markovskiy do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Arkadiusz Józefczak