

Warszawa 30 stycznia 2026

Prof. dr hab. Marek Godlewski
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
02-668 Warszawa, Al. Lotników 32/46

Recenzja pracy doktorskiej
Mgr. inż. Łukasza Witczaka
zatytułowanej:

„Opracowanie technologii wytwarzania diod QLED w oparciu o koloidalne półprzewodnikowe kropki kwantowe przy wykorzystaniu metody druku XTPL”

Praca doktorska mgr. inż. Łukasza Witczaka wykonana została pod kierownictwem (promotor rozprawy) prof. dr hab. inż. Artura Podhorodeckiego i dr Anety Wiatrowskiej (promotor pomocniczy rozprawy). Pracę wykonano **w dziedzinie Nauki Fizyczne, w dyscyplinie Fizyka Doświadczalna.**

Złożona praca jest doktoratem wdrożeniowym. Tym samym oprócz oceny wiedzy kandydata i jego gotowości do samodzielnej pracy naukowej recenzent powinien przede wszystkim ocenić czy uzyskane wyniki w rozprawie mają charakter aplikacyjny i czy istnieją szanse na ich wdrożenie w procesie wytwarzania odpowiednich struktur – w przypadku złożonej rozprawy dotyczy to struktur tranzystorów polowych z elektroniki, w tym elastycznej, i struktur optoelektronicznych - diody QLED. Tym samym w załączonej recenzji skupię się głównie na odpowiedzi na powyższe pytanie. Zanim jednak odpowiem na to pytanie piszę kilka słów na temat konstrukcji złożonej pracy i przedstawiam uwagi dotyczące jej tytułu.

Jeśli chodzi o tytuł, to w moim odczuciu nie oddaje on zakresu pracy doktoranta. Jego rolą było opracowanie metod druku metodą XTPL odpowiednich matryc drutów metalicznych, zastosowanych następnie przy konstrukcji elektrod w tranzystorach polowych wykonanych z wykorzystaniem materiałów organicznych i na przezroczystych podłożach, lub w hybrydowych (materiały organiczne i nieorganiczne) diodach QLED. Elektrody stosowano

w strukturach wykonywanych albo przez partnera naukowego z Włoch lub na Politechnice Wrocławskiej. Sam doktorant jasno definiuje swoją rolę w opracowaniu odpowiednich struktur elektronicznych, a następnie optoelektronicznych. Opracował on wyłącznie metodykę wykonywania odpowiednich matryc drutów metalicznych, stąd moja uwaga dotycząca trafności doboru tytułu rozprawy.

Jeśli chodzi o samą pracę, to napisana jest ona w sposób dosyć oryginalny i chwilami wygląda jak poradnik encyklopedyczny – hasło, a następnie jego wytłumaczenie/rozwińnięcie. Nie jest to istotny zarzut do autora pracy, choć muszę przyznać, że pierwszy raz spotkałem się z taką formą prezentacji.

Sam doktorat jest bardzo rozległy. Tym samym przyjęta forma prezentacji być może jest uzasadniona, bo autor rozprawy uniknął w ten sposób rekordowego rozmiaru swojego dzieła. Mimo dosyć skrótowej prezentacji części z informacji, praca liczy aż 209 stron! Zawiera ona Streszczenie w języku polskim i angielskim, pięć rozdziałów, Podsumowanie wyników, Spis osiągnięć naukowych kandydata, obszerną bibliografię oraz pięć załączników. Praca napisana jest w języku angielskim, choć tytuł podany jest wyłącznie w języki polskim, co jest trochę dziwne. Może powinien być także podany tytuł w języku angielskim.

Jak napisałem powyżej w rozprawie podany jest aktualny (w momencie spisywania rozprawy) dorobek naukowy kandydata. **Należy podkreślić, że dorobek naukowy kandydata jest wyróżniający!** W momencie składania rozprawy kandydat był współautorem aż 15 publikacji naukowych, w tym dwóch jako pierwszy autor. Co ważniejsze (złożony doktorat jest doktoratem wdrożeniowym) **kandydat jest współautorem sześciu przyznanych patentów i dwóch wniosków patentowych. Te osiągnięcia uważam za wyróżniające.**

Jak już pisałem, złożona praca dotyczy opracowania zmodyfikowanych przezroczystych elektrod metalicznych do zastosowań albo przy konstrukcji tranzystorów polowych wykonanych na przezroczystych, w tym także elastycznych, podłożach, z wykorzystaniem materiałów organicznych, albo konstrukcji nowej generacji diod LED, tak zwanych QLED, z częścią świecąca opartą o kropki kwantowe materiałów półprzewodnikowych oraz elementy wykonane z materiałów organicznych. Także w przypadku diod QLED takie struktury mogą być wykonywane na przezroczystych podłożach - na odpowiednich foliach lub na szkłe.

Aby uzyskać wysoką transmisję światła i odpowiednio duże przewodnictwo elektryczne kandydat opracował/zoptymalizował metodę druku siatek metalicznych z wykorzystaniem odpowiednich past. Badano elektrody ze srebra, z miedzi lub ze złota (dla porównania). **Wykonanie takich elektrod jest oryginalnym i ważnym rozwiązaniem w przedstawionej pracy doktorskiej. Uzyskane parametry elektrod są bardzo dobre!**

Jestem pod dużym wrażeniem fachowości doktoranta w badanej dziedzinie. Zawarty w doktoracie opis metod druku z wykorzystaniem „past metalicznych” jak i metod ich utrwalania/wygrzewania potwierdzają znakomitą wiedzę kandydata w tej tematyce. Spełnione jest więc ważne kryterium przy ocenie zaawansowania prac doktorskich. Doktorant szczegółowo opisał swoją rolę w prowadzonych pracach nad różnymi przyrządami jak i napotkane trudności. Nie mam więc żadnej wątpliwości jaki jest jego wkład do prowadzonych prac nad przyrządami.

Zanim skupię się na omówieniu napotkanych trudności w realizacji doktoratu, mam kilka uwag lub sugestii do informacji załączonych w rozprawie. Omawiając problematykę przezroczystych elektrod kandydat podkreślił wiodącą pozycję warstw ITO, ale także obecne ograniczenia w ich dalszym stosowaniu wynikające z rosnącej ceny indu. Poszukiwane są alternatywne materiały na zastosowanie jako przezroczyste elektrody. W tym punkcie zaskoczyło mnie pominięcie w przedstawionym opisie bardzo intensywnych prac badawczych prowadzonych na całym świecie dotyczących innych (alternatywnych) tlenków, w szczególności warstw tlenku cynku domieszkowanego różnymi jonami – glinem, galem, indem, fluorem. Te warstwy skutecznie konkurują obecnie z elektrodami wykonanymi z ITO.

Co więcej dostępne są metody osadzania tych warstw odpowiednio domieszkowanego ZnO w niskich temperaturach, w temperaturach koniecznych w przypadku struktur do przezroczystej i elastycznej elektroniki lub optoelektroniki. Niska temperatura wytwarzania odpowiednich warstw oznacza także możliwość wytwarzania całej gammy struktur hybrydowych – materiał organiczny/elektroda tlenkowa, co jest dobrze udokumentowane w dostępnej literaturze fachowej.

Przy okazji czytając omawiane w pracy rozwiązania nasunęła mi się pewna uwaga/wątpliwość. Z prac prowadzonych w moim zespole badawczym wiem, że różnego typu folie nie są idealnie gładkie i szczelne. Aby wytworzyć odpowiednie struktury elektroniczne często konieczne było położenie na folii warstwy barierowej. Do tego celu my

używaliśmy warstw Al_2O_3 i technologii Osadzania Warstw Atomowych (ALD). Takie warstwy znakomicie poprawiały trwałość odpowiednich struktur organicznych wykonanych na folii z warstwą barierową. Może w przypadku omawianych w rozprawie prac wdrożeniowych warto pomyśleć o tym rozwiązaniu.

Jak już pisałem we wstępie do mojej recenzji, oprócz „klasycznej” oceny wiedzy, poziomu naukowego i umiejętności samodzielnej pracy naukowej doktoranta, w przypadku doktoratów wdrożeniowych powinno się ocenić czy prowadzono prace aplikacyjne i czy są szanse na wdrożenie osiągnięć rozprawy.

Jestem pod dużym wrażeniem wykonanych przez doktoranta matryc metalicznych jak i faktu, że udało się zastąpić metalizację srebrną drutami miedzianymi. To są ważne i cenne osiągnięcia pracy doktorskiej. Przedstawiony doktorat bez wątplenia ma charakter aplikacyjny.

Jednocześnie widzę poważne przeszkody w natychmiastowym wdrożeniu uzyskanych w rozprawie wyników w przypadku części z omawianych w pracy struktur. Sam doktorant podkreślał trudności i ograniczenia zastosowanej przez siebie metody wykonywania przezroczystych elektrod.

W przypadku druku elektrod koniecznym krokiem było wygrzewanie aby przeprowadzić metalizację ścieżek i usunąć komponenty organiczne występujące w stosowanych do druku pastach. Jeśli chodzi o temperaturę takiego wygrzewania, to jest ona często powyżej dopuszczalnej temperatury trwałości dla wybranych typów podłoży foliowych. Również zastosowana metoda obróbki laserowej drukowanych ścieżek metalicznych nie poprawia znacząco tego ograniczenia. Z kolei metoda przeniesienia matrycy metalicznej z jednego podłoża na drugie jest zbyt skomplikowana, aby zastosować ją przy produkcji odpowiednich struktur, czy to elektronicznych, czy to optoelektronicznych. Opracowana metoda wytwarzania elektrod jest więc możliwa do szybkiego zastosowania w strukturach wytwarzanych na przykład na szkle, ale trudna do implementacji na elastycznych podłożach.

Kolejnym ograniczeniem opracowanej technologii metalizacji są długie czasy wytwarzania odpowiednich matryc metalicznych. W tym punkcie zaproponowane rozwiązania chyba nie są konkurencyjne do stosowanych metod napyłania ścieżek metalicznych przez odpowiednie maski. Piszę chyba, bo trochę szkoda, że doktorant nie opisał lepiej zalet swojej metody w stosunku do konkurencyjnej metody metalizacji przez

maski – nie porównał rozmiaru ścieżek, ich trwałość, wysokość etc... Jestem przekonany, że opracowana metoda w doktoracie ma wiele zalet i może być konkurencyjna. Proponuję omówić to porównanie w czasie publicznej obrony doktoratu.

Podsumowanie

Powyższe drobne uwagi/wątpliwości nie zmieniają mojej bardzo pozytywnej oceny złożonej rozprawy, która w moim odczuciu zawiera bardzo ciekawe wyniki prac doświadczalnych. Nie mam najmniejszej wątpliwości, że kandydat jest znakomitym specjalistą w tematyce prowadzonych prac i, że w pełni zasługuje na przyznanie mu stopnia naukowego doktora. **Tym samym wnioskuję o dopuszczenie kandydata do dalszych etapów postępowania.**

