

**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej**  
**pt.: „Opracowanie technologii wytwarzania diod QLED w oparciu o koloidalne półprzewodnikowe kropki kwantowe przy wykorzystaniu metody druku XTPL”**

**Autor: mgr inż. Łukasz Witczak**

### **1. Podstawa opracowanej recenzji**

Podstawę opracowania recenzji stanowi uchwała 205/15/RDND11/2024-2028 z dnia 18.11.2025 roku Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne. Zgodnie z podjętą uchwałą zostałem wyznaczony na recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora panu mgr inż. Łukaszowi Witczakowi.

### **2. Ogólna charakterystyka pracy**

Recenzowana praca podejmuje niezwykle aktualny temat rozwoju drukowanych elektrod dla elastycznej optoelektroniki przy użyciu innowacyjnej metody Ultra-Precise Dispensing (UPD). Zastosowanie konkretnej techniki precyzyjnego mikrodruku elektrod jest wynikiem realizacji pracy w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy” Ministerstwa Edukacji i Nauki w ramach grantu nr DWD/4/50/2020 realizowanego we współpracy z firmą XTPL S.A. będącą dostawcą technologii UDP. Rozprawa ma układ klasyczny i zgodnie ze spisem treści składa się z sześciu głównych rozdziałów, szczegółowego opisu dorobku naukowego Doktoranta, spisu literatury oraz pięciu dodatków uzupełniających treść rozprawy.

Rozprawa otwiera się rozdziałem wprowadzającym, w którym Doktorant przedstawia szczegółową analizę stanu wiedzy w tematyce rozprawy doktorskiej. Autor osadza tematykę badań w szerokim kontekście dorobku badawczego i rozwojowego technologii elektroniki drukowanej. Przedstawia w nim ewolucję projektu badawczego oraz swoją drogę naukową, co pozwala zrozumieć motywację stojącą za podjęciem problematyki wykorzystania nowatorskiej technologii Ultra-Precise Dispensing (UPD) do wytwarzania komponentów optoelektronicznych.

Kolejna część (Rozdział 2) stanowi obszerny przegląd stanu wiedzy (State of the Art). Zebrano w niej i uporządkowano informacje dotyczące fizyki półprzewodników, zjawisk kwantowych w nanostrukturach oraz właściwości koloidalnych kropek kwantowych (QDs). Doktorant szczegółowo omawia zasady działania diod elektroluminescencyjnych bazujących na kropkach kwantowych (QLED) i tranzystorów polowych (FET), a także wyzwania stojące przed elektroniką elastyczną. Integralną częścią tego przeglądu jest wnikliwa analiza technologii UPD, obejmująca mechanizmy dozowania materiału, parametry reologiczne atramentów oraz fizykochemiczne aspekty procesu spiekania struktur metalicznych. Doktorant szczegółowo opisał również ograniczenia zastosowania tych technologii związane ze stosowanymi materiałami, procedurami nanoszenia oraz utwardzania gotowych mikrostruktur elektronicznych..

Opis metodologii badawczej i aparatury (Rozdział 3) zawiera szczegółową prezentację systemu druku Delta oraz charakterystykę stosowanych materiałów przewodzących i podłoży. W tej części pokazano również techniki wytwarzania i charakteryzacji urządzeń, w tym trafne podejście łączące precyzyjne pomiary czteropunktowe z szybką charakterystyką dwupunktową dla dużej liczby próbek. Przedstawiono również zastosowane podejście do charakterystyki mikrostruktur oraz pomiary parametrów optycznych uzyskanych elektrod transparentnych.

Głównym elementem dysertacji są rozdziały dokumentujące przebieg i wyniki badań własnych (Rozdziały 4 i 5), które pokazują logiczne następstwo kolejnych etapów prac. Doktorant szczegółowo omawia w nich fazę badań wstępnych, realizowaną we współpracy z Italian Institute of Technology (IIT) oraz Politechniką Wrocławską, gdzie skoncentrowano się na optymalizacji elektrod dla tranzystorów organicznych (OFET) o wysokiej rozdzielczości a także wytworzenie struktury subpiksela docelowego wyświetlacza QLED. Rozdział 5 stanowi kulminację rozprawy, dokumentując proces projektowania, optymalizacji i transferu drukowanych elektrod transparentnych (TCE) oraz ich skuteczną integrację w elastycznych diodach QLED.

W końcowych rozdziałach pracy (Rozdział 6) przedstawiono podsumowanie najważniejszych osiągnięć naukowych i technologicznych oraz sformułowano wnioski ogólne, wskazując jednocześnie na zidentyfikowane ograniczenia procesu i kierunki dalszych prac rozwojowych.

Warstwę dokumentacyjną uzupełnia wykaz dorobku naukowego Doktoranta, obejmujący imponującą liczbę patentów amerykańskich i zgłoszeń patentowych, a także bibliografia i aneksy zawierające techniczne skrypty sterujące urządzeniem, co pozwala na pełną rekonstrukcję przeprowadzonych procesów technologicznych.

Oceniając cały układ pracy, należy uznać go za przemyślany i spójny, prowadzący czytelnika od podstaw teoretycznych, przez rozwój technologii druku, aż po demonstrację w pełni funkcjonalnych urządzeń optoelektronicznych. Uważam, że układ pracy jest spójny i odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim.

### 3. Ocena merytoryczna pracy

Praca przedstawia wysoką wartość naukową, łącząc nowatorskie podejście do wytwarzania mikrostrukturalnych elektrod i siatek metalicznych z praktyczną aplikacją w urządzeniach optoelektronicznych.

Oceniając rozprawę od strony merytorycznej, należy stwierdzić, że zaplanowane eksperymenty oraz interpretacja uzyskanych wyników zostały przeprowadzone z dużą starannością. Główny cel pracy, zdefiniowany jako **rozwój i optymalizacja technologii wytwarzania kluczowych komponentów elastycznych diod QLED, ze szczególnym uwzględnieniem elektrod transparentnych (TCE) wytwarzanych z nanocząstek srebra i miedzi przy użyciu metody druku UDP**, został sformułowany w sposób jasny i precyzyjny.

Zagadnienie naukowe podjęte przez Doktoranta jest w pełni jednoznaczne. Autor postawił sobie za cel nie tylko demonstrację samej metody druku dla wysokorozdzielczych elektrod funkcjonalnych (np. w tranzystorach OFET), ale przede wszystkim ilościową optymalizację parametrów takich jak rozdzielczość linii ( $\leq 3 \mu\text{m}$ ) czy rezystancja powierzchniowa ( $< 15 \Omega/\square$ ) przy zachowaniu wysokiej transmitancji ( $> 80\%$ ). Tematyka ta jest niezwykle aktualna, biorąc pod uwagę globalne dążenie do obniżenia kosztów produkcji elastycznej optoelektroniki zarówno przez zastępowanie kosztownego srebra tańszą i łatwiej dostępną miedzią, jak i eliminacji zastosowania powszechnie stosowanych warstw tlenkowych na elektrody transparentne jak ITO, co jest przedmiotem zainteresowania czołowych ośrodków badawczych na świecie.

Zakres rozprawy jest szeroki i kompleksowy, obejmując pełen cykl badawczo-rozwojowy: od projektowania mikrostrukturalnych elektrod i siatek, przez optymalizację procesów druku i spiekania, aż po dedykowaną metodę transferu na podłoża elastyczne. Autor słusznie wyznaczył wytyczne odnośnie oczekiwanych efektów prac, koncentrując się na rozwiązaniu problemu chropowatości powierzchni elektrod ( $< 20 \text{ nm}$ ), co jest kluczowe w budowie wysokowydajnych urządzeń cienkowarstwowych jak np. tranzystory OFET.

Istotną część rozprawy zawierają opisy przeprowadzonych badań i prac technologicznych z zastosowaniem technik UDP. W rozdziale 4 Doktorant opisuje szczegółowo prace nad tranzystorami OFET i subpikselami do wyświetlaczy QLED. W tej części rozprawy przedstawione są wczesne etapy projektu, które miały na celu weryfikację możliwości technologii UPD w budowie złożonych układów wielowarstwowych. Prace te, choć obarczone licznymi wyzwaniem technologicznymi, stanowią wartościowy materiał badawczy, obrazujący proces identyfikowania

ograniczeń nowej techniki druku. Pierwsze podejścia były realizowane we współpracy z Italian Institute of Technology (IIT). Współpraca ta skoncentrowana była na wykorzystaniu technologii UPD do redukcji wymiarów geometrycznych elektrod dla struktur OFET. Autorowi udało się wykazać wysoką rozdzielczość metody, drukując elektrody źródła i drenu definiujące kanał o długości zaledwie 1,47  $\mu\text{m}$  oraz linie o szerokości 3,34  $\mu\text{m}$ , zachowując rezystancję na poziomie poniżej 100  $\Omega$ . Pozwoliło to na uzyskanie częstotliwości granicznej pracy tranzystora na poziomie 25,5 MHz dla tranzystorów organicznych na bazie roztworów P(NDI2OD-T2). Jednak w związku z problemami technologicznymi dalsza część badań, dotycząca drukowanych elektrod bramki, napotkała bariery nie do pokonania w założonym czasie. Odnotowano trudności z uzyskaniem stabilnego połączenia elektrycznego między nadrukowanymi liniami a złotymi polami kontaktowymi. Próby poprawy kontaktu poprzez manualne zarysowywanie powierzchni (scratching) i nadrukowywanie dodatkowych pól srebrowych nie przyniosły powtarzalnych rezultatów. Dodatkowymi czynnikami, które zdecydowały o przerwaniu tego wątku, były: niska temperatura spiekania ograniczająca przewodnictwo elektrod oraz krytyczne wyzwania w precyzyjnym pozycjonowaniu na wielowarstwowych próbkach.

W dalszej części Doktorant opisuje podjęcie analogicznych badań we współpracy z Politechniką Wrocławską. Te badania miały szerszy zakres eksploracyjny, obejmujący próby druku warstw izolacyjnych i hermetyzujących oraz transferu struktur na podłoża elastyczne. Zastosowano zmodyfikowane podejście, w którym bramka elektrody na podłożu szklanym była wykonana z naparowanej powłoki aluminiowej, utlenianej dla wytworzenia warstw dielektrycznej tranzystora, dodatkowo pokrytej roztworem PVP. Następnie na naniesione drukiem UDP elektrody drenu i źródła nanoszono powłokę kanału z polimeru półprzewodnikowego. Potwierdzono możliwość wykonywania aktywnych urządzeń, prezentując funkcjonalne tranzystory p-kanałowe z polimerem P3HT wraz z drukowanymi srebrowymi elektrodami na sztywnych podłożach. Zastosowanie innych materiałów półprzewodnikowych do wykonania kanału tranzystora, jak DPP-DTT, TIPS-Pentacene i F8T2, nie przyniosło pomyślnych rezultatów. Autor trafnie zidentyfikował przyczyny tych problemów do których m.in. należą problemy z geometrią wynikające z dużej wysokości nadrukowanych elektrod (powyżej 200 nm) uniemożliwiającej równomierne pokrycie kolejnymi warstwami nanoszonymi metodą spin-coatingu, co ostatecznie prowadziło do zwarcí elektrycznych, także w przypadku warstw zabezpieczających i dielektryków, a także niedopasowanie poziomów energetycznych i pracy wyjścia dla elektrod srebrowych i poszczególnych warstw tranzystora.

Równolegle Doktorant podjął próbę budowy subpikseli QLED, bazując na możliwościach precyzyjnego druku UPD w tworzeniu złożonych mikrogeometrii. Choć ostatecznie nie uzyskano na tym etapie w pełni funkcjonalnej struktury elektroluminescencyjnej to badania te dostarczyły kluczowej wiedzy o niekompatybilności termicznej materiałów. Wykazano, że temperatura spiekania pasty srebrowej zasadniczo koliduje z odpornością termiczną warstwy TFB. Jednak wyniki te przyczyniły się do uzyskania pozytywnych efektów prac nad elastycznymi diodami QLED, wymuszając zmianę strategii materiałowej (poszukiwanie alternatywnych materiałów HTL lub atramentów spiekanych poniżej 140°C).

Druga istotna część pracy opisuje zagadnienia związane z projektowaniem, wytwarzaniem i optymalizacją struktur elektroluminescencyjnych QLED z elektrodami drukowanymi metodą UPD. W pierwszej części Doktorant skupił się na optymalizacji parametrów i doborze transparentnych elektrod siatkowych (TCE). W ramach prac Autor przeprowadził optymalizację parametrów druku dla mikrosiatek wykonanych ze srebra (Ag), miedzi (Cu) oraz złota (Au). Do końcowej fazy wytwarzania urządzeń wyselekcjonowano siatki o szerokości linii 5  $\mu\text{m}$  i odległości między liniami 100  $\mu\text{m}$ . Dla siatek srebrowych uzyskano rezystancję powierzchniową rzędu 11  $\Omega/\square$  przy transmitancji optycznej rzędu 72%, natomiast siatki miedziane osiągnęły ok 9  $\Omega/\square$ . W przypadku elektrod złotych nie uzyskano satysfakcjonujących parametrów elektrycznych z uwagi na uszkodzenia linii podczas transferu na podłoża elastyczne. W efekcie prac Doktorant wykluczył z dalszych badań siatki o szerokości 3  $\mu\text{m}$  oraz siatki złote. Wykazano, że cieńsze linie (3  $\mu\text{m}$ ) są zbyt podatne na pękanie podczas transferu oraz niezwykle wrażliwe na zanieczyszczenia cząstkowe, co drastycznie obniżało uzysk sprawnych pikseli.

Ważnymi badaniami przedstawionymi w pracy jest opracowanie procesu transferu drukowanych i spiekanych elektrod siatkowych na elastyczne podłoże polimerowe z polimeru fotoutwardzalnego NOA63. Uzyskano w ten sposób chropowatość powierzchni elektrody siatkowej na poziomie  $< 20$  nm (nawet do 14 nm dla miedzi). Jest to kluczowy parametr umożliwiający nanoszenie cienkich warstw funkcjonalnych diody QLED bez ryzyka zwarć elektrycznych. Pomimo sukcesu w transferze elektrod, analiza mikroskopowa (AFM) ujawniła obecność mikropęknięć w przetransferowanych liniach metalowych, co może prowadzić do powstawania tzw. „hot-spotów” i przedwczesnej degradacji urządzenia.

Stosując wykonane elektrody transparentne Doktorant dokonał bezpośredniego porównania wydajności diod QLED zbudowanych na bazie elektrod srebrowych i miedzianych. Dla elektrod srebrowych struktury QLED osiągnęły zewnętrzną wydajność kwantową EQE na poziomie 2% oraz wydajność prądową CE ok 6 cd/A. Dla struktur QLED bazujących na elektrodach transparentnych miedzianych wydajność prądowa CE osiągnęła ok 8 cd/A a zewnętrzna wydajność kwantowa EQE na poziomie 2,5%. Wyniki te są szczególnie istotne, gdyż miedź okazała się wydajniejszą i tańszą alternatywą dla srebra. Należy jednak zaznaczyć, że struktury srebrowe wykazały znacznie wyższą maksymalną luminancję ( $3200$  cd/m<sup>2</sup>) w porównaniu do miedzianych ( $500$  cd/m<sup>2</sup>).

Rozprawa przedstawia wysoką wartość merytoryczną i naukową, co przejawia się przede wszystkim w skutecznym zastosowaniu zaawansowanych technik mikroformowania przyrostowego do wytwarzania zaawansowanych struktur elektronicznych podpartym skrupulatną analizą parametrów procesowych będących wynikiem przeprowadzonych złożonych prac eksperymentalnych. Autor zaproponował nowatorskie i oryginalne rozwiązanie w zakresie wytwarzania elektrod transparentnych metodą ultra-precyzyjnego druku siatek mikrostrukturalnych, co stanowi istotny wkład w rozwój elektroniki drukowanej. Osiągnięcia te, udokumentowane wieloma publikacjami i imponującą liczbą patentów amerykańskich oraz budową funkcjonalnych urządzeń o wysokiej wydajności, potwierdzają dojrzałość badawczą oraz użyteczny charakter podjętych prac. Całość dysertacji cechuje się wysokim stopniem oryginalności w stosunku do światowego stanu wiedzy, oferując cenne wytyczne technologiczne dla nowoczesnych układów optoelektronicznych.

#### **4. Uwagi krytyczne do treści i struktury pracy**

Pomimo wysokiej oceny merytorycznej oraz niewątpliwej wartości aplikacyjnej przedstawionych badań, recenzowana rozprawa nie jest wolna od błędów i niedociągnięć. Poniżej przedstawiam szczegółowe uwagi krytyczne dotyczące warstwy terminologicznej, strukturalnej, edycyjnej oraz merytorycznej.

1. Tytuł rozprawy, jak i jej treść, w wielu miejscach odwołują się bezpośrednio do nazwy konkretnej firmy (XTPL) zamiennie względem samej techniki druku (UDP). Nadaje to dysertacji charakter nieco promocyjny. Tytuł powinien raczej odnosić się do zastosowanej techniki lub badanych zjawisk fizykochemicznych.
2. Autor nagminnie używa określenia „transparentne elektrody przewodzące”, co z punktu widzenia fizyki jest pleonazmem (elektroda z definicji jest przewodząca). Niezależnie od występowania tego sformułowania w literaturze, w pracy naukowej zaleca się stosowanie bardziej poprawnych form, takich jak „transparentne elektrody” lub „transparentne warstwy przewodzące”.
3. Rozprawa jest nadmiernie rozdrobniona. Zastosowano zbyt głębokie, sięgające aż piątego poziomu zagłębienia, podrozdziały (np. 2.5.3.3.1), co utrudnia płynną lekturę. Rozdział 2, zamiast ogólnego tytułu, trafniej byłoby nazwać „Przeglądem stanu wiedzy” (State of the Art).
4. Rozdziały od 2.1.1 do 2.1.4 zawierają bardzo elementarną wiedzę z zakresu fizyki półprzewodników, która mogłaby zostać skrócona i ujęta jako zwięzły wstęp do tematyki kropek kwantowych, szczególnie że sama praca nie odnosi się szczegółowo do analizy podstawowych właściwości tych nanomateriałów.
5. W sekcji 2.6.4.1 Autor przytacza parametry reologiczne i zjawisko rozrzedzania przez ścinanie atramentów, jednak parametry te mają charakter ogólny i nie zostały bezpośrednio przebadane w ramach części doświadczalnej pracy.

6. Opis stanowisk do pomiarów cztero- i dwupunktowych (str. 99) jest niewystarczający. Zabrakło precyzyjnego wyszczególnienia komponentów wchodzących w skład tych układów pomiarowych.
7. W pracy brakuje szczegółowej analizy parametrów optycznych dla siatek miedzianych i złotych w porównaniu do siatek srebrowych. Autor nie wyjaśnił jednoznacznie przyczyn załamania charakterystyki spektrum i lokalnego wzrostu transmitancji przy długości fali 350 nm, widocznego na rysunkach 5.1.4 i 5.1.8 – warto byłoby to poprzeć podobnymi wynikami badań z literatury światowej.
8. W punkcie 3.2.1.3, w przeciwieństwie do pozostałych atramentów, zabrakło zdjęcia z mikroskopii elektronowej (SEM) dla atramentu ze złotem.
9. Poważnym brakiem jest rezygnacja z obliczenia wskaźnika FoM (Figure of Merit), który pozwoliłby na obiektywne porównanie parametrów elektrycznych i transmitancji wytworzonych elektrod transparentnych z danymi literaturowymi.
10. W sekcji 5.3.1 oraz na wykresach energetycznych diod QLED przyjęto identyczną pracę wyjścia dla elektrod ze srebra i miedzi (4,7 eV). Brakuje szczegółowej analizy lub pomiarów, które uzasadniałyby to założenie dla konkretnych elektrod wytworzonych metodą UPD.
11. Przedstawione dane nie dają jednoznacznej odpowiedzi i uzasadnienia, dlaczego struktury QLED oparte na siatkach miedzianych wykazują wyższą wydajność niż ich srebrowe odpowiedniki.
12. W szczególności brakuje wyraźnego wyjaśnienia skąd biorą się takie rozbieżności w wydajność struktur QLED dla elektrod srebrowych i miedzianych: maksymalna luminancja (3200 cd/m<sup>2</sup>) dla srebrowych w porównaniu do miedzianych (500 cd/m<sup>2</sup>).
13. Najistotniejszą wadą rozprawy jest brak pogłębionego modelowania procesów i struktur fizycznych, ze szczególnym uwzględnieniem mechanizmów transportu ładunku w półprzewodnikach organicznych i z nanomateriałami przy zastosowaniu różnych rodzajów i struktur elektrod drukowanych, co sprawia, że kluczowe zjawiska — takie jak wyższa wydajność struktur na siatkach miedzianych czy przyjęte wartości pracy wyjścia — nie zostały w pracy w pełni naukowo uzasadnione. Po rozprawie doktorskiej w dyscyplinie Nauki Fizyczne należałoby się spodziewać pogłębionej analizy tych zjawisk.
14. Znaczna liczba rysunków jest mało czytelna (np. 1.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.3.2, 2.4.1 oraz kluczowe dla technologii UPD rysunki 2.6.2 i 2.6.3). Jest to tym bardziej rażące, że układ pracy pozostawia wiele wolnego miejsca, które mogłoby zostać wykorzystane na lepszą ekspozycję grafik.
15. W tekście występują błędy w składzie, skutkujące powstawaniem dużych, pustych obszarów na stronach (np. str. 118 i 119).
16. Zastrzeżenia budzi nagminne odnoszenie się do preprintów oraz dobór niektórych pozycji literaturowych o niejasnym statusie naukowym (np. poz. 64, 65, 83, 94, 95).
17. W mojej osobistej ocenie praca w postaci wydruku okazała się dosyć trudna do analizy, co dodatkowo potęgowały wspomniane wcześniej problemy z formatowaniem, błędami w składzie oraz niefortunnym układem i jakością ilustracji. Uważam jednocześnie, że decyzja o utajnieniu rozprawy wydaje się nieuzasadniona, szczególnie w ujęciu tak imponującej liczby uzyskanych już patentów amerykańskich oraz kolejnych zgłoszeń patentowych, które skutecznie chronią zawartą w pracy własność intelektualną. Jeżeli powodem utajnienia miałyby być konkretne elementy techniczne, takie jak załączone w aneksach skrypty i instrukcje sterujące urządzeniem, to w mojej ocenie właściwszym rozwiązaniem byłoby ich wyłączenie z ogólnej jawności lub całkowite pominięcie w treści dysertacji, gdyż nie stanowią one istotnego wkładu naukowego, a jedynie techniczne uzupełnienie dokumentacji procesu.

Wskazane niedociągnięcia, choć liczne w warstwie redakcyjnej i analitycznej, nie podważają głównej koncepcji pracy, jaką jest nowatorskie zastosowanie mikrostrukturalnych siatek drukowanych metodą UPD jako alternatywy dla tradycyjnych elektrod transparentnych. Autor trafnie zidentyfikował wady procesu oraz sformułował wartościowe wnioski z badań eksploracyjnych, które stanowią cenną lekcję dla dalszego rozwoju tej technologii.

#### **4. Oryginalny dorobek Doktoranta i jest jego znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki.**

Dorobek naukowy Doktoranta związany z tematyką rozprawy opublikowany został w 5 artykułach z recenzowanych czasopismach naukowych z listy JCR w których Doktorant jest pierwszym lub drugim autorem, oraz w jednej publikacji zgłoszonej do analogicznego czasopisma. Poza tym wyniki badań zostały przedstawione w 9 materiałach konferencyjnych. W szczególności na uwagę zasługuje imponująca liczba 6 patentów uzyskanych w Urzędzie Patentowym Stanów Zjednoczonych chroniących własność intelektualną opracowanej technologii, w których to Doktorant jest w większości wymieniany jako pierwszy twórca – dodatkowe dwa zgłoszenia są w trakcie rozpatrywania. Wymienione wyżej publikacje naukowe i patenty stanowią istotny wkład w stan wiedzy w obszarze badań naukowych nad precyzyjnymi mikrostrukturami elektronicznymi a także wnoszą znaczącą wiedzę poznawczą w obszary techniczne wytwarzania praktycznych struktur mikro- i optoelektronicznych technikami przyrostowymi. W szczególności istotnymi dokonaniem Doktoranta w tym zakresie są:

- Opracowanie i optymalizacja procesu wytwarzania elektrod transparentnych (TCE) w formie mikrostrukturalnych siatek z atramentów zawierających nanocząstki srebra (Ag) oraz miedzi (Cu) przy użyciu nowatorskiej metody druku Ultra-Precise Dispensing (UPD).
- Wykazanie możliwości drukowania funkcjonalnych mikrostruktur elektronicznych w tym półprzewodnikowych kanałów o długości zaledwie 1,4  $\mu\text{m}$  oraz elektrod o szerokości 3,3  $\mu\text{m}$ , co pozwoliło na budowę tranzystorów organicznych (OFET) o częstotliwości granicznej 25,5 MHz.
- Opracowanie autorskiego sposobu przenoszenia spieczonych siatek metalowych na elastyczne podłoża polimerowe (NOA63), pozwalające na redukcję chropowatości powierzchni poniżej 20 nm (nawet 14 nm dla miedzi), co jest kluczowe dla elektronicznych struktur wielowarstwowych.
- Demonstracja w pełni funkcjonalnych, elastycznych diod QLED wykorzystujących drukowane elektrody miedziane i srebrne.

#### **5. Ocena i wniosek końcowy**

Podsumowując, stwierdzam, że przedstawione przeze mnie komentarze i uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę merytoryczną pracy mgr. inż. Łukasza Witczaka. Uważam, że Doktorant wykazał się dużą wiedzą teoretyczną, umiejętnością zaplanowania eksperymentów i prowadzenia pracy naukowej. Uzyskane rezultaty z pewnością wnoszą istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Nauki Fizyczne. Cel pracy został osiągnięty przy wykorzystaniu właściwych metod badawczych.

Stwierdzam, że recenzowana przeze mnie rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Witczaka pt.: **„Opracowanie technologii wytwarzania diod QLED w oparciu o koloidalne półprzewodnikowe kropki kwantowe przy wykorzystaniu metody druku XTPL”** spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim, określone w Ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U 2018 poz.1668) z 20 lipca 2018 roku oraz wpisuje się w Dyscyplinę Naukową Nauki Fizyczne. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Łukasza Witczaka do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Wrocławskiej.



dr hab. inż. Marcin Słoma, prof. ucz.