

dr hab. inż. Anna Szerling
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut
Mikroelektroniki i Fotoniki
Al. Lotników 32/46
02 - 668 Warszawa

Warszawa, 03/02/2025

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Jaworskiego
p.t. „ Opracowanie technologii wytwarzania struktur fonicznych z kropkami kwantowymi
jako wydajnych emiterów jednofotonowych do zastosowania w komunikacji kwantowej w
sieciach światłowodowych”**

Rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Jaworskiego została wykonana pod kierunkiem Promotora prof. dra hab. inż. Grzegorza Sęka, Promotora pomocniczego dra inż. Pawła Mrowińskiego i Opiekuna technicznego z ramienia firmy Nanores, gdzie zostało przeprowadzone wdrożenie, w postaci technologii wytwarzania wydajnych emisyjnie struktur fonicznych z kropkami kwantowymi za pomocą skupionej wiązki jonów.

Rozprawa dotyczy technologii wytwarzania struktur fonicznych z kropkami kwantowymi i analizy ich zastosowania jako wydajnych emiterów jednofotonowych do zastosowania w komunikacji kwantowej w sieciach światłowodowych.

Doktorant w recenzowanej rozprawie przeprowadził analizę wpływu technologii wytwarzania z zastosowaniem Focused Ion Beam (FIB) mikrostruktur z emisją z pojedynczych kropek kwantowych w zakresie II i III okna transmisyjnego na ich parametry optyczne. FIB umożliwia precyzyjne wytwarzanie struktur fonicznych w materiałach półprzewodnikowych z kropkami kwantowymi. Dzięki wysokiej rozdzielczości i zdolności do selektywnego usuwania materiału, FIB pozwala na bezpośrednie formowanie wnęk optycznych i falowodów o zoptymalizowanych właściwościach optycznych. Integracja kropek kwantowych z precyzyjnie ukształtowanymi strukturami fonicznymi zapewnia wysoką kierunkowość emisji i zwiększoną efektywność sprzężenia ze światłowodami. Takie rozwiązanie jest kluczowe dla komunikacji kwantowej, gdzie jednofotonowe źródła światła muszą być stabilne, dobrze sprzężone z siecią i kompatybilne z technologią światłowodową.

Recenzowana rozprawa poświęcona jest opracowaniu technologii FIB w celu otrzymania emiterów jednofotonowych. Prace obejmują rozważania teoretyczne, prace technologiczne oraz pomiarowe. Autor w recenzowanej rozprawie:

1) udowodnił, że technika FIB nadaje się do prototypowania i precyzyjnego kształtowania kwantowych układów fonicznych;

2) przedstawił zoptymalizowany proces obróbki mikrostruktur z emisją z pojedynczych kropek kwantowych z wykorzystaniem plazmy ksenonu w mikroskopie FIB (Xe-PFIB);

3) zademonstrował, że pomimo degradującego wpływu wiązki jonów, technologia ta jest nadal wydajna, jeśli warstwy pokrywające (ochronne) kropki kwantowe wynoszą do ok. 150 nm, co nigdy nie zostało pokazane dla struktur tego typu wywarzanych za pomocą FIB;

4) przedstawił optymalny proces wytwarzania bardziej złożonych układów fonicznych z zastosowaniem technologii FIB, na przykładzie koncentrycznego rezonatora Bragga;

5) zademonstrował emisję jednofotonową o wysokiej czystości z kropki kwantowej w strukturze fonicznej sprzężonej do jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego przy 1,55 μm , co stanowi podstawę do tworzenia praktycznych źródeł pojedynczych fotonów do komunikacji kwantowej.

Wyniki opisane w rozprawie zostały opublikowane w 3 artykułach, w których Doktorant był pierwszym Autorem, co dowodzi Jego kluczowej roli w realizowanych badaniach. Kluczowe publikacje związane z rozprawą ukazały się w bardzo dobrych czasopismach dla dziedziny jakimi są Optical Materials Express czy Optics Express.

Praca składa się z 13 rozdziałów. Część pierwsza obejmująca rozdziały od 1 do 4 poświęcona jest wprowadzeniu w temat rozprawy, opisowi metod technologicznych i eksperymentalnych. Opis jest dość szczegółowy i w dużej części prawidłowo przygotowany. Jednakże, Doktorant we wstępie nieprecyzyjnie porównuje technologię FIB z innymi metodami kształtowania struktur fonicznych, wskazując między innymi, że do elektronolitografii konieczne jest wykonywanie masek litograficznych, ponadto w rozdziale 2.5 brak precyzyjnej informacji czy Doktorant sam wyznaczył dane umieszczone na rysunkach 2.11-2.16, czy są to dane literaturowe. Również brak precyzyjnych danych, kto przeprowadził symulacje umieszczone na rys. 3.3. Jednakże, te niejasności nie obniżają wartości naukowej całej rozprawy i uzyskanych przez Doktoranta wyników, nie są też kluczowe w opisie we wprowadzeniu w temat rozprawy.

W kolejnych częściach rozprawy (rozdziały 5 -10) Autor przedstawia analizę wykonanych przez siebie obliczeń i prac eksperymentalnych.

W rozdziale 5 Autor przedstawił w sposób skrócony opis struktur epitaksjalnych użytych do dalszych eksperymentów. Schematy struktur zostały przedstawione w dość jasny sposób, wystarczający jako wprowadzenie do dalszego opisu eksperymentów. W rozdziale 5 nie zabrakło literówek czy drobnych błędów językowych.

W rozdziale 6 Autor zaprezentował metody spektroskopowe i układy optyczne, które zostały zastosowane przez Doktoranta do charakteryzacji wykonywanych struktur.

W rozdziale 7.1 Autor przedstawił opis metod, które zastosował do przeprowadzenia modelowania procesów technologicznych, przedstawił również wyniki teoretyczne dotyczące porównania wpływu oddziaływania wiązek jonów Ga oraz Xe z podłożem GaAs oraz wpływ zastosowania różnych warstw przykrywających (C, Pt) struktury półprzewodnikowe na wprowadzone do tych struktur jony Ga oraz Xe. W tej części rozprawy brakuje informacji dotyczącej grubości zastosowanej platyny, brakuje również przeprowadzonej analizy mającej na celu wyjaśnienie, dlaczego obecność Pt powoduje zniszczenia materiałów bliżej powierzchni struktur w porównaniu dla tych, w których zastosowano C. W rozdziale 7.2 Doktorant przedstawił opis metod, które zastosował do przeprowadzenia modelowania struktur fonicznych. W rozdziale zostały zaprezentowane m.in. przewidywania teoretyczne mające na celu wskazanie jak wydajne powinny być poszczególne struktury foniczne wykonane na strukturach z kropkami kwantowymi. W podrozdziale 7.2.2. Autor nie dość precyzyjnie określił cel umieszczonej charakterystyki i morfologii struktury typu meza, brakuje precyzyjnego wyjaśnienia dlaczego analiza została przeprowadzona dla tej konkretnej struktury i jaki ma związek z rozdziałem 7.2.

W rozdziale 8 Doktorant opisał wytwarzanie mikrostruktur fonicznych z zastosowaniem FIB oraz wpływ parametrów, czy zastosowanych konstrukcji na jakość formowanych struktur fonicznych. W podrozdziale 8.1 występują pewne braki związane z analizą wykonywanych struktur i wpływu warunków procesów, brak opisu mechanizmów które odpowiadają za uzyskane struktury. Pewien niedosyt jest związany z nieprecyzyjnym opisem rysunków 8.1-8.4, co wprowadza pewien dyskomfort w lekturze rozprawy. W rozdziale 8.2 brakuje precyzyjnej informacji, jaki mechanizm może odpowiadać za brak fotoluminescencji w strukturach przedstawionych na rysunku 8.5a i 8.5 b, czy degradacja materiału półprzewodnikowego nastąpiła również dla struktur a i b? Ponadto, w rozdziale 8.2 wydaje się, że zdjęcia struktur S1-S3 powinny się znajdować bliżej ich opisu, w którym wskazane są między nimi różnice. W podrozdziale 8.3 Doktorant nieprecyzyjnie określił, czy GaAs stanowiący warstwę przykrywkową był osadzany w procesie epitaksji wraz z całą strukturą epitaksjalną, na rysunku 8.13 (górnym) GaAs jest opisany jako amorficzny materiał. Brak tutaj analizy wpływu sposobu przygotowania struktur na uzyskane widma fotoluminescencji w postaci choć krótkiego podsumowania. W podrozdziale 8.4 Autor niejednoznacznie opisał jakiej średnicy są mezy. W podrozdziale 8.5 została zaprezentowana struktura foniczna w formie rezonatora pierścieniowego (CBG) za pomocą techniki FIB. Jednakże, w tym podrozdziale pewne niejasności są związane z brakiem analizy, na jakiej podstawie uzyskano informację, że obserwujemy tu działanie w modzie podstawowym, nie jest też klarowne w jaki sposób wyznaczono współczynnik Purcella.

W rozdziale 9 Doktorant przedstawił wyniki spektroskopowe dla wytworzonych struktur fonicznych. Przedstawione wyniki układają się w logiczną całość i przeprowadzona analiza jest

poprawna. Jednakże, pewien dyskomfort w czytaniu rozprawy powoduje opis próbek, w rozprawie w rozdziale 9 czytelnik odsyłany jest do zdjęć we wcześniejszych rozdziałach, czytanie byłoby ułatwione gdyby nazwy próbek jednoznacznie wskazywały jakiego typu są to struktury i w jakich technologiach wykonane. W takim układzie pojawiają się niejasności, dla przykładu w rozdziale 9.1 na str. 92 jest odwołanie do mezy 8.14 b, podczas gdy na rysunku 8.14 b są: *(b) Pomiary w formie profilu 3D z profilometru z różnymi wartościami grubości warstwy pokryciowej z GaAs.*

W rozdziale 10 Autor analizuje konieczność odpowiedniego zaprojektowania procesów technologicznych, w taki sposób aby odpowiednie struktury foniczne były wykonane w ściśle określonych miejscach struktury półprzewodnikowej zawierających kropki kwantowe. Doktorant zaprojektował odpowiednie markery do tego celu, eksperyment i analiza wyników doprowadziły do stworzenie bardzo dobrej metody pozycjonowania pojedynczych kropek kwantowych a docelowo skutecznego wytwarzania źródeł jednofotonowych.

Rozdział 11 obejmuje podsumowanie, rozdział 12 dorobek Doktoranta, a w rozdziale 13 jest spis cytowanych w rozprawie publikacji.

Układ pracy jest przejrzysty, wyniki przedstawione są w postaci czytelnych wykresów, tabel i zdjęć. Pragnę zauważyć, iż wskazane powyżej niedoskonałości natury edycyjnej nie obniżają wartości naukowej recenzowanej rozprawy, co najwyżej wprowadzają dyskomfort podczas czytania. Przedstawiona rozprawa doktorska zawiera oryginalne wyniki badań, wysoko oceniam wyniki naukowe mgr inż. Macieja Jaworskiego. Wyniki przedstawione w rozprawie świadczą o dużym potencjale wdrożeniowym, mogą być oferowane w firmie jako usługi badawcze związane z prototypowaniem struktur fonicznych.

Reasumując, recenzowana rozprawa świadczy o dużej wiedzy Autora w dziedzinie nauk fizycznych, a w szczególności w dziedzinie technologii wytwarzania struktur fonicznych. Dowodzi ona także biegłości w zakresie metod eksperymentalnych, wiedzy z zakresu modelowania procesów technologicznych, analizy danych. Przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Jaworskiego zawiera oryginalne i istotne wyniki badań. Recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z obowiązującą Ustawą wnoszącą o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Anna Szerling