



INSTYTUT FIZYKI POLSKIEJ AKADEMII NAUK
INSTITUTE OF PHYSICS, POLISH ACADEMY OF SCIENCES

02-668 WARSZAWA, AL. LOTNIKÓW 32/46
fax: + (48) 22 843 09 26; <https://www.ifpan.edu.pl/en/>

**International Centre for Interfacing Magnetism and Superconductivity
with Topological Matter – MagTop (ON-6)**

Prof. dr hab. Tomasz Wojtowicz, Leader of the Device Epitaxy Group ON6.2
Deputy head for scientific affairs of the ON6 Scientific Division,
tel. +(48) 22 116 3123; +(48) 500 263 685; e-mail: wojto@MagTop.ifpan.edu.pl
<https://magtop.ifpan.edu.pl/> <https://www.ifpan.edu.pl/en/institute/scientific-divisions.html>

Warszawa, 7-01-2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Macieja Jaworskiego

zatytułowanej:

„Opracowanie technologii wytwarzania struktur fotonicznych z kropkami kwantowymi jako wydajnych emiterów jednofotonowych do zastosowania w komunikacji kwantowej w sieciach światłowodowych”

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. Macieja Jaworskiego dotyczy badań eksperymentalnych oraz symulacji teoretycznych dotyczących nanostruktur fotonicznych zawierających kropki kwantowe. Celem tych badań, jak wskazuje tytuł rozprawy, było opracowanie technologii wytwarzania wydajnych emiterów pojedynczych fotonów, dla przyszłych zastosowań w komunikacji kwantowej.

Praca ta wykonana została na Politechnice Wrocławskiej w Katedrze Fizyki Doświadczalnej Wydziału Podstawowych Problemów Techniki pod kierunkiem promotora prof. dr. hab. inż. Grzegorza Sęka oraz promotora pomocniczego dr. inż. Pawła Mrowińskiego. Na Politechnice Wrocławskiej przeprowadzone zostały wszystkie badania optyczne, natomiast eksperymenty dotyczące wytwarzania nanostruktur fotonicznych prowadzone były w firmie Nanores z wykorzystaniem istniejącego tam dwuwiązkowego systemu Helios G4 PFIB CXe firmy FEI.

Praca badawcza, która stała się podstawą recenzowanej rozprawy doktorskiej wpisuje się w niezmiernie ciekawą i rozwijaną ostatnio bardzo intensywnie tematykę różnego rodzaju źródeł pojedynczych fotonów. Mogłyby one znaleźć zastosowanie nie tylko w obszarze telekomunikacji kwantowej, będącej dalekosiężnym celem mgr Macieja Jaworskiego, ale także w obliczeniach kwantowych. Doktorant, podtrzymując niejako tradycje PW, postanowił skupić się na emiterach, które mogą być wykorzystane dla telekomunikacji światłowodowej, a konkretnie takich, które emitują fotony z obszaru tzw. II i III okna telekomunikacyjnego (tj. dla długości fali odpowiednio ok. 1.3 μm i 1.55 μm).

Oryginalne zadanie, którego podjął się doktorant było bardzo trudne. Trudność z jednej strony wynikała ze stosowania do nanolitografii jonowej niezbyt dotychczas rozpowszechnionego działu z plazmą Xe (Xe-PFIB), co wymagało przeprowadzenia dużej ilości procesów. Z drugiej strony dla optymalizacji tejże technologii niezbędne było prowadzenie skomplikowanych badań optycznych, obejmujących pomiaru μ -PL, mapowania PL, oraz pomiary korelacyjne emisji fotonów. Bowiem tylko tego typu badania, oprócz oczywistego stosowania obrazowania SEM, mogły zapewnić dodatnie sprzężenie zwrotne dla poprawy procedur technologicznych.

Badania realizowane były z wykorzystaniem dwóch typów struktur bazowych: kopek kwantowych InGaAs w matrycy GaAs oraz kropek kwantowych InAs w matrycy InP. Pierwsza ze struktur wyhodowana została metodą MOCVD na Uniwersytecie Technicznym w Berlinie i zawierała pod warstwą z kropkami zwierciadło Bragga (DBR). Druga z kolei zawierała kropki kwantowe InAs w matrycy InP i wyhodowana została metodą MOVPE na Duńskim Uniwersytecie Technicznym. Następnie, po strawieniu podłoża InP (z wykorzystaniem warstwy stopera w postaci InGaAs) warstwa z kropkami przeniesiona została na podłoże Si, które wcześniej pokryte zostało warstwą reflektora aluminiowego oraz SiO₂.

Już na samym początku chciałbym stwierdzić, że cel naukowy, który postawił przed sobą mgr Jaworski, tj. *Opracowanie technologii wytwarzania struktur fotonicznych z kropkami kwantowymi* został osiągnięty, co wykazane zostało rozległymi badaniami własności emisji z wytworzonych tą technologią nanostruktur. Wyniki naukowe prezentowane w rozprawie oraz te opublikowane w trzech publikacjach, w których mgr Maciej Jaworski był pierwszym autorem, oceniam bardzo wysoko. Moim zdaniem przeprowadzone przez mgr. Jaworskiego badania wniosły istotny wkład do rozwoju fizyki, w szczególności w obszarze badań jednofotonowych emiterów bazujących na fotonicznych strukturach zawierających kropki kwantowe. Poniżej przedstawię bardziej szczegółowy opis rozprawy, krótkie omówienie kilku najważniejszych wyników oraz moje uwagi i pytania, dotyczące jednak głównie samej formy prezentacji wyników w rozprawie.

Rozprawa doktorska mgr. Macieja Jaworskiego napisana została w języku polskim, liczy 120 stron i zawiera dość obszerne odniesienie do literatury naukowej, obejmujące 93 pozycje bibliograficzne. Składa się ona z jednostronicowego streszczenia (także po angielsku) oraz jedenastu rozdziałów, z których pierwszy jest wstępem, a jedenasty podsumowaniem. Końcowy rozdział 12 zawiera dorobek Autora w postaci publikacji oraz wystąpień konferencyjnych.

Rozdział pierwszy rozprawy zawiera ogólne wprowadzenie do tematyki i motywację do podjęcia badań.

Rozdział drugi, na który składa się pięć podrozdziałów, zawiera ogólny wstęp teoretyczny obejmujący wprowadzenie: (i) pojęcia struktur fotonicznych i ich rodzajów; (ii) kropek kwantowych w tym systemów InAs/InP oraz InGaAs/GaAs używanych w badaniach; (iii) rodzajów emisji z kropek i ich dynamiki; (iv) wydajności ekstrakcji fotonów; i (v) czystości emisji jednofotonowej.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawia ideę mikroskopów dwuwiązkowych SEM/FIB przedstawiając zdjęcie konkretnego mikroskopu, którego używał, a następnie dyskutuje parametry wiązki jonowej oraz tryby jej ruchu.

Rozdział czwarty zawiera opis oddziaływania wiązki jonów z obrabianym materiałem oraz możliwy wpływ na jego degradację.

W rozdziale piątym przedstawione są dwa rodzaje struktur bazowych z kropkami, z których doktorant wykonywał struktury foniczne, a w rozdziale szóstym używany układ do badań spektroskopowych.

W rozdziale siódmym przedstawione są wyniki modelowania wpływu wiązki jonowej z użyciem programu SRIM, gdzie obliczenia, dla porównania, dotyczą zarówno wiązki Ga jak i Xe, oraz wyniki modelowania emisji światła dla jednego typu struktury fonicznej, o kształcie ściętego stożka (z użyciem programu Lumerical).

Kolejne rozdziały przedstawiają wyniki eksperymentalne uzyskane przez mgr. Jaworskiego i ich interpretację, poczynając od wyników wytwarzania nanostruktur fonicznych w podejściu niedeterministycznym (rozdział 8) i ich badań metodami optycznymi (rozdział 9).

Ostatni rozdział, nr. 10, raportuje wyniki dotyczące technologii wytwarzania nanostruktur deterministycznych oraz ich spektroskopowych badań.

Na podstawie rozprawy mogę stwierdzić, że mgr. Jaworski przeprowadził szereg dobrze zaplanowanych i trudnych eksperymentów oraz wykazał się wiedzą w dziedzinie fizyki materii skondensowanej, a także podstaw fizycznych technologii wykorzystującej skupioną wiązkę jonową (FIB). Jak dowodzą przedstawione wyniki Kandydat opanował bardzo dobrze dwie skomplikowane techniki badawcze, jakimi są nanolitografia FIB oraz badania μ -fotoluminescencyjne, w tym pomiary korelacyjne emisji pojedynczych fotonów. Podczas realizacji swoich badań mgr. Jaworski uzyskał cały szereg bardzo istotnych wyników, z których część wymienię poniżej:

1. Magister Jaworski opracował podstawową technologię wytwarzania z użyciem działu ksenonowego nanostruktur fonicznych w postaci mezo o kształcie ściętego stożka, a także wykonał wstępne struktury z rezonatorem w postaci kołowej siatki Bragga (CBG circular Bragg grating). Warto podkreślić, że tego działu Xe pojawiły się w komercyjnych systemach SEM/FIB stosunkowo niedawno, ale coraz częściej są używane do definiowania nanostruktur. Mają one bowiem podstawową zaletę, iż nie prowadzą do nieuniknionej w przypadku dział galowych implantacji obrabianego materiału atomami Ga. Jednakże ze względu na swoją nowość, technologia wytwarzania z użyciem działu Xe nanostruktur z kropkami kwantowymi nie była jeszcze dobrze opracowana i powszechnie znana.
2. Doktorant w wyniku dobrze zaplanowanych wielokrotnych mokrych trawień chemicznych z zastosowaniem fotorezystu, wykonanych we współpracy z Wydziałem Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów PWr, oraz następującej po nich nanolitografii Xe-PFIB przygotował struktury foniczne dla określenia minimalnej grubości warstwy GaAs

nad kropkami InGaAs, dla której można jeszcze zaobserwować wydajną fotoluminescencję z kropek.

3. Dla mnie, jako eksperymentatora, szczególnie ciekawym i ważnym osiągnięciem doktoranta było opracowanie technologii deterministycznego wytwarzania nanostruktur fotonicznych metodą PFIB wokół kropki kwantowej, której pozycja określona została we wcześniejszych eksperymentach optycznych.

W badaniach tych widać moim zdaniem dojrzałość naukową magistra Jaworskiego. Autor rozpoczął od zastosowania najbardziej oczywistego typu markerów, który zapewne dobrze sprawdziłyby się przy stosowaniu do lokalizacji kropek z wykorzystaniem katodoluminescencji (CL) in-situ. Jednak na podstawie wstępnych wyników zaproponował on nowy typ markerów, specyficznie dopasowanych do używanego przez niego sposobu odnajdowania pozycji kropek kwantowych wykorzystującego mapowanie fotoluminescencji pobudzonej światłem halogenowym. Autor zaproponował i wykonał znaczniki w postaci szeregu wytrawionych wiązką ksenonową kółek zlokalizowanych na obwodzie kwadratu, wyłączając jego rogi. Jak pokazał, takie rozwiązanie, nawet w przypadku nieidealnych kółek, pozwalało określać położenie kropki kwantowej z dużą dokładnością. W metodzie tej Mgr Jaworski zastosował także w sposób twórczy akwizycję map fotoluminescencji dla różnych długości fal, z użyciem odpowiednich filtrów, a następnie ich sumowanie.

Wykorzystując obie opracowane metody identyfikacji położenia kropek w strukturach InAs/InP oraz z użyciem opracowanej wcześniej technologii wytwarzania mezo mgr Jaworski wykonał szereg struktur fotonicznych.

Na potwierdzenie osiągnięcia głównego celu pracy, jakim było opracowanie technologii wytwarzania struktur fotonicznych będących wydajnymi emiterami jednofotonowymi, mgr Jaworski przedstawił szereg wyników ze swoich badań optycznych:

4. Doktorant przeprowadził pomiary micro-fotoluminescencyjne widm ze struktur fotonicznych, porównując je z widmami tych samych kropek przed nanostrukturacją Xe-PFIB. W przypadku systemu InAs/InP widma z mezo były przesunięte w kierunku krótszych fal o około 7.5 nanometra, co Autor wyjaśnia jako efekt mieszania InAs i InP prowadzący do wbudowywania siatomów fosforu do InAs, a tym samym do zwiększenia przerwy energetycznej oraz wzrostu naprężenia.
5. Na podstawie pomiarów μ -PL w funkcji mocy Autor dokonał interpretacji linii emisyjnych z kropek kwantowych. W przypadku systemu InGaAs/GaAs zidentyfikował on emisję związaną ze swobodnym ekscytonem X oraz podwójnym ekscytonem XX. Z kolei dla systemu InAs/InP oprócz linii X oraz XX, zidentyfikował on także linię związaną z naładowanym ekscytonem CX, dodatkowo posiłkując się badaniami polaryzacji liniowej linii emisyjnych.
6. Badając struktury fotoniczne wykonane na częściach wafera z wytrawioną na mokro warstwą powierzchniową mgr Jaworski zademonstrował wydajną emisję z pojedynczych

kropek InGaAs w zakresie 1.3 μm dla grubości warstwy wierzchniej GaAs tak cienkiej jak 150 nm. Poprzednio publikowane wyniki literaturowe innych autorów dotyczyły struktur fotonicznych ze znacznie grubszymi warstwami GaAs. Być może oznacza to, że używanie plazmy Xe do definiowania mezo ma mniejszy negatywny wpływ na optyczne własności struktury niż używanie wiązki Ga.

7. Doktorant wyznaczył także eksperymentalnie wydajność ekstrakcji fotonów η ze struktury fotonicznej o kształcie ściętego stożka wykonanej z wafera systemu InAs/GaAs. Uzyskał on dla emisji w okolicy 1.55 μm wartość $\eta=0.24$. Choć jest to wartość mniejsza od przewidywanej na podstawie obliczeń teoretycznych ($\eta=0.4$) to i tak w momencie jej otrzymania stanowiła ona najlepszy na świecie wynik dla emisji z pojedynczej kropki kwantowej emitującej w zakresie trzeciego okna telekomunikacyjnego.
8. W celu przedstawienia przekonującego dowodu na uzyskanie emisji pojedynczych fotonów mgr. Jaworski przeprowadził pomiary korelacyjne z wykorzystaniem interferometru Hanbury-Brown i Twiss (HBT) zarówno dla ciągłego, jak i impulsowego pobudzenia. Dla struktury z kropką InAs w matrycy InP wyznaczył on funkcję korelacji drugiego rzędu $g^{(2)}$ osiągającą dla zerowego opóźnienia wartość 0 z dużą dokładnością. Wskazuje to na niezmiernie małe prawdopodobieństwo występowania procesów wielofotonowych, tym samym jednocześnie dowodząc pełnej realizacji celu doktoratu.

Warto podkreślić, że pomimo realizacji tak trudnego zadania naukowego (technologia w połączeniu z niełatwymi badaniami optycznymi) wyniki uzyskane przez doktoranta już opublikowane zostały w trzech pracach (ostatnia praca ukazała się już po złożeniu rozprawy). We wszystkich tych pracach doktorant był pierwszym autorem. Były to następujące prace (podaje także 5-cio letni impact factor $IF_{5\text{years}}$ czasopisma):

- M. Jaworski, *et al.*, "Efficient Emission in the Telecom Range from Quantum Dots Embedded in Photonic Structures Fabricated by Focused Ion Beam Milling", *Acta Physica Polonica A* **142**, 662 (2022), $IF_{5\text{years}}=0.5$
- M. Jaworski, *et al.*, "Xenon-plasma focused ion beam processing of photonic microstructures with GaAs-based quantum dots." *Optical Materials EXPRESS* **13**, 2845 (2023), $IF_{5\text{years}}=2.7$
- M. Jaworski, *et al.*, "Xenon plasma-focused ion beam milling as a method to deterministically fabricate bright and high-purity single-photon sources operating at C-band", *Optics EXPRESS* **32**, 41089 (2024), $IF_{5\text{years}}=3.4$

Wyniki upowszechniane były także przez mgr Jaworskiego w formie 3 prezentacji ustnych oraz 7 prezentacji plakatowych na konferencjach krajowych i międzynarodowych.

Z obowiązku recenzenta poniżej przedstawiam kilka uwag i pytań, które nasunęły mi się podczas lektury rozprawy i których uwzględnienie mogłoby ułatwić docenienie raportowanych wyników badań, a potencjalnym czytelnikom uczynić rozprawę bardziej zrozumiałą. Chciałbym

podkreślić, że poniższe uwagi nie wpływają jednak na moją bardzo pozytywną ocenę samych wyników naukowych przedstawionych w rozprawie.

1. Na wstępie niestety muszę przyznać, że forma prezentacji wyników sprawiła mi pewną trudność. I to nie ze względu na fakt, że jest w niej spora ilość literówek oraz niespójnych zdań. Co często wynikało najprawdopodobniej z faktu, że Autor postanowił zmienić formę zdania, ale nie wykasował fragmentów zdania oryginalnego. Podaję kilka przykładów:
 - a) strona 3: mgr Jaworski w streszczeniu nie zdefiniował II i III pasma telekomunikacyjnego, co nie ułatwiło czytelnikowi spoza dziedziny zrozumienie, a dodatkowo skończyło się tym, że sam Autor napisał, iż kropki InGaAs/GaAs emitują w zakresie $1.55 \mu\text{m}$ a nie $1.3 \mu\text{m}$.
 - b) strona 57: „...kropek kwantowych jest pokryta była”,
 - c) strona 64: „ceny” zamiast „oceny”; „jest do symulacja” zamiast „jest to symulacja”,
 - d) strona 73: „sygnał zawierający atomy arsenu” zamiast „sygnał pochodzący od atomów arsenu”
 - e) strona 97: na Rys. 9.4 funkcja korelacji drugiego rzędu ma (2) nie w superskrypcie,
 - f) strona 99: „otrzymana wartość ekstrakcji jest to prawie dwukrotnie więcej” zamiast „otrzymana wartość ekstrakcji jest prawie dwukrotnie większa”.
2. Mam też ogólne zastrzeżenia do podpisów pod rysunkami, bo są zbyt lakoniczne (brak jest także spisu rysunków). Co więcej niektóre rysunki mają źle oznaczone skale, a niektóre wręcz zawierają błędy. Poniżej podaję kilka przykładów.
3. Na Rys. 1.2 zaczerpniętym z Ref. [23] wcale nie jest przedstawiona mikro-kolumna wytworzona przy użyciu galowego działu jonowego, ale za pomocą ICP-RIE (inductively coupled plasma reactive ion etching). Jest to bowiem Fig. 3 d) z tej publikacji. Natomiast struktura wytworzona Ga-FIB, zresztą wspomaganego trawieniem, jest w tej pracy przedstawiona na panelu c) tego rysunku.
4. Kolejnym oczywistym przykładem nieścisłości są rysunki 2.13, 2.15 i 2.16. Nie dość, że skala x nie ma na rysunkach kresek dla podanych wartości liczbowych to:
 - a) na rysunku 2.13 słupki powinny być przesunięte w lewo o wartości 1, co widać od razu ponieważ $1! \neq 2!$
 - b) na rysunku 2.15 i 2.16 jest dokładnie to samo. Prawdopodobieństwo $P(n)$ dla $\langle n \rangle = 1$ i $\langle n \rangle = 10$ powinna mieć wartość 1 dla $n=1$ i $n=10$, odpowiednio, a nie jak jest na rysunku dla $n=2$ i $n=11$. Również w tabelce 2.1 we wzorze na $P(n)$ w indeksie dolnym delty nie powinno być „m” ale „ $\langle n \rangle$ ”.
5. Jeśli przyjąć, że mezy są poprawnie ponumerowane na stronie 78 oraz na rysunku 8.6, to podpisy rysunków 8.7 i 8.8 są zamienione.

6. Rysunek 8.12 nie tylko nie posiada wystarczająco jasnego podpisu, ale jest wręcz mylący. Stosując takie maski z fotorezystu, jak te przedstawione na rysunku, nie da się uzyskać profilu grubości przedstawionego na rysunku 8.14 b. Natomiast stosując trzykrotnie pokrycia rezystem w kształcie prostokątów do kolejnych etapów trawienia, ale inaczej niż na Rys. 8.12 przesuniętych względem siebie, można uzyskać grubość 550 nm, a nie 500 nm, jak to jest na rysunku 8.14 b) oznaczone. Więc albo jest pomyłka w opisie, albo te dodatkowe 50 nm powstało w sposób niezamierzony, na ostatnim etapie najdłuższego, 4½ minutowego trawienia (450 nm).
7. Coś jest chyba pomieszane z opisem grubości powierzchniowej warstwy w strukturach, dla których przedstawione są poszczególne widma na rysunku 9.1. Te same widma są bowiem przypisane do struktur z różnymi grubościami warstw powierzchniowych na rysunku 9.1 rozprawy oraz na rysunku Fig. 5 publikacji Autora w *Optical Materials EXPRESS* **13**, 2845 (2023).
8. Nie bardzo też jestem w stanie docenić to, że autor uzyskał wydajną emisję dla długości fali 1.3 μm z mezy zawiązanej kropki InGaAs/GaAs z grubością warstwy powierzchniowej GaAs tak małej, jak 150 nm. Z kolei mgr Jaworski wymienia to, jako jedno ze swoich głównych osiągnięć. W pracy, w rozdziale 8.3 opisującym badania dotyczące mokrego trawienia warstwy powierzchniowej, brakuje mi jasnego wyjaśnienia, jaki był główny cel tych eksperymentów. Co ma nam dać określenie minimalnej grubości warstwy powierzchniowej GaAs, dla której kropki wykazują jeszcze intensywne świecenie? Dopiero na podstawie lektury publikacji w *Optical Materials EXPRESS* **13**, 2845 (2023) można się domyślić, że chodziło o znalezienie przedziału grubości, który można będzie zastosować po to, aby uzyskać maksymalną ekstrakcję dla danej średnicy mezy. Na przykład, na rysunku Fig. 3 z tej pracy, dla średnicy mezy równej 4 μm taką optymalną grubością warstwy GaAs nad kropkami jest albo 400 nm albo 200 nm.
9. Według mnie opis systemu Helios G4 PFIB CXe firmy FEI używanego podczas prowadzonych badań nie jest wystraszająco szczegółowy. Rozumiem wprawdzie, że rysunek 3.6 jest poglądowy (według mnie przesadnie) to jednak, ponieważ jest on umieszczony pod zdjęciem realnie używanego systemu dwuwiązkowego, to kolumna pionowa powinna być prawidłowo oznaczona jako kolumna działła elektronowego, a nie jonowego. Zresztą pionowa jest także kolumna działła elektronowego w systemie dwuwiązkowym SEM/FIB Auriga firmy ZEISS, który my posiadamy w naszej jednostce MAB. Szkoda także, że skoro system Helios G4 PFIB CXe był podstawowym narzędziem używanym do badań i opracowania technologii, autor nie pokusił się o opisanie elementów systemu na zamieszczonym zdjęciu. A jeszcze lepiej gdyby dokonał tego na kilku zdjęciach systemu wykonanych z różnych stron. To na pewno byłoby nie tylko ciekawe, ale i przydatne dla potencjalnych czytelników rozprawy.
10. W pracy brak jest wyjaśnienia czy struktura fotoniczna w formie ściętego stożka jest preferowana w stosunku do struktury walcowej, czy jest to po prostu kształt najprostszy

do wykonania przy użyciu FIB, prostszy niż walec. No bo to, że walec da się jednak z użyciem FIB wykonać jest potwierdzone np. w publikacji, z której zaczerpnięty został rysunek 1.2. W rozprawie zabrakło mi wyników symulacji rozkładu i wydajności ekstrakcji światła (z użyciem programu Lumerical) dla różnych kształtów mezy, a w szczególności porównania symulacji dla struktur walcowych i struktur w kształcie ściętego stożka.

11. W pracy diskutowana jest także struktura fotoniczna posiadająca na powierzchni zabezpieczającą warstwę platyny. Argumentem zastosowaniem takiego rozwiązania miała być poprawa jakości wynikająca ze zmniejszenia negatywnego wpływu wiązki jonowej na jakość optyczną. Jednakże wszystkie symulacje robione były dla próbek bez metalu na powierzchni, a ten wydaje się ma istotne znaczenie dla efektywności ekstrakcji. Czy program Lumerical nie miał możliwości policzenia takiej struktury z metalem na wierzchu? Czy zysk na poprawie jakości samej struktury ze względu na obecność warstwy metalu podczas trawienia jonowego rzeczywiście będzie większy od straty na efektywności ekstrakcji?
12. Czy skoro wiadomo, że wiązka jonowa powoduje degradację/amorfizację pewnej grubości ściętego stożka, to czy było to jakoś uwzględniane w symulacjach, np. poprzez zmniejszenie rozmiarów, w stosunku do tych wyznaczonych z obrazów SEM?
13. Mgr Jaworski w swojej rozprawie argumentuje za przewagą wiązki ksenonowej nad wiązką galową do wytwarzania nanostruktur fotonicznych. Jednak zgodnie z tym co usłyszałem od użytkowników działu Xe jego stosowanie ma też swoje wady, m.in. przy osadzaniu platyny, gdzie potrafi ono wyprodukować niejednorodną warstewkę metalu, czasami nawet zawierającą bąbelki gazowe w środku. Jak ja rozumiem, to głównym problemem z użyciem Ga jest to, że podczas procesu następuje nieunikniona implantacja Ga do materiału. Pytanie tylko, czy w przypadku optycznych struktur III-V ma to aż tak duży negatywny wpływ. Czy podjęto próbę bezpośredniego porównania jakości struktur fotonicznych wytwarzanych z tego samego wafera przy użyciu zarówno działu Xe jak i działu Ga? Jak można przeczytać na stronie Web-owej Nanores, firma ta posiada oprócz używanego przez Doktoranta systemu Helios G4 PFIB CXe także system Helios NanoLab 600i z działem galowym, więc zasadniczo byłoby to możliwe.
14. Mam pewne obawy dotyczące metody wybierania miejsca, wokół którego w podejściu deterministycznym wytworzone zostaną struktury fotoniczne. Jak można się zorientować na podstawie Rys. 10.5 b), mgr Jaworski bazował chyba w tym wyborze na intensywności luminescencji w danym przedziale spektralnym. Ale czy jest to metoda dobra? Czy silna luminescencja nie może oznaczać, że w danej okolicy jest zlokalizowanych jest więcej podobnych kropek, a nie, że pojedyncza kropka ma silną PL? Czy nie należałoby poszukiwać miejsc gdzie widma PL składałyby się jedynie z pojedynczej linii X i XX?

Podsumowując, choć, że jak opisałem powyżej, mam pewne uwagi do samej formy prezentacji wyników w rozprawie, to absolutnie nie umniejsza to ani jakości, ani wartości uzyskanych w pracy wyników naukowych.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pana mgr. Macieja Jaworskiego zawiera nowe i bardzo wartościowe wyniki naukowe dające istotny wkład do postępu w dziedzinie fizyki (oraz inżynierii materiałowej), w szczególności w obszarze badań jednofotonowych emiterów bazujących na fotonicznych strukturach zawierających kropki kwantowe. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a jej treść potwierdza, że Kandydat posiada także ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Oznacza to, że rozprawa spełnia zarówno wymogi zwyczajowe jak i te określone w art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (z późn. zm.). Dlatego z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. Macieja Jaworskiego zatytułowanej *„Opracowanie technologii wytwarzania struktur fotonicznych z kropkami kwantowymi jako wydajnych emiterów jednofotonowych do zastosowania w komunikacji kwantowej w sieciach światłowodowych”* do publicznej obrony.

Z poważaniem,