



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ
FIZYKI

dr hab. Tomasz Kazimierczuk
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
ul. Pasteura 5
02-093 Warszawa
e-mail: Tomasz.Kazimierczuk@fuw.edu.pl

Warszawa, 06.08.2025

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marka Mikulicza pt. „*Heterogeneous integration of InAs/InP quantum dots with photonic integrated circuits operating at 1550 nm*”

Praca doktorska mgr. inż. Marka Mikulicza pt. „*Heterogeneous integration of InAs/InP quantum dots with photonic integrated circuits operating at 1550 nm*” została przygotowana pod opieką dr. hab. Marcina Syperka, prof. PWR oraz dr. Pawła Mrowińskiego. Podstawą pracy były wyniki eksperymentalne uzyskane w laboratoriach Politechniki Wrocławskiej oraz Duńskiego Uniwersytetu Technicznego (DTU). Opisane w rozprawie wyniki zostały opisane również w trzech opublikowanych pierwszo-autorskich artykułach naukowych. Warto nadmienić, że te trzy publikacje stanowią jedynie fragment bogatszego dorobku naukowego Doktoranta.

Tematyka pracy

Przedstawiona rozprawa wpisuje się w szeroki nurt badań ukierunkowanych na uzyskanie praktycznego źródła kwantowego światła w zakresie telekomunikacyjnym. Emisja światła w tzw. paśmie C, tj. długościach fali 1530-1565 nm, ma ogromne znaczenie praktyczne, gdyż można je bezpośrednio wykorzystać w oplatającej cały świat infrastrukturze światłowodowej opartej na standardowych włóknach SMF-28. Oczywiście praktyczne zalety takich źródeł są jednak równoważone skalą trudności wyzwań, wielokrotnie większą niż np. w kropkach kwantowych III-V lub II-VI emitujących w zakresie widzialnym. Trudniejszy jest w zasadzie każdy aspekt – od wzrostu samych emiterów (np. węższy wachlarz opcji materiałowych), przez strukturyzację (np. mniejszy kontrast współczynnika załamania w strukturach fotonicznych), aż po charakteryzację (konieczność stosowania detektorów innych niż krzemowe).

Praca mgr. inż. Marka Mikulicza koncentruje się na jednej z ciekawszych technik processingu, tj. na heterogenicznej integracji dwóch różnych systemów materiałowych. W tym wypadku były to struktury kropek kwantowych InAs/InP, które w deterministyczny sposób łączone były z niezależnie przygotowanym otoczeniem fotonicznym wykonanym w układzie Si lub SiN.

Struktura pracy

Rozprawa została zredagowana w języku angielskim. Właściwa treść pracy mieści się na 150 stronach; do tego doliczyć należy 20 stron ze streszczeniami, spisem treści, itp. Praca wsparta jest dość rozbudowaną bibliografią liczącą 228 pozycji.

Należy docenić wysiłek Autora w kierunku możliwie jasnego zaznaczenia w jakim zakresie uzyskane wyniki opierały się na jego własnej pracy, a co było wynikiem pracy współautorów. Jest to opisane od razu w rozdziale 1.3 (dla przejrzystości dodatkowo w formie tabeli!), a później dodatkowo przypominane w dalszych rozdziałach. Jest to tym bardziej istotne, że Doktorant osobiście zajmował się praktycznie wszystkimi etapami badań, od wytwarzania próbek, przez symulację i charakteryzację w eksperymentach optycznych, aż po opracowanie wniosków w formie artykułów.

Praca została podzielona na 6 rozdziałów w układzie odpowiadającym typowej strukturze pracy doktorskiej, od ogólnego wprowadzenia aż do własnych wyników. W dalszej części recenzji omówiona zostanie zawartość każdego z nich. Każdy z rozdziałów, poza ostatnim, kończy się krótkim podsumowaniem.

Zawartość pracy

Rozdział I został zaplanowany jako wprowadzenie do tematu. Pod kątem objętości jest to największy rozdział pracy (48 stron ze 150), ale zarazem sprawia wrażenie najbardziej chaotycznego. Wygląda, że Autor postawił sobie niemożliwe do spełnienia wyzwanie, by opowiedzieć „o wszystkim”. Dyskutowane są m.in. kropki kwantowe jako takie, kompleksy ekscytonowe w kropkach, kwantowe własności emitowanego przez nie światła, metody ich badania, różne rodzaje wnęk optycznych, elementy zintegrowanych obwodów fotonicznych. W rozdziale tym mieści się również dyskusja problemu efektywnego wyprowadzenia emitowanych fotonów światłowodami oraz motywacji w postaci protokołów QKD. Są wreszcie opisane układy pomiarowe wykorzystane do optycznych badań wytwarzanych struktur.

Rozdział ten tworzy u odbiorcy ambiwalentne uczucia – z jednej strony widać erudycję autora i każde ze wspomnianych zagadnień opisane jest ze zrozumieniem, ale z drugiej jest również wrażenie oddzielenia tego rozdziału od treści dalszych rozdziałów. Przykładem tego jest opis zachowania się ekscytonów w polu magnetycznym oraz entendue jako kluczowego parametru układów optycznych. Kwestie te dostały swoje osobne sekcje we wprowadzeniu (odpowiednio: 1.5.4.2 oraz 1.6.2.2), ale potem nie wracamy do nich w kontekście struktur wytworzonych i charakteryzowanych przez Doktoranta w rozprawie. Wydaje się, że praca jako całość zyskałaby na mocniejszym związku wprowadzenia z dalszymi rozdziałami – czy to przez lepszą selekcję treści wprowadzenia, czy przez rozbudowanie dyskusji struktur w rozdziałach 4-5, aby pokazać użyteczność wprowadzonych wcześniej pojęć w analizowanych strukturach. Za pozytywny przykład może natomiast posłużyć sprzężenie światłowodów z wykorzystaniem zwężonych sekcji (ang. *taper*). Zostało ono opisane w ramach wprowadzenia w osobnej sekcji 1.6.2.1, adekwatnie do podkreślanej później roli tego rozwiązania w gotowych strukturach.

Rozdział II kieruje czytelnika ku heterogenicznej integracji. Sam rozdział ma charakter hybrydowy. Opisane tu metody wytwarzania oraz charakteryzacji osadzone są mocno w kontekście DTU,

z odwołaniem do konkretnych urządzeń, ich parametrów bądź procedur. Nie jest to jednak sucha lista aparatury, gdyż „twarde” parametry połączone są tu z opisem wyjaśniającym znaczenie poszczególnych elementów, okazjonalnie na bardzo ogólnym poziomie wprowadzenia do tematu (*vide* tabela 2.3).

Rozdział III omawia konkretny przykład struktur powstałych metodą łączenia bezpośredniego (*direct bonding*) kropek kwantowych InAs/InP z falowodami wytworzonymi w technologii SOI. Funkcjonowanie tych struktur polega na „przechwytywaniu” przez krzemowy falowód fotonów emitowanych w odcinku struktury InP. Wykorzystywane tu zjawisko sprzęgania modów kontaktujących się światłowodów przez stopniowe zwężanie struktury, wprowadzone wcześniej w Rozdziale I. W dalszej kolejności omówione zostały kroki technologiczne wytworzenia struktury. Każdy z etapów został opisany precyzyjnie i dodatkowo ilustrowany schematami. Jednak najwięcej uwagi poświęcone zostało wynikom optycznym, co korespondowało zresztą z osobistym wkładem pracy Doktoranta. W badaniach wykorzystana została zarówno typowa konfiguracja pomiarowa z jednym obiektywem prostopadle do powierzchni próbki, jak i „konfiguracja prostopadła”, w której dodatkowo możliwa była rejestracja sygnału prowadzonego falowodem krzemowym. Uzyskane wyniki jednoznacznie pokazują prawidłowe funkcjonowanie wytworzonej struktury, tzn. że znacząca część emitowanych przez kropkę kwantową fotonów była przechwytywana przez falowód krzemowy. W rozdziale tym Doktorant analizuje własności emitowanego przez kropkę światła, poczynając od porównania widma przy różnych warunkach zbierania. W widmie widoczne są trzy kompleksy ekscytonowe (X, XX, X-), których identyfikacja opiera się na porównaniu kształtu widma obserwowanej kropki z wcześniejszymi pracami, wspartego dodatkowo analizą intensywności poszczególnych linii w funkcji mocy pobudzenia. Merytorycznie nie ma wątpliwości, że jest to prawidłowa identyfikacja, jednak w tym punkcie szczególnie widać wspomnianą wcześniej lukę redakcyjną między zawartością wprowadzenia (przedstawiającego czytelnikowi listę 11 różnych metod identyfikacji), a zwięzłym akapitem dotyczącym identyfikacji linii w konkretnym badanym systemie materiałowym. Rozdział kończy się weryfikacją jednofotonowego charakteru emisji.

Rozdziały IV i V opisują struktury wytworzone już całkowicie przez Doktoranta, przy użyciu metody mikro-transferu. Struktura z rozdziału IV powstała w wyniku integracji krysztalu fotonicznego z kropkami kwantowymi ze standardowym światłowodem jednomodowym. Podstawową zaletą takiego połączenia jest trwałość/stabilność ekstrakcji emitowanych fotonów do światłowodu, dzięki czemu taki moduł może być potem wielokrotnie przemieszczany i bezobsługowo wykorzystywany. W ramach swojej pracy Doktorant poddał eksperymentalnej weryfikacji tę stabilność w skali dziesiątek godzin. Również dla tej struktury potwierdzony został jednofotonowy charakter emisji, jak oczekiwane od pojedynczych kropek kwantowych.

Rozdział V poświęcony jest z kolei strukturze łączącej nanowiązkę (ang. *nanobeam*) ze strukturą falowodową z krzemu lub azotku krzemu. Jest to najlepszy rozdział pracy, wzorowo prowadzący czytelnika przez kolejne etapy przygotowania i charakteryzacji najpierw osobno nanowiązki i docelowej struktury krzemowej, a następnie emisji w przygotowanej strukturze. Cennych wniosków dostarcza analiza statystyczna precyzji procesu mikrotransferu, stanowiąca punkt odniesienia dla przyszłych prac. Jako słabszy punkt oceniam natomiast opis transferu na kontakty metaliczne. Jest to ciekawy temat, jednak przedstawione wykresy np. I-V oraz fakt brak wygaszania luminescencji pozostawiają wrażenie niedosytu.

W ostatnim, VI rozdziale Doktorant dokonuje podsumowania opisanych wcześniej wyników.

Uwagi ogólne i podsumowanie

Praca doktorska mgr. inż. Marka Mikulicza w ciekawy sposób demonstruje zastosowanie techniki heterogenicznej integracji, a w szczególności mikrotransferu do wytwarzania struktur sprzęgających kropki kwantowe InAs/InP z światłowodami. Kompozycyjną słabością pracy jest pewien rozdźwięk między wprowadzeniem a dalszymi rozdziałami prezentującymi wyniki pracy Doktoranta. Optymalnym rozwiązaniem byłoby rozbudowanie dyskusji zasygnalizowanych we wprowadzeniu zagadnień w odniesieniu do tych konkretnych struktur. Widać to tym bardziej, że pod względem technicznym praca została przygotowana bardzo starannie. W całej pracy można znaleźć jedynie kilka literówek i jeden omyłkowo powtórzony akapit.

Nie mam najmniejszych wątpliwości, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska spełnia wszystkie kryteria stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. z 2024 r., poz. 1571 z późn. zm.). Wnoszę o skierowanie tej rozprawy do publicznej obrony. Jednocześnie zaznaczam, że mimo podniesionych wcześniej zastrzeżeń redakcyjnych, merytoryczny wynik pracy Doktoranta w postaci stworzenia metodą mikrotransferu funkcjonalnego jednofotonowego źródła światła zintegrowanego ze światłowodami telekomunikacyjnymi oceniam bardzo wysoko i na tej podstawie wnioskuję o wyróżnienie rozprawy. Widząc rezultaty zautomatyzowanego transferu (rys. 5.35) łatwo zgodzić się z wnioskiem o realnych perspektywach aplikacyjnych.

Pytania

Poniżej zebrane są pytania, jakie nasunęły się podczas lektury rozprawy.

1. W sekcji 1.7.5 opisany został algorytm aktywnej stabilizacji kriostatu podczas długich pomiarów. W rozprawie został zawarty komentarz, że umożliwia on korekcję pozycji z precyzją $0,2\ \mu\text{m}$ w czasie rzeczywistym. Trochę więcej informacji znajduje się w przywołanej w tym rozdziale publikacji [181]. W jakiej części prezentowanych w rozprawie wyników wykorzystywana była ta stabilizacja? Czy znana jest efektywność takiej stabilizacji w odniesieniu do układów pomiarowych z większą liczbą obiektów mikroskopowych?
2. W rozdziale III jednym z parametrów wpływających na sumaryczną ekstrakcję fotonów jest wydajność sprzężenia MM/SM. Oszacowanie wydajności tego sprzężenia przeprowadzone były przy wykorzystaniu światła laserowego. Jak dobrym założeniem jest przyjęcie, że rozkład modowy wykorzystanego światła laserowego jest zbliżony do rozkładu modowego światła emitowanego przez kropkę kwantową?
3. W rozdziałach III i IV eksperymentalne wyniki korelacji $g^{(2)}$ korygowane były o tło (formuły (3.1) oraz (4.2)). Jest to prostsze w sytuacji eksperymentu CW, jednak w przypadku pobudzania impulsowego wykorzystanego w rozdziale IV mamy do czynienia zarówno z tłem niezależnym od czasu (np. zliczenia

ciemne) oraz tłem o podobnej charakterystyce czasowej co emisja z kropki kwantowej (np. szerokopasmowa fotoluminescencja ze struktury). Jak duże znaczenie miały oba te wkłady?