

Polski Ośrodek Rozwoju Technologii PORT  
Sieć Łukasiewicza  
Wrocław

Recenzja pracy doktorskiej

***Maciej Jaworski***

**“Opracowanie Technologii wytwarzania struktur fotonicznych z kropkami kwantowymi jako wydajnych emiterów jednofotonowych do zastosowania w komunikacji kwantowej w sieciach światłowodowych”**

Rozprawa doktorska pana mgr. Macieja Jaworskiego powstała w ramach doktoratu wdrożeniowego. Pan Jaworski był pracownikiem firmy Nanores we Wrocławiu a doktorat robił pod patronatem pana profesora Grzegorza Sęka na Politechniki Wrocławskiej, Wydział Podstawowych Problemów Techniki. W udany sposób powiąże ona istniejący know-how firmy Nanores w nanostrukturyzacji wiązką ksenową (Xe-PFIB) z możliwościami grupy profesora Sęka w charakteryzacji niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych a tu w szczególności kropek kwantowych jako źródła pojedynczych fotonów dla obszaru telekomunikacji poczerwioniej. Próbkę do tych badań pochodzą z dobrze znanych grup profesora S. Reitzensteiners (TU Berlin) oraz z Duńskiego Uniwersytetu Technicznego (Kongens Lyngby).

Kropki kwantowe (quantum dots, QDs) są od wielu lat dużym tematem w fizyce półprzewodników. Powstaną one w odpowiednich warunkach wzrostu epitakcjonalnego w sposób ‘samoorganizowany’ (self-organized) i znajdą zastosowanie przede wszystkim jako źródła pojedynczych fotonów (single photon sources, SPS). Jednym z głównych technologicznych wyznań jest ich izolowanie przestrzenne do odpowiednich badań bez ich degradacji. W tej pracy technologia FIB (Focused Ion Beam) jest zastosowana. Na ogół w takich przyrządach wiązka galowa jest używana do strukturalizacji a to wiązka ksenonowa (Xe), co ma kilka zalet.

We wstępie pan Jaworski wprowadza krótko technologie kwantowe i ich znaczenie dla komunikacji pojedynczymi fotonami. Jeśli chodzi o praktyczne zastosowania to kwantowe kropki półprzewodnikowe, mimo wszystkich z tym związanych problemami, mają wyraźne zalety nad na przykład pułapkami jonowymi lub pojedynczymi defektami w materiałach szeroko-przerwowych. Jest to związane z tym, że odpowiednie przyrządy optoelektroniczne od lat istnieją i trzeba będzie ‘tylko’ do nich wprowadzać dobrze od siebie izolowane kropki kwantowe emitujące w odpowiednim obszarze widmowym. Rozprawa doktorska się dokładnie tym się zajmuje i pokaże drogi do praktycznych rozwiązań.

W drugim rozdziale podstawy teoretyczne są obszernie dyskutowane. Kinetyka przejść ekscytonowych jest dobrze omówiona i różnice ekscyton – bieksyton pokazane. Pan Maciej Jaworski dyskutuje dokładnie różnicę między stanem termicznym, koherentnym a n-fotonowym, co jest ważne dla dalszego rozumienia.

Następnie przedstawione są podstawy i zasady działania mikroskopu dwuwiązkowego SEM/FIB typu Helios ze szczególną uwagą na parametry i skutki uboczne wiązki jonowej. Porównane są dwa różne konfiguracje FIB do usuwania materiału. Źródło ksenonowe ICP-Xe (Inductively Coupled Plasma) oraz galowe LMIS-Ga (Liquid Metal Ion Source). Zależność plamki wiązki od prądu jest bardzo ważnym parametrem, bo zdecyduje nie tylko o szerokości pisanych struktur ale też o tzw. 'damage', tzn. o przez jony wtórne zniszczone obszary dookoła. Źródło galowe ma tę zaletę, że można operować bardzo niskimi prądami rzędu kilka pA. Źródło ksenonowe natomiast ma przy większych prądach (>10 nA) nadal liniową zależność wielkości plamy od prądu. Która konfiguracja jest używana zależy więc od danego półprzewodnika i zadania. Pan Jaworski dyskutuje też tryby skanowania i wzorców.

Tematyką oddziaływania wiązki z materiałem zajmuje się następny rozdział czwarty. Do oszacowania głębokości wnikania używane są metody Monte Carlo. Podczas rozpylania materiału tworzą się skośne ściany boczne ze względu na oddziaływanie z wybitymi jonami. Inne efekty to re-depozycja materiału i efekty kanałowania (channeling). Poprzez odpowiednie dobranie prądu wiązki można też ograniczyć degradację otoczenia i co za tym idzie obszary 'optycznie martwe'. Innym problemem jest naładowanie się powierzchni struktur półprzewodnikowych.

Krótki opis używanych próbek i zestaw na pomiary mikro-luminescencji zawierają następne dwa rozdziały. Dwa rodzaje struktur były badane. Kropki kwantowe InGaAs/GaAs emitujące w zakresie 1,3μm zostały hodowane metodą MOCVD na TU Berlin w trybie Stranski-Krastanow o gęstości 10<sup>9</sup>cm<sup>-2</sup>. Kropki InAs/InP emitujące przy 1,55μm hodowane zostały metodą MOVPE (co praktycznie jest ta sama metoda) na Duńskim Uniwersytecie Technicznym.

Ważną częścią pracy doktorskiej stanowią modelowania wpływu wiązki i porównanie źródeł Ga i Xe. Pan Jaworski pokazał, że używając jony Xe da się w istotny sposób zmniejszyć obszary objęte degradacją, co jest szczególnie istotnie do badań pojedynczych kropek kwantowych. Przy tej samej liczby jonów Ga i Xe rozkład jonów Xe jest mniejszy i ich głębokość wnikania też. Struktury fotoniczne są symulowane metodą FDTD. Wynikało m.i., że maksymalna wydajność ekstrakcji przy 1550nm wynosi 89%. Bazując na tych symulacjach wyprodukowano wiązką Xe-PFIB mezy o podstawie 4μm. Z różnych powodów nie udało się osiągnąć jasnej luminescencji więc dalsze badania koncentrowały się na mezach o podstawie 3,5μm. W

odróżnieniu do często stosowanych mikro-kolumn mezy się charakteryzują wyraźnie większym stosunkiem podstawy do wysokości. Później zastosowano do badań pojedynczych kropek zarówno mikro-kolumny jak i mezy.

Ósmy rozdział zajmuje się kwestiami praktycznymi utworzenia takich mikrostruktur. Szczególnie ważne jest przy tym ochrona powierzchni przed degradacją wywołaną strumieniem jonowym. Używając GIS (Gas Injection System) testowano różne warstwy ochronne przy pomocy wiązki elektronowej, co stanowi łagodniejszą metodę w porównywaniu z wiązką jonową. Do tworzenia mikro-kolumn zastosowano zarówno Ga jak i Xe. Ostatecznie okazało się, że potrzebna jest grubsza warstwa półprzewodnikowa nad kropkami niż zwykle. Optymalnie okazało się warstwa o grubości 150nm i obróbka przy pomocy Xe-PFIB. Prace te doświadczalne są przeprowadzone bardzo rzetelnie i bazują na poprzednich symulacjach. Widać, że pan Maciej Jaworski jest bardzo dobrym eksperymentatorem, który potrafi minimalizować skutki uboczne wiązek jonowych podczas tworzenia mikro-struktur. Tylko dzięki temu osiągnął te wyniki, opisane w następujących dwóch rozdziałach.

Wyniki spektroskopowe przedstawione są w rozdziałach 9 i 10. Przy mikrostrukturach z kropkami InGaAs/GaAs widać wyraźnie, że, przechodząc z struktury płaskiej do mikro-kolumny o średnicy  $4\mu\text{m}$ , liczba adresowanych kropek maleje i to, mimo że nominalna szerokość wiązki pobudzającego lasera jest tylko  $2\mu\text{m}$ , co pan Jaworski tłumaczy rozkładem natężenia wiązki i rozpraszaniem. Badano też zależności obserwowanej emisji kropek od grubości pokrywającej warstwy GaN zarówno dla struktur planarnych jak i mezy o  $4\mu\text{m}$  średnicy. Pomogło to optymalizować procedurę technologiczną do badań pojedynczych kropek. Badania spektroskopowe widma w funkcji natężenia pobudzenia pozwoliły identyfikować zarówno linie ekscytonowe X jak i bieksytonowe XX. Dodatkowo wrócono uwagę na jak najmniejsze rozszczepienia struktury subtelnej, która jest wskaźnikiem doskonałości formy kropek kwantowych i ich stosowalności jako emitery pojedynczych fotonów i ich stosowalności n.p. do kryptografii kwantowej.

Badania kropek kwantowych w strukturach InAs/InP dodatkowo do linii X i XX wykazały istnienie trionów, tzn. natadowanych ekscytonów CX. Przy pomocy konfiguracji Hanbury Brown Twiss (HBT) wyznaczono czystość emisji pojedynczych fotonów. Funkcja  $g^{(2)}(\tau)$  jest miarą tego. Otrzymane wartości dla  $\tau = 0$   $g^{(2)}(0) = 0,04$  w pobudzeniu ciągłym oraz  $g^{(2)}(0) = 0,18$  w pobudzeniu impulsowym trzeba uznać za bardzo dobre świadczące zarówno o doskonałości struktur epitaksjalnych jak i umiejętności przygotowania odpowiednich mezy przez pana Jaworskiego.

W rozdziale 10 omówiona jest deterministyczne wytwarzanie struktur fotonicznych w układzie InAs/InP. Metoda ta jest dobrze umotywowana i opisana przez pana Jaworskiego. Używał w tym celu Xe-FIB aby wokół wybranej kropki kwantowej tworzyć mikro-kolumnę. W tym celu optymalizował kształt i wielkość markerów do około kropek. Wysoka jakość tej preparatyki została potwierdzona przez pomiary spektroskopowe. Po wykonaniu mes widać nie tylko większą intensywność linii ale też większą ilość ich oraz mniejsze tło, co jest bardzo ważne dla takich pomiarów.

Podsumując można twierdzić, że rozprawa doktorska pana Macieja Jaworskiego jest doskonałym przykładem doktoratów wdrożeniowych, bo zawiera zarówno bardzo rzetelnie wykonane prace eksperymentalne przy pomocy różnych konfiguracji FIB jak i odpowiednie pomiary spektroskopowe oraz ich interpretację. Nie podlega dla mnie żadnej dyskusji, że spełnione są wszystkie wymagania odnośnie takich doktoratów. Rozprawa jest dobrze strukturyzowana i zawiera bardzo ciekawych i nowych wyników. Te zostały publikowane w odpowiednich, bardzo dobrych czasopismach jak Optical Materials Express and Optics Express. Do tego dochodzi szereg wystąpień konferencyjnych.

Praca doktorska pana mgr. Macieja Jaworskiego spełnia zarówno wszystkie wymagania formalne jak i merytoryczne. Poproszę więc o jej dopuszczenie do publicznej obronie.

Mając na uwadze charakter pracy doktorskiej, tzn. format doktoratu wdrożeniowego i fakt, że pan Jaworski dodatkowo pracował w firmie a nie tylko się zajmował doktoratem swoim, wnioskuję o wyróżnienie tej rozprawy. Oczywiście o tym decydować będzie finałowa obrona doktorska pana mgr. Macieja Jaworskiego.