

Polski Ośrodek Rozwoju Technologii PORT  
Sieć Łukasiewicza  
Wrocław

Recenzja pracy doktorskiej

***Paweł Wyborski***

**“GaAs-based quantum dots grown by MBE on metamorphic buffers as a platform  
for single-photon emitters in the telecommunication spectral range”**

Rozprawa doktorska pana mgr. Pawła Wyborskiego jest dalszym udanym wynikiem wieloletniej współpracy między WUST (Prof. J. Misiewicz, Prof. G. Sęk) a Uniwersytetem Würzburg (Prof. A. Forchel, Prof. S. Hoefling). Praca jest głównie wykonana na Politechnice we Wrocławiu (charakterizacja spektroskopowa struktur epitaksjalnych z kropkami kwantowymi) a częściowo we Würzburgu w trakcie trzymiesięcznego pobytu pana Wyborskiego. Na początku wyjaśnione jest, co zostało robione gdzie i jaki udział w tym ma kandydat. Wszystkie próbki były hodowane metodą MBE we Würzburgu, gdzie ich też charakteryzowano powierzchniowo przy użyciu AFM. W tych pomiarach uczestniczył pan Wyborski podczas swojego pobytu a częściowo ich sam wykonał. Pomiarów STEM oraz preparatyka lamelli była wykonana zarówno na Politechnice w Gliwicach jak i w PORT Wrocław oraz w NANORES. W tych pomiarach pan Wyborski brał udział. Jego główny i samodzielny wkład to badania spektroskopowe próbek i interpretacja obserwowanych własności kropek kwantowych w laboratoriach profesora G. Sęka na Politechnice. Obliczenia wykonał korzystając z oprogramowania NEXTNANO oraz z kodów udostępnionych przez dwóch innych naukowców grupy. Nie ma żadnej wątpliwości, że wyniki otrzymane i interpretowane w tej rozprawie doktorskiej należą do pana mgr. Pawła Wyborskiego.

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), co jest poważnym utrudnieniem w zastosowaniu ich jako źródła pojedynczych fotonów (single photon sources SPS). Jest związane z faktem, że między sobą się lekko różnią rozmiarem a co za tym idzie dokładną energią emisji fotonów. W tej pracy pokazane są możliwości, jak to kontrolować oraz jak można emisję kropek dostrajać do obszaru dla telekomunikacji. Tu bardzo ważne i nowe wyniki zostały otrzymane.

Pierwszy rozdział zawiera krótkie wprowadzenie w kropki kwantowe jako struktury zero-wymiarowe i zagadnienia z tym związane. Następnie ekscytony i ich kompleksy są omawiane m. i. kinetyka przejść optycznych oraz pewne rozważania statystyczne. W trzecim rozdziale problemy praktyczne związane z precyzyjnym dostrajaniem kropek do obszaru telekomunikacyjnego są

dyskutowane. Jaka kombinacja materiałów z grupy III-V najlepiej nadaje się do tego? Co można osiągnąć poprzez manipulacje lokalnymi naprężeniami (strain engineering)? W tych zagadnieniach grupa profesora Alfred Forchel i Sven Höfling należy do najlepszych na świecie i jako profesor na Uniwersytecie w Bremen miałem przyjemność z nimi w tej dziedzinie współpracować.

W czwartym rozdziale detalicznie przedstawione są używane metody pomiarowe. Jeśli chodzi o badania strukturalne, to AFM, SEM, TEM (też w modzie skaningowym STEM) oraz FIB do przygotowania lameli do pomiarów transmisyjnych są bardzo dobrze opisane. Do chemicznej analizy rozkładów atomów metoda HAADF jest używana. Potem od razu pan Wyborski przechodzi do jego najważniejszej metody, do charakteryzacji optycznej kropek kwantowych. Brakuje mi tu wyraźnie krótki opis MBE jako metoda do epitaksji badanych struktur. Cała praca doktorska bazuje przecież na tym, że takie hetero-struktury najwyższej klasy autor miał do dyspozycji! Skoro pan Wyborski miał staż w Würzburgu to można się spodziewać, że i z epitaksją mógł się zapoznać. Układy pomiarowe PL są bardzo dobrze opisane. Do charakteryzacji zespołów kropek kwantowych różne układy były zastosowane. Oprócz 'normalnej' fotoluminescencji (PL), pobudzenie PL (PLE), fotomodulowane odbicie (PR), czasowo rozdzielcze PL (TRPL), micro-PL ( $\mu$ PL i  $\mu$ PLE) oraz układ Hanbury Brown and Twiss (HBT) do identyfikacji emisji pojedynczych fotonów. Badania teoretyczne do obliczenia struktury energetycznej kropek są raczej krótko omawiane.

Z piątym rozdziałem zaczyna się sedno rozprawy doktorskiej. Na wstępie słusznie podkreślona jest rola niedopasowania sieciowego i naprężeń wynikający stąd dla 'klasycznego' systemu InAs / GaAs. Wszystko jest bardzo dobrze opisane i nie wymaga komentarzy. Tu też są przedstawione badane próbki hodowane metodą MBE z szczególnym naciskiem roli MBL (metamorphic buffer layer). Jest to coś rodzaju super-sieci o zmieniających się grubościach i składach warstw GaAs lub InGaAs (o małym składzie indu) oraz InGaAs (o znacznie wyższym składzie indu) lub InAs (Rys. 5.2) . Takie MBL nakładane na podłożu GaAs lub warstw buferowych GaAs pozwalają na strain engineering, tzn. na kontrolowanych zmianach naprężeń struktur i hodowanych na nich kropkach kwantowych. Widać, że w dalszej części rozprawy doktorskiej bazują na doskonałych próbkach i wieloletnim doświadczenie grupy profesora S. Höflinga w Würzburgu.

Najpierw opisana jest pierwsza generacja takich struktur , mające w górnej Części MBL koncentracje indu 6 – 36%. Ze wzrostem koncentracji In > 12% obserwowano w SEM pogarszającą się jakością strukturalną.

W drugiej serii zmieniono periodyczności w MBL aby to poprawić. Koncentracje In w górnej części MBL też były celowane na do 18 -36%, ale praktycznie budowało się 29% indu z lepszymi

wynikami strukturalnymi. W próbkach ze składem indu 24% i 29% udało się emisję kropek kwantowych przesunąć do obszaru 1200 - 1250nm, tzn. do drugiego okienka telekomunikacyjnego ze znacznie węższą szerokość połówkową (FWHM) emisji. Pomiar EDX pokazał dobrą jakość oraz zawartość indu 31% będąc blisko do 29% wyznaczone z PL.

W trzeciej serii osiągnięto wyższe koncentracje indu poprzez kombinacje InGaAs/InAs. Technologia tych zmian w różnych MBL jest bardzo dokładnie opisane. Osiągnięto przez to w górnej części koncentracje In do 42%. Dla 38% In emisja była centrowana koło 1380nm z pasmem bocznym do dłuższych długości fal. Więc dochodziło się do trzeciego okienka telekomunikacyjnego dla kropek InAs na InGaAs MBL. Jest to ważny wynik osiągnięty przez grupy hodujące te struktury metodą MBE na Uniwersytecie w Würzburgu. Pan Wyborski miał to szczęście, na takich strukturach badać optyczne własności pojedynczych kropek kwantowych oraz ich własności zespołowe. Morfologiczne badania pojedynczych kropek metodami AFM, SEM i STEM potwierdziły wysoką jakość strukturalną. Szczególnie na podstawie obrazów STEM przeprowadzono obliczenia przejść optycznych kropek kwantowych.

W szóstym rozdziale pan Wyborski przedstawia własności optyczne zespołów kropek kwantowych, tzn. ich uśrednione wartości. Ich uśrednione własności świadczą o równomierności samoorganizowanych kropek. Uzyskano FWHM 25meV dla dominującego peaku przy 1380nm i koncentracji In 38%, Jest to wyjątkowy wynik. Dodatkowe informacje dostarczyły pomiary polaryzacyjne. To osiągnięto informacje o mieszanii ciężkich i lekkich dziur. Jako główny mechanizm strat nośników identyfikowano ich przejście do MBL z temperaturą. Dodatkowo otrzymano PLE dało informacje transferu energii pobudzenia między kropkami. Pomiary dynamiki potwierdziły wysoką jakość badanych struktur, gdzie tylko w wyższych koncentracjach indu pewna degeneracja wystąpiła.

W rozdziale siódmym finałowo badano własności pojedynczych wybranych kropek kwantowych. W całym obszarze od 1100nm do 1600nm obserwowano emisję pojedynczych kropek metodą  $\mu$ PL. Dla najdłuższych długości fal twierdzono degenerację materiały przez wysoki wkład indu, co poszerzyło szerokości linii. Wiele bardzo ciekawych pomiarów zostały przeprowadzone jak n.p. zależności PLE od natężenia. Fine structure splitting (rozszczenie struktury subtelnej) wskazuje na pewną asymetrię kropek, co jest jednym z największych problemów dla ich zastosowań w komputerach kwantowych. Finałowo pokazano przez pomiary HBT zarówno w modzie ciągłym jak i impulsowych emisję pojedynczych fotonów z wartością  $g^{(2)}$  poniżej 0,1.

Rozprawa doktorska jest dobrze strukturyzowana, logicznie budowana i zawiera wiele ciekawych i nowych wyników. Obszerny spis literatury świadczy o bardzo dobrym rozeznaniu pana mgr. Pawła Wyborskiego w tej dziedzinie i jest jak najbardziej przydatny dla czytelnika. W tym miejscu dwie drobne uwagi krytyczne. Pomocnicze by było, gdyby każdy rozdział z wynikami (5 – 7) zakończyłby się krótkim podsumowaniem najważniejszych wyników. Uważam, że rozmiar liter jest dość mały, co utrudniało płynne czytanie tej pracy.

Bezpośrednie wyniki zostały opublikowane w trzech publikacjach. Dwie prace w Materials (IF 3,75) w tym raz jako pierwszy i raz jako drugi autor, a trzecia ukazała się w tym miesiącu w prestiżowym Physical Review Applied [vol. 20, 044009] (IF 4,93), gdzie też jest pierwszym autorem. Do tego dochodzą 12 publikacje w tej dziedzinie w ostatnich pięciu latach. Jest to, jak na doktoranta, bardzo dużo i świadczy jego wydajności naukowej. Indeks Hirsch wynosi 6! Wyniki naukowe zostały dodatkowo prezentowane na 15 konferencjach w tym pięć zagranicą. Trzy razy były to prezentacje ustne.

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

Wnioskuje dodatkowo ze względu na wymienione wyjątkowe wyniki, publikacje, oraz prezentacje wyników na konferencjach zarówno krajowych jak i międzynarodowych o wyróżnienie tej pracy doktorskiej. Oczywiście o tym decydować będzie finałowa obrona doktorska pana mgr. Pawła Wyborskiego..

