

Warszawa, 28.11.2011

Prof. dr hab. Tadeusz Wosiński  
Instytut Fizyki PAN, Warszawa

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mariusza Kaczmarczyka pt.:  
„Charakteryzacja struktur kropek kwantowych na potrzeby zastosowań  
w przyrządach półprzewodnikowych”

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Mariusza Kaczmarczyka jest pracą eksperymentalną, poświęconą badaniom i analizie właściwości stanów związanych w kropkach kwantowych InAs w matrycy GaAs otrzymanych techniką wzrostu epitaksjalnego MBE w procesie spontanicznego wzrostu w modzie Stranskiego-Krastanowa. Tematyka pracy jest bardzo aktualna i ważna dla technologii nowoczesnych przyrządów półprzewodnikowych do zastosowań w optoelektronice a także w konstrukcji przyszłościowych optycznych pamięci jednoelektronowych o ogromnym upakowaniu informacji i wielkiej skali integracji.

Rozprawa liczy 104 strony, zawiera 46 rysunków i wykresów oraz dwie tabele. Jest podzielona na 7 rozdziałów poprzedzonych krótkim wprowadzeniem i zakończona spisem literatury oraz trzema dodatkami. We wprowadzeniu autor przedstawił układ rozprawy. W rozdziale 1 zdefiniował cele naukowe przeprowadzonych badań, przedstawił motywację ich podjęcia oraz przedmiot badań. W rozdziałach 2 i 3 doktorant krótko przedstawił aktualny stan wiedzy nt. właściwości układów niskowymiarowych oraz omówił wpływ defektów na właściwości materiałów i przyrządów półprzewodnikowych. W rozdziale 4 przedstawił przegląd metod pomiarowych stosowanych w badaniach kropek kwantowych oraz defektów występujących w badanych strukturach półprzewodnikowych. Szczegółowo opisał różne warianty niestacjonarnej spektroskopii głębokich poziomów (DLTS), która była podstawową techniką badawczą wykorzystaną w rozprawie. W rozdziale 5 przedstawiony jest opis badanych struktur półprzewodnikowych. Zasadniczą część rozprawy stanowi obszerny rozdział 6 poświęcony opisowi uzyskanych wyników eksperymentalnych i ich szczegółowej analizie. Rozdział 7 stanowią wnioski i podsumowanie. Rozprawa zakończona jest obszerną bibliografią obejmującą 137 pozycji oraz trzema dodatkami zawierającymi: spis używanych skrótów i oznaczeń, wartości niektórych stałych fizycznych i materiałowych oraz spis publikacji i wystąpień konferencyjnych autora.

Część wyników przedstawionych w rozprawie była prezentowana na międzynarodowych konferencjach naukowych i została już wydrukowana w ośmiu publikacjach naukowych (w pięciu z nich doktorant jest pierwszym autorem). Doktorant jest również współautorem siedmiu innych publikacji naukowych, w tym trzech opublikowanych w *Applied Physics Letters*. Część prac badawczych doktorant prowadził w ramach grantu promotorskiego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Badane przez doktoranta struktury półprzewodnikowe, zawierające pojedynczą warstwę kropek kwantowych, wytworzone zostały na Uniwersytecie Chalmersa w Göteborgu techniką MBE z wykorzystaniem mechanizmu wzrostu Stranskiego-Krastanowa i starannie zoptymalizowanej metody przerywanego wzrostu w celu poprawy jakości i jednorodności kropek kwantowych. Bariery GaAs, otaczające kropki kwantowe InAs, były w procesie wzrostu epitaksjalnego domieszkowane na typ n, a gotowe struktury zaopatrzone zostały w kontakt omowy od strony silnie domieszkowanego podłoża n<sup>+</sup>-GaAs oraz kontakt Schottky'ego na powierzchni struktury, co umożliwiło badanie struktur przy użyciu metod spektroskopii pojemnościowej. Doktorant dysponował czterema starannie dobranymi strukturami o różnych parametrach. Dwie struktury, zawierające kropki kwantowe, różniły się występującymi w nich naprężeniami mechanicznymi, wynikającymi z różnicy parametrów sieci krystalicznej InAs i GaAs. Zmniejszenie naprężeń ściskających w warstwie kropek kwantowych uzyskano w jednej ze struktur przez nałożenie cienkiej warstwy InGaAs na warstwie kropek kwantowych InAs. Dwie struktury referencyjne bez kropek kwantowych, wykorzystane do badań porównawczych, różniły się występowaniem w jednej z nich bardzo cienkiej warstwy InAs – tzw. warstwy zwilżającej – o grubości uniemożliwiającej formowanie się kropek kwantowych.

Dużą zaletą rozprawy doktorskiej jest zastosowanie przez autora szeregu technik eksperymentalnych, użytych w celu wszechstronnej charakteryzacji badanych struktur. Właściwości strukturalne kropek kwantowych InAs – ich kształt, rozmiary oraz gęstość powierzchniowa – były badane przy pomocy mikroskopii sił atomowych (AFM) na strukturach testowych, których wzrost został przerwany po uformowaniu się kropek. Autor przeprowadził staranną analizę statystyczną rozkładów wielkości badanych kropek kwantowych oraz ich gęstości powierzchniowej. Doktorant dysponował też wynikami pomiarów widm fotoluminescencji badanych struktur, które pozwoliły mu – przy wykorzystaniu danych literaturowych – na przyporządkowanie poszczególnych linii widmowych przejściom promienistym dla stanów s oraz p kropek kwantowych oraz wyjaśnienie zmian położenia linii widmowych ze zmianą naprężeń i temperatury.

Najważniejsze wyniki rozprawy, do których należą: wyznaczenie energii emisji termicznej elektronów ze stanów związanych, podstawowego  $s$  i wzbudzonego  $p$ , kropek kwantowych, ich przekrojów czynnych na wychwyty elektronu oraz czasów relaksacji elektronów ze stanu wzbudzonego do podstawowego kropki kwantowej, doktorant uzyskał przy użyciu niestacjonarnej spektroskopii głębokich poziomów DLTS. Autor stosował standardową technikę DLTS, w wariantach z pomiarem w funkcji temperatury oraz w funkcji zmian częstotliwości powtarzania impulsu wypełniającego, a także, tzw. niestacjonarną spektroskopię tunelowania, w której pole elektryczne – zmieniane poprzez zmianę napięcia polaryzacji złącza Schottky’ego – jest parametrem wymuszającym zmiany sygnału DLTS.

Otrzymane widma DLTS zawierają zarówno maksima związane z procesami emisji termicznej nośników ładunku ze stanów związanych kropek kwantowych do bariery GaAs jak i pasma wywołane tunelowaniem nośników ze stanów kropek przez trójkątną barierę GaAs, a ponadto maksima związane z emisją termiczną ze stanów defektów punktowych występujących w badanych strukturach. W celu łatwiejszej interpretacji tych złożonych widm doktorant przedstawił je w postaci trójwymiarowych bądź konturowych wykresów parametrycznych, w których amplituda sygnału DLTS prezentowana jest na płaszczyźnie temperatura–napięcie polaryzacji lub częstotliwość–napięcie polaryzacji. Wykresy byłyby jeszcze łatwiejsze do analizy, gdyby autor zachował takie same zakresy zmienności parametrów na porównywanych wykresach; np. takie same skale temperatury na parach wykresów (a) i (c) oraz (b) i (d) z Rys. 6.3.3 oraz takie same skale napięcia polaryzacji i temperatury dla pary (a) i (b) z Rys. 6.3.11.

Dokładne zrozumienie procesów fizycznych odpowiedzialnych za różne elementy widm DLTS umożliwiło porównanie widm eksperymentalnych z wynikami symulacji tych widm wykonanymi przy wykorzystaniu modelu teoretycznego zaproponowanego przez Engströma i wsp. Dobra zgodność wyników modelowania z wynikami doświadczalnymi potwierdza poprawność przyjętego opisu teoretycznego. W efekcie doktorant wyznaczył szybkości emisji nośników ze stanów związanych kropek kwantowych oraz położenie energetyczne tych stanów, a także oszacował czas przechowywania nośników w kropce kwantowej, który ma zasadnicze znaczenie dla konstrukcji opartych na kropkach kwantowych pamięci półprzewodnikowych.

Na podstawie pomiarów DLTS dla struktur referencyjnych i porównania ich z widmami otrzymanymi dla struktur zawierających kropki kwantowe, autor wyznaczył parametry dwóch defektów punktowych występujących w obu rodzajach struktur. Pokazał, że defekty te występują w pobliżu płaszczyzny kropek kwantowych lub warstwy zwilżającej InAs i tworzone są w wyniku

naprężeń występujących podczas wzrostu struktury. Nie próbował jednak zaproponować mikroskopowej natury obserwowanych defektów. Dodatkowo, doktorant przeprowadził szczegółową analizę wyników pomiarów charakterystyk pojemność–napięcie ( $C-V$ ) badanych struktur. Pokazał, że dogłębna analiza połączona z odpowiednim modelowaniem wyników pomiarów  $C-V$ , znacznie prostszych od spektroskopii DLTS, może być bardzo przydatna do charakteryzacji struktur półprzewodnikowych zawierających defekty punktowe oraz stany związane kropek lub studni kwantowych o niejednorodnym rozkładzie przestrzennym.

Redakcja rozprawy jest przejrzysta i bardzo starannie opracowana pod względem graficznym. Napisana jest ona na ogół poprawnym i zrozumiałym językiem. Do niezręcznych sformułowań należy używane wielokrotnie słowo „system” (np. system materiałowy, system z integratorem, itd.) zamiast – lepiej brzmiącego po polsku – „układ”. Zamiast „czas retencji nośników w kropce kwantowej”, lepiej brzmiałoby po polsku „czas przechowywania (lub przebywania) nośników w kropce kwantowej”. Zamiast „ze wzrastaniem  $T$ ” (str. 65), lepiej użyć: „ze wzrostem  $T$ ”.

Kilka błędów zauważyłem we wzorach matematycznych:

- wzór (4.4.4) na str. 28 określa odwrotność szybkość okna emisji  $1/e_w$ , a nie, jak podano:  $e_w$  (ten błąd doktorant wyjaśnił już po oddaniu rozprawy do recenzji),
- we wzorze na parametr  $\lambda$  na str. 61 ładunek elementarny  $q$  powinien być w kwadracie ( $q^2$  zamiast  $q$ ),
- podobnie, we wzorze (6.5.8) na str. 77 powinno być:  $q^2$  zamiast  $q$ .

Inne zauważone błędy edytorskie i nieścisłości:

- autor nie wyjaśnia, skąd się bierze czynnik liczbowy  $1/0.18$  we wzorze (6.4.7) na str. 64,
- nie podana jest wartość temperatury, dla której uzyskano wyniki przedstawione na Rys. 6.5.9 na str. 88.

Podsumowując uważam, że autor zrealizował zamierzone cele pracy przyczyniając się do lepszego zrozumienia procesów zmiany stanu ładunkowego w badanych kropkach kwantowych. Pokazał jednocześnie przydatność technik spektroskopii pojemnościowej do badania elektronowych właściwości kropek kwantowych w strukturach półprzewodnikowych. Uzyskane przez niego rezultaty mogą mieć także znaczenie praktyczne dla wykorzystania tego typu kropek kwantowych do konstrukcji nowoczesnych przyrządów półprzewodnikowych a zaproponowana metodologia umożliwia otrzymanie wyników elektrycznej charakteryzacji skomplikowanych struktur półprzewodnikowych, zawierających kropki kwantowe oraz niejednorodnie

rozłożone defekty punktowe, niezbędnych do projektowania i konstrukcji tego typu przyrządów. Ponadto doktorant wykazał zarówno doskonałe opanowanie stosowanych technik eksperymentalnych jak i głębokie zrozumienie badanych zjawisk fizycznych.

Stwierdzam, że recenzowana praca – mimo przedstawionych powyżej drobnych mankamentów – spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ponadto wnoszę o uznanie rozprawy doktorskiej mgra inż. Mariusza Kaczmarczyka za wyróżniającą się.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Winiarski', is located in the lower right quadrant of the page.