

Warszawa, 10.11.2010

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

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra Piotra Kruszewskiego pt.:

„Bariery energetyczne w procesach zmiany stanu ładunkowego półprzewodnikowych nanokropek kwantowych systemu InAs/GaAs”

Recenzowana rozprawa doktorska poświęcona jest eksperymentalnym badaniom elektronowych właściwości stanów związanych w kropkach kwantowych InAs w matrycy GaAs otrzymanych techniką wzrostu epitaksjalnego MBE w procesie spontanicznego wzrostu w modzie Straskiego-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.

Rozprawa liczy 156 stron, zawiera 71 rysunków i wykresów. Jest podzielona na pięć rozdziałów. W krótkim wstępie autor zdefiniował cele naukowe przeprowadzonych badań oraz przedstawił układ rozprawy. W rozdziale 2 przedstawił podstawowe informacje dotyczące właściwości badanych związków półprzewodnikowych oraz struktur niskowymiarowych. W rozdziale 3 doktorant opisał stosowane techniki pomiarowe. Zasadniczą część rozprawy stanowi obszerny rozdział 4 poświęcony opisowi uzyskanych wyników eksperymentalnych i ich szczegółowej analizie. Rozprawa zakończona jest zwięzłym podsumowaniem oraz dwoma dodatkami zawierającymi schematy stosowanych układów pomiarowych i obszerną bibliografią obejmującą 94 pozycje.

Część wyników prezentowanych w rozprawie została już opublikowana w trzech pracach, w których doktorant jest pierwszym autorem, prezentowanych na międzynarodowych konferencjach naukowych i następnie wydrukowanych w czasopiśmie naukowych. Doktorant jest również współautorem ośmiu innych publikacji naukowych.

Badane przez doktoranta próbki zostały wytworzone na Uniwersytecie w Manchesterze. 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⁺-GaAs oraz kontakt Schottky'ego na powierzchni struktury, co umożliwiło badanie struktur przy użyciu technik spektroskopii pojemnościowej

oraz fotoprądu. Doktorant dysponował pięcioma strukturami o różnej grubości warstwy epitaksjalnej InAs, wykorzystanej do wzrostu kropek kwantowych, i różnym domieszkowaniu barier GaAs, a ponadto, strukturą referencyjną z bardzo cienką warstwą InAs, ale bez kropek kwantowych.

Dużą zaletą rozprawy doktorskiej jest zastosowanie przez autora szerokiej gamy 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. Mylący jest jednak opis zdjęcia z mikroskopu AFM (rys. 22 ze str. 58) przedstawiony na stronie 57, który podaje, że powierzchnia tego zdjęcia wynosi 1000 nm^2 . Natomiast zgodnie z opisem osi na rys. 22 należy wnioskować, że obszar zdjęcia obejmuje 10^6 nm^2 . Obliczona gęstość powierzchniowa kropek, rzędu 10^9 cm^{-2} , sugeruje, że to dane na rys. 22 są prawidłowe.

Jakość złącz Schottky'ego na strukturach z kropkami kwantowymi była badana poprzez pomiary ich charakterystyk prądowo-napięciowych (I-V) oraz pojemnościowo-napięciowych (C-V). Na podstawie zmierzonych charakterystyk C-V autor wyznaczył profil koncentracji nośników ładunku w warstwie zubożonej złącza Schottky'ego otrzymując maksima koncentracji związane z gromadzeniem się elektronów w kropkach kwantowych. Na stronie 69 autor przedstawia interpretację obserwowanych na rys. 29b (str. 67) dwóch maksimów koncentracji, których amplituda, ze zmianą temperatury pomiaru, „przelewa się” z jednego do drugiego, zakładając występowanie dwóch rywalizujących procesów: emisji termicznej nośników z kropek kwantowych (dominującej w wysokich temperaturach) i emisji tunelowej (dominującej w niskich temperaturach). Interpretacja ta nie tłumaczy jednak, dlaczego maksima te występują na różnych głębokościach od powierzchni próbki ($0.36 \mu\text{m}$ oraz $0.41 \mu\text{m}$). Autor nie komentuje tej rozbieżności.

Najważniejsze wyniki rozprawy, do których należą: wyznaczenie energii wiązania nośników większościowych i mniejszościowych na stanach związanych w kropkach kwantowych oraz energii blokady kulombowskiej dla elektronów obsadzających stan podstawowy w kropce, doktorant uzyskał z pomiarów spektralnej zależności fotoprądu oraz przy użyciu niestacjonarnej spektroskopii głębokich poziomów, powszechnie znanej pod nazwą DLTS (od skrótu nazwy angielskiej). Autor stosował zarówno standardową technikę DLTS jak i jej wysoko-rozdzielczą modyfikację – Laplace DLTS, a także tzw. MCTS (niestacjonarną spektroskopię nośników mniejszościowych), w której zmianę obsadzenia głębokich poziomów w obszarze zubożonym złącza Schottky'ego realizuje się przy pomocy ciągu impulsów światła, zamiast impulsów napięcia polaryzującego złącze.

Poprzez umiejętny dobór odpowiednich wartości napięcia zaporowego, polaryzującego złącze Schottky'ego w pomiarach DLTS, oraz różnych amplitud impulsów napięciowych, doktorant potrafił rozdzielić i zidentyfikować piki widm DLTS odpowiedzialne za procesy emisji nośników do bariery GaAs ze stanu jedno- oraz dwu-elektronowego w kropkach kwantowych InAs oraz oszacować wartość energii blokady kulombowskiej związanej z wychwytem drugiego elektronu na stan podstawowy w kropce. Autor pokazał również, że procesy emisji elektronów ze stanu podstawowego w kropkach kwantowych odbywają się drogą czystego tunelowania bądź też tunelowania z udziałem fononów. Natomiast, dla procesów emisji dziur do pasma walencyjnego bariery GaAs, w niskich temperaturach dominuje niezależna od temperatury jonizacja tunelowa, która w wyższych temperaturach współzawodniczy z termicznie aktywowaną emisją ponad barierą. Szkoda tylko, że szczegółową analizę emisji tunelowej autor przeprowadza wyłącznie dla zjawiska czystego tunelowania. Wydaje się, że w warunkach stosunkowo słabych pól elektrycznych występujących w eksperymentach DLTS (poniżej 10^7 V/m) znacznie bardziej prawdopodobne jest tunelowanie z udziałem fononów.

Zarówno dla struktur zawierających kropki kwantowe jak i dla struktury referencyjnej doktorant zaobserwował w widmach DLTS występowanie piku, który nie jest związany z emisją nośników ładunku z kropek. Powołując się na doniesienie literaturowe (praca [LinPRB05]) autor wiąże ten pik z defektami punktowymi powstającymi na skutek występowania silnych naprężeń mechanicznych, wywołanych dużymi różnicami stałych sieci krystalicznej między wzrastanymi warstwami InAs oraz GaAs (str. 103). Nie przedstawia jednak żadnych dodatkowych pomiarów, które pomogłyby bardziej wiarygodnie określić rodzaj defektów odpowiedzialnych za ten pik DLTS. Podstawowym defektem powstającym w wyniku naprężeń na granicy niedopasowanych sieciowo kryształów są dyslokacje niedopasowania, które również dają głębokie stany pułapkowe w przerwie wzbronionej półprzewodnika, ujawniane w pomiarach DLTS. Stany te można łatwo odróżnić od stanów defektów punktowych badając ich kinetykę obsadzania nośnikami ładunku. Pomiar taki wykonuje się badając zależność amplitudy piku DLTS od czasu trwania napięciowego impulsu zapełniającego. Defekty punktowe charakteryzują się eksponencjalną kinetyką obsadzania, natomiast dyslokacje mają znacznie wolniejszą, logarytmiczną kinetykę.

Redakcja rozprawy jest przejrzysta i bardzo staranna. Napisana jest ona na ogół poprawnym i zrozumiałym językiem. Do niezręcznych sformułowań należy – użyte w tytule rozprawy oraz wielokrotnie w jej treści – „system InAs/GaAs” zamiast – lepiej brzmiącego po polsku – „układ InAs/GaAs”. Zamiast „nanokropki otrzymane metodą Stranskiego-Krastanowa” (str. 111 oraz str. 115) poprawniej byłoby „nanokropki powstałe w wyniku wzrostu typu

Straskiego-Krastanova”. Stwierdzenie podane na str. 125 oraz powtórzone we Wnioskach (str. 135) i w Podsumowaniu (str. 143), że „logarytm szybkości emisji zależy liniowo od odwrotności pola elektrycznego” jest mylące, ponieważ sugeruje, że szybkość emisji maleje ze wzrostem pola elektrycznego. Tymczasem istota zjawiska tunelowania przez trójkątną barierę polega na tym, że pole elektryczne zawęża barierę i powoduje wzrost prawdopodobieństwa tunelowania i, co za tym idzie, wzrost szybkości emisji. W rzeczywistości, logarytm szybkości emisji maleje liniowo z odwrotnością pola elektrycznego, co wynika zarówno ze wzoru (3.27) na str. 48 jak i wyników doświadczalnych przedstawionych na rys. 64 (str. 125).

Kilka błędów zauważyłem we wzorach matematycznych:

- wzory (4.1) i (4.2) na str. 83 opisujące szybkość emisji nośników z kropki kwantowej do pasm w barierze GaAs powinny mieć różny człon przedeksponencjalny A dla elektronów i dla dziur,
- we wzorze (4.4) na str. 85 błędnie zapisana jest definicja fotoprądu: $I_{PC} = n/\tau_{rek}$ zamiast: $I_{PC} = n/\tau_{ucieczki}$ (natomiast wzór końcowy na I_{PC} jest poprawny).

Inne zauważone błędy to:

- na str. 30 autor przywołuje rys. 26 (ze str. 63), który miałby ilustrować zależność C-V dla diody Schottky’ego zawierającej kropki kwantowe, gdy tymczasem rysunek ten przedstawia widma fotoluminescencji,
- w podpisie pod rys. 63 (str. 124) oraz w opisie tego rysunku na str. 123 napisano, że pomiar wykonano dla napięcia $U_R = -2.7$ V, natomiast na rysunku podano: $U_R = U_0 = -3.4$ V,
- praca [GellerPRB06] cytowana na str. 48 oraz na str. 125 nie występuje w spisie publikacji (Bibliografia, str. 152–156).

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. Uzyskane rezultaty mogą mieć także znaczenie praktyczne dla wykorzystania tego typu kropek kwantowych do konstrukcji nowoczesnych przyrządów półprzewodnikowych. Ponadto doktorant wykazał zarówno doskonale opanowanie szeregu różnorodnych technik eksperymentalnych jak i głębokie zrozumienie badanych zjawisk fizycznych.

Stwierdzam, że recenzowana praca – mimo przedstawionych powyżej mankamentów – spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.