

Dr hab. Adam Babiński, prof. UW
Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego

Warszawa 7 listopada 2016 r.

Recenzja pracy doktorskiej mgr Pawła Mrowińskiego zatytułowanej
**"Optyczne właściwości pojedynczych nanostruktur epitaksjalnych z InAs pod kątem
zastosowań w nanofotonice"**

wykonanej na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej pod
kierunkiem dr. hab. inż. Grzegorza Sęka prof. P. Wr.

Przedstawiona rozprawa prezentuje wyniki badań doświadczalnych własności struktur półprzewodnikowych zawierających epitaksjalne tzw. *kreski kwantowe* InAs/InGaAlAs/InP o potencjalnych zastosowaniach w wytwarzaniu laserów bliskiej podczerwieni. Wyniki te wsparte są analizą teoretyczną. Zainteresowanie społeczności badawczej strukturami kresek kwantowych jest motywowane ich potencjalnymi zastosowaniami w laserach pracujących w zakresach 1.3 μm oraz 1.55 μm , które są istotne z punktu widzenia zastosowań w technologiach telekomunikacyjnych. Badanie takich struktur, opracowanych i wytworzonych w grupie prof. Forchela z Würzburga wpisuje się zatem w jeden z głównych nurtów fizyki materii skondensowanej ostatnich lat. Wyniki uzyskane przez mgr Mrowińskiego mają zatem walor nowości i z pewnością ułatwią zrozumienie fizyki zjawisk zachodzących w tego typu strukturach.

Rozprawa doktorska mgr Mrowińskiego składa się z pięciu rozdziałów. W pierwszym rozdziale stanowiącym wprowadzenie omówiono pokrótce obiekt badań oraz zastosowane metody doświadczalne. W rozdziale drugim opisane są własności kompleksów ekscytonowych uwięzionych w kropkach (kreskach) kwantowych. Wyniki eksperymentalne i ich analizę przedstawiono w rozdziale trzecim i czwartym poświęconych odpowiednio własnościom pojedynczych kresek kwantowych oraz wpływowi morfologii i czynników zewnętrznych na własności optyczne struktur z kreskami kwantowymi. Rozdział piąty podsumowuje uzyskane wyniki. Praca obejmuje też bogatą listę literatury, listę dorobku Autora oraz dwa dodatki, w tym manuskrypt pracy „*Excitonic fine structure and binding energies of excitonic complexes in single InAs quantum dashes*”, przyjętej do publikacji w Physical Review w momencie składania dysertacji i opublikowanej 26 września br. (Phys. Rev. B **94**, 115434 (2016)).

W ocenie wyników doświadczalnych przedstawionych w pracy należy zwrócić uwagę na złożony charakter eksperymentów optycznych, które są jej zasadniczym elementem. Kluczowa pod tym względem jest energia emisji optycznej badanych obiektów sięgająca poza zakres obejmowany standardowymi matrycami CCD opartymi na krzemie. Zamiast tego wykorzystywana jest linijka detektorów InGaAs, której mniejsza czułość stawia przed eksperymentatorem wyższe wymagania.

Dodatkowym elementem jest także zastosowanie pola magnetycznego zarówno w konfiguracji Faradaya jak i Voigta, a także niska temperatura pomiaru. Ponadto zastosowanie rozdzielczości polaryzacyjnej, kluczowej dla badań anizotropii optycznej kresek kwantowych wymagało od Autora opanowania istotnych umiejętności eksperymentalnych. Przedstawione wyniki potwierdzają, że opanował on warsztat doświadczalny i jest gotowy do podjęcia dalszych wyzwań w badaniach optycznych własności nanostruktur półprzewodnikowych.

Na wyniki przedstawione w rozdziale trzecim składa się szczegółowa analiza własności pojedynczych kresek kwantowych. Dzięki strukturyzacji badanych próbek i wytworzeniu mezostruktur o rozmiarach submikronowych Autor uzyskał widma emisji, które w wiarygodny sposób powiązał z pojedynczymi kreskami kwantowymi. Zidentyfikowano w szczególności neutralne kompleksy ekscytonowe (ekscytony i bieksytony), a także triony. Przeanalizowana została struktura subtelna ekscytonu w kresce kwantowej. Wykazano wysoki stopień anizotropii polaryzacyjnej emisji, który przewyższa istotnie podobną wielkość obserwowaną zwykle w kropkach kwantowych. Przedstawiono także wyniki badań pojedynczych kresek kwantowych w polu magnetycznym umożliwiające określenie efektywnego g -czynnika elektronu i dziury w płaszczyźnie, a także współczynnika diamagnetycznego dla pola magnetycznego prostopadłego i równoległego do płaszczyzny kresek.

W części czwartej omówiony jest wpływ różnych czynników zewnętrznych na własności optyczne badanych nanostruktur. Przede wszystkim dotyczy to porównania energii wiązania poszczególnych kompleksów i energii ich rozszczepienia subtelnego z wynikami obliczeń atomistycznych. Znalezione satysfakcjonującą zgodność doświadczenia z teorią. Ponadto stwierdzono na podstawie wyników teoretycznych brak w widmie linii emisyjnych związanych z trionem ujemnym. Bardzo interesująca jest w opinii recenzenta bezpośrednia obserwacja wpływu otoczenia dielektrycznego kresek kwantowych na ich anizotropię polaryzacyjną. Autor pokazuje, że emisja z mezostruktur prostokątnych jest znacznie silniej spolaryzowana niż emisja z próbki niestrukturyzowanej (rys. 43). Podobny efekt nie zachodzi w przypadku mezostruktur w kształcie kwadratu. Wyniki eksperymentalne poparte są analizą teoretyczną rozkładu intensywności pola elektrycznego w obu przypadkach.

Ważnym elementem rozprawy pana mgr Mrowińskiego jest fakt, że powstała ona w efekcie współpracy międzynarodowej, zaś teoretyczne wsparcie uzyskanych wyników możliwe było dzięki współpracy zarówno z grupą teoretyków z Politechniki Wrocławskiej (dr J. Olszewski i dr K. Tarnowski) jak i czołowym specjalistą w dziedzinie obliczeń atomistycznych z Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, dr hab. Michałem Zielińskim.

Analizując pracę doktorską pana mgr Mrowińskiego należy także zwrócić uwagę na jego dorobek publikacyjny obejmujący dwanaście prac w liczących się czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Pan mgr Mrowiński jest pierwszym autorem siedmiu z nich, w tym wspomnianej uprzednio pracy opublikowanej w *Physical Review B* (1), a także prac w ważnych dla dziedziny prowadzonych przez

niego badań czasopismach *Applied Physics Letters* (4) oraz *Journal of Applied Physics* (2). Prace Autora były też komunikowane na szeregu konferencjach naukowych o zasięgu międzynarodowym, w tym podczas prezentacji ustnej na konferencji *Optics of Excitons in Confined Systems* w Jerozolimie w 2015 r.

Wysokiej oceny pracy mgr Mrowińskiego nie przesłaniają pewne drobne uchybienia jakie można znaleźć w jej tekście. W trosce o zapewnienie jak najwyższej jakości oceny pracy ich wspomnienie jest obowiązkiem recenzenta. Z pewnością też poniższe uwagi będą pomocne Autorowi w trakcie jego dalszego rozwoju.

- (a) Opisując kompleksy ekscytonowe Autor nie ustrzegł się pewnej niekonsekwencji. Energia oddziaływania kulombowskiego J_{eh} pojawiająca się w równaniu II-1 jest ujemna (co w naturalny sposób prowadzi do obniżenia energii oddziałującej pary elektron-dziura w kropce kwantowej). Podobnie potraktowany jest wkład kulombowski do energii trionów (równania II-5 i II-6). W tym sensie w wyrażeniu piątej linii od dołu na stronie 18 powinna pojawić się raczej wartość bezwzględna $|J_{eh}|$ (tak jak na rys. 6), niż wartość tej energii. Ponadto, na rys. 6 bardziej dydaktyczne byłoby używanie oznaczeń pojawiających się w tekście (np. J_{eh}) niż oznaczeń, które w tekście trudno znaleźć [$J(e, h)$].
- (b) Na str. 58, na początku podrozdziału III.6.2 Autor wspomina o „różnicy głębokości potencjału wiążącego dla kierunku wzrostu i kierunków w płaszczyźnie”. Wydaje się, że to raczej szerokość studni potencjału w kierunku wzrostu i w płaszczyźnie są różne.
- (c) Pewna niespójność dotyczy opisu wyników uzyskanych w polu magnetycznym. W opisie rys. 29 pojawia się pojęcie „natężenia pola B ” podczas gdy na samym rysunku jednostką wielkości B jest tesla, co sugeruje, że chodzi raczej o indukcję pola magnetycznego, a nie jego natężenie. Także w tekście pojęcie indukcji i natężenia pojawia się wymiennie, co nie jest w pełni poprawne, w szczególności w kontekście natężenie pola wyrażonego w teslach (np. str. str. 39, 59, 67).
- (d) Analizując wyniki przedstawione na rys. 26 b nie sposób nie odnieść wrażenia, że liniowe dopasowanie punktów doświadczalnych w całym zakresie pól magnetycznych nie jest rozwiązaniem optymalnym. Pobieźna ocena wyników sugeruje dwa zakresy liniowości. Interesujące było ponowne przeanalizowanie tej kwestii.
- (e) Pewien niedosyt pozostawia redakcyjna strona przedstawienia bibliografii. Odnośniki zapisane są w różnych formatach, zaś niektóre pozycje posiadają braki istotnie utrudniające identyfikację cytowanego dzieła. Większa uwaga przyłożona do przygotowania tej bogatej i pomocnej listy z pewnością ułatwiłaby czytelnikowi pełniejsze docenienie wartości przedstawionej pracy w perspektywie aktualnego stanu wiedzy na ten temat.

Wymienione powyżej drobne uwagi krytyczne dotyczące głównie redakcyjnej strony omawianej pracy nie umniejszają w żaden sposób jej wysokiej wartości merytorycznej. Uzasadnia to zdaniem recenzenta stwierdzenie, że spełnia ona w pełni wymagania stawiane pracom doktorskim. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego potwierdzające także wiedzę ogólną Autora. Biorąc to pod uwagę wnoszę o dopuszczenie mgr. Pawła Mrowińskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Adam Babiński

