



Warszawa, dnia 8.09.2024

Recenzja pracy doktorskiej mgr. inż. Michała Rygały

Mgr inż. Michał Rygała przedstawił dysertację „Zbadanie właściwości optycznych niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych wykorzystywanych jako obszar aktywny detektorów za zakres średniej podczerwieni”. W pracy tej znaleźć można wyniki charakteryzacji szeregu struktur supersieci InAs/GaSb oraz InAs/InAsSb, a także rezonansowych diód tunelowych wykorzystujących jako absorber warstwę GaInAsSb o różnych grubościach. Badane struktury mają znaczenie technologiczne, zaś uzyskane wyniki mogą zostać wykorzystane do dalszej optymalizacji detektorów. Na uwagę zasługuje fakt, że struktury te hodowane były w czołowych laboratoriach technologicznych Europy co dodatkowo wskazuje na aktualny charakter podjętej tematyki. Przedstawione wyniki i ich analiza bez wątplenia potwierdza umiejętności eksperymentalne Autora.

Tematyka pracy znalazła odzwierciedlenie w kilku artykułach opublikowanych w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym:

- M. Rygała i in "Ultrafast infrared spectroscopy of InAs/GaSb and InAs/InAsSb type-II superlattices, Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XX (2024) 1-8,
- M. Rygała i in "Investigating the physics of higher order optical transitions in InAs/GaSb superlattices", Physical Review B **104**, 085410 (2021).
- M. Dyksik, M.Motyka, Rygała i in. „Peculiarities in optical response of hybrid-barrier GaSb/InAs/AlSb resonant tunnelling diode structures” Optica Applicata 51, 171 171-180 (2021).

W dorobku Autora znaleźć też można szereg innych prac jego współautorstwa niezwiązanych bezpośrednio z dysertacją, a także liczne wystąpienia konferencyjne.

Na pracę składa się 9 rozdziałów i bibliografia. Po wprowadzeniu w tematykę (Rozdział 1) czytelnik zapoznaje się z podstawowymi własnościami elementów aktywnych badanych urządzeń (Rozdział 2). W Rozdziale 3 przedstawiono na dość elementarnym poziomie fizykę przejść optycznych w nanostrukturach półprzewodnikowych, zaś w Rozdziale 4 opisano użyte metody badawcze. Wyniki eksperymentalne i ich teoretyczna analiza zajmują kolejne Rozdziały. Omówiono w nich symetryczne supersieci II-typu InAs/GaSb (Rozdział 5), inżynierię interfejsu asymetrycznych supersieci II-typu InAs/GaSb (Rozdział 6), supersieci II typu InAs/InAsSb (Rozdział 7) i rezonansowe diody tunelowe z warstwą absorpcyjną InGaAsSb (Rozdział 8). W każdym z tych czterech rozdziałów w sposób dydaktyczny przedstawiono schematy badanych struktur, wyniki doświadczalne i rezultaty obliczeń numerycznych. Uzyskane wyniki podsumowano w Rozdziale 9. Układ pracy jest poprawny, a bibliografia bogata i właściwie dobrana.

Odnosząc się do zawartości pracy wypada zaadresować kilka elementów, które w opinii recenzenta nie zostały w pełni przeanalizowane. Przykładowo na Rys. 8.3 a) i c) przedstawiono mapy prezentujące ewolucję temperaturę widma fotoluminescencji rezonansowych diód tunelowych. Analiza tych map sugeruje istnienie dość wąskiego pasma absorpcji w okolicach 0.45 eV, którego energia sprawia wrażenie niezależnego od temperatury. Autor nie odnosi się w jawny sposób do tej obserwacji. Nie będący specjalistą w dziedzinie pomiarów w podczerwieni Czytelnik mógłby

zasugerować związek absorpcji 0.45 eV z pasmem absorpcji atmosferycznej w okolicach 2.75 μm związanego z CO_2 i H_2O (por. https://www.astronomy.ohio-state.edu/pogge.1/Ast161/Unit5/Images/atmos_nirtran.png). W takim przypadku oczywista staje się zaobserwowana przez Autora niemonotoniczna zależność intensywności przejścia T3 w funkcji temperatury, z minimum odpowiadającym „przejściu” przez energię 0.45 eV. Z pewnością kształtujące byłoby poznanie opinii Autora na temat tej koncepcji.

Ponadto, choć Autor przedstawia wykładniki opisujące zależności intensywności linii luminescencyjnych w funkcji mocy dla tych struktur (Rys. 8,5), zaniedbuje przedstawienia tych zależności pozostawiając wierze czytelnika ocenę jakości tych dopasowań. Może mieć to znaczenie szczególnie dla linii T2, której intensywność jest istotnie mniejsza niż pozostałych linii. Autor nie skomentował także faktu, że tak samo oznaczone przejście T2 w próbce I charakteryzowało się wykładnikiem mniejszym niż 1, zaś w próbce J zauważalnie większym niż 1. Jeśli w obu próbkach te przejścia mają różny charakter to opisywanie ich takim samym symbolem jest mylące. Być może jednak ten wynik wiąże się z poprzednią sugestią istnienia pasma absorpcji.

Krytycznie przychodzi ocenić zawartość początkowych rozdziałów dysertacji. Uważna ich lektura sugeruje, że zabrakło analizy przedstawionego tekstu z punktu widzenia jego spójności.

Znaleźć można zatem stwierdzenia nie dość precyzyjne, które nie powinny pojawiać się w tekście naukowym jak np.:

Str 15 „Gdy grubość warstw jest wystarczająco nieduża zachodzi efekt związania kwantowego”

Str 20 „Dyfuzja funkcji falowych elektronów i dziur (...) jest wystarczająco niska...”.

Str. 26 „Półprzewodniki to klasa materiałów, których opór elektryczny znajduje się pomiędzy metalami a dielektrykami (izolatorami)”.

Str. 27 ”... strukturę pasmową, czyli ewolucję pasm w wektorze falowym w sieci odwrotnej”.

Str. 30 „... wewnątrz studni o długości L ”

Str. 31 „Jeśli głębokość wnikania przekracza szerokość bariery, wówczas zachodzi zjawisko tunelowania kwantowego.”

Str. 33 „podczas gdy elektrony przyjmują wartości w zakresie od 10^9 m^{-1} do 10^{10} m^{-1} ”

Str. 36 „Poziomy energetyczne (...) można podzielić (...) w zależności od siły zlokalizowania defektu w materiale”.

Str. 37 „... światło rozdzielane jest na pojedyncze fragmenty przy pomocy monochromatora...”

Str. 45 „... laser pobudzający rozdzielony jest pomiędzy dwie gałęzie...”

Niektóre zdania sprawiają wrażenie niedokończonych jak np.:

Str 15 „Możliwość tworzenia detektorów złożonych ze studni o różnych grubościach pozwala też na konstrukcji co pozwala...”

Str 19 „transport elektronu odbywa się za pomocą kaskady kwantowej składającej się z barier o odpowiednio dobranych grubościach separowanych energią wynoszącą blisko podłużnego fononu optycznego...”

Str. 20 „Stanowi to bardzo dużą zaletę tego typu architektury, ponieważ eliminuje standardową koncepcję ciemnego prądu w strukturze”.

Str. 28 „przerwa energetyczna drugiego materiału znajduje się wewnątrz pierwszego”

Str. 55 „Interfejs w próbce D był relaksowany przy wykorzystując metodę ...”.

Można także znaleźć szereg wyrażeń, które przez niezbyt staranne formatowanie stają się nieczytelne jak np.

Str 56 parametry $\alpha: 2.49e^{-1}$ eV/K itd.,

Str 75 koncentracje domieszki $2e18$ cm^{-3} i $9e18$ cm^{-3} .

Pewien niepokój budzi też sposób opisu dyspersji elektronu w półprzewodniku. W Równaniu (3.5) znajdujemy jej zależność od $\hbar^2 k^2 / 2m$, gdzie m oznacza „masę elektronu”. Jednocześnie dalej w tekście w Równaniu (3.13) pojawia się zależność $\hbar^2 k^2 / 2m^*$ z masą efektywną m^* , co zdaje się sugerować, że masa m oznacza w istocie masę elektronu w próżni. Jest to oczywista niekonsekwencja, której wypada unikać w tekście dysertacji doktorskiej. Tym bardziej, że w równaniu (4.7) w Ref. [60], do której odnosi się Autor m oznacza masę cząstki (a nie masę elektronu). W oczywisty sposób, w półprzewodniku cząstką tą jest elektron w ciele stałym, którego masę w przybliżeniu k_p opisuje masa efektywna.

Dobrze byłoby wyjaśnić także np. co Autor ma na myśli odnosząc się do „przeciwnej charakterystyki polaryzacyjnej” widm opisywanych na str 51, a także czym jest modyfikacja interfejsu „soaking” – str 54.

Wskazanie słabszych, redakcyjnych stron przedstawionej dysertacji ma na celu zwrócenie uwagi Autora jak ważna w pracy badacza jest precyzja wypowiedzi i wyposażenie go w to doświadczenie w dalszej części kariery. Uwagi te nie niwelują jednak w żaden sposób pozytywnej oceny zawartości merytorycznej przedstawionej rozprawy. Jakość wyników uzyskanych za pomocą szeregu skomplikowanych technik eksperymentalnych, a także ich analiza uzasadniają w mojej opinii ostateczną pozytywną jej ocenę.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi rozprawa spełnia wszelkie ustawowe warunki i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Michała Rygały do dalszych etapów przewodu doktorskiego.