



Wrocław, 26 lutego 2018 r.

Prof. dr hab. inż. Arkadiusz Wójs, prof. zw.
Katedra Fizyki Teoretycznej
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wroclawska

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Oksany Voronych „Exciton-polariton X waves in a microcavity”

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr Oksany Voronych została zrealizowana w Instytucie Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Gdańskiego pod kierunkiem promotora dr hab. Magdaleny Stobińskiej oraz promotora pomocniczego dr. Adama Buraczewskiego.

Tematyka rozprawy leży na styku fizyki materii skondensowanej i optyki kwantowej. Obejmuje ona badania ekscytonowo-polarytonowych fal X w półprzewodnikowych mikrownękach optycznych. Główną tezę rozprawy jest fakt występowania takich fal (szczególnego typu zlokalizowanych pakietów falowych) w nadcieczy ekscytonowo-polarytonowej a w szczególności fakt ich bezdystorsyjnej propagacji i ponadświetlnej prędkości propagacji maksimum. Tezę tę udowodniono teoretycznie na podstawie zaawansowanych obliczeń numerycznych, wykonanych za pomocą oryginalnych programów komputerowych, a także potwierdzono eksperymentalnie.

Wyniki będące przedmiotem rozprawy przedstawiono wcześniej w trzech artykułach opublikowanych w renomowanych czasopismach fizycznych:

- [1] O. Voronych, A. Buraczewski, M. Matuszewski, M. Stobińska: *Exciton-polariton localized wave packets in a microcavity*, Physical Review B (współczynnik wpływu IF=3.836) 93, 245310 (2016) – 4 cytowania, w tym 2 przez innych autorów;
- [2] O. Voronych, A. Buraczewski, M. Matuszewski, M. Stobińska: *Numerical modeling of exciton-polariton Bose-Einstein condensate in a microcavity*, Computer Physics Communications (IF=3.936) 215, 246 (2017) – 2 cytowania, w tym 1 przez innych autorów.
- [3] A. Gianfrate, L. Dominici, O. Voronych, M. Matuszewski, M. Stobinska, D. Ballarini, M. De Giorgi, G. Gigli, D. Sanvitto: *Superluminal X-waves in a polariton quantum fluid*, Light: Science and Applications (IF=14.098) 7, 17119 (2018) – brak cytowań.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wroclawska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79
F: +48 71 328 36 96

wppt.kit@pwr.edu.pl
www.kit.pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 00001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Zachodni WBK S.A.
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Wszystkie te trzy artykuły włączono do rozprawy doktorskiej wraz z deklaracjami Autorki rozprawy oraz pozostałych współautorów artykułów wskazującymi na istotny wkład Autorki rozprawy.

Oprócz przedruków wyżej wymienionych artykułów rozprawa zawiera Wstęp, rozszerzony opis wyników zawartych w każdym z tych trzech artykułów (m.in. uzupełniony o dodatkowe ilustracje), Podsumowanie oraz Bibliografię.

Wstęp składa się z 10 podrozdziałów, w których kolejno przedstawiono kluczowe pojęcia (mikrownęka optyczna, ekscytony, polarytony ekscytonowe i ich kondensaty), kontekst i tło dla własnych badań, główną tezę rozprawy, metodę badawczą w postaci algorytmu numerycznego, a także spodziewany wpływ otrzymanych rezultatów na przyszłe badania i aplikacje.

Rozdział poświęcony pracy [1] opisuje pierwszy ważny rezultat rozprawy: wykazanie na podstawie analizy teoretycznej i obliczeń numerycznych że możliwe jest wytworzenie fal X w nadcieczy polarytonów (ekscytonowych) pobudzanej rezonansowo w odpowiedniej części przestrzeni odwrotnej (poza punktem przegięcia), w której dwie składowe masy efektywnej (w dolnej gałęzi dyspersji, tzw. LPB – ang. lower polariton branch) mają przeciwne znaki. W pracy tej zbadano także rolę oddziaływania między polarytonami (czyli nieliniowości w równaniu Grossa-Pitajewskiego) i wykazano, że choć samo występowanie bezdystorsyjnych fal X nie wymaga tego oddziaływania, to jest ono warunkiem spontanicznego ich formowanie z pakietów gaussowskich.

Rozdział poświęcony pracy [2] przedstawia oryginalny pakiet procedur numerycznych stworzony do badania realistycznych kondensatów polarytonów ekscytonowych, różniący się od pakietów istniejących wcześniej faktem uwzględnienia złożonej natury funkcji falowej polarytonu ekscytonowego (reprezentowanej przez spinor o dwóch składowych: ekscytonowej i polarytonowej). Pakiet składa się z czterech procedur dla układów jedno- i dwuwymiarowych, ze spinem i bez. Algorytm numeryczny rozwiązywania cząstkowego równania różniczkowego (równania Grossa-Pitajewskiego) opiera się na metodzie iteracyjnej Rungego-Kutty czwartego rzędu. Procedury obliczeniowe napisano w języku programowania C++ z rozszerzeniem OpenMP pozwalającym na równoleglenie obliczeń na różne wątki w obrębie jednego węzła obliczeniowego (czyli różne wątki dzielące dostęp do wspólnego obszaru pamięci). Ponadto, pakiet pozwala na optymalizację obliczeń na komputerach o architekturze wektorowej.

Rozdział poświęcony pracy [3] opisuje pierwszą realizację doświadczalną idei z pracy [1], czyli generacji (za pomocą optycznego pobudzania rezonansowego) fal X w kon-



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wroclawska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79
F: +48 71 328 36 96

wppt.kit@pwr.edu.pl
www.kit.pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Zachodni WBK S.A.
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



densacie ekscytonowo-polarytonowym wytworzonym w półprzewodnikowej mikro-wnęce optycznej. Badania eksperymentalne przeprowadzono w grupie prof. Daniele Sanvitto w instytucie CNR NANOTEC w Lecce we Włoszech. Dzięki zastosowaniu nowatorskiej metody obrazowania kondensatu udało się zarejestrować i zanalizować ewolucję pakietu falowego (z początkowego pakietu gaussowskiego) w czasie rzeczywistym i wykazać bezdystorsyjność jego propagacji na znaczną odległość oraz ponadświatłą prędkość jego maksimum – w satysfakcjonującej zgodności z realistycznymi obliczeniami numerycznymi dla fal X.

Tytuł oraz strukturę rozprawy uważam za właściwe. Rozprawa została opracowana starannie, choć Autorka nie ustrzegła się pewnej liczby błędów czy pomyłek, których kilka wymienię dla przykładu: (i) „... a planar microcavity which reflecting...” (str. 14) – błąd językowy; (ii) „... excites an electron in a valence band and moves it towards the conduction band.” (str. 14) – nieścisłość; (iii) „ E_v is the spectrum of energy for the excitons” (str. 15) – niezrozumiały opis symbolu; (iv) niezdefiniowany symbol m_c (str. 15-16). Innym błędem są zbyt lakoniczne podpisy pod niektórymi rysunkami, np. lewy górny panel na Rys. 3 nie jest wcale opisany, a dwa opisane nie są oznaczone jako (a) i (b), a na Rys. 5 brakuje opisu osi (brak jednostek, zapewne też błędna nazwa osi „t” sugerująca czas) oraz definicji parametru γ (który zapewne równoważny jest stałej sprzężenia g w równaniu 1.2). Pomimo usterek, należy mocno pochwalić ogólną prezentację rozprawy, w tym m.in. estetykę ilustracji czy spójność i elegancję bibliografii.

Oceniając merytoryczną zawartość rozprawy stwierdzam, że: (i) cel badawczy został precyzyjnie zdefiniowany i zrealizowany w całości; (ii) przedstawione rezultaty nie są liczne, ale (iii) są ze sobą spójnie połączone w jeden temat występowania w badanym układzie fal X; (iv) rezultaty zostały opublikowane (a więc przeszły zapewne wnikliwą recenzję) w renomowanych czasopismach; (v) Autorka rozprawy wniosła dominujący lub istotny wkład w uzyskanie tych rezultatów; (vi) przedstawiona rozprawa stanowi samodzielne rozwiązanie ważkiego problemu naukowego.

Należy też zauważyć, że podjęta tematyka badawcza jest nowoczesna i atrakcyjna, a dwa starsze artykuły włączone do rozprawy doczekały się już pierwszych cytowań.

I wreszcie należy podkreślić, że Autorka wykazała się dobrą znajomością elementów dwóch ważnych obszarów fizyki współczesnej: optyki kwantowej i fizyki nanostruktur półprzewodnikowych, a także doskonale opanowała zarówno nietrywialne techniki analityczne jak i numeryczne (na najwyższym poziomie, o czym świadczy publikacja pracy [2] dokumentującej pakiet obliczeniowy). Należy też pochwalić wysoką kulturę programowania oraz upublicznienie własnych kodów w postaci pakietu EPCGP).



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wroclawska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79
F: +48 71 328 36 96

wppt.kit@pwr.edu.pl
www.kit.pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 00001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Zachodni WBK S.A.
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Politechnika Wroclawska

Katedra Fizyki Teoretycznej

Przy lekturze rozprawy nasunęły mi się następujące pytania: Które parametry modelu zostały w pracy [3] wyznaczone z innych przesłanek, np. własności materiałowych (szerokość przerwy energetycznej, masy efektywne. itp.) lub geometrii (wymiary zwierciadeł bragowskich lub studni kwantowych), a które zostały dopasowane pod kątem zgodności z eksperymentem? Czy niepewności wyników obliczeń i pomiarów oraz uzyskana zgodność modelu i doświadczenia pozwalają ocenić stosowalność lub dokładność równania Grossa-Pitajewskiego w badanym kontekście? Co zdecydowało o wyborze GaAs jako materiału studni kwantowej, w której tworzony jest kondensat polarytonów ekscytonowych? Czy pomijając różnice w obecnym poziomie epitaksji (czyli przede wszystkim w ruchliwości elektronów) wybór innego materiału mógłby być korzystny dla generacji i detekcji fal X?

W konkluzji stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska pani mgr Oksany Voronych „*Exciton-polariton X waves in a microcavity*” spełnia wymagania określone Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2017 r., poz. 1789). W związku z tym wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Ponadto, biorąc pod uwagę aktualność tematyki, wagę osiągniętych rezultatów oraz przygotowanie samej rozprawy, składam wniosek o jej wyróżnienie. Najważniejszym osiągnięciem uzasadniającym ten wniosek jest: Oryginalna propozycja, na podstawie własnych obliczeń wykonanych przy użyciu własnej metody i własnymi programami komputerowymi, że w rezonansowo pobudzonej nadcieczy polarytonów ekscytonowych wytworzonej w półprzewodnikowej mikrownęce optycznej, w odpowiednich warunkach, powstają, także w reżimie liniowym (czyli przy niskiej gęstości polarytonów), zlokalizowane pakiety falowe zwane falami X, charakteryzujące się bezdystorsyjną propagacją oraz nadświetlną prędkością maksimum, a także potwierdzenie doświadczalne tej propozycji we współpracy międzynarodowej.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wroclawska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Teoretycznej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79
F: +48 71 328 36 96

wppt.kit@pwr.edu.pl
www.kit.pwr.edu.pl
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Zachodni WBK S.A.
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434

Prof. dr hab. inż. Arkadiusz Wójs