



Prof. dr hab. inż. Grzegorz Sęk

Wrocław, 09.01.2023

**Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr. Rafała Mirka
pt. „Nonlinear effects of exciton polaritons
applied in neuromorphic networks”**

Przedstawiona mi do zaopiniowania rozprawa doktorska pana mgr. Rafała Mirka dotyczy badań doświadczalnych nad własnościami polarytonów ekscytonowych i ich kondensatów, wytwarzanych w strukturach mikrowętek optycznych z emiterami w postaci studni kwantowych, wykonanych na bazie wieloskładnikowych, półmagnetycznych związków półprzewodnikowych grupy II-VI CdZnMgTe z dodatkiem jonów manganu. Praca koncentruje się na wybranych procesach nieliniowych i możliwości ich praktycznej implementacji w konstrukcji elementów logicznych dla optycznych sieci neuronowych.

Praca napisana jest w języku angielskim i obejmuje 117 stron wraz z obszerną bibliografią, spisem rysunków i podsumowaniem dorobku naukowego Autora. Rozdział pierwszy jest zwięzłym wstępem, a właściwie wprowadzeniem podstawowych pojęć nt. oddziaływania światło-materia w strukturach półprzewodnikowych wętek optycznych utworzonych pomiędzy dwoma zwierciadłami Bragga, gdzie emiterami są ekscytony uwięzione w studni (studniach) kwantowych umieszczanych zwykle w strzałkach rozkładu pola elektromagnetycznego wętki. Autor ograniczył się wyłącznie do zakresu tzw. silnego sprzężenia pomiędzy ekscytonem i modem optycznym rezonatora, czyli reżimu formowania się kwazicząstek zwanych polarytonami ekscytonowymi, łączącymi w sobie cechy fotonów i elektronów/ekscytonów. Wspomina także o powstawaniu kondensatu takich cząstek, analogicznego do znanego z fizyki atomowej kondensatu Bosego-Einsteina, oraz podkreśla podstawowe różnice pomiędzy obydwooma układami. W podrozdziale 1.4 podkreśla jaki jest kontekst jego badań, które to dotyczą polarytonów ekscytonowych w strukturach wykonanych ze związków II-VI, gdzie możliwe jest zastosowanie półprzewodników półmagnetycznych w studni kwantowej, co zaś otwiera dodatkowe możliwości do badania efektów spinowych i do sterowania ich własnościami polem magnetycznym. Rozdział drugi jest zaś przystępnym, wręcz dydaktycznym wstępem do obliczeń neuromorficznych i optycznych sieci neuronowych.

Rozdział trzeci poświęcony jest opisowi badanych struktur oraz głównego układu do pomiarów spektroskopowych. Niektóre szczegóły eksperymentalne można co prawda potem jeszcze znaleźć w kolejnych rozdziałach, jednak mimo wszystko opis



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

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

wppt.kfd@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



w rozdziale trzecim na ok. półtorej strony uważam za zbyt skrótowy. Tak jak zrozumiałem jest, że Autor nie chciał poświęcać zbyt wiele uwagi opisywaniu technologii otrzymywania próbek, w czym nie uczestniczył (struktury wytworzone zostały one przez prof. Pacuskiego i jego współpracownika), to już zaledwie kilkudziesięciu opis układu do pomiarów spektroskopowych, które Doktorant wykonywał osobiście, bez podawania szczegółów nt. zastosowanych przyrządów i elementów optycznych oraz ich charakterystyk (ani nawet tak fundamentalnych parametrów w tych badaniach jak rozdzielczość przestrzenna), uważam za zbyt skromny, jak na doświadczalną jednak pracę doktorską.

Kolejne rozdziały zawierają już wyniki uzyskane przez Doktoranta. W rozdziale czwartym opisuje on podstawowe własności polarytonów ekscytonowych w strukturach półmagnetycznych. Dzięki naturalnej niejednorodności układów na bazie związków II-VI możliwe jest tworzenie zlokalizowanych kondensatów, ograniczonych przestrzennie w trzech wymiarach, których własności, również spinowe, można wybierać, albo sterować nimi niezależnie. Jeśli takie zlokalizowane kondensaty znajdują się w bliskiej odległości (pojedynczych mikrometrów) to możliwy jest transfer wzbudzeń pomiędzy nimi. Jedną z głównych obserwacji tej części prac było potwierdzenie niezerowej składowej jednej z polaryzacji kołowych w emisji z kondensatu, nawet w zerowym polu magnetycznym, czyli istnienie sztucznego, czy raczej wbudowanego, efektywnego pola magnetycznego w takich nierównowagowych, wzbudzanych optycznie kondensatach, niezależnie od tego, czy użyto półprzewodnika półmagnetycznego czy niemagnetycznego w studniach kwantowych. To zaś pozwala tworzyć zlokalizowane kondensaty o różnych własnościach spinowych, które mogą być kontrolowane czynnikami zewnętrznymi, jak gęstość mocy pobudzania czy pole magnetyczne. Chciałem w tym miejscu podzielić się kilkoma wątpliwościami i zadać pytania, które się nasunęły przy lekturze tego rozdziału:

- Już w tej części pracy pojawia się pytanie, pozostające w mocy również w kolejnych rozdziałach, dotyczące strony technicznej wykonywania pomiarów. W jaki sposób Autor powraca wielokrotnie do tych samych, wcześniej badanych kondensatów, które są przecież rozmieszczone przypadkowo na próbce, której powierzchnia chyba nie była w żaden sposób strukturyzowana, pokrywana znacznikami, etc. (przynajmniej nie natrafiłem na taką informację w tekście)?
- Przy opisie rys. 4.3 dla pobudzania poniżej progu kondensacji, Autor wspomina (początek str. 20), że po włączeniu pola magnetycznego widać wyraźnie różnice w obsadzeniu dolnych gałęzi polarytonowych w obu polaryzacjach, na korzyść tej niżej energetycznej. Jednak dla indukcji magnetycznej $+2T$, ta różnica wydaje się być słabo widoczna, w przeciwieństwie do przypadku $-2T$. Dlaczego?



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

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

wppt.kfd@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



- W rozdz. 4.2 o wyznaczaniu stałej sprzężenia, jednym z rezultatów pośrednich jest oszacowanie koncentracji manganu w studniach kwantowych. Uzyskano wartości ok. 1 %, czy nawet powyżej, które zostały skomentowane jako dobra zgodność z tym co wiadomo na podstawie warunków wzrostu. Ale w Tabeli 3.1 podano, że w próbce MC-S było zaledwie 0.5% Mn, a chyba na tej właśnie próbce dokonano wspomnianej analizy. Z czego wynika ta rozbieżność?

W kolejnym rozdziale Autor bada szczegółowej własności pułapkowanych kondensatów, głównie pod kątem wybrania dwóch blisko przestrzennie sąsiadujących, oddzielonych wystarczająco niską barierą potencjału, aby możliwy był przepływ polarytonów pomiędzy nimi i zademonstrowanie efektów nieliniowych. Te zaś są niezbędne do ewentualnego zastosowania takich układów w sieciach neuronowych. Do weryfikacji eksperymentalnej skorzystano z możliwości niezależnego, nierezonansowego pobudzania każdego ze sprzężonych kondensatów za pomocą dwóch wiązek laserowych. Pokazano między innymi, że zarówno kierunek jak i wydajność przepływu kondensatów (polarytonów) pomiędzy takimi dwoma pułapkami można modyfikować za pomocą energii impulsów laserowych poszczególnych wiązek pobudzających. Zademonstrowano także efekt interferencji w przypadku dwóch kondensatów płynących w przeciwnych kierunkach, który może również być sterowany za pomocą zmiany energii impulsów pobudzających oraz poprzez zmianę czasu opóźnienia pomiędzy impulsami obu wiązek laserowych (i stąd też opóźnienia w powstawianiu i zaniku obu kondensatów). Tutaj ponownie nasuwa się pytanie o kontrolę rozdzielczości przestrzennej pobudzania, aby wykluczyć możliwość niepożądanego wbudowania kondensatu „sąsiedniego”, oraz o powtarzalność różnych, kolejnych pomiarów (najpewniej wykonywanych w innych dniach) na dokładnie tych samych pułapkach? Dodatkowo, być może Doktorant zechce też na obronie zaprezentować wykresy z rys. 5.6 w skali logarytmicznej dla osi intensywności, gdyż w skali liniowej dla czytelnika wcale nie jest takie jednoznaczne, że nie widać zachowania progowego na rys. 5.6(b)?

Rozdział szósty traktuje o wytwarzaniu, za pomocą trawienia skupioną wiązką jonów (*ang. Focused Ion Beam – FIB*), i charakteryzacji optycznej rezonatorów trójwymiarowych w postaci pionowych mikrokolumn ze zwierciadłami Bragga. Jak pisze Autor, głównym celem tych prac było obniżenie gęstości progowych na kondensację polarytonów, w stosunku do tych lokalizowanych na przypadkowych fluktuacjach (defektach) potencjału fotonicznego planarnej wnęki, co zresztą uzyskano. Uważam jednak, że znacznie ważniejszym jest aspekt praktyczny tych prac, gdyż zastosowanie takiego rozwiązania pozwoliłoby przełożyć zjawiska fizyczne zaobserwowane przez Doktoranta dla kondensatów o własnościach losowych, i wynikające z nich konsekwencje aplikacyjne, na układ, którego własności mogą być w dużej mierze odpowiednio zaprojektowane, i co więcej w technologii powtarzalnej, czy wręcz deterministycznej, która w dodatku może być skalowalna. Muszę przyznać,



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

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

wppt.kfd@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



że spodziewałem się iż kolejne rozdziały będą dotyczyły badania i praktycznego wykorzystania takich właśnie mikrorezonatorów, co jednak nie nastąpiło. Następne rozdziały nadal dotyczyły wyłącznie kondensatów wytwarzanych we wnęce planarnej zlokalizowanych na przypadkowych niejednorodnościach. Ciekawym byłoby usłyszeć czy Doktorant podejmował próby analogicznych badań dla kondensatów w mikrokolumnach i dlatego przykłady takich wyników nie znalazły się w rozprawie. To oczywiście nie umniejsza znaczeniu zawartych w pracy wyników ani nawet znaczeniu zademonstrowanego potencjału aplikacyjnego, ale w obliczu powyższego rozdział 6 zasadniczo niewiele wniósł do głównego nurtu rozprawy. Bez szkody dla całej pracy można chyba było z tej części zrezygnować całkowicie, szczególnie, że główny sukces tych badań, w moim odczuciu, leży po stronie technologii wytwarzania mikrokolumn za pomocą FIB, w czym najwyraźniej pan mgr Mirek nie uczestniczył osobiście, i które zresztą wykonane były w innym ośrodku – poza macierzystą jednostką Doktoranta.

Rozdział siódmy pokazuje możliwość powstawania wirów kwantowych w badanych kondensatach, które w odróżnieniu od znanych z literatury przykładów i z powodu ich „wzmocnionych” własności spinowych pozwalają na tworzenie także tzw. półwirów. Dzięki zastosowaniu dedykowanego układu pomiarowego na bazie interferometru Macha-Zendera możliwe było zaobserwowanie w mapach rozkładu przestrzennego fazy istnienia par takich półwirów o przeciwnych ładunkach topologicznych (kierunkach zmiany fazy) dla obu polaryzacji kołowych. Pokazano, że odległość między nimi zależy od energii impulsów pobudzających, a za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego można doprowadzić do anihilacji takich wirów.

Kolejny króciutki rozdział prezentuje metodę badania zmian fazy kondensatu polarytonowego wzbudzanego rezonansowo w eksperymencie transmisyjnym, w którym informację o fazie uzyskuje się z pomiarów interferencyjnych w układzie podobnym do tego zastosowanego w rozdziale poprzednim. Dzięki temu możliwe było wyznaczenie przestrzennych map amplitudowych i fazowych. Śledzenie różnic w fazie w różnych położeniach na próbce pokazało, że różnica ta nie jest linową funkcją intensywności pobudzania, a faza zawiera w sobie informację o oddziaływaniu polaryton-polaryton w kondensacie.

Rozdział dziewiąty opisuje możliwość wzmocnienia emisji z kondensatu poprzez sprzężenie zwrotne wykorzystujące emitowane przez kondensat fotony. Dzięki takiej konfiguracji dodatkowe wzbudzenie z pętli sprzężenia zwrotnego jest z założenia rezonansowe o długości fali znacząco różnej od długości fali wiązki laserowej odpowiedzialnej za nierezonansowe wbudowanie polarytonów i kondensatu. Celem tego eksperymentu było generowanie nieliniowości, które mogłyby być wykorzystane w obliczeniach neuromorficznych. Zaobserwowano, że powtórne wykorzystanie emitowanych fotonów powoduje obniżenie progu pobudzania niezbędnego do zaobserwowania efektów nieliniowych, a nieliniowy wzrost silnie



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

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

wppt.kfd@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



zależy od opóźnienia czasowego pomiędzy pobudzającym impulsem laserowym, a impulsem emisyjnym pochodzącym z pętli sprzężenia zwrotnego. Uzyskano nawet podwojenie intensywności w pobliżu progu kondensacji.

Kolejne dwa rozdziały pokazują możliwość praktycznej implementacji diskutowanych efektów nieliniowych w kondensatach w sieciach neuronowych. Rozdział dziesiąty dotyczy przykładu realizacji binarnej sieci neuronowej opartej o bramkę logiczną typu XOR, na przykładzie zastosowania do rozpoznawania pisma odręcznego. Do konstrukcji bramki wykorzystano dwa sprzężone, sąsiadujące ze sobą kondensaty, generowane optycznie przez dwie niezależne wiązki laserowe, gdzie nieliniowość oddziaływania mogłaby być regulowana przez zmianę odległości pomiędzy kondensatami (defektami fotonicznymi, na których są spułapkowane). Zaś sama liniowa klasyfikacja wykonywana była komputerowo, co też definiuje ograniczenia na szybkość i wydajność energetyczną całego podejścia. Dlatego też w dalszej części rozdziału zaprezentowano możliwość realizacji w pełni optycznych bramek XOR w oparciu o mieszanie optycznego sygnału wejściowego z dwóch impulsowych laserów pompujących z wyjściowym, który stanowiła emisja z kondensatu. Takie rozwiązanie oferuje poprawę wydajności energetycznej w stosunku do poprzedniego. Jedną z niewielkich niejasności na jakie napotkałem w tej części jest pozorna zmiana położenia kondensatu na rys. 10.3 w kolejnych etapach pobudzania – na rysunku (c) to położenie zdaje się różnić od pozostałych. Jak to rozumieć?

W rozdziale jedenastym przedstawiono realizację sieci neuronowej z kodowaniem w domenie czasowej, dzięki wykorzystaniu zależnej od czasu nieliniowości oddziaływań/sprzężenia dwóch oddzielonych w czasie kondensatów z jednym, wspólnym rezerwuarem ekscytonowym. Kondensaty wytwarzane są za pomocą następujących po sobie w czasie wzbudzeń impulsowych, a opóźnienie między nimi może być regulowane. Pierwszy przychodzący impuls generuje (nierezonansowo) rezerwuuar ekscytonów, który zanika z czasem, kreując w ten sposób zależne od czasu wzmocnienie dla tworzenia polarytonów/kodensatu powstających po przybyciu impulsu drugiego. Dla tak wybranych danych optycznych dokonano klasyfikacji liniowej (komputerowo) i pokazano stuprocentową dokładność bramki XOR i wydajność energetyczną na poziomie 2 pJ, oraz czas operacji krótszy niż 450 ps. Na zakończenie, dla sieci neuronowej opartej na takich bramkach zademonstrowano zadanie rozpoznawania mowy z dokładnością klasyfikacji ok. 96%. Bez wątpienia wyniki tego rozdziału i poprzedniego są największym dotychczasowym osiągnięciem pana mgr Rafała Mirka, istotnym zarówno naukowo jak i aplikacyjnie, co znalazło odzwierciedlenie w dwóch publikacjach na ten temat (w *Physical Review Applied* i w *Nano Letters*), w których pan mgr Mirek jest pierwszym autorem, oraz jednej aplikacji patentowej, której jest współautorem.

W ramach podsumowania w rozdziale dwunastym Autor omawia swoje rezultaty dotyczące sieci neuronowych na bazie polarytonów na tle innych rozwiązań



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wrocławska
Wydział Podstawowych Problemów
Techniki
Katedra Fizyki Doświadczalnej
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

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

wppt.kfd@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



proponowanych w literaturze i pokazuje, że ich potencjał aplikacyjny tkwi w dużej wydajności. Na zakończenie roztacza dalsze możliwości zastosowań oraz możliwości udoskonalania rozważanego układu fizycznego czy też uczynienia go bardziej praktycznym poprzez np. wykorzystanie polarytonów ekscytonowych kondensujących w temperaturze pokojowej.

Rozprawa jest w ogólności napisana poprawnie merytorycznie i pod względem redakcyjnym (może poza nieco niedbałym tłumaczeniem streszczenia na język polski), a omawiane zagadnienia są przedstawione ciekawie, przejrzystie i przystępnie. Autor nie ustrzegł się kilku drobnych usterek edytorskich i błędów językowych, niewpływających jednak na poprawny odbiór. Dla przykładu, brak jest opisu osi poziomej na rys. 5.19. Większość pracy napisana jest w pierwszej osobie liczby mnogiej, co jest najprawdopodobniej nieco automatycznym przeniesieniem stylu z publikacji (wieloautorskich i anglojęzycznych), ale w przypadku rozprawy doktorskiej mogłoby zostać odebrane niejednoznacznie. Na szczęście analiza warstwy merytorycznej nie pozostawia wątpliwości co do tego, które części prac badawczych były realizowane przez Doktoranta.

W podsumowaniu chciałbym zatem podkreślić, iż wymienione powyżej uwagi i drobne niedociągnięcia redakcyjne w żadnej mierze nie obniżają wysokiej wartości naukowej uzyskanych przez pana mgr. Rafała Mirka rezultatów. Wyniki te wnoszą nie tylko nową wiedzę na temat własności polarytonów ekscytonowych wytwarzanych w strukturach z półmagnetycznych materiałów związków II-VI i efektów nieliniowych w takich układach, ale mają też znaczenie praktyczne i potencjał aplikacyjny, głównie w kontekście zastosowań związanych z obliczeniami z wykorzystaniem optycznych sieci neuronowych. Rozprawa doktorska pana mgr. Rafała Mirka potwierdza jednoznacznie, że posiada on ugruntowaną ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie nauki fizyczne i dowodzi, że Autor ma zdolność oryginalnego rozwiązywania problemów naukowych. Rozprawa spełnia tym samym wymogi określone w art. 187 ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018 r. (z późn. zm.), dlatego też z pełnym przekonaniem wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Biorąc zaś pod uwagę bardzo wysoki poziom naukowy rozprawy, ogrom uzyskanych rezultatów i ich duże znaczenie w skali międzynarodowej, oraz fakt, że część z nich została opublikowana w renomowanych czasopismach naukowych i stała się podstawą aplikacji patentowej, z pełnym przekonaniem wnioskuję także o wyróżnienie rozprawy.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

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

wppt.kfd@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