



dr hab. inż. Maciej Pieczarka, prof. PWr
Zespół badawczy *Quantum Fluids in Photonic Devices*
Katedra Fizyki Doświadczalnej
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
maciej.pieczarka@pwr.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Marcina Muszyńskiego pod tytułem „Self-Organizing Photonic Potentials of Different Dimensions in Liquid Crystal Microcavities with Spin-Orbit and Light-Matter Couplings”

Przedstawiona praca doktorska mgr. Marcina Muszyńskiego została zrealizowana pod opieką profesora UW, dr. hab. Jacka Szczytko na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w Instytucie Fizyki Doświadczalnej. Praca dotyczy badań eksperymentalnych nad zjawiskami laserowania fotonów i kondensacji polarytonów w układach mikrownęk optycznych wypełnionych ciekłymi kryształami z dodatkiem ośrodka aktywnego optycznie, w których możliwa była eksploracja możliwości tworzenia samoorganizujących się periodycznych potencjałów dla światła oraz potencjałów lokalizujących mody optyczne we wnętrzu. Próbkę badaną w pracy zostały wykonane we współpracy z Wojskową Akademią Techniczną w Warszawie oraz laboratoriami IBM w Zurychu, w Szwajcarii.

Sylwetka naukowa Autora na podstawie załączników C i D rozprawy

Pan Marcin Muszyński posiada bardzo bogaty dorobek naukowy, świadczący o jego ponadprzeciętnej aktywności oraz wszechstronności w swojej działalności eksperymentatora. W swoim dorobku posiada dziewięć prac opublikowanych w międzynarodowych czasopismach (w trzech z nich jest pierwszym autorem) oraz jeden komunikat pokonferencyjny. Autor wykazał trzy prace wysłane do publikacji i będące w trakcie procesu recenzji (dwie prace umieszczone są na serwisie arXiv). Na liście publikacji umieszczone są również dwie prace będące dopiero w przygotowaniu, które są ważne w kontekście pracy doktorskiej z uwagi na zakres tematyczny. Sześć publikacji z całej listy dotyczy bezpośrednio tematu pracy doktorskiej.

Należy podkreślić szeroki zakres tematyczny opublikowanych prac kandydata. Oczywiście, w większości dotyczą one tematyki doktoratu oraz tematyki grupy badawczej, w której pracował podczas studiów doktoranckich. Są to właściwości pasywnych i aktywnych mikrownęk optycznych z ciekłymi kryształami, efekty kondensacji i laserowania, jak również efekty związane z otwartością badanego układu kwantowego, czyli tzw. efekty w ramach fizyki niehermitowskiej. Warto jednak odnotować publikacje poza tą główną tematyką, czyli badania spektroskopowe trionów w studni kwantowych na bazie ZnO (praca przed studiami doktorskimi) oraz pracę na temat wytwarzania nanowstążek grafitowych za pomocą cięcia wiązkami jonowymi, które udowadniają wyżej wspomnianą wszechstronność pana Muszyńskiego w prowadzeniu badań spektroskopowych oraz prac technologicznych.

Ponadto, pan Muszyński występował wielokrotnie z komunikatami ustnymi na temat swoich wyników na renomowanych międzynarodowych konferencjach dotyczących fizyki półprzewodników, polarytonów ekscytonowych, mikrownęk oraz ciekłych kryształów. Należy zaznaczyć, iż jeden z wykładów został wygłoszony na zaproszenie, choć można



domniemać, iż doktorant zastępował w tym w wypadku swojego promotora. Niemniej jednak nie ma wątpliwości, iż dorobek naukowy Pana Muszyńskiego jest bardzo wyróżniający na tym etapie kariery naukowej i on sam stał się rozpoznawalnym naukowcem w dziedzinie, z uwagi na wielokrotne wystąpienia na ważnych konferencjach oraz na liczne cytowania jego prac, które opublikował w czasopismach z najwyższej międzynarodowej półki.

Struktura i forma rozprawy

Praca doktorska mgr. Muszyńskiego jest napisana w języku angielskim i składa się z dziewięciu rozdziałów, czterech dodatków/załączników, spisanych na 196 stronach w formacie A4. Praca zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim oraz podziękowania. Rozdziały 1 i 2 dotyczą wprowadzenia do tematu rozprawy oraz motywacji do podjęcia badań w tym kierunku, rozdział 3 opisuje metody badawcze i zastosowane metody symulacji numerycznych. Następnie, rozdziały od 4 do 8 stanowią część zasadniczą rozprawy i przedstawiają po kolei wyniki badawcze kolejnych projektów składających się na całość pracy. Każdy z tych rozdziałów kończy się podsumowaniem dotyczącym danego projektu. Cała rozprawa podsumowana jest w rozdziale 9, po którym znajdują się dodatki A-E, w których zawarto dodatkowe badania wstępne rozwinięte podczas studiów doktoranckich, które stanowią podstawę i perspektywę do dalszych badań. W dodatkach zawarto również główne informacje nt. kariery naukowej kandydata. Praca zakończona jest bogatą bibliografią, na którą składa się aż 329 pozycji.

Praca jest napisana zrozumiałym językiem i nie zawiera istotnych błędów językowych, czy mankamentów edytorskich. Zdarzają się w formatowaniu akapity będące pojedynczym zdaniem, co zapewne jest pomyłką edytorską. Kilka drobnych błędów zauważonych przez ze mnie jest wymienionych w dalszej części recenzji. Praca jest napisana z dobrym ciągiem logicznym. Z uwagi na bogactwo poruszonych przez Kandydata tematów, obrano formę osobnych, zamkniętych rozdziałów, które dotyczą poszczególnych projektów rozwijanych podczas studiów doktoranckich. Układ ten przypomina formę cyklu publikacji, jednakże rozumiem, iż nie wybrano takiej formy, z uwagi na toczące się procesy recenzycyjne ważnej części prac dotyczących rozprawy. Chciałbym podkreślić, iż ilość przedstawionych w pracy oryginalnych wyników naukowych z powodzeniem mogłaby stanowić podstawę nie jednej, a dwóch rozpraw doktorskich.

Ocena naukowej treści rozprawy

Praca mgr. Muszyńskiego dotyczy bardzo aktualnego tematu badawczego, czyli laserowania oraz kondensacji polarytonów ekscytonowych w zewnątrzsterowanych potencjałach i syntetycznych polach cechowania. Pan Muszyński zrealizował swoją pracę doktorską w grupie, która zapoczątkowała tę tematykę około siedem lat temu i stała się absolutnym liderem na arenie międzynarodowej. Sam Autor zauważa we wstępie rozprawy, iż gdy rozpoczynał prace nad swoim doktoratem tylko grupa na Uniwersytecie Warszawskim prowadziła badania nad takimi układami, natomiast dziś, po kilku latach, wiele wiodących grup badawczych prowadzi podobne badania, co świadczy o gwałtownym rozwoju i zainteresowaniu dziedziną ciekłokrystalicznych mikrownęk optycznych i zjawiskach kolektywnych w nich obserwowanych.

Pan Muszyński podjął się ambitnego celu badawczego, jakim było zintegrowanie nietrywialnych optycznych potencjałów przestrzennych wewnątrz mikrownęk na bazie ciekłych kryształów. Jest to temat pionierski, ponieważ jeszcze kilka lat temu nie było żadnych publikacji w tym temacie, a badania prowadzone były głównie nad mikrownękami planarnymi, ze szczególnym uwzględnieniem efektywnego oddziaływania spin-orbita dla fotonów. Autor przedstawia zwięźle tę perspektywę w Rozdziale 1 pracy, w której wymienia główne motywacje podjętego tematu badawczego oraz opisuje obecny stan wiedzy.



Odwołuje się również do dokonań wcześniejszych doktorantów w grupie, na bazie których rozpoczął swoje badania nad tymi wnękami.

Rozdział 2 przedstawia tzw. „przydatne koncepcje”, czyli wprowadzenie merytoryczne do tematyki pracy i podstawowe pojęcia użyteczne do zrozumienia zasadniczej części badawczej pracy. Autor w sekcji 2.1 rozpoczyna od ogólnego wprowadzenia do tematyki ciekłych kryształów i komórek ciekłokrystalicznych. Porusza on w przystępny sposób wszystkie definicje, koncepcje i zasadę działania komórek ciekłokrystalicznych. Uważam tę część za bardzo przydatną, szczególnie dla czytelników nie będących blisko tego tematu.

W sekcji 2.2 Autor wprowadza czytelnika w temat planarnych mikrowniek optycznych na bazie rozproszonych zwierciadeł Bragga. Podstawy działania mikrowniek są omówione w sposób przystępny, wręcz dydaktyczny, oraz poparte są bardzo schludnymi wizualizacjami wszystkich koncepcji. Wyjaśnione są podstawowe pojęcia. Następnie wprowadzone zostają trudniejsze koncepcje związane z definicją pseudospinu i polaryzacją światła w mikrownękach. W sposób zwarty przedstawione zostają pojęcia efektywnego oddziaływania spin-orbita dla światła w mikrownękach optycznych.

Sekcja 2.3 dotyczy wprowadzenia do oddziaływania światło-materia w mikrownękach optycznych i koncepcji kondensacji Bosego-Einsteina. Niestety, w porównaniu do dwóch poprzednich sekcji ta ustępuje swoim poziomem oraz szczegółowością opisu. Autor poprawnie przedstawia zakres słabego i silnego sprzężenia światło-materia i wprowadza koncepcję kwazicząstki polarytonu ekscytonowego. Następnie bardzo pobieżnie przedstawione są koncepcje związane z kondensacją Bosego-Einsteina w kontekście polarytonów. Autor opisuje jedynie minimum, nie rozwija żadnego z wątków, który jest konieczny do opisu i interpretacji jednej z ważniejszych części zasadniczych pracy, czyli rozdziału 5. Autor nie porusza tematu porównania zjawiska kondensacji w układzie zamkniętym i otwartym, a wyjaśnienie procesu kondensacji opiera na porównaniu termicznej fali de Broglie’a (czyli konceptu termodynamicznego) i jakościowego opisu obsadzeń w przestrzeni wektora falowego. Niezbyt poruszona jest kwestia oddziaływań, nadciekłości i komplikacji z tą koncepcją w układach otwartych. Przemilczany jest istotny aspekt wpływu wymiarowości układu na właściwości i charakter przemiany fazowej kondensatu Bosego-Einsteina. Są to kluczowe koncepcje w kontekście układu dwuwymiarowego jakim są polarytony w mikrownękach planarnych. W niniejszej pracy jest to jeszcze bardziej istotne, z uwagi na oddziaływanie spin-orbita modyfikujące dyspersje jednocząstkowe oraz na modyfikację gęstości stanów w układach periodycznych. Autor kończy rozdział osobistym komentarzem o używaniu nomenklatury kondensatu Bosego-Einsteina w literaturze w kontekście zjawisk obserwowanych w mikrownękach polarytonowych bardziej w formie marketingu i promocji, niż faktycznie odzwierciedlającej zaobserwowane zjawiska fizyczne. Taki nieprofesjonalny komentarz nie powinien mieć miejsca w rozprawie doktorskiej. Szczególnie niefortunne jest to w sytuacji, w której sam Autor rozprawy nie prowadzi dogłębnej dyskusji tych zjawisk oraz sprawia wrażenie nadużywania nazwy kondensacji Bosego-Einsteina w kontekście późniejszego rozdziału 5. bez zaprezentowania niezbitych dowodów oraz dodatkowych informacji pozwalających na tak ścisłą interpretację obserwowanych zjawisk. Na koniec rozdziału, w sekcji 2.4, Autor przybliży koncepcję kryształu fotonicznego i periodycznych potencjałów fotonicznych. Moim zdaniem ta sekcja lepiej by pasowała przed sekcją dotyczącą oddziaływania światło-materia, jednak nie jest to istotny mankament.

Rozdział 3. stanowi bardzo rzetelne opisanie metodologii użytej w pracy badawczej Autora podczas studiów doktoranckich. Opisane są podstawowe metody charakteryzacji próbek oraz bardziej skomplikowanych eksperymentów optycznych. Czytelnik może dowiedzieć się o podstawowych metodach, jak również o szczegółach laboratoryjnych, takich jak metody kalibracji układu. Autor opisuje też rodzaje próbek badanych podczas studiów doktoranckich, przy czym podaje imponującą liczbę przetestowanych próbek podczas ostatnich kilku lat. Pozwala to na wyobrażenie sobie ogromnej ilości pracy włożonej w badania przez Autora w celu uzyskania zaprezentowanych wyników. Dodatkowo, w tym rozdziale Autor po krótko opisuje metody symulacji numerycznej mikrowniek optycznych za pomocą



metody macierzy przejścia Beeremana oraz metody numerycznej elementów skończonych do obliczenia jednocząstkowych funkcji falowych. Rozdział zakończony jest ścisłym opisem wkładu Autora w przedstawione badania oraz wkładu innych uczestników tych badań.

Od rozdziału 4. rozpoczyna się część zasadnicza pracy doktorskiej, w której Autor opisuje swoje główne dokonania badawcze. W tym rozdziale Autor badał mikrownąkę wypełnioną ciekłym kryształem w fazie nematycznej, domieszkowanym aktywnym optycznie barwnikiem laserowym P580. Wytworzono w ten sposób prototyp przestrajalnego lasera zasilanego zewnętrznym pompowaniem optycznym. Autor przedstawia wszystkie charakterystyki laserowe oraz demonstrowanie przestrajania lasera w sposób ciągły w szerokim zakresie długości fal, który ograniczony był w zasadzie tylko widmem wzmocnienia optycznego oferowanego przez zastosowany barwnik. Jest to bardzo istotna właściwość takiego urządzenia, które w przyszłości mogłoby być podstawą lasera przestrajalnego bez przeskakiwania modów (mode hopping) i uważam, że takie rozwiązanie mogłoby mieć zastosowanie w przyszłości w na rynku komercyjnym. Autor przedstawia również bardzo ciekawą demonstrację laserowania w trybie rezonansu RDSOC, w którym laserowanie odbywa się z dwóch dolin w przestrzeni wektora falowego z różnymi polaryzacjami kołowymi. W ten sposób urządzenie emituje dwie spolaryzowane wiązki jednocześnie. Efekt ten jest podstawą obserwacji helisy spinowej, czyli okresowej modulacji stopnia polaryzacji w przestrzeni rzeczywistej próbki, wynikający z koherentnej interferencji i sprzężenia dwóch wiązek. Na koniec rozdziału autor przedstawia bardzo użyteczne i praktyczne obserwacje na temat wpływu wyjustowania obiektywu na kształt prążków helisy w przestrzeni rzeczywistej i stosunek ich periodu względem odseparowania. Należy podkreślić, iż rozdział przedstawia pierwszą demonstrację takiego efektu spinowego w mikrownąkach z RDSOC.

Rozdział 5 jest niejako rozwinięciem idei z rozdziału 4., aczkolwiek tutaj przestrajalna wnęka działa w zakresie silnego sprzężenia światło-materia. Głównym efektem postulowanym w rozdziale jest obserwacja stanu laserującego, który został zinterpretowany jako nadciężkie ciało stałe (ang. supersolid). W celu uzyskania silnego sprzężenia zmodyfikowano próbkę, w której umieszczono dwie warstwy aktywnego optycznie polimeru MeLPPP. Na początku rozdziału Autor opisuje trudności technologiczne związane z wykonaniem takiej próbki oraz badaniami nad nią. Następnie, Autor demonstrowanie silne sprzężenie światło materia, tj. efekt nieprzecinania się stanów energetycznych, w sposób pośredni, z uwagi na brak możliwości detekcji sygnału polarytonów w z górnych gałęzi. Zademonstrowano zmianę masy efektywnej gałęzi dolnej w funkcji odstrojenia, co uważam za bardzo pomysłowe i praktyczne podejście do problemu.

Zasadniczy wynik rozdziału rozpoczyna się od przedstawienia tożsamy eksperymenty do rozdziału 4., czyli efektu laserowania wraz z niewielkim przesunięciem energetycznym, który interpretowany jest jako efekt oddziaływań między polarytonami w kondensacie. Przedstawione są pomiary koherencji czasowej i przestrzennej, jednakże ich analiza nie jest dość szczegółowa. Powyższe wyniki pozwalają na interpretację, iż udaje się uzyskać dynamiczny i nierównowagowy kondensat polarytonowy, niemniej jednak Autor interpretuje swoje dane jako kondensat Bosego-Einsteina i konsekwentnie używa tej nazwy w rozdziale. Sądzę, że jest to nadużycie, z uwagi na brak przedstawienia dowodów termalizacji gazu, analizy ilościowej gęstości w przestrzeni fazowej oraz potencjału chemicznego i jego relacji do parametru oddziaływań polaryton-polaryton. Warto zaznaczyć, że obserwowane efekty są poza równowagą termodynamiczną oraz nie są otrzymane w stanie stacjonarnym, ponieważ eksperymenty są wykonane w trybie impulsowym. W dalszej części przedstawione są eksperymenty kondensacji polarytonowej w zakresie rezonansu RDSOC, w którym zachodzi emisja z dwóch spolaryzowanych kołowo minimów energetycznych przestrzeni wektora falowego. Autor przedstawia efekt tożsamy to helisy spinowej, aczkolwiek tym razem można nakreślić analogię do nadciężkiego ciała stałego, z uwagi na spodziewaną niezerową nieliniowość w oddziaływaniach polaryton-polaryton. Zademonstrowany jest jednoznaczny pomiar modulacji w przestrzeni rzeczywistej oraz odpowiednie właściwości polaryzacyjne (identyczne do rozdziału 4.). Następnie przedstawiony jest efekt spontanicznego





łamania symetrii ciągłej na periodyczną. Zostało to zmierzone za pomocą obrazowania pojedynczych realizacji kondensatu i monitorowania fazy prążków interferencyjnych. Świadczy to o znikomym wpływie nieporządku na efekt interferencji w kondensacie, ale daleki byłbym od jednoznacznego określenia tego efektu jako dowodu na nadciekłość. Jest to pionierski wynik o bardzo dużym znaczeniu dla nauki. Jednakże wadze takiej obserwacji nie dorównuje dość ograniczony zestaw przedstawionych danych i niepełna dyskusja w tym rozdziale. Odnosząc się do komentarza Autora w rozdziale 2.4 na temat nadużywania nazewnictwa kondensacji Bosego-Einsteina w literaturze, w moim odczuciu w tym rozdziale sam Autor jej nadużywa. Sądzę jednak, że przy odpowiednim uporządkowaniu nomenklatury użytej w dyskusji na temat samego kondensatu oraz przy bogatszym zbiorze dowodów, uzyskany wynik analogu nadciekłego ciała stałego stanie się bardzo ważnym wkładem w fizykę nierównowagowych kondensatów bozonowych.

Rozdział 6. jest pierwszym, w którym do wnęki wprowadzona jest periodyczna modulacja współczynnika załamania. Autor wraz ze współpracownikami opracował wnękę wypełnioną ciekłym kryształem w fazie ULH, której to ułożenie w formie poziomej helisy modyfikuje periodycznie wnękę w jej płaszczyźnie. Użyto tutaj uporządkowania z pojedynczym i podwójnym okresem (próbki typu A i B). Z ogromną przyjemnością czyta się ten rozdział, z uwagi na bardzo bogaty zbiór danych, jednoznaczną interpretację oraz bardzo wysoką jakość analizy danych. Autor w szczegółach prezentuje efekt periodycznej modulacji w postaci bezpośredniej obserwacji tworzenia się pasm w przestrzeni wektora falowego. Następnie demonstruje przestrajalność struktury pasmowej w funkcji przyłożonego napięcia. W tychże próbkach zademonstrowano również efekt wewnątrz pasmowego mieszania stanów tej samej parzystości, w formie charakterystycznych wzorów polaryzacyjnych. Przedstawiono efekt laserowania oraz propagacji w przestrzeni rzeczywistej. Rozdział kończy się charakterystyką defektów w takiej strukturze pasmowej. Jeden typ był deterministycznie tworzony przez selektywne podgrzanie struktury skupionym laserem, drugi tym zachodził na naturalnej granicy między dwoma kierunkami uporządkowania ULH we wnękę. Autor prowadzi spekulację nad możliwością charakterystyki nietrywialnie topologicznych stanów, jednakże w pracy nie dostarczono ku temu jednoznacznych i wystarczających dowodów. Rozdział ten stanowi pewną całość, czego dowodem jest opublikowana na jego podstawie praca w bardzo wpływowym czasopiśmie.

Rozdział 7. jest rozwinięciem badań nad defektami fotonicznymi w mikrownękach ciekłokrystalicznych. W tym projekcie próbki zostały przygotowane przez technologów w specjalny sposób, by wymusić tworzenie się wewnątrz wnęki zlokalizowanych i nietrywialnych defektów w ciekłym kryształach, które nazywane są toronami. Autor demonstruje nietypową strukturę modów w nich związanych oraz wpływ rozmiaru toronu na energie modów i ich kształt. Szczególnie wartościową i interesującą jest właściwość stanu podstawowego, który niesie ze sobą niezerowy moment pędu i nietrywialną strukturę polaryzacyjną. Autor charakteryzuje go w najmniejszych detalach a następnie demonstruje akcję laserową z tego nietypowego modu oraz przedstawia dowody na niesiony przez emitowaną wiązkę laserową niezerowy moment pędu. Autor nazywa ten stan laserujący optycznym analogiem poziomu Landaua, jednak brakuje mi tutaj jasnego wytłumaczenia tej analogii (prócz samego momentu pędu) oraz charakterystyki pola cechowania kształtującego ten mod. Mimo to, uważam uzyskanie takiego efektu za wielce ciekawe i wartościowe. Rozdział zakończony jest charakterystyką samoorganizujących się sieci toronowych, które, przy odpowiednio gęstym upakowaniu, pozwalają na stworzenie pasm na bazie sprzęgania wyżej wymienionych nietrywialnych modów optycznych. Jest to z pewnością kierunek wart dalszego rozwijania, ponieważ kryje w sobie mnogość nowych, niespotykanych dotąd efektów. Autor to wyraźnie to podkreśla, kończąc przedstawieniem wstępnych wyników emisji z sieci toronowej w próbce z obszarem aktywnym z MeLPPP.

Ostatni rozdział zasadniczy, opisuje optyczną charakterystykę trójwymiarowego kryształu fotonicznego naturalnie wytworzonego w fazie niebieskiej ciekłego kryształu. Autor wykorzystał metodologię stosowaną w spektroskopii mikrowną optycznych w



przestrzeni wektora falowego i zastosował je do pełnego zobrazowania trójwymiarowych pasm w kryształach, które znane są w literaturze jako wzory Kossela. Scharakteryzowano w ten sposób w szczególności uzyskany naturalny trójwymiarowy kryształ fotoniczny. Zastosowanie tej techniki może być bardzo wartościowe dla społeczności badającej ciekłe kryształy oraz kryształy fotoniczne. Autor dalej przedstawia laserowanie w kierunkach skośnych w tej strukturze i demonstrowa wpływ orientacji wiązki wzbudzającej na kierunkowość obserwowanego laserowania, gdy struktura domieszkowana jest odpowiednim barwnikiem aktywnym. Rozdział zakończony jest zintegrowaniem uzyskanego naturalnego kryształu fotonicznego z dodatkową mikrowną optyczną. Okazało się jednak, że uzyskane właściwości optyczne mogły być zamodelowane uproszczoną strukturą ciekłego kryształu. Zademonstrowano laserowanie z pełnej mikrownki, analogicznie do poprzednich rozdziałów pracy. Rozdział ten pokazuje rzetelnie przeprowadzone badania ciekłego kryształu w fazie niebieskiej domieszkowanego aktywnym barwnikiem.

Bardzo ciekawym zakończeniem pracy jest dodatek A, który przedstawia kolejną ścieżkę zainteresowań Autora, tym razem rozwijając mikrownki z ciekłymi kryształami o dodatkowy wbudowany potencjał pułapujący i periodyczny. Autor rozwija w nim przepis technologiczny na modyfikację zwierciadeł/komórek ciekłokrystalicznych by deterministycznie zmodyfikować je przestrzennie. Autor opanował posługiwanie się trawieniem skupioną wiązką jonów i samodzielnie przygotował podłoża do całej serii próbek. Ilość przedstawionych tutaj danych wstępnych zadziwia, ponieważ wystarczałyby na kolejny pełnoprawny rozdział w pracy oraz dodatkową publikację naukową. Rozumiem jednak, że celem tego dodatku jest usystematyzowanie progresu Autora w przygotowaniu technologii, którą wykorzystywać będą nowe pokolenia badaczy w grupie badawczej polarytonów na UW. Ciekawym wynikiem przedstawionym w dodatkach jest zaobserwowanie oznak termalizacji i kondensacji fotonów w układzie badanej mikrownki domieszkowanej barwnikiem. Jeśli te wyniki się potwierdzą, to stanowią one mogą całkowicie nową odnogą działalności badawczej w tej tematyce.

Uwagi merytoryczne i pytania do rozprawy

W tej części recenzji przedstawiam streszczoną listę uwag i pytań do Autora dotyczących merytorycznych aspektów rozprawy doktorskiej. Kolejność listy przygotowana jest na bazie kolejnych rozdziałów pracy

Rozdział 2

1. Strona 31. Autor przedstawia warunek na zajście słabego lub silnego sprzężenia pomiędzy ekscytonami a fotonami za pomocą pierwszego równania na tej stronie (brak numeracji równania) $\Omega < \frac{1}{2}(\gamma_{ph} + \gamma_{ex})$. Wyrażenie to nie jest zgodne z warunkiem wynikającym z rozwiązania hamiltonianu (17) przedstawionego na następnej stronie. Jaka jest interpretacja tych wyrażeń i które wyrażenie jest poprawne w tym uproszczonym opisie?
2. Strona 31. Autor prezentuje wyrażenie na współczynnik Purcella (również brak numeracji równania), jednakże bez odpowiedniego kontekstu i cytowania literatury. Czytelnik musi domyślać się, czy wyrażenie to jest ogólne, czy jest też wyprowadzone dla szczególnej geometrii wnęki? Dla jakiej sytuacji zacytowane wyrażenie jest poprawne?
3. Strona 35. Autor stwierdza, iż zasilająco-dyssypacyjna natura kondensatów polarytonów ekscytonowych prowadzi do szeregu efektów, takich jak koherencja stanu podstawowego, dalekozasięgowy porządek, czy nadciekłość. Efekty te są unikalnie związane z efektami kondensacji bozonowej niezwiązanej z otwartością układu, tj. ich fundamentalna przyczyna wynika z fizyki równowagowej kondensatu Bosego-Einsteina cząstek oddziałujących i ich statystyki. Proszę Autora o sprecyzowanie tej myśli i podanie przykładów efektów w kondensatach polarytonów ekscytonowych, które faktycznie są



powodowane poprzez właściwości układu otwartego, ich stan nierównowagowy, czyli naturę zasilająco-dyssypacyjną.

Rozdział 3

4. Strona 45. Czy użyty obiekt do detekcji z kompensacją szkła nakrywkowego był dopasowany do grubości okładki komórki ciekłokrystalicznej? Mogłoby to skompensować problemy ze znalezieniem ostrości przy obrazowaniu helisy spinowej.
5. Strona 48. Czy w rzeczywistej kalibracji układu wyznaczono funkcję rozmycia układu? Czy użyta próbka kalibracyjna miała elementy charakterystyczne odpowiednio dużych rozmiarów, by móc skalibrować powiększenie układu i uzyskać ostry obraz elementów?

Rozdział 4

6. Strona 62. Autor podaje dominujący efekt determinujący laserowanie w polaryzacji horyzontalnej jako ułożenie dipoli barwnika aktywnego wzdłuż kierunku ciekłego kryształu. Czy jest to efekt dobrze poznany? Czy zastosowanie innego barwnika (i jakiego) mogłoby zmienić ten efekt?
7. Strona 65 (również Rozdział 5) Autor pokazuje charakterystykę w funkcji mocy pobudzania dla laserowania w pojedynczym modzie poza warunkami rezonansu RDSOC, jednak nie przedstawia pełnej charakterystyki laserowania w próbce działającej w rezonansie RDSOC i jedynie opisuje, iż moc progowa jest tym wypadku większa. Rozprawa doktorska jest dobrym miejscem na pokazanie takich dodatkowych charakterystyk doświadczalnych, które mogą wzmocnić przedstawiane obserwacje, w szczególności w kontekście rozdziału 5.

Rozdział 5

8. Zasadnicze i najbardziej ogólne pytanie dotyczy interpretacji zjawisk opisanych w tym rozdziale. Autor nazywa zaobserwowane zjawisko jako kondensat Bosego-Einsteina polarytonów w mikrownęce ciekłokrystalicznej w warunkach RDSOC, a następnie interpretuje kolektywną interferencję jako fazę nadstałą (nadciekła faza stała). Nie pokazano jednak zachowania z mocą pobudzania (pytanie 7.), by pokazać efekt kondensacji/laserowania polarytonowego. Zastosowano tutaj pobudzanie impulsowe, więc nie sądzę, by można było stwierdzić cokolwiek o stopniu termalizacji powstałego kondensatu, czy o określeniu parametru temperatury kondensatu. Bardziej krytycznym aspektem jest fakt dwuwymiarowości badanego układu. W takich warunkach nie można mówić o kondensacie Bosego-Einsteina w granicy termodynamicznej, czy o dalekozasięgowym porządku. Biorąc pod uwagę oddziaływania, mogłoby to być zjawisko bliższe przejściu klasy BKT. Czy zaobserwowane efekty nie są związane ze skończonym i małym rozmiarem układu? Jaka jest część skondensowana układu (condensed fraction) i jak ma się to do potencjału chemicznego wynikającego z oddziaływań? Czy w tym kontekście można mówić o nadciekłości w 2D układzie otwartym przy RDSOC, w którym (na moją obecną wiedzę) nie zademonstrowano bezpośrednio efektu nadciekłości? Autor podaje argumentację obserwacji wirów optycznych, jednak zaobserwowanie wirów optycznych jest możliwe przy dominującej dyssypacyjnej nieliniowości, np. w laserach półprzewodnikowych i niekoniecznie jest dowodem na efekty nadciekłości układu. Autor prezentuje spontaniczność drugiego łamania symetrii $U(1)$, ale brakuje pokazania spontanicznego łamania symetrii $U(1)$ samego kondensatu bez nadstałości. Bardzo proszę Autora o zbiorcze ustosunkowanie się do interpretacji i uporządkowanie jej, rozwijając przedstawione w rozprawie wyniki oraz używając możliwie dodatkowych argumentów, które nie zostały w pracy omówione i odpowiedzieć choć na część powyższych wątpliwości.
9. Strona 80. Jak mają się wartości zaobserwowanego przesunięcia spektralnego kondensatu polarytonowego do przesunięcia spektralnego w rozdziale 4.? Czy można tutaj mówić o znaczącej nieliniowości w porównaniu z wnątką w słabym sprzężeniu?



10. Strona 80-81. Autor stwierdza, iż zmierzona charakterystyczna długość koherencji przekracza 30 mikrometrów. Nie jest podana żadna analiza jakościowa i ilościowa interferogramu. Na jego bazie można zaobserwować, iż kontrast prążków interferencyjnych zanika w przestrzeni szybciej niż podany pasek skali 20 mikrometrów. Na jakiej podstawie wyznaczono zatem tak powolny zanik przestrzennego stopnia koherencji? Zmierzono również czas koherencji. Czy ten pomiar nie jest ograniczony czasem trwania impulsu emitowanego przez kondensat? Doprecyzowując, jak ma się wyznaczona wartość czasu koherencji do czasu trwania emisji kondensatu po impulsie wzbudzającym?

Rozdział 6

11. Strona 98. Autor nie odnosi się w żaden sposób od wyraźnego nachylenia w energii modów w przestrzeni rzeczywistej, które są również odzwierciedlone nachyleniem w przestrzeni wektorów falowych. Proszę skomentować powód takiej właściwości próbki oraz czy taki przestrzenny gradient energetyczny może mieć wpływ na obserwowane efekty
12. Sekcja 6.4. Autor prezentuje defekt na granicy dwóch orientacji periodyczności wokół spirali ULH. Do jego opisu używa nazwy defektu topologicznego. Autor obserwuje wykładniczy zanik przestrzenny zaobserwowanego zlokalizowanego modu w przerwie energetycznej. Nie jest to w żaden sposób dowód na topologiczny charakter defektu a jedynie na jego zlokalizowanie przestrzenne i ułożenie w spektralne w przerwie. Czy autor może podać argumentację, dlaczego zaobserwowany defekt mógłby być interpretowany w kontekście nietrywialnej topologii? Nie jest to dostatecznie opisane w pracy.

Rozdział 7

13. Strona 121. Czy istnieje hipoteza dlaczego zaobserwowano niezgodność symulacji rozkładu kwadrupola polaryzacyjnego stanu podstawowego w przestrzeni rzeczywistej z obserwacją eksperymentalną?
14. Czy sterowanie rozmiarem toronu za pomocą zewnętrznego napięcia jest odwracalne?
15. Strona 127. Autor stwierdza, iż niezerowy moment pędu niesiony przez stan podstawowy pułapki toronowej może być interpretowany jako laserowanie z analogu z poziomu Landaua. Nie jest to jednak wyjaśnione w przystępny sposób, bądź nie odniesiono się do wcześniejszych hamiltonianów i nie pokazano bezpośrednio tej analogii. Czy można pokazać tę analogię w przystępny sposób?
16. Sekcja 7.4. Dlaczego sieci toronowe organizują się do symetrii sieci trójkątnej? Czy da się zmodyfikować to ułożenie?

Rozdział 8

17. Pytanie dotyczy zasadności enkapsulacji fazy niebieskiej ciekłego kryształu do dodatkowej wnęki planarnej. Sam Autor zauważa, iż zaobserwowane właściwości polaryzacyjne wnęki z fazą niebieską da się zasymulować w uproszczony sposób, zakładając fazę cholesteryczną. Czy faza niebieska nie jest wystarczająco interesująca bez wnęki? Czy periodyczność współczynnika załamania w 3 wymiarach wewnątrz wnęki optycznej zepsuje warunek rezonansu fali pomiędzy zwierciadłami? Fotony można opisać masą efektywną w odpowiednich punktach strefy Brillouina w trójwymiarowym potencjale periodycznym i nie widzę powodu na dodatkowy mechanizm zadający masę efektywną w postaci wnęki Fabry'ego-Perota.

Dodatki

18. Strona 167. Dlaczego analiza intensywności nie jest dokonana powyżej 8 meV, gdzie na widmach nadal można zaobserwować istotną intensywność sygnału? Pozwoliłoby to na dopasowanie widm i wyznaczenie efektywnej temperatury gazu fotonowego i przetestowanie jego ewentualnej termalizacji i kondensacji. Jakie są zatem oszacowania temperatury gazu fotonowego?



Drobniejsze uwagi do pracy

Poniższe uwagi są małej wagi do całości pracy i nie jest konieczne odnoszenie się do nich podczas obrony pracy doktorskiej.

- i. Strona 45. Jest „A half-wave plate mounted on a motorized rotation stage and a fixed polarizer are used to control the excitation energy” a powinno być „A half-wave plate mounted on a motorized rotation stage and a fixed polarizer are used to control the excitation pumping power”.
- ii. Strona 48. Jest „It is also worth emphasizing that the spectrometer itself preferred one linear polarization...” a powinno być np. „It is also worth emphasizing that the spectrometer is characterized by unequal transmission in orthogonal polarizations...”
- iii. Strona 64. Niefortunne/mylące użycie litery Q (wcześniej użyte w kontekście współczynnika jakości) gdy w kontekście przesunięcia dolin energetycznych w przestrzeni wektora falowego użyto innych oznaczeń w dalszej pracy.
- iv. Strona 65. Odnośnik do nieistniejącego rysunku 4.10(f).
- v. Strona 72. Autor pisze „...propagation-driven effects such as superfluidity [81,174], quantized vortices [80,175], synthetic gauge fields [176, 177], quantum fluid behavior [178], and many others.” Żaden z tych efektów nie jest wynikiem propagacji, a interakcji między cząstkami w przybliżeniu średniopółowym. Winno być co „interaction-driven effects”.
- vi. Strona 83. Autor pisze „...the bottom of the vertically polarized mode...” a powinno być „...the energy minimum of the vertically polarized mode...”.
- vii. Strona 95. Użyto oznaczenia H_{cont} , jednakże nie odniesiono się do tego odznaczenia w tekście i nie omówiono różnicy pomiędzy innymi hamiltonianami.
- viii. Strona 95. Literówka: „It assume...”, powinno być „It assumes...”.
- ix. Strona 95. Nieścisłość językowa, powinno być: „whereas the V polarization **degree** (green, along the y axis) remains **spatially** constant.”
- x. Strona 99. Nieścisłość językowa, powinno być „...two bands with **intensity** minima at $k_y = 0...$ ”.
- xi. Strona 99. Podano przez pomyłkę polaryzacje „P” oraz „M”.
- xii. Strona 100. W opisie rysunku 6.9 podano błędny odnośnik do hamiltonianu (3).
- xiii. Strona 103. Nieścisłość językowa „Wherever the V modes are sufficiently deep...”, powinno być „Wherever the V modes reflectivity minima are sufficiently deep...”. Dodatkowo „...where they were easier to estimate” powinno być „...where their energies were easier to estimate”.
- xiv. Strona 114. Literówka „It was propose...”. Powinno być „It was proposed...”.
- xv. Strona 119. Odnośnik do nieistniejącego rysunku 7.1(c).
- xvi. Strona 125. Odnoszono się do niebieskich kwadratów (blue squares) na rysunku, jednakże takich na nim nie ma.

Podsumowanie i ocena końcowa

Przedstawiona rozprawa doktorska mgr. Marcina Muszyńskiego dotycząca bardzo aktualnego i ważnego tematu badawczego zawiera ogromną ilość oryginalnych wyników badawczych. Do najważniejszych wyników opisanych przez mgr. Muszyńskiego w pracy mogę zaliczyć m. in.,

1. Demonstrację przestrajalnego lasera na bazie mikrownęki ciekłokrystalicznej. Obserwację laserowania w trybie rezonansu RDSOC i helisy spinowej. Wyniki opublikowane w ważnym branżowym czasopiśmie *Physical Review Applied*.
2. Obserwację kondensacji polarytonów ekscytonowych w strukturze z polimerem MeLPPP w strukturze wnęki ciekłokrystalicznej. Demonstracja przestrajalności



University Network for Innovation,
Technology and Engineering



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51

Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



- kondensatu oraz obserwacja kondensacji w trybie rezonansu RDSOC. Przedstawienie pionierskich wyników, które można interpretować jako analog nadciekłego ciała stałego. Praca na ten temat jest obecnie w recenzji.
3. Zrealizowanie naturalnego, wbudowanego oraz przestrajalnego potencjału periodycznego w mikrownęce z ciekłym kryształem w fazie ULH. Demonstracja laserowania w takiej strukturze oraz charakteryzacja efektu wewnątrzprzasmowego SOC. Praca została opublikowana i wyróżniona w czasopiśmie *Laser and Photonics Reviews*.
 4. Demonstracja skomplikowanej struktury naturalnych defektów fotonicznych poprzez wytworzenie mikrownęki z toronami. Charakteryzacja właściwości takich zlokalizowanych układów fotonicznych oraz demonstracja laserowania z niezerowym momentem pędu w takim układzie. Demonstracja tworzenia się naturalnej sieci periodycznej na bazie toronów. Praca nie jest obecnie opublikowana
 5. Pełna charakteryzacja właściwości optycznych trójwymiarowego kryształu fotonicznego ciekłego kryształu w fazie niebieskiej, domieszkowanego barwnikiem laserowym. Zademonstrowanie techniki badawczej pełnego obrazowania wzorów Koszela oraz przebadanie kierunkowego laserowania w strukturze. Praca jest obecnie w recenzji.

Przedstawiona praca dokumentuje bardzo dobrze ogólną i szeroką wiedzę teoretyczną mgr. Muszyńskiego w temacie ciekłych kryształów, mikrownęk wypełnionych ciekłymi kryształami, laserowania oraz kondensacji polarytonów ekscytonowych. Pan Muszyński opublikował szereg oryginalnych i przełomowych wyników eksperymentalnych, będących pierwszymi demonstracjami różnych efektów fizycznych, które opisałem powyżej w mojej recenzji. Rozprawa doktorska udowadnia jego pełną samodzielność badawczą, kreatywność oraz kunszt naukowy. Część eksperymentalna pracy nie pozostawia wątpliwości co do wysokiego poziomu opanowanego warsztatu eksperymentatora. Na podkreślenie zasługuje szereg przedstawionych symulacji numerycznych przez pana Muszyńskiego. Nie jest to standardem, by eksperymentator był zarazem biegły w teoretycznym symulowaniu obserwowanych przez siebie zjawisk. Przedstawione w mojej recenzji uwagi i pytania nie umniejszają wysokiemu poziomowi tej pracy. Część moich pytań wynika wprost z ciekawości w temacie przedstawionych pionierskich i przełomowych obserwacji. Pytania dostosowane są również do wysokiego poziomu tej rozprawy. Rozprawa doktorska mgr. Muszyńskiego może stanowić wzorzec dla młodszych adeptów studiów doktoranckich w dyscyplinie nauk fizycznych.

Podsumowując, rozprawa doktorska przedstawiona przez Pana Marcina Muszyńskiego charakteryzuje się wysoką jakością i prezentuje bardzo istotne wyniki o potencjalnie dużym wpływie na społeczność naukową. Praca ta spełnia wszystkie wymagane kryteria stawiane pracom doktorskim określone w art. 190 ust. 2 i art. 183 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. Zm.). Wnioskuje o dopuszczenie pracy do publicznej obrony. Z uwagi na mnogość i wagę naukową przedstawionych wyników badawczych, takich jak pierwsza realizacja przestrajalnych potencjałów optycznych w mikrownękach laserujących oraz obserwacja przesłanek realizacji eksperymentalnej analogu nadciekłego ciała stałego ze światła, zwracam się również z wnioskiem o jej wyróżnienie.

Moneta Kuczyńska