

1. Imię i nazwisko

Barbara Julia Piętka

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

2007 **Doktor nauk fizycznych, Uniwersytet Warszawski, Warszawa, Polska**
2007 **Doktor nauk fizycznych, Université Joseph Fourier, Grenoble, Francja**
Doktorat w ramach polsko – francuskiej umowy o podwójnym dyplomie (co-tutelle).

Tytuł rozprawy doktorskiej: Excitonic Complexes in Natural Quantum Dots Formed in Type II GaAs/AIAs Structures.

Doktorat z wyróżnieniem.

Promotorzy: prof. dr hab. Roman Stępniewski, Uniwersytet Warszawski oraz prof. dr hab. Marek Potemski, National High Magnetic Field Laboratory, CNRS-UGA-UPS-INSA-EMFL, Grenoble, Francja.

2003 **Magister, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego**

Tytuł pracy magisterskiej: Wpływ lokalizacji na rekombinację promienistą w strukturach półprzewodnikowych o obniżonej wymiarowości.

Dyplom z wyróżnieniem.

Promotor: prof. dr hab. Andrzej Wysmołek, Uniwersytet Warszawski.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

od **2010** **Adiunkt na Uniwersytecie Warszawskim, Wydział Fizyki, Zakład Fizyki Ciała Stałego, Warszawa, Polska**

2007 – 2010 **Staż po-doktorski w Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratorium Optoelektroniki Kwantowej, Lozanna, Szwajcaria**

Opiekun naukowy prof. Benoit Deveaud, EPFL, Lausanne, Szwajcaria

Inne krótkotrwałe staże naukowe:

- ▶ lipiec/sierpień 2016, staż badawczy finansowany przez Ambassade de France en Pologne, National High Magnetic Field Laboratory, CNRS, Grenoble, Francja
- ▶ marzec 2014, październik 2015, kwiecień 2016 eksperyment w Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR, Drezno, Niemcy
- ▶ sześciomiesięczny pobyt w ramach studiów programu Sokrates – Erasmus, National High Magnetic Field Laboratory, CNRS, Grenoble, France.
- ▶ trzy dwumiesięczne staże w laboratorium chemicznym latach 1999 - 2002, Solvay Fluor und Derivate GmbH, Hanower, Niemcy

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego

Zjawiska koherentne w gazach polarytonów ekscytonowych w mikrownękach półprzewodnikowych.

b) Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe (uporządkowane od najnowszych do najstarszych).

[H1] B. Piętka, N. Bobrovska, D. Stephan, M. Teich, M. Król, S. Winnerl, A. Pashkin, R. Mirek, K. Lekenta, F. Morier-Genoud, H. Schneider, B. Deveaud, M. Helm, M. Matuszewski, J. Szczytko, Doubly dressed bosons: exciton polaritons in a strong terahertz field.

Phys. Rev. Lett. 119, 077403 (2017) **IF 8,462**

[H2] B. Piętka, M. R. Molas, N. Bobrovska, M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, P. Stępnicki, F. Morier-Genoud, J. Szczytko, B. Deveaud, M. Matuszewski, M. Potemski, 2s exciton polariton revealed in external magnetic field.

Phys. Rev. B. 96, 081402(R) (2017) **IF 3,836**

[H3] R. Mirek, M. Król, K. Lekenta, J.-G. Rousset, M. Nawrocki, M. Kulczykowski, M. Matuszewski, J. Szczytko, W. Pacuski, B. Piętka, Angular dependence of giant Zeeman effect for semi-magnetic cavity polaritons.

Phys. Rev. B 95, 085429 (2017) **IF 3,836**

[H4] J.-G. Rousset, B. Piętka, M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, J. Szczytko, J. Borysiuk, J. Suffczyński, T. Kazimierczuk, M. Goryca, T. Smoleński, P. Kossacki, M. Nawrocki, W. Pacuski, Strong coupling and polariton lasing in Te based microcavities embedding (Cd,Zn)Te quantum wells.

Appl. Phys. Lett. 107, 201109 (2015) **IF 3,142**

[H5] B. Piętka, D. Zygmunt, M. Król, M. R. Molas, A. A. L. Nicolet, F. Morier-Genoud, J. Szczytko, J. Łusakowski, P. Zięba, I. Tralle, P. Stępnicki, M. Matuszewski, M. Potemski, B. Deveaud, Magnetic field tuning of exciton-polaritons in a semiconductor microcavity.

Phys. Rev. B 91, 075309 (2015) **IF 3,718**

[H6] F. Manni, K. G. Lagoudakis, B. Pietka, L. Fontanesi, M. Wouters, V. Savona, R. André, B. Deveaud-Plédran, Polariton condensation in a one-dimensional disordered potential.

Phys. Rev. Lett. 106, 176401 (2011) **IF 7,370**

[H7] G. Nardin, G. Grosso, Y. Léger, B. Pietka, F. Morier-Genoud, B. Deveaud-Plédran, Hydrodynamic nucleation of quantized vortex pairs in a polariton quantum fluid.

Nature Physics 7, 635 (2011) **IF 18,967**

[H8] K. G. Lagoudakis, F. Manni, B. Pietka, M. Wouters, T. C. H. Liew, V. Savona, A. V. Kavokin, R. André, B. Deveaud-Plédran, Probing the dynamics of spontaneous quantum vortices in polariton superfluids.

Phys. Rev. Lett. 106, 115301 (2011) **IF 7,370**

[H9] K. G. Lagoudakis, B. Pietka, M. Wouters, R. André, B. Deveaud-Plédran, Coherent oscillations in an exciton-polariton Josephson junction.

Phys. Rev. Lett. 105, 120403 (2010) **IF 7,622**

[H10] G. Nardin, K. G. Lagoudakis, M. Wouters, M. Richard, A. Baas, R. André, Le Si Dang, B. Pietka, B. Deveaud-Plédran, Dynamics of long-range ordering in an exciton-polariton condensate.

Phys. Rev. Lett. 103, 256402 (2009) **IF 7,328**

Przyjęto następujący cykl oznaczeń literatury:

- prace własne stanowiące osiągnięcie naukowe oznaczono literą H, np. [H1]
- prace własne bezpośrednio (B) związane z tematyką osiągnięcia naukowego oznaczono literą B, np. [B1]
- prace własne inne (I), nie związane z tematyką osiągnięcia naukowego oznaczono literą I, np. [I1]
- cytowane prace innych autorów oznaczono bez stosowania liter, np. [1].

c) Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Abstrakt

Przedstawiony poniżej jednotematyczny cykl publikacji dotyczy badań polarytonów ekscytonowych w mikrownękach półprzewodnikowych. Swoje badania koncentruję na zjawiskach, które zachodzą w gazie polarytonów ekscytonowych, kiedy układ ten jest bardzo silnie pobudzany nierezonansową lub rezonansową wiązką promieniowania. Pobudzanie nierezonansowe prowadzi do kreowania rezerwuaru ekscytonów (ekscytonów o dużych wartościach wektora falowego), które relaksując, zasilają stan podstawowy polarytonów. Dzięki temu można osiągnąć duże gęstości polarytonów w jednym ze stanów podstawowych i doprowadzić gaz polarytonów do przejścia fazowego do stanu nierównowagowego kondensatu Bosego - Einsteina. Taki stan pokazuje bardzo ciekawe właściwości, które dotychczas były obserwowane głównie w gazach zimnych atomów. Pokazałam, że w gazie polarytonów można obserwować takie zjawiska koherentne jak korelacje dalekiego zasięgu [H10], wiry kwantowe [H8], czy oscylacje Josephsona [H9]. Z kolei przy rezonansowym pobudzaniu układu koherentną wiązką promieniowania można wymusić stan nadciekły i badać zjawiska z reżimu hydrodynamiki kwantowej, gdzie kreowane są propagujące się wiry kwantowe [H7]. Pokazałam również, że odpowiednio zaprojektowane pobudzanie rezonansowe dwoma wiązkami koherentnymi o energii dostrojonej do energii stanów wzbudzonych [H2] prowadzi do wykreowania z polarytonów ekscytonowych, nowych kwazicząstek, ekscytonów silnie sprzężonych z dwoma fotonami o różnej długości fali, zachowujących swoje właściwości bozonowe [H1]. Ponadto polarytony ekscytonowe, dziedzicząc część swoich charakterystyk od ekscytonu, posiadają spin. Właściwości spinowe kondensatów polarytonowych do dziś nie są szeroko badane ze względu na małe rozszczepienie Zeemana polarytonów [H5]. Pokazałam, że użycie półprzewodników półmagnetycznych do zmodyfikowania części ekscytonowej polarytonu prowadzi do obserwacji gigantycznego efektu Zeemana [H3] nie blokując przy tym możliwości wytworzenia nierównowagowego kondensatu półmagnetycznych polarytonów [H4]. Moje badania nad nowym typem polarytonów o silnych właściwościach magnetycznych otwierają drogę do badania spinorowych kondensatów polarytonowych, wyjątkowych wśród gazów bozonowych.

Stan wiedzy przed podjęciem tematyki i omówienie celu naukowego wykonanych badań

Polarytony ekscytonowe (zwane dalej polarytonami), są to kwazicząstki powstałe w wyniku silnego sprzężenia fotonów z ekscytonami [1]. Silne sprzężenie realizuje się poprzez umieszczenie półprzewodnikowej studni kwantowej w maksimum rozkładu pola elektrycznego w mikrownęce półprzewodnikowej. W tym celu mikrownęki półprzewodnikowe projektuje się tak, aby uzyskać dużą amplitudę fali elektromagnetycznej

w ściśle określonym miejscu przestrzennym. Najczęściej wytwarza się strukturę złożoną z dwóch luster Bragga oddzielonych warstwą stanowiącą wnękę rezonansową o energii fotonów we wnęcie dostrojonych do częstości przejścia ekscytonu w studni kwantowej. W wyniku sprzężenia (tzw. oscylacje Rabiego) zamiast modu fotonowego i rezonansu ekscytonowego, otrzymuje się dwa nowe mody: górny i dolny polaryton, o właściwościach obu swoich komponentów [1]. Polarytony dziedziczą małą masę efektywną od części fotonowej (9 rzędów wielkości mniejszą od masy atomów) i możliwość oddziaływań od składnika ekscytonowego.

W 2006 roku J. Kasprzak, M. Richard et al. [2] pokazali, że polarytony w reżimie dużych gęstości przechodzą do nowego stanu kwantowego: kondensatu Bosego - Einsteina (BEC) [3]. Ten szczególny stan kwantowy przewidziany został przez Alberta Einsteina w latach 1924-25 zainspirowanego pracami Satyendra Natha Bosego pracującego nad statystycznymi własnościami fotonów. Einstein rozszerzył prace Bosego na wszystkie bozony i pokazał, że możliwe są makroskopowe obsadzenie pojedynczego stanu kwantowego i całkowita nierozróżnialność cząstek w niskich temperaturach. Dalej, w 1938 roku, korzystając z tych prac, Fritz London udowodnił, że zaobserwowane wówczas zjawisko nadciekłości helu jest bezpośrednio związane z kondensacją Bosego - Einsteina. Na eksperymentalne potwierdzenie istnienia przejścia fazowego gazu bozonów w niskiej temperaturze, należało poczekać aż do 1995 roku, kiedy to Carl Wieman i Eric Cornell oraz niezależnie Wolfgang Ketterle, wykorzystując techniki chłodzenia laserowego, zademonstrowali redukcję rozkładu prędkości atomów i makroskopowe obsadzenie pojedynczego stanu kwantowego. Przez bardzo długi czas obserwacja tej degeneracji kwantowej była zarezerwowana dla gazu atomów w bardzo niskich temperaturach (rzędu nanokelwinów).

Kondensacja polarytonów ekscytonowych, która obecnie jest obserwowana również w temperaturze pokojowej [4, 5], otworzyła ogromne możliwości badania tego szczególnego stanu kwantowego. Rozpoczęto studiowanie fundamentalnych zjawisk kwantowych jak określenie rodzaju korelacji dalekiego zasięgu [6] czy natury przejścia fazowego (BEC - BKT¹) [7]. W 2009 roku A. Amo et al. [8] pokazał, że polarytony wykazują nadciekłość, czego bezpośrednią konsekwencją są wiry kwantowe i pół-wiry kwantowe [9, 10], czy jak później pokazano, również ciemnie i jasne solitony [11,12]. Swoje badania w tej tematyce rozpocząłem, kiedy zjawisko nierównowagowej kondensacji polarytonów, istnienie korelacji dalekiego zasięgu oraz nadciekłość zostały zademonstrowane, natomiast nie były znane czasy budowania spójności fazowej, mechanizmy rządzące propagacją wirów kwantowych, czy inne zjawiska koherentne jak np. oscylacje Josephsona. Również część spinowa funkcji falowej polarytonów i ich właściwości magnetyczne nie były jeszcze w ogóle analizowane. Istnienie stanów wzbudzonych polarytonów oraz potencjalne możliwości manipulowania tymi stanami nie były nawet rozważane.

Osiągnięte wyniki naukowe stanowiące przedmiot habilitacji oraz perspektywy ich ewentualnego wykorzystania

Obserwowana degeneracja kwantowa w gazie polarytonów ekscytonowych [2, 13 - 16] jest bezpośrednią konsekwencją bozonowego charakteru polarytonów i pojawia się dla dużych koncentracji, w reżimie nieliniowych oddziaływań polaryton – polaryton, gdzie stymulacja bozonowa do stanu końcowego dominuje nad stratami cząstek wynikającymi z ich rekombinacji promienistej. Nierównowagowy charakter kondensatu polarytonów

¹ BKT - przejście fazowe typu Berezinski - Kostertiz - Thoules [A. Posazhennikova, "Weakly interacting, dilute Bose gases in 2D", Rev. Mod. Phys. 78, 1111 (2006).]

odróżnia go od stabilnej natury kondensatów atomowych. Również typ samego przejścia fazowego nie jest taki sam jak w przypadku idealnego kondensatu Bosego - Einsteina ze względu na jego skończony rozmiar oraz to, że korelacje dalekiego zasięgu zanikają wraz z odległością. Pomimo tego, określenie „kondensat” w odniesieniu do przejścia fazowego obserwowanego w gazie polarytonów zostało przyjęte w literaturze, jako że jest opisywane tymi samymi modelami teoretycznymi (np. równaniem Grossa - Pitaevskiego) z uwzględnieniem strat i zewnętrznego zasilania.

Idealny kondensat Bosego - Einsteina określony jest poprzez istnienie makroskopowej funkcji falowej [17]. Definiuje ją istnienie korelacji dalekiego zasięgu, ang. off-diagonal long range order (OLDRO), rozciągających się na cały system. Koncept ten został wprowadzony przez Penrosa i Onsagera w 1956 roku, którzy uznali też, że to właśnie funkcja korelacji pełni rolę parametru uporządkowania w przypadku kondensatów atomowych. Pojawienie się niezerowej wartości funkcji korelacji przestrzennych jest zatem najważniejszym dowodem na obserwację przejścia fazowego. Pierwszym pytaniem, które zadałam sobie, kiedy zaczęłam badać kondensaty polarytonów było: jak szybko korelacje dalekiego zasięgu są budowane podczas przejścia fazowego? Należy również zwrócić uwagę, że badania nad dynamiką formowania się spójności fazowej są niezmiernie trudne do przeprowadzenia w gazach zimnych atomów, gdzie na ten problem zwrócono uwagę dopiero w 2007 roku [18, 19]. W swojej pracy [H10] pokazałam, że początek ustanawiania korelacji fazy pomiędzy punktami kondensatu oddzielonymi o 8.5 μm zachodzi w czasie kilku ps, dużo szybciej niż oczekiwano, czyli równocześnie z początkiem rozpraszania stymulowanego. Dynamika całego procesu zależy od gęstości cząstek. W reżimie niskich gęstości, tj. gęstości progowych, proces ustalania koherencji fazowej zachodzi wolno, adiabatycznie wraz ze wzrostem populacji. Gdy system jest szybko przeprowadzany przez przejście fazowe, koherencja dalekiego zasięgu jest ustalona znacznie wolniej niż buduje się populacja. Pokazuje to, że system potrzebuje trochę czasu, kilka pikosekund w naszym przypadku, aby zbudować porządek dalekiego zasięgu. Pokazałam zatem, że prędkość tworzenia fazy w kondensacie polarytonowym jest tak samo szybka lub szybsza od prędkości propagacji oddziaływań, zadanej przez prędkość dźwięku w tym systemie. Oznacza to, że jest to proces znacznie szybszy niż w przypadku układów zimnych atomów.

Problem budowania korelacji dalekiego zasięgu jest również ciekawy w przypadku systemów charakteryzujących się dużym nieporządkiem przestrzennym. Zostało przewidziane, że w przypadku systemu charakteryzującego się niejednorodnym rozkładem potencjału lokalizującego cząstki, przejście fazowe nie następuje do stanu kondensatu, ale do stanu izolatora, tzw. Bose-Glass (BG) [20 - 22]. Stan BG charakteryzuje się zanikającą fazą nadciekłą i wykładniczym zanikiem korelacji dalekiego zasięgu wraz z odległością. Można by zatem oczekiwać, że w takim przypadku będziemy mieli od czynienia z defragmentacją kondensatu na mniejsze, nie związane ze sobą kondensaty. W pracy [H6] badałam korelacje przestrzenne w jednowymiarowym, niejednorodnym kondensacie polarytonów. Pokazałam, że pomimo silnej lokalizacji cząstek w minimach potencjału, funkcja korelacji rozciąga się na cały kondensat. Zanik wartości funkcji korelacji wraz z odległością nie jest monotoniczny, a jego wartość jest ściśle związana z gęstością i fluktuacją gęstości polarytonów w danym minimum potencjału. Wyniki te potwierdziły jeszcze raz nierównowagowy charakter kondensatów polarytonowych.

Wiedząc zatem, że silnie niejednorodny przestrzennie kondensat polarytonów może zachowywać duże wartości funkcji korelacji dalekiego zasięgu oraz dzięki badaniom, które pokazały, że możliwe jest również uzyskanie wielu różnych koegzystujących kondensatów [B4], zredukowałam rozważany system do jeszcze prostszego. Zajęłam się badaniem

kondensatu zlokalizowanego jedynie w dwóch minimach potencjału. Bariera oddzielająca oba kondensaty oraz gęstość polarytonów w każdym z minimów ustanawiały efektywną wartość stałej sprzężenia pomiędzy nimi. Otrzymałam w ten sposób polarytonowy odpowiednik bozonowego złącza Josephsona. Efekt Josephsona jest jednym z bardziej zaskakujących przejawów kwantowych efektów kolektywnych materii, gdyż pozwala na przepływ prądu przez złącze bez dyssypacji, co w klasycznym reżimie jest niemożliwe. Tradycyjne złącze Josephsona powstaje przez oddzielenie od siebie dwóch nadprzewodników cienką warstwą izolatora. Bozonowe złącze Josephsona jest to układ dwóch kondensatów bozonowych oddzielonych barierą potencjału. Takie złącze zostało zrealizowane w kondensatach zimnych atomów [23, 24]. W pracy [H9] pokazałam, że efekt Josephsona można zaobserwować również w przypadku kondensatów polarytonowych. Badając rozkład w czasie gęstości polarytonów w obu pułapkach oraz wzajemne relacje fazowe między nimi pokazałam istnienie koherentnych i periodycznych oscylacji gęstości polarytonów pomiędzy minimami potencjału. Towarzyszące temu oscylacje fazy modulo 2π pokazują, że jest to zmiennoprądowy proces Josephsona.

W czasie, kiedy prowadziłam wspomniane badania bardzo dużo rozważań prowadzonych było na temat natury samego przejścia fazowego obserwowanego w gazie polarytonów. Już sama geometria zakazywała istnienia idealnego kondensatu Bosego - Einsteina. Polarytony są systemem dwu-wymiarowym, gdyż powstają w płaszczyźnie wyznaczonej przez półprzewodnikową studnię kwantową, ponadto mają skończone rozmiary ze względu na rozmiar plamki lasera pobudzającego. Oczekiwano zatem, że przejście fazowe w tym systemie jest raczej typu Berezinski-Kosterlitz-Thoules (BKT) do fazy nadciekłej. W przypadku oddziałującego dwu-wymiarowego gazu bosego faza nadciekła może powstawać przez łączenie się w pary wirów o przeciwnych ładunkach. W pracy [H8] badałam dynamikę formowania się spontanicznie powstających wirów kwantowych podczas przejścia fazowego w gazie polarytonów. Jak dotychczas wirowość w gazie polarytonów została potwierdzona jedynie w przypadku wirów zlokalizowanych na niejednorodnościach potencjału [25] czy wymuszonych zewnętrznym promieniowaniem [26, 27]. Dynamika spontanicznie kreowanych wirów pozostawała nieznana. Badając czasowo rozdzielone interferogramy o wysokiej rozdzielczości przestrzennej pokazałam [H8], że spontanicznie kreowane wiry podążają zawsze tą samą ścieżką wyznaczaną przez nieporządek. Ten schemat powstawania wirów sugerował, że to mechanizm Kibble-Zurek [28 - 30] w układach nierównowagowych jest odpowiedzialny za formowanie się parametru porządku lokalnie, w sposób domenowy. Koherencja fazy byłaby budowana przez połączenia się domen o różnych fazach, przez co w stanie końcowym, o koherencji rozciągającej się na cały system, mogłyby pozostawać liczne defekty topologiczne. Ta teoria nie została jednak potwierdzona [31].

Wiry mogą pojawiać się również w systemie polarytonów w jeszcze inny, dość wyjątkowy sposób: kiedy gaz przechodzi ze stanu nadciekłego do klasycznego, na granicy załamania się nadciekłości. W przypadku nadciekłego helu i zimnych gazów atomowych zostały one określone jako kwantowy odpowiednik turbulencji w płynach klasycznych. W pracy [H7] pokazałam, że kiedy polarytony w stanie nadciekłym zderzają się z przeszkodą, w cieniu przeszkody nukleują się parami wiry kwantowe, które dalej unoszone są przez płynącą ciecz. Był to eksperyment bardzo szczególny, gdyż jako pierwszy pozwolił na rozważania z zakresu hydrodynamiki kwantowej w zdegenerowanych gazach polarytonowych. Polarytony w stanie nadciekłym zostały w tym eksperymencie wytworzone poprzez pobudzenie rezonansową wiązką lasera, podobnie jak w pracy A. Amo et al.[8] i dalej już propagując się swobodnie, napotykały na swojej drodze defekt. W zależności od prędkości nadciekłych polarytonów, v , (zadanej przez kąt padania lasera pompującego) względem prędkości dźwięku w tym systemie, c_s , (zadanej przez stałą oddziaływań polaryton -

polaryton oraz przez gęstość polarytonów), pokazałam reżim typowo nadciekły (kiedy defekt jest omijany), reżim gazu w stanie klasycznym (gdzie obserwuje się liczne rozproszenia na defekcie) oraz graniczną sytuację, kiedy w cieczy generowane są wzbudzenia w postaci wirów kwantowych. Ta sytuacja jest osiągnięta dla $v/c_s \approx 1$, kiedy to prędkość cieczy osiąga prędkość dźwięku. Przedstawione tu badania pokazały jaki ogromny potencjał mają polarytony ekscytonowe w badaniach nad powstawaniem turbulencji w gazach kwantowych.

Dotychczas w swoich badaniach nie uwzględniałam właściwości spinowych polarytonów. Ekscytony optycznie aktywne, z degeneracją całkowitego momentu pędu ± 1 (zwanego dalej „spinem”) sprzęgają się ze światłem, tworząc polarytony o dwóch orientacjach spinowych. Z punktu widzenia struktury spinowej, polarytony są zatem złożonymi bozonami o spinorowym charakterze [32], co jest nietypowe pośród gazów bozonowych. W literaturze problem spinu polarytonów nie był szeroko rozważany ze względu na trudności eksperymentalne i spodziewane małe wartości rozszczepienia Zeemana polarytonów. Mając duże doświadczenie w technikach eksperymentalnych stosowanych w silnych polach magnetycznych [116 - 118, 124], postanowiłam zająć się tym zagadnieniem. Perspektywy były bardzo ciekawe. W pracy teoretycznej Y. G. Rubo i in. [33], wykazał podobieństwo kondensatów polarytonowych do nadprzewodników, gdyż przewidział wypychanie zewnętrznego pola magnetycznego z wnętrza materiału (efekt Meissnera) oraz tłumienie nadciekłości przez pole magnetyczne. Zbadanie tego zagadnienia stało się jednym z celów mojej dalszej pracy.

W pierwszej kolejności należało zatem zbadać wartość rozszczepienia Zeemana polarytonów i pokazać, czy polem magnetycznym można doprowadzić do energetycznego rozdzielania obu komponentów spinowych. Zająłam się badaniami struktur opartych o materiały półprzewodnikowe z grup III-V, głównie GaInAs, ze względu na to, że kondensaty polarytonowe w tych materiałach mają najdłuższe czasy życia [34], są najbardziej jednorodne [35] i wykazują propagację nadciekłych polarytonów na rekordowe odległości 150 μm [36]. W pracy [H5] bardzo szczegółowo zbadałam zachowanie polarytonów w reżimie liniowym (bez kondensatu) w zewnętrznym polu magnetycznym aż do 14 T. Pokazałam jak zmieniają się energie polarytonów i jak ta zmiana wpływa na zawartość składnika ekscytonowego w polarytonie (odpowiedzialnego za efekt Zeemana i oddziaływania polaryton - polaryton). Ponadto wykazałam zwiększenie energii sprzężenia (energii Rabiego) pomiędzy ekscytonem i fotonem w polu magnetycznym. Efekt Zeemana polarytonów okazał się bardzo niewielki, rzędu 100 μeV , co aż do 14 T było porównywalne z szerokością linii.

Tym samym stało się jasne, że aby obserwować wszystkie ciekawe efekty kolektywne związane ze spinem w zdegenerowanym gazie polarytonów należy zająć się innym materiałem, gdzie efekty spinowe będą większe. W tym samym czasie na Wydziale Fizyki UW dr hab. Wojciech Pacuski wraz z zespołem zaczął wytwarzać struktury mikronęk półprzewodnikowych wprowadzając do studni kwantowych jony manganu. Nowatorskim podejściem było wykreowanie nowego typu polarytonów ekscytonowych (tzw. polarytonów półmagnetycznych) przez wprowadzenie do układu oddziaływań magnetycznych poprzez oddziaływanie wymiany $s,p-d$ między ekscytonowym składnikiem w polarytonie i momentami magnetycznymi atomów umieszczonych wewnątrz studni kwantowych. Struktura wnęki oraz zwierciadła Bragga nie zawierały jonów magnetycznych. W związku z tym oddziaływanie wymiany wpływa na polarytony tylko przez ich składnik ekscytonowy, natomiast ani jony Mn, ani zewnętrzne pole magnetyczne nie wpływają na fotony wnękowe. W pracy [H3] pokazałam gigantyczny efekt Zeemana występujący w takich

strukturach. Już w polu magnetycznym 5 T zaobserwowałam rozdzielenie obu komponentów spinowych dolnego polarytonu.

Następny przełom nastąpił, kiedy w tych mikrownękach półmagnetycznych zaobserwowałam nierównowagową kondensację polarytonów. W pracy [H4] pokazałam, że w warunkach silnego, impulsowego, nierezonansowego pobudzenia polarytony makroskopowo obsadzają pojedynczy stan kwantowy. Wpływ oddziaływań polaryton - polaryton oraz polaryton - rezerwuar ekscytonowy był widoczny w zmianie energii polarytonów wraz ze zwiększaniem obsadzenia.

Fizyka w przypadku kondensatu polarytonów półmagnetycznych jest znacznie bogatsza i różni się od przypadku bozonów nie posiadających spinu. Oddziaływania pomiędzy polarytonami, odpowiedzialne za szereg nieliniowych efektów (kondensacja, nadciekłość), zależą od spinu [32, 36 - 38]. Jest to spowodowane faktem, że polarytony z równoległymi spinami odpychają się, a polarytony ze spinami anty-równoległymi się przyciągają. Moje badania skupione obecnie na badaniu efektów spinowych w kondensatach półmagnetycznych polarytonów otwierają drogę do wielu ciekawych zjawisk. Pole magnetyczne wprowadza nierównowagę między obsadzeniem stanów o obu orientacjach spinowych poprzez tendencję do porządkowania spinów. Ponadto, pole magnetyczne wpływa na warunki krytyczne do osiągnięcia kondensacji, co pokazałam w pracy [B1]. Warto wspomnieć, że przez długi czas brak możliwości strojenia oddziaływań był uznawany za główną wadę kondensatów polarytonowych w porównaniu do kondensatów atomowych, gdzie zmiana stałej oddziaływań pozwala na strojenie fizyki zdegenerowanych gazów atomowych poprzez wiele reżimów. Teraz chciałabym wykazać, że jest to także możliwe w przypadku kondensatów polarytonowych. Jestem bliska [B0] pokazania i zrozumienia spinowego efektu Meissnera polarytonów [33]. Ponadto, polarytony mogą mieć właściwości paramagnetyczne, ferromagnetyczne lub diamagnetyczne w zależności od warunków zewnętrznych [37, 39], nad czym obecnie pracuję. W moim laboratorium wraz z zespołem zbudowaliśmy również interferometr, który przy sprzężeniu z układem pracującym w silnym polu magnetycznym pozwoli nam eksplorować bogactwo wirów kwantowych w tych spinorowych cieczach, tzw. pół-wiry kwantowe o różnej orientacji ładunku i polaryzacji [9, 10, 40], zjawisko, które nie występuje w gazach zimnych atomów.

Warto wspomnieć również, że oprócz ciekawych właściwości spinowych, polarytony posiadają bogatą strukturę stanów wzbudzonych. Ponieważ część funkcji falowej jest dziedziczona od ekscytonu, należy się spodziewać, że polarytony powinny posiadać identyczne stany wzbudzone. W studni kwantowej struktura stanów energetycznych ekscytonów jest analogiczna do dwu-wymiarowego atomu wodoru ze stanami kolejno 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d, Stanami optycznie aktywnymi są ekscytony o symetrii funkcji falowej w płaszczyźnie studni kwantowej typu s. W pracy [H2] pokazałam, że oprócz stanu podstawowego ekscytonu 1s, silne sprzężenie ekscyton - foton można zaobserwować również w stanie 2s (oraz 3s). Eksperyment przeprowadziłam w silnym polu magnetycznym dzięki czemu rozdzieliłam stan 2s od energetycznie bliskich [B2, B3] stanów 2p, co pozwoliło na obserwację rozszczepienia linii rezonansu fotonowego na dwie składowe polarytonowe. W tej samej pracy pokazałam również, że energia sprzężenia ekscyton - foton (energia Rabiego) w stanie 1s oraz 2s znacznie rośnie w polu magnetycznym, co ma bezpośredni związek ze wzrostem siły oscylatora ekscytonu w polu magnetycznym [B2, B3].

Pokazanie istnienia drabinki stanów wzbudzonych polarytonów ekscytonowych pozwoliło mi na zaprojektowanie dużo bardziej skomplikowanego eksperymentu. Dzięki pracy [H2]

wyzaczyłam różnicę energetyczną pomiędzy stanem $1s$ a $2p$ polarytonu na 6.5 ± 0.5 meV, co odpowiada długości fali fotonu z zakresu promieniowania THz, $191 \mu\text{m}$. Zaprojektowany eksperyment polegał na jednoczesnym kreowaniu polarytonów ekscytonowych w stanie podstawowym ekscytonu, czyli ekscytonów $1s$ silnie sprzężonych z fotonami mikrowłny, z zakresu promieniowania NIR, oraz podświetleniu układu silną i koherentną wiązką promieniowania THz o energii dostrojonej do przejścia $1s - 2p$ ekscytonu. Takie rezonansowe promieniowanie THz doprowadzi do dodatkowego silnego sprzężenia fotonów THz z rezonansem ekscytonowym $1s - 2p$. Taki eksperyment przeprowadziłam w laboratorium Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR, w Dreźnie w Niemczech, gdzie jest dostępny laser na swobodnych elektronach (FEL) o silnej (rzędu kilkuset mW) i wąskiej spektralnie (0.03 meV) wiązce promieniowania. W pracy [H1] pokazałam, że istotnie, ekscyton może być silnie sprzężony z dwoma fotonami o różnej energii NIR i THz. Natura tego sprzężenia jest inna, dla polarytonów są to oscylacje Rabiego próżni, dla sprzężenia z promieniowaniem THz, zwykłe oscylacje Rabiego. Pokazałam zatem istnienie podwójnie ubranych stanów kwantowych. Pokazałam dalej, że te stany zachowują charakter bozonowy. Kondensacja podwójnie ubranych polarytonów będzie zatem szczególnie interesująca, ponieważ stany te charakteryzują się dużym momentem dipolowym (ze względu na domieszkę stanów $2p$). To może prowadzić do zupełnie nowych zjawisk jak np. super-ciało-stałe (ang. *supersolidity*) [41].

W odniesieniu do przyszłych możliwych zastosowań, zdolność do tworzenia kondensatu w strukturach półprzewodnikowych otwiera drogę do budowy nowych urządzeń optoelektronicznych w szybko rozwijającej się dziedzinie łączącej wiedzę optoelektroniczną z polarytonami, tzw. „polarytroniką” [42]. Podstawowe aspekty fizyczne związane z fizyką polarytonów i ich potencjał aplikacyjny, nadaje tej dziedzinie fizyki półprzewodników wyjątkowe znaczenie a także interdyscyplinarny charakter, łącząc zainteresowania społeczności naukowych zajmujących się półprzewodnikami, gazami atomowymi i optyką kwantową.

Podsumowanie osiągnięcia habilitacyjnego

Pokazałam, że polarytony ekscytonowe, będąc kwazicząstkami bozonowymi, pokazują klasę zjawisk fizycznych znanych dotąd głównie w kondensatach Bosego - Einsteina zimnych gazów atomowych. Zademonstrowałam:

- ▶ dynamikę formowania się koherencji fazy w nierównowagowym kondensacie Bosego - Einsteina polarytonów ekscytonowych [H10] oraz dynamikę formowania się i propagację wirów kwantowych [H8].
- ▶ istnienie i działanie bozonowego złącza Josephsona z prądem oscylującym pomiędzy dwoma zlokalizowanymi kondensatami polarytonowymi [H9].
- ▶ w hydrodynamicznym reżimie nadciekłych polarytonów pokazałam jak formują się wiry kwantowe, kiedy ciecz polarytonów przepływa przez defekt [H7].
- ▶ w jednowymiarowym kondensacie polarytonów pokazałam istnienie korelacji dalekiego zasięgu pomimo istnienia silnych niejednorodności przestrzennych [H6].

Pokazałam również jak zachowują się polarytony ekscytonowe i ich kondensaty pod wpływem pól zewnętrznych:

- ▶ pod wpływem silnego pola magnetycznego pokazałam zwiększenie siły oddziaływania ekscyton - foton w zewnętrznym polu magnetycznym [H5], oraz dzięki temu pokazałam, że polarytony posiadają dobrze określone stany wzbudzone [H2].

- ▶ zademonstrowałam również, że w układzie polarytonów zbudowanych z ekscytonów półmagnetycznych można doprowadzić do nierównowagowej kondensacji polarytonów [H4], oraz że właściwości spinowe polarytonów silnie zależą od zewnętrznego pola magnetycznego [H3].
- ▶ odpowiednio projektując eksperyment, pod wpływem silnej i koherentnej wiązki promieniowania wytworzyłam nowy typ polarytonu ekscytonowego o charakterze bozonowym: ekscyton silnie ubrany w dwa fotony o różnych długościach fali (NIR oraz THz) [H1].

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

Osiągnięcia naukowe nie stanowiące bezpośrednio osiągnięcia habilitacyjnego a uzyskane po doktoracie można podzielić na trzy grupy: a) badania zlokalizowanych stanów kwantowych w fotonicznych układach zerowymiarowych; b) badania właściwości dwu-wymiarowego gazu elektronowego modulowanego promieniowaniem zewnętrznym oraz c) kontynuacja badań uzyskanych w czasie doktoratu dotyczących pojedynczych kropek kwantowych w heterostrukturach GaAs/AlAs o skośnej przerwie energetycznej.

Równoległe z badaniami koherentnych gazów polarytonów ekscytonowych prowadziłam badania zero wymiarowych polarytonów ekscytonowych, czyli polarytonów uwięzionych w pułapkach fotonicznych. Dzięki małej masie efektywnej polarytonów, rzędu 10^{-4} - 10^{-5} masy swobodnego elektronu, potencjał wiążący polarytony w płaszczyźnie jest osiągany na obszarze rzędu pojedynczych mikrometrów [43 - 45]. Pozwala to na wytworzenie w stosunkowo łatwy sposób (np. litograficzne) struktur o dowolnych kształtach i rozmiarach. Najczęściej badanymi przeze mnie obiektami były owalne mezy o rozmiarach od 3 do 20 mikrometrów. Rozmiar mikrometrowy tych obiektów pozwala na obserwację całej funkcji falowej stanów związanych (amplitudy i fazy) za pomocą standardowych układów optycznych w zakresie światła widzialnego.

Pokazałam:

- ▶ rozkład amplitudy i metodę eksperymentalną pozwalającą na pełną, trójwymiarową tomografię (dwa kierunki przestrzenne oraz energia) stanów związanych w pułapkach fotonicznych [I10], [I7];
- ▶ rozkład fazy i metodę określania fazy stanów związanych polarytonów w pułapkach fotonicznych [I7], [I5];
- ▶ wzmocnienie procesów relaksacji polarytonów do stanu podstawowego z powodu ograniczenia przestrzennego funkcji falowej [I9];
- ▶ metodę kontroli funkcji falowej zlokalizowanych polarytonów za pomocą zewnętrznego lasera rezonansowo dostrojonego do danego zlokalizowanego modu [I8];
- ▶ dynamikę oscylacji amplitudy rezonansowo pobudzanych stanów zlokalizowanych z powodu efektów nieliniowych [I4];
- ▶ metodę wytwarzania i właściwości wirów kwantowych w zlokalizowanych stanach [I3], [I2];
- ▶ wpływ pola magnetycznego na funkcje falowe stanów związanych i redystrybucję obsadzenia na kolejnych stanach pod wpływem pola magnetycznego [I1].

Interesującym zagadnieniem, którym zajęłam się również po doktoracie było zbadanie jak zewnętrzne promieniowanie z zakresu dalekiej podczerwieni oraz promieniowanie widzialne wpływają na własności dwu-wymiarowego gazu elektronowego. Właściwościami dwu-wymiarowego gazu elektronowego zainteresowałam się już w czasie doktoratu, kiedy uczestniczyłam w badaniach, które pokazały istnienie fermionów kompozytowych

(elektronów z dołączonymi dwoma kwantami strumienia pola magnetycznego) w reżimie ułamkowego efektu Halla [I16]. Obecne prace miały na celu określenie spektrum wzbudzeń plazmonowych w dwuwymiarowym gazie elektronowym o ekstremalnie wysokiej ruchliwości elektronów, z uwzględnieniem wpływu periodycznych potencjałów elektrostatycznych generowanych światłem widzialnym [I11] i wygenerowanych poprzez metaliczne periodyczne struktury napyłone na powierzchni próbki [I12], [I14], [I15]. Ciekawym osiągnięciem tych badań było zademonstrowanie działania skanera THz opartego na tranzystorach polowych z dwu-wymiarowym gazem elektronowym [I13].

Kontynuowałam również badania pojedynczych kropek kwantowych w heterostrukturach GaAlAs rozpoczętych podczas doktoratu. Heterostruktura podwójnej studni kwantowej GaAs/AlAs otoczona barierami GaAlAs została zaprojektowana tak, że pasmo X w studni kwantowej AlAs leży poniżej pasma Γ w studni kwantowej GaAs. Na interfejsie GaAs/AlAs samoczynnie tworzyły się kropki kwantowe o prostej przerwie energetycznej (Γ - Γ), co pokazałam w pracy [I24]. Układ taki tworzył ciekawy system, w którym ekscytony zlokalizowane w kropkach kwantowych stanowiły efektywny kanał rekombinacji promienistej dla długo życiowych skośnych ekscytonów kreowanych w bezpośrednim otoczeniu kropek kwantowych. Dynamikę formowania się ekscytonów i wyższych kompleksów ekscytonowych pokazałam w pracach [I20] i [I22]. Ponadto, w pracach [I23], [I21], [I18] i [I17] zademonstrowałam istnienie rodziny kompleksów ekscytonowych, od pojedynczych neutralnych ekscytonów, poprzez bieksycytony do struktur bardziej złożonych, jak singletowe i trypletowe stany trionów. Własności kropek kwantowych jako emiterów pojedynczych fotonów pokazałam w pracy [I19], w której pokazałam również, że kompleksy ekscytonowe stanowią trzy rodziny stanów: neutralnych, naładowanych dodatnio bądź ujemnie.

Obecnie, wspólnie z dr. hab. Jackiem Szczytko, zbudowałam nowe Laboratorium Optyki Struktur Polarytonowych na Wydziale Fizyki UW, w którym połączone zostały różne techniki optyki widzialnej w układzie z silnym polem magnetycznym. Przy moim współudziale został zakupiony sprzęt (magnes nadprzewodzący do 5 T, mikroskop konfokalny sprzężony z magnesem nadprzewodzącym do 9 T, laser pracy ciągłej o wyjątkowej stabilności wiązki optycznej oraz laser impulsowy, układy mikroskopów i mikroprzesuwów, układy stabilizacji wiązki optycznej, zaawansowany interferometr), który jest w pełni działający. W laboratorium pod moją współopieką (razem z dr. hab. Jackiem Szczytko) pracuje obecnie trzech doktorantów, post-doc oraz opiekuję się studentami w ramach warsztatów w grupach badawczych. Obecne laboratorium pozwala na skalę światową rozwijać badania z zakresu nieliniowej spektroskopii stanów koherentnych w połączeniu z silnymi polami magnetycznymi. Współpracuję ściśle z grupami eksperymentalnymi i teoretycznymi z Polski, Francji, Szwajcarii, Niemiec i Anglii.

Podsumowując w skrócie mój dorobek naukowy (pełna lista znajduje się w załączniku):

- Jestem współautorem ponad 52 prac recenzowanych naukowych w międzynarodowych czasopismach (39 opublikowanych po doktoracie), w tym dwa artykuły w Nature Physics, pięć artykułów w Physical Review Letters, dwanaście artykułów w Physical Review B oraz dwa artykuły w Applied Physics Letters i jeden artykuł w Scientific Reports.
- Liczba wszystkich cytowań moich prac według bazy Web of Science (stan na dzień 15 kwietnia 2018) wynosi: 670,
- Liczba cytowań bez autocytowań wynosi 604,
- Indeks Hirscha według bazy Web of Science (uwzględniając artykuły opublikowane pod nazwiskiem rodzimym Chwalisz) wynosi 13.

- Wykonuję recenzje dla międzynarodowych czasopism naukowych, w tym dla Scientific Reports, Superlattices and Microstructures oraz Physical Review Letters.
- Uczestniczyłam w ponad 25 konferencjach naukowych, wygłosiłam 17 referatów w tym pięć referatów zaproszonych.
- Jestem członkiem Zespołu Ekspertów Narodowego Centrum Nauki, Rady Naukowej Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego oraz Polskiego Towarzystwa Fizycznego.
- Kierowałam trzema projektami badawczymi (dwa finansowane przez Narodowe Centrum Nauki, jeden przez Fundację na Rzecz Nauki Polskiej), byłam wykonawcą pięciu innych projektów oraz jestem opiekunem naukowym dwóch projektów „Diamentowy Grant” Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Lista publikacji (wybór):

Prace własne bezpośrednio (B) związane z tematyką osiągnięcia naukowego (uzyskane po doktoracie):

- [B0] M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, J.-G. Rousset, M. Nawrocki, M. Matuszewski, J. Szczytko, W. Pacuski, **B. Piętka**, Spin polarized semimagnetic exciton-polariton condensate in magnetic field. Scientific Reports 8, 6694 (2018) **IF: 4,847**
- [B1] J.-G. Rousset, **B. Piętka**, M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, J. Szczytko, W. Pacuski, M. Nawrocki, Magnetic field effect on the lasing threshold of a semimagnetic polariton condensate. Phys. Rev. B 96, 125403 (2017) **IF: 3,836**
- [B2] P. Stępnicki, **B. Piętka**, F. Morier-Genoud, B. Deveaud, M. Matuszewski, Analytical method for determining quantum well excitons properties in a magnetic field, Phys. Rev. B 91, 195302 (2015) **IF: 3,781**
- [B3] P. Zięba, **B. Piętka**, I. Tralle, J. Łusakowski, Exciton binding energy and oscillator strength in a shallow QW in an external magnetic field, Acta Physica Polonica A 128, 237 (2015). **IF: 0,525**
- [B4] D. N. Krizhanovskii, K.G. Lagoudakis, M. Wouters, **B. Pietka**, R. A. Bradley, K. Guda, D.M. Whittaker, M.S. Skolnick, B. Deveaud-Pledran, M. Richard, R. André, Le Si Dang, Coexisting Non-Equilibrium Condensates with Long-Range Spatial Coherence in Semiconductor Microcavities, Phys. Rev. B 80, 045317 (2009) **IF: 3,475**

Prace własne inne (I), nie związane z tematyką osiągnięcia naukowego (uzyskane po doktoracie):

a) badania stanów związanych polarytonów ekscytonowych

- [I1] **B. Piętka**, J. Szczytko, J. Łusakowski, G. Nardin, Y. Léger, F. Morier-Genoud, B. Deveaud – Plédran, Magnetic Field Induced Redistribution of Exciton-Polariton Density on Confined Modes, Acta Physica Polonica A, vol. 122, no. 6, p. 1093 (2012). **IF: 0,531**
- [I2] G. Nardin, Y. Léger, **B. Pietka**, F. Morier-Genoud, B. Deveaud-Plédran, Coherent oscillations between orbital angular momentum polariton states in an elliptic resonator, Journal of Nanophotonics 5, 053517 (2011). **IF: 1,570**
- [I3] G. Nardin, Y. Léger, **B. Pietka**, F. Morier-Genoud, B. Deveaud-Plédran, Coherent oscillations between polariton vortex and anti-vortex states in an elliptical resonator. Proc. SPIE 7937, 79371Y (2011); doi:10.1117/12.885513
- [I4] T. K. Paraiso, R. Cerna, M. Wouters, Y. Léger, **B. Pietka**, F. Morier-Genoud, M. T. Portella-Oberli, and B. Deveaud-Plédran, Collisional damping of dipole oscillations in a trapped polariton gas, Phys. Rev. B 83, 155304 (2011) **IF: 3,691**

- [I5] G. Nardin, Y. Léger, **B. Pietka**, F. Morier-Genoud and B. Deveaud-Plédran, Phase-resolved Imaging of Confined Exciton-Polariton Wavefunctions in Elliptical Traps, *Phys. Rev. B* 82, 045304 (2010) **IF: 3,774**
- [I6] G. Nardin, K. G. Lagoudakis, **B. Pietka**, F. Morier-Genoud, Y. Léger, B. Deveaud-Plédran, Selective photoexcitation of confined exciton-polariton vortices, *Phys. Rev. B* 82, 073303 (2010) **IF: 3,774**
- [I7] G. Nardin, T. K. Paraíso, R. Cerna, **B. Pietka**, Y. Léger, O. El Daif, F. Morier-Genoud, B. Deveaud-Plédran, Probability density tomography of microcavity polaritons confined in cylindrical traps of various sizes, *Superlattices and Microstructures* 47, 207 (2010) **IF: 1,096**
- [I8] R. Cerna, D. Sarchi, T. K. Paraíso, G. Nardin, Y. Leger, M. Richard, **B. Pietka**, O. El Daif, F. Morier-Genoud, V. Savona, M. T. Portella-Oberli, B. Deveaud-Plédran, Coherent optical control of the wave function of zero-dimensional exciton polaritons, *Phys. Rev. B* 80, 121309(R) (2009) **IF: 3,475**
- [I9] T. K. Paraíso, D. Sarchi, G. Nardin, R. Cerna, Y. Leger, **B. Pietka**, M. Richard, O. El Daif, F. Morier-Genoud, V. Savona, and B. Deveaud-Plédran, Enhancement of microcavity polariton relaxation under confinement, *Phys. Rev. B* 79, 045319 (2009) **IF: 3,475**
- [I10] G. Nardin, T. K. Paraíso, R. Cerna, **B. Pietka**, Y. Léger, O. El Daif, F. Morier-Genoud, B. Deveaud-Plédran, Probability density optical tomography of confined quasiparticles in a semiconductor microcavity, *Appl. Phys. Lett.* 94, 181103 (2009) **IF: 3,554**

b) prace pokazujące właściwości dwu-wymiarowego gazu elektronowego pod wpływem zewnętrznego promieniowania:

- [I11] P. Sznajder, **B. Piętk**a, W. Bardyszewski, J. Szczytko, and J. Łusakowski, Resonant Plasmon Response of a Periodically Modulated Two-Dimensional Electron Gas, *Acta Physica Polonica A*, vol. 122, no. 6, p. 1090 (2012). **IF: 0,531**
- [I12] M. Białek, K. Karpierz, **B. Piętk**a, M. Grynberg, J. Łusakowski, M. Czapkiewicz, K. Fronc, J. Wróbel and V. Umansky, Magnetoplasmons in a High Electron Mobility GaAs/AlGaAs Heterostructure, *Acta Physica Polonica A*, vol. 122, no. 6, p. 1096 (2012). **IF: 0,531**
- [I13] D. Yavorskiy, J. Marczewski, K. Kucharski, P. Kopyt, W. Gwarek, M. Ratajczyk, W. Knap, M. Ściesiek, **B. Piętk**a, J. Łusakowski, THz Scanner Based on Silicon Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors, *Photonics Letters of Poland*, vol. 4, no. 3, pp. 100-102 (2012)
- [I14] J. Szczytko, R. Adomavicius, E. Papis, A. Barańska, A. Wawro, A. Krotkus, **B. Piętk**a, J. Łusakowski, THz Time Domain Spectroscopy of Thin Gold and Titanium Layers on GaAs, *Acta Physica Polonica A*, vol. 122, no. 6, p. 1118 (2012). **IF: 0,531**
- [I15] J. Szczytko, M. Stolarek, **B. Piętk**a, A. Wawro, A. Baraska, E. Papis, N. Pałka, P. Zagrajek, R. Adomavicius, A. Krotkus, J. Łusakowski, Terahertz Properties of Metallic Layers and Grids, 2012 19th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), vol. 1, page(s): 271 - 275
- [I16] M. Byszewski, **B. Chwalisz (Piętk**a), D. K. Maude, M. L. Sadowski, M. Potemski, T. Saku, Y. Hirayama, S. Studenikin, D. G. Austing, A. S. Sachrajda, P. Hawrylak "Optical probing of composite fermions in a two-dimensional electron gas" *Nature Physics* 2, 239 (2006) **IF: 12,040**

c) badania kropek kwantowych w strukturach skończonej GaAs/AIAs

- [I17] M. R. Molas, A. A. L. Nicolet, B. Piętka, A. Babiński, and M. Potemski, The excited spin-triplet state of a charged exciton in quantum dots, *J. Phys.: Condens. Matter.* 28, 365301 (2016) **IF: 2,209**
- [I18] M. Molas, A. A. L. Nicolet, **B. Piętk**a, A. Babiński, M. Potemski, Magnetic Field effect on the Excitation Spectrum of a Neutral Exciton in a Single Quantum Dot, *Acta Physica*

Polonica A 124, 1066 (2014) **IF: 0,530**

[I19] **B. Piętka**, J. Suffczyński, M. Goryca, T. Kazimierczuk, A. Golnik, P. Kossacki, A. Wysmolek, J. A. Gaj, R. Stępniewski, and M. Potemski, Photon correlation studies of charge variation in a single GaAlAs quantum dot, *Phys. Rev. B* 87, 035310 (2013) **IF: 3,664**

[I20] M. D. Martin, C. Anton, L. Vinia, **B. Pietka**, M. Potemski, Recombination dynamics of excitons and exciton complexes in single quantum dots, *Europhysics Letters* 100, 67006 (2012) **IF: 2,260**

[I21] M. Molas, K. Gołasa, **B. Piętka**, M. Potemski, A. Babiński, Fine Structure of Neutral Excitons in Single GaAlAs Quantum Dots, *Acta Physica Polonica A*, vol. 122, no. 6, p. 988 (2012). **IF: 0,531**

[I22] M. D. Martín, M. Martínez-Berlanga, L. Viña, B. Pietka, M. Potemski, Recombination dynamics of exciton and exciton complexes in single quantum dots, *Journal of Physics: Conference Series* 210, 012014 (2010)

[I23] J. Suffczynski, A. Trajnerowicz, T. Kazimierczuk, **B. Pietka**, K. Kowalik, P. Kossacki, A. Golnik, M. Nawrocki, J. A. Gaj, A. Wysmolek, R. Stepniewski, M. Potemski, V. Thierry – Mieg, Control of Photon Polarization in GaAs/AlAs Single Quantum Dot Emission, *Acta Physica Polonica A*, 112, 461 (2007) **IF: 0,340**

[I24] **B. Chwalisz - Pietka**, A. Wysmolek, R. Stepniewski, M. Potemski, S. Raymond, R. Bozek, V. Thierry-Mieg, Direct bandgap quantum dots embedded into a type-II GaAs/AlAs double well structure, *Int. Journal of Modern Physics B* 21, 1654 (2007). **IF: 0,467**

Literatura:

[1] C. Weisbuch, M. Nishioka, A. Ishikawa, Y. Arakawa, Observation of the coupled exciton-photon mode splitting in a semiconductor quantum microcavity, *Phys. Rev. Lett.* 69, 3314 (1992)

[2] J. Kasprzak, M. Richard, S. Kundermann, A. Baas, P. Jeambrun, J. M. J. Keeling, F. M. Marchetti, M. H. Szymańska, R. André, J. L. Staehli, V. Savona, P. B. Littlewood, B. Deveaud, Le Si Dang, Bose–Einstein condensation of exciton polaritons, *Nature* 443, 409 (2006)

[3] L.P. Pitaevskii, S. Stringari, „Bose-Einstein condensation” (Oxford: Clarendon Press, 2003)

[4] S. Christopoulos, G. Baldassarri, Höger von Högersthal, A. J. D. Grundy, P. G. Lagoudakis, A. V. Kavokin, J. J. Baumberg, G. Christmann, R. Butté, E. Feltin, J.-F. Carlin, and N. Grandjean. Room-temperature polariton lasing in semiconductor microcavities. *Phys. Rev. Lett.* 98, 126405 (2007)

[5] J. J. Baumberg, A. V. Kavokin, S. Christopoulos, A. J. D. Grundy, R. Butté, G. Christmann, D. D. Solnyshkov, G. Malpuech, G. Baldassarri Höger von Högersthal, E. Feltin, J.-F. Carlin, and N. Grandjean, Spontaneous polarization buildup in a room-temperature polariton laser. *Phys. Rev. Lett.* 101, 136409 (2008).

[6] D. Sarchi and V. Savona, Long-range order in the Bose-Einstein condensation of polaritons *Phys. Rev. B* 75, 115326 (2007)

[7] M. H. Szymańska, J. Keeling, P. B. Littlewood, Nonequilibrium quantum condensation in an incoherently pumped dissipative system, *Phys. Rev. Lett.* 96, 230602 (2006) oraz G. Roumpos, Y. Yamamoto (2012) The Berezinskii–Kosterlitz–Thouless Phase Transition in Exciton–Polariton Condensates. In: Timofeev V., Sanvitto D. (eds) *Exciton Polaritons in Microcavities*. Springer Series in Solid-State Sciences, vol 172. Springer, Berlin, Heidelberg.

[8] A. Amo, J. Lefrère, S. Pigeon, C. Adrados, C. Ciuti, I. Carusotto, R. Houdré, E. Giacobino, A. Bramati, Superfluidity of polaritons in semiconductor microcavities, *Nature Phys.* 5, 805 (2009)

- [9] K. G. Lagoudakis, T. Ostatnický, A. V. Kavokin, Y. G. Rubo, R. André, B. Deveaud-Plédran, Observation of half-quantum vortices in an exciton-polariton condensate. *Science* 326, 974, (2009)
- [10] F. Manni, K. G. Lagoudakis, T. C. H Liew, R. André, V. Savona, B. Deveaud, Dissociation dynamics of singly charged vortices into half-quantum vortex pairs, *Nat. Comm.* 3, 1309, (2012)
- [11] A. Amo, S. Pigeon, D. Sanvitto, V. G. Sala, R. Hivet, I. Carusotto, F. Pisanello, G. Leménager, R. Houdré, E. Giacobino, C. Ciuti, A. Bramati, Polariton Superfluids Reveal Quantum Hydrodynamic Solitons, *Science* 332, 1167 (2011)
- [12] P. M. Walker, L. Tinkler, B. Royall, D. V. Skryabin, I. Farrer, D. A. Ritchie, M. S. Skolnick, D. N. Krizhanovskii, Dark Solitons in High Velocity Waveguide Polariton Fluids *Phys. Rev. Lett.* 119, 097403 (2017)
- [13] H. Deng, G. Weihs, Ch. Santori, J. Bloch, Y. Yamamoto, Condensation of semiconductor microcavity exciton polaritons, *Science* 298, 199 (2002).
- [14] T. Guillet, M. Mexis, J. Levrat, G. Rossbach, C. Brimont, T. Bretagnon, B. Gil, R. Butté, N. Grandjean, L. Orosz, F. Réveret, J. Leymarie, J. Zúñiga-Pérez, M. Leroux, F. Semond, and S. Bouchoule, Polariton lasing in a hybrid bulk ZnO microcavity, *Appl. Phys. Lett.* 99, 161104 (2011).
- [15] S. Christopoulos, G. Baldassarri Höger von Högersthal, A. J. D. Grundy, P. G. Lagoudakis, A. V. Kavokin, J. J. Baumberg, G. Christmann, R. Butté, E. Feltin, J.-F. Carlin, and N. Grandjean, Room-temperature polariton lasing in microcavities, *Phys. Rev. Lett.* 98, 126405 (2007)
- [16] J. J. Baumberg, A. V. Kavokin, S. Christopoulos, A. J. D. Grundy, R. Butté, G. Christmann, D. D. Solnyshkov, G. Malpuech, G. Baldassarri Höger von Högersthal, E. Feltin, J.-F. Carlin, and N. Grandjean, Spontaneous polarization buildup in a room-temperature polariton laser. *Phys. Rev. Lett.* 101, 136409 (2008)
- [17] W. Ketterle, Nobel Lecture, When atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser, December 8, 2001.
- [18] S. Ritter, A. Öttl, T. Donner, T. Bourdel, M. Köhl, and T. Esslinger, Observing the Formation of Long-Range Order during Bose-Einstein Condensation, *Phys. Rev. Lett.* 98, 090402 (2007)
- [19] M. Hugbart, J. A. Retter, A. F. Varón, P. Bouyer, A. Aspect, M. J. Davis, Population and phase coherence during the growth of an elongated Bose-Einstein condensate, *Phys. Rev. A* 75, 011602(R) (2007)
- [20] M. P. A. Fisher, P. B. Weichman, G. Grinstein, and D. S. Fisher, Boson localization and the superfluid-insulator transition, *Phys. Rev. B* 40, 546 (1989)
- [21] L. Fontanesi, M. Wouters, and V. Savona, Superfluid to Bose-Glass Transition in a 1D Weakly Interacting Bose Gas, *Phys. Rev. Lett.* 103, 030403 (2009).
- [22] G. Malpuech, D. D. Solnyshkov, H. Ouerdane, M. M. Glazov, and I. Shelykh, Bose glass and superfluid phases of cavity polaritons, *Phys. Rev. Lett.* 98, 206402 (2007)
- [23] F. S. Cataliotti, S. Burger, C. Fort, P. Maddaloni, F. Minardi, A. Trombettoni, A. Smerzi, M. Inguscio, Josephson junction arrays with Bose-Einstein condensates, *Science* 293, 843 (2001)
- [24] R. Gati, M. Albiez, J. Fölling, B. Hemmerling, M.K. Oberthaler, Realization of a single Josephson junction for Bose–Einstein condensates, *Appl. Phys. B* 82, 207 (2006).
- [25] K. G. Lagoudakis, M. Wouters, M. Richard, A. Baas, I. Carusotto, R. André, Le Si Dang, B. Deveaud-Plédran, Quantized vortices in an exciton-polariton condensate, *Nature Phys.* 4, 706 (2008)
- [26] D. Sanvitto, F. M. Marchetti, M. H. Szymańska, G. Tosi, M. Baudisch, F. P. Laussy, D. N. Krizhanovskii, M. S. Skolnick, L. Marrucci, A. Lemaître, J. Bloch, C. Tejedor, L. Viña, Persistent currents and quantized vortices in a polariton superfluid, *Nature Phys.* 6, 527 (2010)

- [27] D. N. Krizhanovskii, D. M. Whittaker, R. A. Bradley, K. Guda, D. Sarkar, D. Sanvitto, L. Vina, E. Cerda, P. Santos, K. Biermann, R. Hey, and M. S. Skolnick, Effect of Interactions on Vortices in a Nonequilibrium Polariton Condensate, *Phys. Rev. Lett.* 104, 126402 (2010)
- [28] T. W. B. Kibble, Topology of Cosmic Domains and Strings, *J. Phys. A* 9, 1387 (1976).
- [29] W. H. Zurek, Cosmological experiments in superfluid helium?, *Nature (London)* 317, 505 (1985)
- [30] W. H. Zurek, Cosmological experiments in condensed matter systems, *Physics Reports-Review Section of Physics Letters*, 276(4):177–221, 1996.
- [31] M. Matuszewski, E. Witkowska, Universality in nonequilibrium condensation of exciton-polaritons, *Phys. Rev. B* 89, 155318 (Apr 2014)
- [32] Spin effects in exciton-polariton condensates, A. Kavokin in *Exciton polaritons in microcavities* by D. Sanvitto and V. Timofeev, *Springer Series in Solid-State Sciences* 172 (2012)
- [33] Y. G. Rubo, A.V. Kavokin, I.A. Shelykh, Suppression of superfluidity of exciton-polaritons by magnetic field, *Phys. Lett. A* 358, 227 (2006).
- [34] Yongbao Sun, P. Wen, Y. Yoon, G. Liu, M. Steger, L. N. Pfeiffer, K. West, D. W. Snoke, K. A. Nelson, Bose-Einstein Condensation of Long-Lifetime Polaritons in Thermal Equilibrium, *Phys. Rev. Lett.* 118, 016602 (2017)
- [35] E. Wertz, A. Amo, D. D. Solnyshkov, L. Ferrier, T. C. H. Liew, D. Sanvitto, P. Senellart, I. Sagnes, A. Lemaître, A. V. Kavokin, G. Malpuech, J. Bloch, Propagation and Amplification Dynamics of 1D Polariton Condensates, *Phys. Rev. Lett.* 109, 216404 (2012)
- [36] E. Wertz, L. Ferrier, D. D. Solnyshkov, R. Johne, D. Sanvitto, A. Lemaître, I. Sagnes, R. Grousson, A. V. Kavokin, P. Senellart, G. Malpuech, J. Bloch, Spontaneous formation and optical manipulation of extended polariton condensates, *Nature Phys.* 6, 860 (2010)
- [37] Y. Zhang, B. Zou, Diamagnetism of microcavity polaritons induced by spin-dependent polariton–polariton interactions, *Phys. Lett. A* 376, 3332 (2012)
- [38] M. Vladimirova, S. Cronenberger, D. Scalbert, K. V. Kavokin, A. Miard, A. Lemaître, J. Bloch, D. Solnyshkov, G. Malpuech, and A. V. Kavokin, Polariton–polariton interaction constants in microcavities, *Phys. Rev. B* 82, 075301 (2010)
- [39] H. Ohadi, A. Dreismann, Y. G. Rubo, F. Pinsker, Y. del Valle-Inclan Redondo, S. I. Tsintzos, Z. Hatzopoulos, P. G. Savvidis, and J. J. Baumberg., Spontaneous spin bifurcations and ferromagnetic phase transitions in a spinor exciton-polariton condensate, *Physical Review X* 5 (3), 031002 (2015)
- [40] M. T. Solano, Y. Rubo, Half-quantum vortices in exciton–polariton condensates in applied magnetic field, *Superlattices and Microstructures* 49, 318 (2011)
- [41] K. Góral, L. Santos, and M. Lewenstein, Quantum Phases of Dipolar Bosons in Optical Lattices, *Phys. Rev. Lett.* 88, 170406 (2002)
- [42] B. Deveaud-Plédran, Polaritronics in view. *Nature* 453, 297 (2008).
- [43] J. Bloch, R. Planel, V. Thierry-Mieg, J.-M. Gérard, D. Barrier, J.-Y. Marzin, and E. Costard, Strong-coupling regime in pillar semiconductor microcavities, *Superlattices Microstruct.* 22, 371 (1997)
- [44] M. Obert, J. Renner, A. Forchel, G. Bacher, R. André, and L. S. Dang, Nonlinear emission in II–VI pillar microcavities: Strong versus weak coupling, *Appl. Phys. Lett.* 84, 1435 (2004)
- [45] R. I. Kaitouni, O. El Daif, A. Baas, M. Richard, T. Paraiso, P. Lugan, T. Guillet, F. Morier-Genoud, J. D. Ganière, J. L. Staehli, V. Savona, and B. Deveaud, Engineering the spatial confinement of exciton polaritons in semiconductors, *Phys. Rev. B* 74, 155311 (2006)

BjPis.