

Abstract

Exciton polaritons (polaritons herein) are mixed light-matter quasiparticles, emerging from the strong coupling between quantum-well (QW) excitons and cavity photons in a semiconductor optical microcavity. They are a quantum superposition of these two states, and as such they inherit their unique properties from both the excitonic and the photonic components. They are interacting bosons, with interactions inherited directly from the excitons, but they are also light-weight, fast and easily accessible in optical experiments, due to the photonic part. As bosons, they can form a macroscopically coherent state, such as a Bose-Einstein condensate.

Although they have been studied for more than twenty years, due to their complexity, their properties are still not fully understood and new research still emerges. They are often studied in novel contexts, in new novel platforms, or with potential for novel applications. Even some of their fundamental properties are still not fully unveiled and are subject to intensive research. This is why this thesis centers around novel properties of exciton polaritons, unexplored or unevidenced before. It focuses on several key parts: spin-dependent properties, fundamental interactions, topological and non-Hermitian properties, and dissipative effects.

The thesis studies solid-state semiconductor microcavities via optical experiments. It first centers around the experimental study of spin-dependent interactions of long-lived polaritons in a high-density condensate, where the polariton properties are governed by the polarization, optical anisotropy and the polarization-dependent interactions. It studies the condensate collective excitations, affected by a non-Abelian effective gauge field, which is formed by the polarization splittings. The thesis evidences the effective field with unique, monopole-like features and dispersion degeneracy points and directly measures the fundamental interaction constants. Then, using the same methods, it uncovers the topological and non-Hermitian properties of exciton polaritons, where not the interactions but the dissipation adds to the effective gauge field, with a high contribution of an optical anisotropy. It evidences paired exceptional points in momentum space of such a system and extracts a non-Hermitian topological invariant - serving as a first direct measurements of this feature. Then the influence of dissipation is studied further, resulting in an uncommon effect of level attraction. However, in order to do it, the excitonic properties of an AlGaAs platform need to be understood first. Based on experimental results, the thesis pinpoints three types of excitons - one direct and two momentum- and spatially-indirect - in the studied QW system, and explores their characteristics. The system understanding

is essential in unveiling the novel properties, when the coupling with photonic states is included. In a full polariton microcavity the thesis evidences an inverted, anomalous dispersion of a polariton state, inherently linked to a negative effective mass. It uncovers a basis of the effect, stemming from a dissipative coupling mediated via a coherent coupling to a dissipative mode. It pinpoints the dissipation to come from an indirect state characterized in another part of the thesis, and it presents a new method of anomalous dispersion curvature tuning. It is a first observation of an anomalous dispersion in an unstructured QW polariton system to date.

All the findings of the thesis have profound implications for further research and applications. They have been published or are under review in international peer-reviewed journals.

Streszczenie

Polarytony ekscytonowe (zwane dalej polarytonami) są kwazicząstkami złożonymi ze światła i materii, powstającymi w wyniku silnego sprzężenia ekscytonów zlokalizowanych w studni kwantowej (QW) ze związanymi fotonami w półprzewodnikowej mikrownęce optycznej. Stanowią kwantową superpozycję tych dwóch stanów, a zatem dziedziczą swoje unikalne właściwości zarówno od składnika ekscytonowego, jak i fotonowego. Są oddziałującymi bozonami, przy czym ich oddziaływania są bezpośrednio dziedziczone od ekscytonów; jednocześnie są lekkie, szybkie i łatwo mierzalne w eksperymentach optycznych, dzięki składnikowi fotonowemu. Jako bozony mogą tworzyć makroskopowo koherentny stan, jakim jest kondensat Bosego-Einsteina.

Mimo, że polarytony są badane od ponad dwudziestu lat, ze względu na swoją złożoność ich właściwości wciąż nie są w pełni zrozumiane, co motywuje wciąż pojawiające się nowe badania. Są często badane w nowych kontekstach, w nowych platformach eksperymentalnych, lub z potencjałem do nowych zastosowań. Nawet niektóre ich fundamentalne właściwości nie zostały jeszcze w pełni odkryte i są przedmiotem intensywnych badań i dyskusji. Dlatego niniejsza praca skupia się właśnie na takich nowych właściwościach polarytonów ekscytonowych, dotąd niezbadanych lub nieudowodnionych. Koncentruje się na kilku kluczowych zagadnieniach: właściwościach zależnych od spinu, fundamentalnych oddziaływaniach, właściwościach topologicznych i niehermitowskich oraz efektach dyssypatywnych.

Praca bada półprzewodnikowe mikrownęki w ciele stałym za pomocą eksperymentów optycznych. W pierwszej kolejności skupia się na eksperymentalnym badaniu zależnych od spinu oddziaływań długożyjących polarytonów w kondensacie o wysokiej gęstości, w którym właściwości polarytonów są determinowane przez polaryzację, anizotropię optyczną i zależne od polaryzacji oddziaływania. Praca bada kolektywne wzbudzenia kondensatu, na które wpływa nieabelowe efektywne pole cechowania, tworzone przez rozszczepienia polaryzacji. Praca przedstawia to efektywne pole z unikalną strukturą przypominającą monopole magnetyczne oraz punktami degeneracji w dyspersji stanów, a także przedstawia bezpośredni pomiar fundamentalnych stałych oddziaływań. Następnie, wykorzystując te same metody, odkrywa właściwości topologiczne i niehermitowskie polarytonów ekscytonowych, dla których nie oddziaływania, lecz dyssypacja przyczynia się do struktury efektywnego pola cechowania, przy jednoczesnym dużym wkładzie anizotropii optycznej. Praca przedstawia sparowane punkty wyjątkowe w przestrzeni pędu takiego systemu i wyznacza niehermitowski niezmiennik topologiczny, co stanowi pierwsze bezpośrednie pomiary

tej cechy. Następnie badany jest dalej wpływ dyssypacji, który prowadzi jednak do nietypowego efektu przyciągania stanów kwantowych. Aby go wyjaśnić, należy najpierw zrozumieć właściwości ekscytonów w układzie materiałowym AlGaAs. Na podstawie wyników eksperymentalnych praca identyfikuje oraz charakteryzuje trzy typy ekscytonów – jeden prosty i dwa skośne w pędzie oraz w przestrzeni – w badanym systemie studni kwantowych. Zrozumienie tego układu jest kluczowe dla zrozumienia nowych właściwości, gdy uwzględnione jest sprzężenie ekscytonów ze stanami fotonowymi. W pełnej mikrownęce polarytonowej praca dokumentuje odwróconą, anomalną dyspersję stanu polarytonowego, nierozzerwalnie związaną z ujemną masą efektywną. Wyjaśnia podstawy tego efektu, wynikające z dyssypatywnego sprzężenia, tworzonego przez koherentne sprzężenie ze stanem dyssypatywnym. Praca wskazuje, że dyssypacja pochodzi z jednego ze skośnych stanów, scharakteryzowanych we wcześniejszej części pracy, i prezentuje nową metodę zmiany i kontroli krzywizny anomalnej dyspersji. Jest to pierwsza obserwacja anomalnej dyspersji w niestrukturyzowanym systemie polarytonowym opartym o studnie kwantowe.

Wszystkie wyniki rozprawy mają ważne implikacje dla dalszych badań i zastosowań. Zostały one opublikowane lub są w trakcie recenzji w międzynarodowych czasopismach naukowych.