

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВЛАДИМИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени А.Г. и
Н.Г. СТОЛЕТОВЫХ»

На правах рукописи

Демирчян Севак Серобович

**Нелинейные и неклассические эффекты с экситонными
поляритонами в полупроводниковых микрорезонаторах**

01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Владимир – 2017

Работа выполнена на кафедре физики и прикладной математики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

Научный руководитель – *Аракелян Сергей Мартиросович, доктор физико-математических наук, профессор*

Официальные оппоненты – *Чиркин Анатолий Степанович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В. Ломоносова», физический факультет, профессор*

Чижов Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований», ведущий научный сотрудник

Гладуш Максим Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБУН «Институт спектроскопии Российской академии наук», старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «21» декабря 2017 г. в 16 ч. 45 мин. на заседании диссертационного совета МГУ.01.13 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, д. 1. стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С. А. Ахманова.

E-mail: sevakdemirchyan@gmail.com .

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:

https://istina.msu.ru/dissertation_councils/councils/33919655/ .

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В настоящее время поляритоника представляет собой универсальный инструмент изучения фундаментальных квантовых, когерентных и нелинейных явлений, возникающих при взаимодействии света с веществом, и относится к различным областям квантовой и атомной оптики, а также физики конденсированных сред. Одним из основных достижений поляритоники на данный момент является получение поляритонного конденсата в полупроводниковых микрорезонаторе (см. рис. 1а ниже) и управление его свойствами. При этом для данного макроскопического квантового объекта, характерно заселение основного энергетического состояния с одновременным увеличением его временной и пространственной когерентности [1]. Способность поляритонов переходить в макроскопически заселенное когерентное состояние может быть использована для создания источника когерентного излучения нового типа, получившего название «поляритонный лазер». С практической точки зрения поляритонные лазеры обладают характеристиками, аналогичными характеристикам обычного лазера: оба являются источниками когерентного и монохроматического света, а также в обоих случаях существует некоторый порог накачки, выше которого только одно состояние становится эффективно заселенным. Важное отличие состоит в том, что для обычного лазера усиление лазерной моды за счет вынужденного излучения происходит, если достигнута инверсия населенности. В поляритонном же лазере явные требования к инверсии населенности отсутствуют. Когерентное излучение формируется в результате высвечивания поляритонного конденсата из микрорезонатора. При этом порог мощности оптической накачки, необходимый для формирования конденсата, существенно ниже порога лазерной генерации на межзонном переходе в данной структуре.

Среди областей возможного практического применения микрорезонаторных поляритонов можно отметить значительный прогресс в исследованиях, посвященных использованию поляритонных систем в качестве альтернативы стандартным оптическим и электронным средствам обработки и передачи информации. Действительно, принцип работы типичных оптических вентилях основан на управлении распространением оптического сигнала за счет изменения показателя преломления среды. Это изменение может быть достигнуто, например, за счет воздействия другого оптического импульса. Такое управление определяется нелинейными свойствами материалов –

изменением показателя преломления под действием управляющего оптического воздействия. Однако, к сожалению, нелинейные коэффициенты в доступных на данный момент оптических твердотельных средах относительно невелики. Поэтому функционирование оптических вентилях требует больших лазерных мощностей.

В этой связи поляритонные среды, которые характеризуются сильной нелинейностью, обладают преимуществами в аспекте быстродействия (их характерное время переключения – несколько пикосекунд) и пороговых мощностей управляющих воздействий, необходимых для осуществления соответствующих логических операций (на 2-3 порядка ниже, чем в схемах, использующих оптические твердотельные среды) [2]. Кроме того, достижения современных микро- и нанотехнологий позволяет создавать поляритонные устройства, способные функционировать при высоких температурах – вплоть до комнатных [3].

В последнее десятилетие были предложены различные подходы к использованию резонаторных поляритонов для задач обработки информации как в классических, так и в квантовых системах. К наиболее значимым примерам необходимо отнести поляризационно-управляемые вентили [4], оптические цепи на поляритонных нейронах [5], а также оптические поляритонные транзисторы [6]. Основным критерием, предъявляемым к поляритонным средам в подобных задачах, является возможность поддержания долговременной когерентности как всего конденсата в целом, так и между поляритонами, находящимися в разных состояниях. В частности, речь идет о степени когерентности между состояниями поляритонного конденсата, относящимися к разным дисперсионным ветвям. В этом случае наличие когерентности экспериментально проявляется в виде биения интенсивности оптического сигнала, выходящего из микрорезонатора, известных как осцилляции Раби. Данные биения происходят с частотой, соответствующей энергетическому расщеплению между двумя поляритонными ветвями и сопровождаются периодическим обменом населенностью между экситонной и фотонной подсистемами. Однако, как было установлено экспериментально [7], сильные диссипативные эффекты, а также процессы декогеренции, происходящие в полупроводниковых микрорезонаторах, приводят к быстрой потере когерентности между различными состояниями поляритонного конденсата и сопутствующему затуханию осцилляций Раби на временных масштабах порядка нескольких пикосекунд.

Таким образом, исследование когерентных свойств поляритонных источников оптического излучения, а также поиск способов поддержания когерентности в таких поляритонных системах, представляют собой актуальную научную задачу. Для ее решения в диссертационной работе предлагается способ поддержания долгоживущих осцилляций Раби в связанной экситон-фотонной системе за счет непрерывной подпитки осцилляций из некогерентного экситонного резервуара, формируемого нерезонансной накачкой. Для этого исследуются различные механизмы рассеивания экситонов из некогерентного резервуара в основное поляритонное состояние, позволяющие оптимизировать параметры системы и добиться улучшения эффекта поддержания когерентности в поляритонном лазере. При этом особое внимание уделено анализу влияния характерных для полупроводниковых микрорезонаторов эффектов, которые разрушают эту когерентность. Речь идет, во-первых, о процессах экситон-экситонного взаимодействия, обуславливающих сильно нелинейный характер поляритонной динамики. Во-вторых, это существенно неравновесный характер поляритонных состояний, который обуславливает присутствие дополнительных каналов релаксации. В этой связи исследование когерентных свойств поляритонных источников оптического излучения с учетом квантовых флуктуаций в полупроводниковых микрорезонаторах, является принципиальной фундаментальной задачей. Она определяет возможное применение подобных устройств в качестве низкопороговых источников когерентного оптического излучения, а также может способствовать разработке элементов и систем оптической обработки информации, функционирующих на новых физических принципах.

Целью диссертационной работы является исследование механизмов увеличения времени когерентности осцилляций Раби в системе экситонных поляритонов, сформированных в присутствии нерезонансной оптической накачки в плоском полупроводниковом микрорезонаторе, а также анализ влияния квантовых флуктуаций на свойства излучения поляритонных лазеров.

В соответствии с данной целью в диссертационной работы решались следующие основные задачи:

1. Поиск и исследование механизма поддержания долговременной когерентности между экситонными поляритонами, локализованными на разных дисперсионных ветвях в полупроводниковом микрорезонаторе. Построение соответствующей теории.

2. Исследование нелинейных процессов в поляритонной системе (взаимное рассеяния экситонов, находящихся в основном состоянии, а также на экситонах из некогерентного резервуара), а также дополнительных механизмов релаксации в экситон-фотонной системе, влияющих на установление устойчивых во времени осцилляций Раби.

3. Определение условий и требований к параметрам системы: интенсивности внешней накачки, диссипации фотонных и экситонных компонент, характеристикам некогерентного резервуара, – при которых поляритоны обладают свойствами РТ-симметричных (или в общем случае псевдоэрмитовых) систем.

4. Анализ влияния квантовых флуктуаций на экситонные поляритоны, локализованные в полупроводниковом микрорезонаторе, с учетом их нелинейного взаимодействия с оптическим излучением.

Научная новизна

1. Предложен физический механизм создания долгоживущих Раби осцилляций в системе экситонных поляритонов, формируемых в полупроводниковом микрорезонаторе в присутствии нерезонансной оптической накачки.

2. Выявлено влияние различных механизмов потерь на возможность установления незатухающих Раби-осцилляций с учетом нелинейности и дополнительной релаксации поляритонов верхней дисперсионной ветви. При этом определены условия, при которых поляритоны обладают свойствами РТ-симметричных (или в общем случае псевдоэрмитовых) систем при учете динамики резервуарных экситонов, внешней накачки и диссипации.

3. Учтены квантовые шумы, определяющие статистические свойства излучения микрорезонатора с полупроводниковой квантовой ямой, возбуждаемого околорезонансной накачкой. Продемонстрировано, что присутствие квантового шума может существенным образом влиять на состояние системы. В частности, показано, что в области, где стандартный анализ стационарных состояний экситонной и фотонной подсистем, выполненный в приближении среднего поля, предсказывает существование бистабильности решения, в развитой квантовой теории, учитывающей квантовый шум, она не обнаруживается. При этом наблюдается резкое увеличение средней интенсивности излучения микрорезонатора в узком диапазоне значений внешней накачки, который меньше ширины области бистабильности, возникающей в рамках полуклассического анализа.

Практическая значимость

Проведенные исследования когерентных свойств поляритонных лазеров могут быть использованы при разработке новых физических принципов для создания элементов и систем обработки оптической информации нового типа, а также источников когерентного излучения с неклассической статистикой. Полученные результаты открывают новые перспективы как для теоретического исследования осцилляций Раби в поляритонных средах и эффектов, связанных с ними (в частности, влияния осцилляций Раби на свойства поляризации излучения поляритонного лазера), так и для экспериментального обнаружения незатухающих осцилляций в реальных микрорезонаторных структурах.

Положения, выносимые на защиту

1. Время затухания осцилляций Раби в системе экситонных поляритонов в микрорезонаторе может быть увеличено за счет эффекта вынужденного рассеяния из некогерентного экситонного резервуара, созданного нерезонансной постоянной накачкой. Для реалистичных параметров микрорезонаторов на основе GaAs время жизни осцилляций Раби достигает величины 1 нс.

2. За счет механизма парного рассеяния экситонов из некогерентного резервуара в основное состояние, возможно установление незатухающих осцилляций населенности фотонной компоненты конденсата. Эффект будет иметь место в том числе и в структурах, для которых характерна быстрая дополнительная релаксация поляритонов верхней дисперсионной ветви.

3. Эффект динамической компенсации потерь в экситон-фотонной системе в присутствии нерезонансной оптической накачки может быть интерпретирован в терминах неэрмитовой квантовой механики, как проявление поляритонной системой свойств псевдоэрмитовости с набором действительных собственных частот.

4. Присутствие квантовых флуктуаций в системе экситонных поляритонов с нелинейным взаимодействием между экситонами приводит к появлению резкого скачка величины экситонной плотности, сопровождающегося переходом системы с нижней ветви бистабильности на верхнюю ветвь. Данный скачок также сопровождается резким увеличением функции когерентности второго порядка оптического поля. Значение накачки, при котором происходит такой скачок, а также амплитуда скачка определяются параметрами системы: нелинейностью, скоростью диссипации, а также экситон-фотонной отстройкой.

Апробация работы

Результаты работы прошли апробацию на следующих российских и международных конференциях:

International Conference and School «Single dopants», Россия, Санкт-Петербург, 1-5 июня 2014 г.; Молодежная школа для молодых ученых «Лазерная физика и фотоника», Россия, Владимир/Суздаль, 11-17 ноября 2014 г.; Second Russian-Britain Workshop for Young Scientists «Advanced Polaritonics and Photonics», Россия, Владимир/Суздаль, 12-15 марта 2015 г.; XXIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Россия, Москва, 11-15 апреля 2015г.; XII International Workshop on Quantum Optics (IWQO-2015), Россия, Москва/Троицк, 11-16 августа 2015 г.; The twenty fifth annual International Laser Physics Workshop, Армения, Ереван, 11-15 июля 2016г.

По теме диссертационной работы опубликовано 4 статьи в журналах из перечня ВАК (приведены в конце автореферата).

Личный вклад автора

Представленные в диссертации результаты оригинальны и получены автором лично. Выбор направления исследования, постановка задач и интерпретация полученных результатов производились совместно с научным руководителем и соавторами статей.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, трех оригинальных глав, заключения и списка литературы из 115 наименований. Диссертация изложена на 123 страницах и содержит 33 рисунка.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цели, аргументирована научная новизна исследований. Показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения. Описан личный вклад автора и представлены сведения об апробации работы и публикациях.

Первая глава посвящена общему описанию исследуемых в диссертации задач с точки зрения их использования для решения современных проблем функционирования оптических сетей. Рассмотрены задачи взаимодействия

оптического излучения с возбуждениями в твердом теле и приведены схемы реализации поляритонных устройств на их основе. Отдельное внимание уделено рассмотрению экситонов в квантовой яме – низкоразмерной структуре, которая удерживает экситон в одном из направления и в результате вызывает квантование его энергии в направлении пленения. В частности, описывается процесс взаимодействия экситонов квантовой ямы и моды микрорезонатора, в который помещена эта квантовая яма, в режиме сильной связи, при котором выполняется условие $\Omega \gg \gamma_p, \gamma_x$. Здесь Ω – коэффициент связи между экситонной и фотонной модами, γ_x – скорость затухания экситонной моды и γ_p – скорость затухания фотонного поля внутри микрорезонатора. Такое взаимодействие приводит к образованию двух новых собственных мод системы, которые называются поляритонами верхней и нижней ветвей. В первой главе также представлен краткий обзор явлений, свойственных данным квазичастицам, а именно осцилляций Раби [7] и конденсации Бозе-Эйнштейна [1]. Далее рассмотрены возможные способы создания элементов оптических цепей на основе экситонных поляритонов. Показано, что устройства на основе поляритонов обладают рядом преимуществ, таких как быстрое время переключения и низкая пороговая мощность.

Вторая глава посвящена исследованию возможности увеличения времени жизни осцилляций Раби в полупроводниковом микрорезонаторе. Для этого предложено использовать внешнюю непрерывную накачку, формирующую некогерентный экситонный резервуар, пополняющий населенности поляритонных состояний и поддерживающий тем самым их взаимную когерентность (рис. 1). Принцип действия предложенной схемы можно описать следующим образом. Короткий (длительностью порядка сотни фемтосекунд) спектрально широкий лазерный импульс возбуждает суперпозицию поляритонов верхней и нижней ветвей в области $\vec{k}_{\parallel} = 0$, где \vec{k}_{\parallel} – волновой вектор, лежащий в плоскости микрорезонатора. При этом непрерывная нерезонансная накачка (оптическая или токовая) формирует резервуар некогерентных экситонов, характеризующихся большими значениями волнового вектора \vec{k}_{\parallel} . Поляритоны из резервуара могут вынужденным (стимулированным) образом переходить в основное состояние на верхней и нижней поляритонных ветках ($\vec{k}_{\parallel} = 0$), поскольку именно эти состояния макроскопически заселены в результате действия начального импульса.

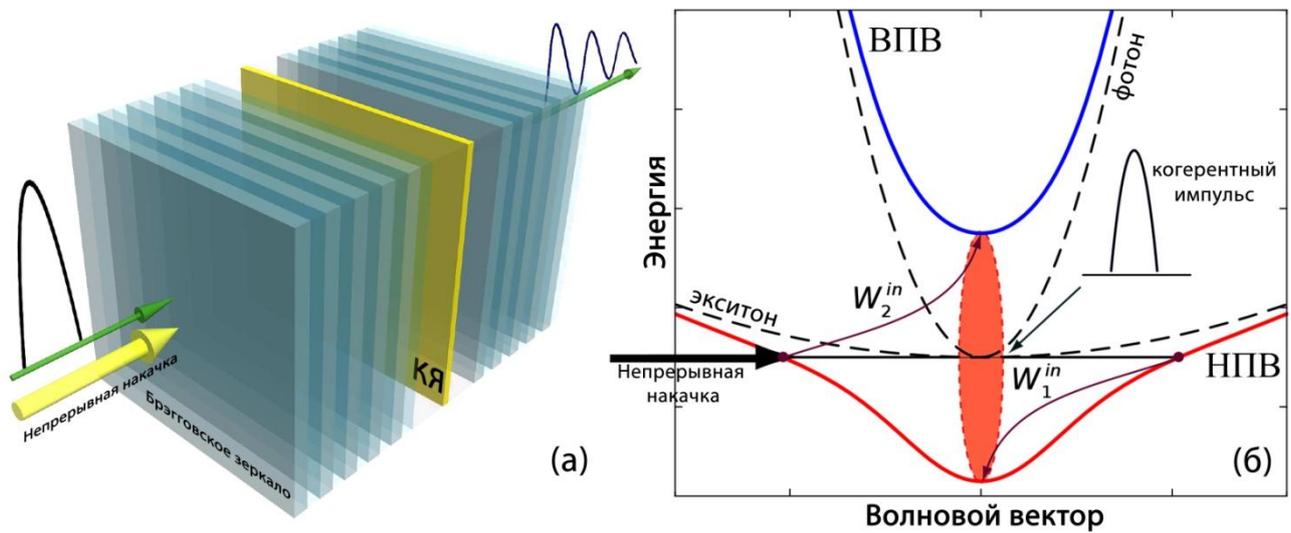


Рис. 1. (а) – Схема возбуждения поляритонов в микрорезонаторе, (б) – поляритонная дисперсия и схематическое изображение процесса поляритонного рассеяния, поддерживаемого некогерентным резервуаром.

Для описания динамики подсистемы поляритонов верхней и нижней дисперсионных ветвей используется подход матрицы плотности ρ размерности 2×2 , для которой диагональные элементы описывают населенности поляритонных состояний, а недиагональные отвечают за относительную фазу между верхним и нижним поляритонными состояниями [8]. Данный подход позволяет перейти к уравнениям для вектора псевдоспина рассматриваемой двухуровневой системы (Раби осциллятора)

$$\vec{\Pi} = (\Pi_x, \Pi_y, \Pi_z) = \left(\frac{\rho_{12} + \rho_{21}}{2}, \frac{i(\rho_{21} - \rho_{12})}{2}, \frac{\rho_{22} - \rho_{11}}{2} \right),$$

длина которого нормирована

на общее количество поляритонных частиц. Последняя величина, в свою очередь, не сохраняется из-за взаимодействия поляритонной подсистемы с некогерентным резервуаром, описываемым кинетическим уравнением на число частиц N_R . При этом под резервуаром в обобщенном виде понимаются все поляритонные состояния, для которых составляющая волнового вектора, лежащая в плоскости микрорезонатора, не равна нулю. Влияние резервуара учтено в виде кинетических слагаемых, ответственных за вынужденные переходы частиц из резервуара в Раби-осциллятор (вероятность которых пропорциональна $W_{1,2}^{in}$, где индекс «1» соответствует нижнему состоянию, а индекс «2» – верхнему) и обратно ($\sim W_{1,2}^{out}$). Используемый подход позволяет явным образом учесть бозонную природу вынужденных переходов, когда скорость перехода в конечное состояние пропорциональна не числу частиц N_i

в данном состоянии, а $N_i + 1$. Поэтому уравнения, описывающие динамику Раби-осциллятора, имеют вид полуклассических уравнений Больцмана:

$$\begin{aligned}\frac{dN}{dt} &= -\left[\frac{1}{\tau_+} - \delta W_+\right]N - \left[\frac{1}{\tau_-} - \delta W_-\right]\Pi_z + W_+, \\ \frac{d\Pi_z}{dt} &= -\left[\frac{1}{\tau_+} - \delta W_+\right]\Pi_z - \left[\frac{1}{\tau_-} - \delta W_-\right]N + W_-, \\ \frac{d\vec{\Pi}_\perp}{dt} &= -\left[\frac{1}{\tau_+} + \frac{1}{\tau_\perp} - \delta W_+\right]\vec{\Pi}_\perp - [\vec{\Omega}_R \times \vec{\Pi}_\perp],\end{aligned}\quad (1)$$

здесь $\vec{\Pi}_\perp = (\Pi_x, \Pi_y)$, $N = \frac{\rho_{11} + \rho_{22}}{2}$, $\delta W_\pm = \left[(W_2^{in} - W_2^{out}) \pm (W_1^{in} - W_1^{out})\right]/2$, $W_\pm = (W_2^{in} \pm W_1^{in})/2$, $\vec{\Omega}_R = \Omega_R \vec{e}_z$, где Ω_R – частота расщепления Раби между дисперсионными ветками при $\vec{k}_\parallel = 0$ и \vec{e}_z – единичный вектор вдоль оси z , перпендикулярной плоскости квантовой ямы. В системе (1) так же введены характерные времена затухания $\tau_\pm^{-1} = (\tau_2 \pm \tau_1)/2$, где τ_1 и τ_2 – скорости релаксации поляритонов нижней и верхней ветвей соответственно, а так же τ_\perp – скорость дополнительной релаксации недиагональных компонент матрицы плотности. Диссипативные процессы ответственны за потерю когерентности и затухание Раби-осцилляций.

Используемое представление позволяет продемонстрировать эффект увеличения времени жизни осцилляций Раби. Согласно используемой модели (1) время затухания осцилляций определяется временем релаксации τ_R поперечных компонент вектора псевдоспина Π_x и Π_y . На рис. 2 представлено решение динамических уравнений для величины Π_x , наглядным образом демонстрирующее, что пополнение населенностей поляритонных ветвей за счет переходов из резервуара способствует увеличению τ_R (рис. 2). При этом анализ стационарных решений системы показывает, что чем больше мощность внешней накачки P , тем более выражен исследуемый эффект. Другим ключевым параметром, определяющим эффективность увеличения времени когерентности, является соотношение скоростей вынужденных переходов из резервуара на верхнюю и нижнюю ветви W_2^{in} / W_1^{in} . Получено наглядное выражение, описывающее зависимость времени жизни осцилляций от параметров системы.

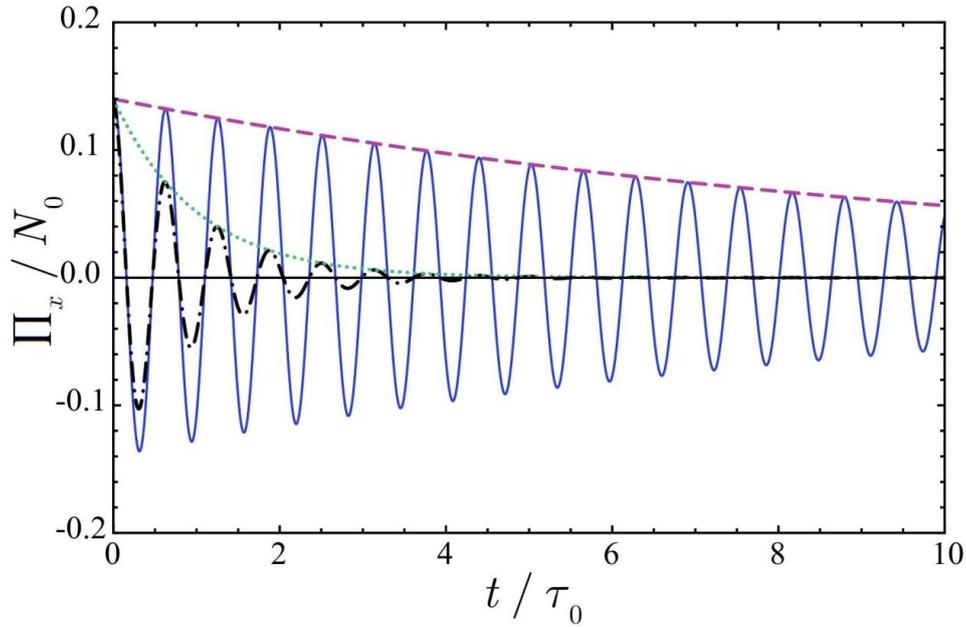


Рис. 2. Временная динамика нормированной компоненты вектора Блоха Π_x/N_0 [$N_0 \equiv N(t=0)$] в присутствии (сплошная, синяя кривая) и отсутствии (штрих-пунктирная, черная кривая) накачки. Пунктирная (фиолетовая) и точечная (зеленая) кривые соответствуют огибающей осцилляций в присутствии накачки и без нее, соответственно. Параметры системы: $P\tau_0 = 20$, $W_{1,2}^{out} = 0$, $\Omega_R\tau_0 = 10$. Здесь τ_0 – время затухания осцилляций в отсутствии резервуара. Начальные условия: $\Pi_x/N_0 = 0.14$, $\Pi_y/N_0 = 0$ и $\Pi_z/N_0 = 0.48$.

Если скорости затухания поляритонных состояний верхней и нижней ветвей равны, что может быть достигнуто в столпообразных микрорезонаторах (micropillars), время жизни осцилляций Раби может быть увеличено вплоть до наносекунд (в отсутствие резервуара осцилляции затухают на пикосекундном масштабе). В то же время, для плоских микрорезонаторов характерно присутствие дополнительной релаксации верхнего поляритонного состояния. В таких системах данный процесс будет определяющим образом влиять на время затухания осцилляций. Для компенсации разных времен жизни поляритонов верхней и нижней ветвей предложено подстраивать частоту внешней накачки таким образом, чтобы она была близка к резонансу с верхней поляритонной веткой. При этом скорость заселения верхней ветки из резервуара оказывается выше скорости переходов на нижнюю ветвь, что способствует компенсации дополнительных потерь для верхнего состояния.

В третьей главе было исследовано проявление квантовых свойств (псевдоэрмитовости экситон-фотонной системы в присутствии нерезонансной накачки) в динамике Раби осцилляций, а также влияние на нее нелинейных эффектов. Присутствие нелинейности в системе обусловлено процессами

упругого рассеяния рассеяние экситонов, находящихся в основном состоянии, друг на друге, а также на экситонах резервуара. Оба эти процесса приводят к сдвигу уровня энергии экситонов в синюю область спектра.

При решении задачи, описанной в главе 2, конкретные физические процессы, приводящие к пополнению основной поляритонной моды, оставались за рамками рассмотрения, что позволило сделать лишь общие выводы о необходимом соотношении скоростей рассеяния на верхнюю и нижнюю ветку. В третьей главе для развития результатов, полученных ранее, было рассмотрено два конкретных механизма пополнения экситонной моды из резервуара. Первым процесс соответствует энергетической релаксации экситона из резервуара в основное состояние за счет рассеяния на акустическом фоне. Вероятность таких переходов пропорциональна плотности частиц в резервуаре. Вторым рассматриваемым механизмом является парное рассеяние экситонов с волновыми векторами $-\vec{k}$ и \vec{k} в состояние с $\vec{k}_{\parallel} = 0$. Поскольку в таком процессе принимают участие сразу два некогерентных экситона, скорость подобных переходов пропорциональна квадрату числа экситонов в резервуаре N_R^2 , а так же количеству экситонов в основном состоянии. Поскольку процессы пополнения Раби осциллятора непосредственным образом связаны с поведением экситонной компоненты поляритонного состояния, при решении задачи использовался экситон-фотонный базис. Таким образом, динамика системы описывалась в терминах амплитуд фотонной ϕ и экситонной χ компонент:

$$\begin{aligned}\frac{d\phi}{dt} &= -\frac{1}{2}\gamma_P\phi - i\Omega\chi, \\ \frac{d\chi}{dt} &= \frac{1}{2}(p_X[N_R] - \gamma_X)\chi + i\Delta\chi - i\Omega\phi - ig_{ES}\chi, \\ \frac{dN_R}{dt} &= P - \gamma_R N_R - p_X[N_R]|\chi|^2,\end{aligned}\tag{2}$$

где $p_X[N_R]$ описывает накачку экситонного состояния вследствие вынужденного рассеяния из резервуара, $\Delta = \omega_p - \omega_x$ – отстройка, определяемая разностью частот фотонной и экситонной моды, γ_R – скорости затухания резервуара. Параметр $g_{ES} = g_c|\chi|^2 + g_R N_R$ ответственен за экситон-экситонное и экситон-резервуарное взаимодействия, с константами взаимодействия g_c и g_R соответственно.

Вначале было рассмотрено поведение системы (2) при значениях накачки в непосредственной близости от порога образования конденсата, когда переходы из резервуара полностью компенсирует потери в экситонных и фотонных модах. При этом населенность экситонной моды $|\chi|^2$ мала, и нелинейными эффектами рассеяния экситонов в основном состоянии можно пренебречь. Выше порога накачки в системе устанавливается режим динамической компенсации потерь, соответствующий ненулевой заселенности экситонной и фотонной мод. При этом продемонстрировано, что при определенных параметрах системы возможно установление режима незатухающих во времени биений плотности экситонной и фотонной компонент, т.е. осцилляций Раби. Практически такие осцилляции проявляют себя в виде биения оптического излучения микрорезонатора. Установление незатухающих осцилляций возможно при действительных значениях частот, что позволяет интерпретировать эффект динамической компенсации потерь в экситон-фотонной системе в терминах неэрмитовой квантовой механики [9].

Условие установления незатухающих биений оптического сигнала микрорезонатора (осцилляций Раби) существенным образом зависит от конкретного механизма пополнения населенности поляритонной моды. Демонстрировано, что в случае доминирования процесса заселения основного состояния за счет рассеяния экситонов из резервуара на фонах незатухающие осцилляции устанавливаются только при выполнении условия резонанса экситонных и фотонных мод, т.е. при $\Delta = 0$. В противном случае вклад экситонной компоненты неодинаков для верхнего и нижнего поляритонного состояния. Тогда в отсутствие дополнительной релаксации верхней ветви потери не могут быть одновременно скомпенсированы для обоих поляритонных состояний, в результате чего осцилляции Раби затухают. В экситон-фотонном базисе описанный эффект проявляет себя в затухании биений и установлении населенностей экситонной и фотонной компонент на стационарном уровне.

В том случае, когда в системе доминирует процесс пополнения основного состояния за счет парного экситон-экситонного рассеяния (что, как было продемонстрировано в диссертации, возможно при больших значениях накачки) условие резонанса экситонного перехода в квантовой яме с микрорезонаторной модой не является обязательным для установления незатухающих осцилляций.

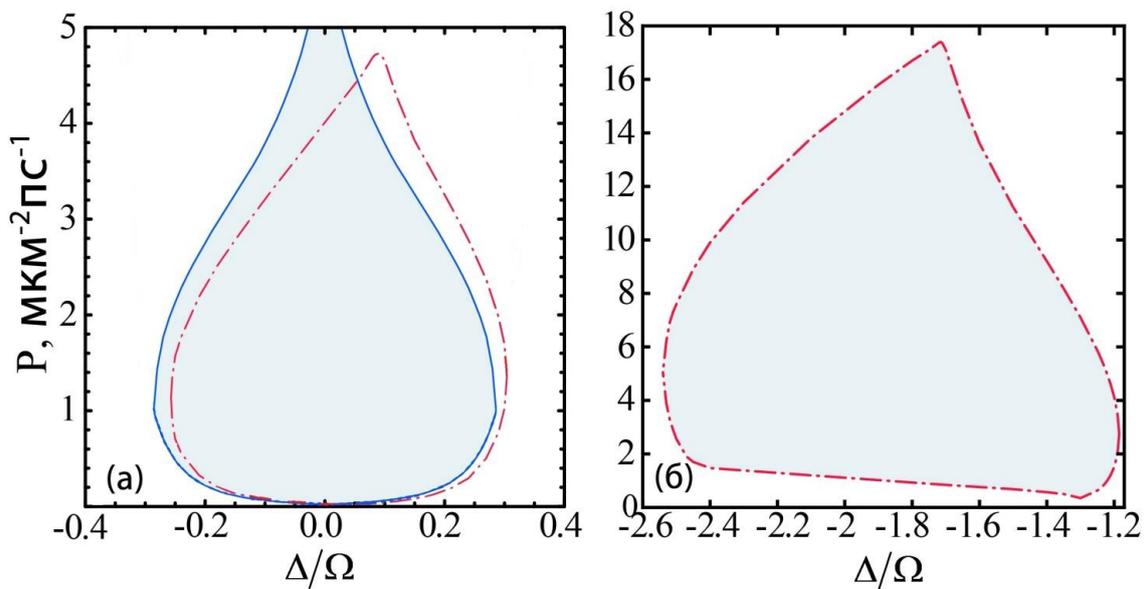


Рис.3. Диаграмма существования незатухающих осцилляций Раби (закрашенная область) без учета (а) и с учетом (б) релаксации верхней поляритонной ветви со скоростью $\gamma' = 0.4 \text{ ps}^{-1}$. Штрих-пунктирная линия соответствует области существования осцилляций, определенной численно с учетом синего сдвига уровня энергии экситона. Параметры, использованные для расчета, соответствуют микрорезонаторам на основе GaAs.

Показано, что присутствие рассмотренного механизма пополнения Раби-осциллятора делает систему более устойчивой к дисбалансу потерь на поляритонных ветках. Определен диапазон значений экситон-фотонной отстройки, при которых система обладает действительным набором собственных частот.

Использованный подход позволяет обобщить сделанные выводы на случай присутствия нелинейности за счет процессов упругого экситон-экситонного рассеяния. Продемонстрировано, что присутствие взаимодействия между экситонами в основном состоянии приводит лишь к изменению диапазона значений параметров, при которых образуются незатухающие осцилляции (штрих-пунктирная кривая на рис.3а), но не отражается на принципиальной возможности их обнаружения. Данный результат, однако, справедлив лишь в присутствии процессов парного экситон-экситонного рассеяния из резервуара.

Для определения параметров системы, при которых возможно установление осцилляций Раби, было выполнено численное моделирование динамики системы с учетом нелинейных процессов – см. рис. 3. При этом продемонстрировано, что благодаря процессам парного рассеяния экситонов из резервуара устойчивые осцилляции Раби могут устанавливаться даже в присутствии сильной дополнительной релаксации верхней ветки. Это возможно при больших отрицательных значениях отстройки (рис. 3б). В этом пределе

поляритоны верхней ветви становятся полностью экситоноподобными и получают большую часть от накачки экситонного состояния из резервуара, что позволяет компенсировать бóльшие потери.

В заключительном разделе третьей главы продемонстрировано, что незатухающие осцилляции Раби играют важную роль в установлении долгоживущей спиновой поляризации в экситон-фотонной системе, что делает возможным создание новых оптических устройств, обладающих нетривиальными поляризационными характеристиками. В частности показано, что управление поляризацией поляритонного лазера возможно внешним магнитным полем, присутствие которого приводит к зеемановскому расщеплению состояний экситонов с разными значениями спина. В результате осцилляции Раби могут независимым образом устанавливаются для обеих спиновых компонент, но характеризуются разной частотой. Результирующая поляризация излучения микрорезонатора при этом совершает сложные биения, соответствующие быстрому заполнению вектором Стокса сферы Пуанкаре.

Четвертая глава посвящена анализу влияния шумов, вызванных диссипацией, на функционирование оптических и поляритонных систем, использующих явление бистабильности. Для описания такой системы использовался следующий гамильтониан, записанный в терминах вторичного квантования:

$$H = \hbar\omega_p \hat{\phi}^\dagger \hat{\phi} + \hbar\omega_x \hat{\chi}^\dagger \hat{\chi} + \hbar\Omega (\hat{\phi}^\dagger \hat{\chi} + \hat{\chi}^\dagger \hat{\phi}) + \hbar\kappa \hat{\chi}^{\dagger 2} \hat{\chi}^2 + i\hbar(E \hat{\phi}^\dagger - E^* \hat{\phi}) + \hat{\phi}^\dagger \Gamma_1 + \hat{\phi} \Gamma_1^\dagger + \hat{\chi}^\dagger \Gamma_2 + \hat{\chi} \Gamma_2^\dagger. \quad (3)$$

Здесь $\hat{\phi}(\hat{\phi}^\dagger)$ – оператор уничтожения (рождения) фотонной моды частоты ω_p , $\hat{\chi}(\hat{\chi}^\dagger)$ – то же для экситонов, обладающих частотой ω_x . Поле внешней накачки полагается однородным, $E = E_p \cdot e^{-i\varepsilon t}$, где E_p – амплитуда накачки фотонной моды, ε – частота накачки. Слагаемое $\hbar\kappa \hat{\chi}^{\dagger 2} \hat{\chi}^2$ соответствует упругому экситон-экситонному рассеянию (κ – параметр нелинейности). Операторы Γ_1 и Γ_2 описывают фононные резервуары для фотонов и экситонов соответственно.

Вначале рассмотрено поведение системы в полуклассическом подходе, основанном на использовании уравнений для средних от операторов уничтожения фотонов и экситонов. При этом стационарное решение системы предсказывает наличие бистабильной зависимости интенсивности сигнала от

микрорезонатора от величины внешней накачки. Устойчивость соответствующих решений определяется в рамках линейного анализа устойчивости. Далее, на основе представления Глаубера-Сударшана был осуществлен переход от операторных уравнений к уравнениям на с-числа. В пределе малых возмущений получены точные аналитические выражения для спектра флуктуаций в квантовом пределе, подразумевающим, что энергии экситона и фотона существенно больше тепловой энергии, $\hbar\omega_{x,p} \gg kT$, что хорошо выполняется на практике. Однако приближение линеаризации по квантовым флуктуациям не всегда справедливо, и в таких случаях необходимо решать уравнение Фоккера-Планка, что, тем не менее, не всегда представляется возможным. В этой связи для нахождения решения уравнения Фоккера-Планка было использовано адиабатическое приближение. Данное приближение можно полагать хорошо выполняющимся на практике в силу быстрого затухания фотонной моды $\gamma_p \gg \gamma_x$, наблюдаемое в типичных образцах. Существование искомого решения обеспечивается условием потенциальности, которое выполняется в случае пренебрежения теплового шума, т.е. в квантовом пределе. При этом обычное интегрирование обобщенной силы в комплексной плоскости невозможно, так как функция распределения в этом случае расходится, поэтому вместо обычного диагонального представления Глаубера-Сударшана использовалось недиагональное.

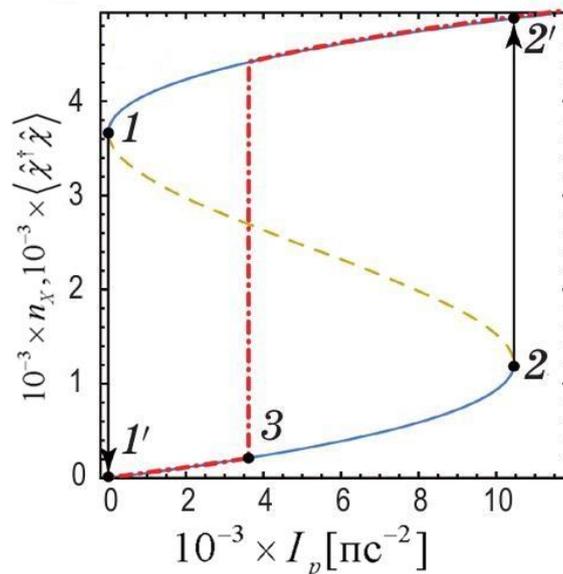


Рис.4. Сплошная кривая (с пунктирным участком) соответствует полуклассическому решению для зависимости населенности экситонов n_x от величины оптической накачки I_p ; штрих-пунктирная линия соответствует квантово-механическому среднему значению населенности экситонов $\langle \hat{x}^\dagger \hat{x} \rangle$, определенному из решения уравнения Фоккера-Планка.

Получено аналитическое выражение для P -функции экситон-фотонной системы, что дает возможность определить корреляторы любого порядка и исследовать статистику излучения микрорезонатора. В частности, продемонстрировано, что в области, где полуклассическое стационарное решение предсказывает присутствие бистабильности, решение уравнение Фоккера-Планка ее не обнаруживает. Вместо этого наблюдается резкий скачок в зависимости плотности экситонов (и фотонов) от накачки – см. рис. 4. Переход из состояния на нижней ветви бистабильности в состояние на верхней ветви сопровождается также резким всплеском величины когерентности второго порядка $g^{(2)}$ до значений, соответствующих ярко выраженной группировке. При этом до скачка поле находится в состоянии группировки $g^{(2)} > 1$, а после скачка наблюдается эффект антигруппировки $g^{(2)} < 1$.

В **Заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

1. Решена проблема получения долгоживущих поляритонных состояний, формирующихся в полупроводниковых микрорезонаторах. Предложен способ увеличения времени жизни осцилляций Раби в подобных системах за счет вынужденных переходов поляритонов из некогерентного резервуара, созданного нерезонансной оптической накачкой.
2. Выяснено, что в режиме сильной связи системы фотонов в моде микрорезонатора с экситонами в основном состоянии, реализуются псевдоэрмитовы свойства, что отражается в динамике излучения поляритонного лазера. При этом устанавливается режим устойчивых во времени (самоподдерживающихся) осцилляций фотонного поля и экситонной плотности (осцилляций Раби). Определены критерии и требования к параметрам системы: величине некогерентной накачки, а также экситон-фотонной отстройке, – при которых система фотонов и экситонов поддерживает незатухающие Раби-осцилляции.
3. Определено влияние нелинейных свойств поляритонной системы (взаимное рассеяния экситонов, находящихся в основном состоянии, а также рассеяние на экситонах из некогерентного резервуара) на установление в экситон-фотонной системе устойчивых во времени осцилляций Раби. Выяснено, что если осцилляции Раби поддерживаются за счет процессов рассеяния экситонов резервуара на фонах с переходом в основное состояние, то нелинейное взаимодействие между экситонами делает невозможным установление

- длительный осцилляций – они медленно затухают (на временах порядка нескольких пс).
4. Доказано, что нелинейный механизм парного рассеяния резервуарных экситонов способен поддерживать осцилляции Раби даже с учетом нелинейного взаимодействия между экситонами в основном состоянии (в отличие от механизма рассеяния на фонах), а также в присутствии дополнительной релаксации поляритонов верхней поляритонной ветви – основного механизма, отвечающего за затухание осцилляций Раби, наблюдаемого на практике. Учет данных эффектов является необходимым для обнаружения предсказанных явлений в реальных микрорезонаторных структурах. Определена область значений параметров (экситон-фотонной отстройки и мощности накачки), при которых могут устанавливаться незатухающие осцилляции Раби.
 5. Определено, что учет квантовых флуктуаций для поляритонной системы с экситонной нелинейностью критическим образом меняет стационарное решение. Аналитическое решение уравнения Фоккера-Планка предсказывает резкий всплеск плотности экситонов в области, где полуклассическое решение характеризуется наличием бистабильности.

Список публикаций автора в журналах, включенных в перечень ВАК

1. *Demirchyan S.S., Chestnov I.Yu., Alodjants A.P., Glazov M.M., Kavokin A.V.* Qubits Based on Polariton Rabi Oscillators // *Physical Review Letters* –2014. –Vol.112. – P.196403.
2. *Chestnov, I. Y., Demirchyan S.S., Alodjants A.P., Rubo Y.G., Kavokin A.V.* Permanent Rabi oscillations in coupled exciton-photon systems with PT-symmetry//*Scientific Reports*. – 2016. –Vol.6. –P.19551.
3. *Демирчян С. С., Честнов И.Ю., Аракелян С.М., Алоджанц А.П. и Кавокин А.В.* О механизме поддержания осцилляций Раби в системе экситонных поляритонов в микрорезонаторе // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2016. – Т. 103. – №. 1. – С. 56-61.
4. *Демирчян С.С., Худайбергенов Т.А., Честнов И.Ю., Алоджанц А.П.* Квантовые флуктуации в системе экситонных поляритонов в полупроводниковом микрорезонаторе// *Оптический журнал*. –2017. – Т.84. –№.2. – С. 10-18.

Список цитированной литературы

1. *Kasprzak J., Richard M., Kundermann S., Baas A., Jeambrun P., Keeling J. M. J., Marchetti F. M., Szymańska M. H., André R., Staehli J. L., Savona V., Littlewood P. B., Deveaud B., Dang Le Si* Bose–Einstein condensation of exciton polaritons // *Nature*. – 2006. – Т. 443. – №. 7110. – С. 409-414.
2. *De Giorgi M., Ballarini D., Cancellieri E., Marchetti F. M., Szymańska M. H., Tejedor C., Cingolani R., Giacobino E., Bramati A., Gigli G., Sanvitto D.* Control and ultrafast dynamics of a two-fluid polariton switch // *Physical review letters*. – 2012. – Т. 109. – №. 26. – С. 266407.
3. *Christopoulos S., Von Högersthal G. B. H., Grundy A. J. D., Lagoudakis P. G., Kavokin A. V., Baumberg J. J., Christmann G., Butté R., Feltin E., Carlin J.-F., Grandjean N.* Room-temperature polariton lasing in semiconductor microcavities // *Physical review letters*. – 2007. – Т. 98. – №. 12. – С. 126405.
4. *Leyder C., Liew T. C., Kavokin A. V., Shelykh I. A., Romanelli M., Karr J. P., Giacobino E., Bramati A.* Interference of coherent polariton beams in microcavities: polarization-controlled optical gates // *Physical review letters*. – 2007. – Т. 99. – №. 19. – С. 196402.
5. *Liew T. C. H., Kavokin A. V., Shelykh I. A.* Optical circuits based on polariton neurons in semiconductor microcavities // *Physical Review Letters*. – 2008. – Т. 101. – №. 1. – С. 016402.
6. *Ballarini D., De Giorgi M., Cancellieri E., Houdré R., Giacobino E., Cingolani R., Bramati A., Gigli G., Sanvitto D.* All-optical polariton transistor // *Nature Communications*. – 2013. – Т. 4. – С. 1778.
7. *Norris T. B., Rhee J. K., Sung C. Y., Arakawa Y., Nishioka M., Weisbuch C.* Time-resolved vacuum Rabi oscillations in a semiconductor quantum microcavity // *Physical Review B*. – 1994. – Т. 50. – №. 19. – С. 14663.
8. *Glazov M. M., Semina M. A., Sherman E. Y., Kavokin A. V.* Spin noise of exciton polaritons in microcavities // *Physical Review B*. – 2013. – Т. 88. – №. 4. – С. 041309.
9. *Bender C. M., Boettcher S.* Real spectra in non-Hermitian Hamiltonians having PT symmetry // *Physical Review Letters*. – 1998. – Т. 80. – №. 24. – С. 5243.