

“УТВЕРЖДАЮ”

И.о. директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН), к.ф.-м.н.



[Signature] / *Ремисов В. А.*
« 12 » _____ 11 _____ 2018г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Томилина Владимира Александровича «Обратная связь с переключением фазы в системах квантовой оптики и конденсированных атомов» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика».

Актуальность темы диссертации

Управление одиночными квантовыми системами стало важной областью современных теоретических и экспериментальных исследований. Типичные задачи этого направления – инженерия экзотических квантовых состояний, различение и коррекция квантовых состояний в квантовой информатике, лазерное охлаждение. Одним из подходов к организации управления в квантовых системах является использование цепей обратной связи, действие которых основано на оценке параметров управляемой системы путем проведения над ней измерений. При этом непосредственный перенос результатов классической теории управления в квантовую область невозможен, поскольку акт измерения неизбежно приводит к возмущению состояния системы. В квантовой оптике важную роль играют ансамбли квантовых излучателей, взаимодействующих с внешними электромагнитными полями. Для них естественными измеряемыми характеристиками являются свойства испускаемых ими спонтанных квантов.

Диссертационная работа В.А. Томилина посвящена теоретическому исследованию эффектов обратной связи, основанной на скачкообразных переключениях параметров управляемой системы и (или) условий, в которых она эволюционирует (в частности, фаз классических электромагнитных полей). При этом объектами, подвергающимися действию обратной связи, являются системы квантовых излучателей и моды электромагнитного поля. Для этого В.А. Томилиным предложено использовать теоретический аппарат т.н. гибридных систем, состоящих из квантовой части (непосредственно квантовой системы, подлежащей управлению) и классической части (измерительного прибора, задающего значение управляемого параметра). Таким образом, работа представляет несомненный интерес как с фундаментальной точки зрения (развивая существующие теоретические подходы), так и с практической, поскольку, как показано

автором, обсуждаемый тип искусственной модификации эволюции системы может служить мощным инструментом для поиска новых физических явлений и эффектов. Учитывая вышесказанное, можно утверждать, что актуальность проведенных В.А. Томилиным исследований не вызывает сомнений.

Структура и содержание диссертации

Работа состоит из Введения, трех глав, Заключения и Списка цитируемой литературы из 124 наименований. Общий объем диссертации составляет 110 страниц, в том числе 29 рисунков.

Во **Введении** описывается область проведения исследований, а также выполнен обзор литературы, определены актуальность и практическая значимость работы, ее научная новизна. Сформулированы цели и задачи диссертации, описана ее структура. Приводится информация о количестве публикаций автора, а также список конференций, на которых были представлены результаты работы. В конце Введения сформулированы защищаемые положения диссертации.

Глава 1 посвящена спектроскопии одиночных двухуровневых атомов в классическом внешнем поле, фаза которого управляется фоторегистрациями спонтанных квантов. Она состоит из пяти разделов. Первый раздел посвящен выводу квантового кинетического уравнения для открытых квантовых систем в приближении Маркова-Борна (уравнения Линдблада). Во втором разделе развит формализм гибридных квантово-классических систем и выведены модифицированные кинетические уравнения, описывающие их эволюцию. Полученные результаты затем применены к решению задачи о спектре резонансной флуоресценции двухуровневого атома в поле, фаза которого переключается на величину π после каждого акта фоторегистрации. Обнаружена значительная модификация спектра, а именно – его ярко выраженная асимметрия и устойчивость триплетной структуры по отношению к варьированию интенсивности внешнего поля. В третьем разделе исследована статистика спонтанных атомных фотоиспусканий в различные компоненты спектра резонансной флуоресценции, а также корреляции между ними. Также исследована статистика фотоиспусканий при более сложном устройстве цепи обратной связи, действующей селективно в зависимости от спектральной принадлежности зарегистрированных спонтанных квантов. Показана возможность существенной модификации типа статистики фотоиспусканий путем варьирования отстройки внешнего поля. В четвертом разделе также исследована статистика фотоиспусканий, но уже от пары близко локализованных двухуровневых атомов. При этом обнаружена возможность усиления антигруппировки фотоотчетов. Пятый раздел посвящен исследованию модификации когерентного пленения населенностей (КПН) в трехуровневой Λ -системе в присутствии обратной связи, управляющей фазой поля на одном из атомных переходов. Обнаружена возможность управления полевой шириной резонанса КПН, в том числе его многократное сужение по отношению к ширине, наблюдаемой в отсутствие обратной связи. Кроме того, исследовано необычное поведение работы внешних полей как функции частот Раби, и приведено качественное объяснение этого явления на языке модифицированных «темных» состояний системы.

Глава 2 посвящена рассмотрению схемы интерферометрического зондирования двухъямного атомарного конденсата Бозе-Эйнштейна, помещенного в одно из плеч интерферометра Маха-Цандера. При этом зондированию подвергается лишь одна из атомных локализаций. Обратная связь инициируется фоторегистрациями в том или ином фотодетекторе на выходе интерферометра и заключается в быстрых переключениях конфигурации потенциала, в котором локализован конденсат, в одно из двух заранее заданных положений. Показано, что подходящим выбором этих конфигураций возможно управление заселенностями ям в пределе слабой декогеренции, вызываемой зондирующим полем.

В **Главе 3** рассмотрены задачи о применении обратной связи на основе переключений фазы к квантованным модам оптического излучения. Она состоит из трех разделов. В первом разделе приведен обзор квантовых состояний Юрке-Столера, являющихся особого типа суперпозицией когерентных состояний Глаубера электромагнитного поля. С их помощью решена задача о стационарном состоянии квантованного поля в оптическом резонаторе, подпитываемого внешним гармоническим источником, фаза которого переключается цепью обратной связи, инициируемой детектированием покинувших резонатор квантов. Второй раздел посвящен исследованию спектра резонансной флуоресценции двухуровневого атома в поле, находящемся в указанном состоянии Юрке-Столера. Для этого предложена модель восстановления когерентности поля, основанная на дуальности состояний Глаубера и Юрке-Столера. Обнаружено, что спектр имеет вид одиночного пика, центрированного на частоте атомного резонанса. В заключительном третьем разделе решена задача о корреляционной функции второго порядка атомных фотоиспусканий от ансамбля невзаимодействующих двухуровневых атомов в поле Юрке-Столера. Для нее найдено приближенное аналитическое выражение и предложено качественное объяснение наблюдаемого диссипативного поведения.

В **Заключении** приведены основные результаты работы, их обсуждение и дальнейшие перспективы рассмотренной в работе темы, а также выражены благодарности коллективу.

Наиболее значимыми научными результатами диссертационной работы являются следующие: в спектре резонансной флуоресценции двухуровневого атома в цепи обратной связи с переключением фазы обнаружена резкая асимметрия пиков, а в трехуровневой Λ -системе с обратной связью, управляющей фазой поля на одном из переходов, продемонстрирована возможность эффективного управления шириной и формой резонанса КПП.

Новизна исследования

Все результаты, представленные в диссертации, являются новыми. Во всех рассмотренных в работе задачах используется единый теоретический подход, основанный на решении систем модифицированных квантовых кинетических уравнений, ранее не применявшийся для описания квантовых систем с обратной связью. Исследованы применения обратной связи импульсного типа к различным квантово-оптическим системам и обнаружено, что она приводит к необычным, ранее не наблюдавшимся модификациям их свойств. Показано, что данный подход пригоден для получения в ряде

случаев точных аналитических выражений. К примеру, получены такие выражения для спектра и статистических характеристик фотоиспусканий одного и пары двухуровневых атомов в резонансном поле для случаев спектрально-неселективной обратной связи и при наличии спектральной селекции. Кроме того, впервые построена модель, позволяющая рассматривать стационарный режим взаимодействия неклассических полей с атомными ансамблями.

Научная ценность и значимость полученных результатов

В диссертационной работе исследованы возможности использования обратной связи импульсного типа для обнаружения различных нетривиальных явлений и эффектов в квантово-оптических системах. В частности, показана возможность получения устойчивых к варьированию амплитуды внешнего поля структур в спектре резонансной флуоресценции, которые могут найти применение в качестве реперов частоты. Также несомненный практический интерес представляет возможность сужения резонансов когерентного пленения населенностей в трехуровневой системе, а необычные узкие структуры, возникающие в зависимостях работ полей от их амплитуд, могут найти применение в разработке новых методов стабилизации интенсивностей. Кроме того, несомненную ценность представляет вклад в развитие теоретических методов описания квантовых систем в присутствии импульсной обратной связи. В отдаленной перспективе полученные результаты могут иметь важное значение для развития экспериментальных методов прецизионной лазерной спектроскопии и квантовых сенсоров, создаваемых на основе методов, рассмотренных В.А. Томилиным.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования в научно-технической деятельности в ФИАН (г. Москва), Российском квантовом центре (г. Москва), ЦМГУ (г. Москва), НГУ (г. Новосибирск), ИФП СО РАН (г. Новосибирск), ИЛФ СО РАН (г. Новосибирск) и других научных организациях.

По диссертации имеются следующие замечания:

- 1) Использованные модели и упрощения настолько идеализированы, что перспективы экспериментального подтверждения полученных результатов остаются полностью неопределенными. Тем не менее, с учетом быстрого развития экспериментальной техники, можно надеяться, что в отдаленном будущем полученные Томилиным В.А. результаты смогут найти применение в условиях реального эксперимента.
- 2) Результаты работы сформулированы исключительно в виде качественных утверждений и графиков. Имеется недостаток численных оценок, из которых экспериментатор смог бы составить представление о величине ожидаемых эффектов и соответствующих требованиям необходимых для их наблюдения. Таким образом, требуются дополнительные интеллектуальные усилия, чтобы сделать представленный к защите материал доступным для широкого круга как теоретиков, так и экспериментаторов.
- 3) При постановке задачи формирования обратной связи предполагается, что подавляющая часть спонтанных фотонов регистрируется системой детекторов и

результаты представлены в сильно идеализированном случае 100% эффективности детектирования. При этом, учет конечной эффективности детектирования спонтанных фотонов и влияния ненулевой задержки в цепи обратной связи остаются за рамками рассматриваемой задачи, что представляет интерес для экспериментальной проверки полученных результатов.

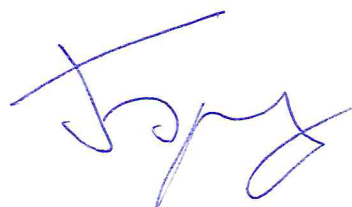
Указанные замечания не отменяют значимости проведенной работы и сомнений в достоверности результатов не возникает. Защищаемые положения и основные результаты диссертационной работы Томилина В.А. сформулированы грамотно и обладают несомненной научной новизной. Работа выполнена на высоком научно-исследовательском уровне и является существенным вкладом в квантовую оптику. Результаты работы опубликованы в 10 статьях в научных изданиях, входящих в список ВАК. Материалы диссертации неоднократно представлялись на всероссийских и международных конференциях. Автореферат верно отражает содержание диссертации.

Общее заключение по диссертационной работе

Диссертация Томилина В.А. является завершенной научно-исследовательской работой, соответствующей специальности 01.04.05 «Оптика», полностью отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика».

Отзыв составлен кандидатом физико-математических наук Д.В. Бражниковым на основе обсуждения содержания диссертации на семинаре Института лазерной физики СО РАН, который состоялся 19 октября 2018 г.

Старший научный сотрудник
Научно-исследовательской группы
лазерной спектроскопии ИЛФ СО РАН,
кандидат физико-математических наук
по специальности 01.04.05 «Оптика»
Россия, 630090, г. Новосибирск,
Пр. Академика Лаврентьева, д. 15Б,
Тел. +7-923-2237907
e-mail: brazhnikov@laser.nsc.ru

 Д.В. Бражников