

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

Мартынов Виталий Олегович

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)
«Формирование многофотонных запутанных состояний в квантовых системах с
квадратичной нелинейностью»

Аспирант:

Мартынов Виталий Олегович

Научный руководитель:

к. ф.-м. н., г.н.с. отд. 170

Миронов В. А.

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

01.04.21 Лазерная физика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород — 2018

Актуальность темы диссертации

Одним из актуальных и перспективных направлений развития информационно-телекоммуникационных технологий, суперкомпьютерных систем и современной физики являются исследования в области квантовых вычислений и информации [1, 2, 3]. Данное направление возникло относительно недавно на стыке сразу нескольких отраслей научного знания: квантовой механики, квантовой оптики, лазерной физики, спектроскопии, дискретной математики, теории информации и программирования. С практической точки зрения как основные объекты изучения выделяются устройства, в которых обработка, хранение и передача информации осуществляется мезоскопическими квантовыми системами, и квантовые элементы, позволяющие совершать логические операции. Основным ресурсом, используемым в таких системах являются особые квантовые состояния, называемые запутанными [1]. В целом область применения запутанных состояний не ограничивается только квантовой информатикой, так, например, они играют важную роль в метрологии. В независимости от области основным препятствием на пути практического применения этого ресурса является декогеренция [4, 5]. В общем случае потеря квантовой когерентности (и, как следствие, разрушения запутанных состояний) обусловлена взаимодействием подсистем с окружением (например, тепловым резервуаром), обладающим большим числом степеней свободы. При этом стоит особо подчеркнуть, что скорость процесса декогеренции увеличивается с ростом температуры [4].

В последние годы интенсивно обсуждается возможность сохранения запутанности в течение продолжительного времени при конечных температурах в открытых системах за счет постоянного притока энергии [6]. Прежде всего отметим работы [7, 8], где изучалось влияние коротких лазерных импульсов на биологические макромолекулы. Другим интересным примером является система двух связанных осцилляторов находящихся в условиях развития параметрической неустойчивости, которая рассматривалась в работах [9, 10, 11, 12]. Данная физическая модель позволяет разобраться с тем, как формируются запутанные состояния и в более сложных ситуациях, например, в микроволновых сверхпроводящих резонаторах, наномеханических осцилляторах, а также оптомеханических системах. Помимо прочего модель двух параметрически связанных осцилляторов является базовой для описания многих физических объектов, в которых имеется квадратичная нелинейность и реализуется процесс спонтанного параметрического рассеяния. Данный процесс является одним из наиболее распространенных способов формирования запутанных состояний света [13]. При этом стоит отметить, что в большинстве экспериментальных реализаций спонтанное параметрическое рассеяние используется в режиме слабой накачки и малой трассы взаимодействия. При этих условиях состояние света на выходе нелинейного элемента в основном является вакуумным с небольшой примесью двухфотонного запутанного состояния. С точки зрения квантовой информатики такие состояния имеют преимущество в том, что алгоритмы основанные на их

использовании обладают высокой эффективностью. Однако, в силу указанной ранее особенности их получения, скорость их выхода из нелинейного элемента является крайне малой, что негативно сказывается на времени выполнения потенциального алгоритма. Альтернативным подходом к применению света в обработке квантовой информации является использование гауссовых состояний (например когерентных или сжатых), в которых информация кодируется в амплитудных или фазовых квантовых флуктуациях [3]

Указанные ранее работы [9, 10, 11, 12] как раз посвящены формированию запутанных многомодовых сжатых состояний. В статье [9] исследовался случай, когда параметрическая накачка осуществляется посредством изменения коэффициента линейного взаимодействия между осцилляторами, каждый из которых помещен в свой собственный резервуар. В этой статье было продемонстрировано существование перепутанных состояний в интервале температур от нуля до критического значения, которое может быть достаточно большим и определяется инкрементом неустойчивости. В работе [10] изучалась аналогичная система, но с осцилляторами, помещенными в общий резервуар, и также было показано наличие запутанности при сравнительно высоких температурах. В [11] обсуждалось возникновение запутанного состояния двух осцилляторов при параметрическом воздействии только на один из них и в отсутствие линейного взаимодействия между ними, но с опосредованной связью через общий немарковский резервуар.

Особенностью указанных ранее работ является то, что в рассматриваемой там системе формирование запутанных состояний происходит на фоне непрерывного роста среднего числа фотонов. В любой реальной системе данный рост не может длиться долго: рано или поздно начнут сказываться эффекты истощения накачки. Простейшей моделью для того чтобы рассмотреть влияние этих эффектов на процесс формирования запутанных состояний, наверное, является параметрический генератор света (ПГС) [14]. В простейшем виде он представляет собой нелинейный кристалл, помещенный в резонатор. Параметры системы подобраны таким образом, что для трех мод резонатора выполняется фазовый синхронизм для нелинейного трехволнового взаимодействия, при этом производится накачка резонатора на частоте моды с наибольшей энергией фотона. Так же, в целом, ПГС рассматривается как возможный кандидат для систем, реализующих квантовые алгоритмы [14], а также для обработки квантовых изображений. Таким образом изучение квантовых свойств света формирующегося внутри параметрического генератора света является весьма актуальной задачей. Тут же стоит отметить, что насколько известно автору, вопрос о запутанности в ПГС при амплитуде накачки сильно превышающей пороговое значение не рассматривался, а именно в этой области параметров нелинейное взаимодействие между тремя модами наиболее выражено.

Еще одной интересной системой, с точки зрения построения устройств, реализующих алгоритмы квантовой информатики, являются массивы связанных световодов. В последнее время

в ряде работ рассматривалась возможность использования данной системы для создания [15], управления [16] и томографии [17] квантовых состояний света. Так, например, в [17] теоретически и экспериментально исследуется возможность формирования запутанных состояний в результате спонтанного параметрического рассеяния в одномерной решетке связанных световодов обладающих квадратичной нелинейностью. В частности, там рассматривается ситуация, когда параметрическая накачка заводится в один из световодов. В результате распада накачки в волноводе рождаются пары фотонов, которые, распространяясь в поперечном направлении в процессе квантовых блужданий, формируют запутанные состояния между отдельными световодами. Но стоит отметить, что в указанных работах рассматривался процесс формирования двухфотонных запутанных состояний.

Наконец хотелось бы отметить, что во всех указанных ранее работах параметрическая накачка полагалась монохроматической. При этом в реальной ситуации любая накачка обладает конечной шириной спектра, в частности, из-за наличия фазовых шумов. Наличие данных шумов, существенным образом влияет на статистические процессы в классических параметрических системах. В квантовом случае такие шумы приводят к заметному уменьшению эффективности генерации неклассических (например, сжатых) состояний атома [5, 18].

Цели и задачи диссертационной работы

Целью данной работы является изучение особенности формирования запутанных состояний в квантовых системах обладающих квадратичной нелинейностью, и в которых реализуется процесс спонтанного параметрического рассеяния. Главным вопросом является определение условий существования запутанных состояний, а также влияние различных шумов на данный процесс (в работе рассматриваются два источника шума: тепловой шум окружения, а также фазовые флуктуации в параметрической накачке). В рамках проведенного исследования было рассмотрены следующие задачи:

1. Изучение процесса формирования запутанных состояний двух параметрически связанных квантовых осцилляторов, каждый из которых помещен в независимый резервуар, в условиях конечной ширины спектра накачки, в следствии наличия фазовых шумов;
2. Изучение особенностей квантовой динамики параметрического генератора света. Главным образом данная задача заключается в определении запутанности, присутствующей в системе, при амплитуде накачки, превышающей порог генерации. Помимо прочего, данная задача включает в себя рассмотрение того, как фазовые шумы накачки влияют на формирующиеся запутанные состояния;
3. Изучение процесса формирования запутанных состояний света в одномерной решет-

ки связанных световодов, формирующихся в результате спонтанного параметрического рассеяния накачки, присутствующей только в одном из световодов. Данная задача также включает в себя рассмотрение влияния фазовых шумов накачки на указанный процесс.

Методы исследования

Для изучения динамики квантовых систем, в которых реализуется процесс спонтанного параметрического рассеяния, в условиях, когда можно пренебречь истощением накачки (глава 1 и 3), использовался формализм Гейзенберга – Ланжевена [5]. В такой системе для определения любых квантовых корреляций, в том числе и запутанности, достаточно знать средние значения от различных квадратичных комбинаций операторов рождения, уничтожения рассматриваемых мод поля. Таким образом, для исследуемых систем были построены замкнутые системы уравнений для квадратичных величин, при этом для усреднения по фазовым шумам накачки использовался формализм стохастических дифференциальных уравнений и свойства стохастических интегралов Ито [19]

Для моделирования квантовой динамики трехволнового взаимодействия в нелинейном кристалле (глава 2) использовался метод квантовых траекторий [20] (квантовый метод Монте-Карло). Для описания открытой квантовой системы, взаимодействующей с окружением (резервуаром), обычно используется формализм матрицы плотности. В рассматриваемом случае матрица плотности обладает большой размерностью. Прямое численное решение уравнения на матрицу плотности требует значительных вычислительных затрат. Метод квантовых траекторий для моделирования использует эффективный квантовомеханический вектор состояния, число элементов которого значительно меньше, чем у матрицы плотности той же размерности, что в свою очередь снижает требования к вычислительным ресурсам.

При исследовании запутанности в различных квантовых системах важным вопросом является выбор метода определения наличия квантовых корреляций. В различных работах было разработано множество критериев позволяющих по заданной матрице плотности, описывающей состояние системы, определить присутствие запутанности. Среди всех прочих критериев, в данной работе была выбрана величина называемая логарифмической отрицательностью [21]. Данная характеристика была выбрана так как автор считает, что она обладает наиболее оптимальным соотношением между простотой вычисления и полнотой описания присутствующих в системе квантовых корреляций. В приложении диссертации вводится формальное математическое определение запутанности, а также приводятся формулы для вычисления логарифмической отрицательности разных квантовых систем.

Научная новизна работы

В данной работе было впервые исследовано влияние фазовых шумов накачки на процесс формирования запутанных состояний в системе двух параметрически связанных квантовых осцилляторов. Кроме того использованный в данной работе подход позволил получить аналитическое решение для динамики логарифмической отрицательности. В предыдущих работах, в которых рассматривалась подобная задача, ограничивались результатами численного моделирования.

В данной работе было впервые проведено прямое численное моделирование квантовой динамики параметрического генератора света на основе решения уравнения для матрицы плотности. В предыдущих работах моделирование проводилось на основе упрощенных уравнений Фоккера-Планка для Р-представления. Кроме того, на сколько известно автору, квантовые свойства света в параметрическом генераторе света при амплитуде накачки превышающей пороговое значение не рассматривались.

В рамках данной работы впервые было рассмотрено формирование многомодовых сжатых состояний света в одномерной решетке связанных световодов с квадратичной нелинейностью. Помимо этого вопрос о том как амплитуда, а также возможные фазовые шумы накачки влияют на рассматриваемый процесс, не изучался.

Научная значимость результатов

Генерация многофотонных запутанных состояний является актуальной задачей современной физики. При этом одним из ключевых факторов ограничивающих возможность формирования неклассических состояний света являются различного рода шумы. Модель двух параметрически связанных осцилляторов является базовой для большого числа физических систем и, таким образом, изучение процесса формирования запутанных состояний в данной модели является весьма важной задачей. Проведенные ранее исследования показали, что температурные шумы не оказывают существенного влияния на процесс генерации запутанных состояний если амплитуда накачки превышает некоторое значение, поэтому изучение возможных ограничений, накладываемых другими видами шума, является актуальной задачей.

Основная масса работ посвященная формированию запутанных состояний в результате спонтанного параметрического рассеяния использует приближение неистоцимой накачки. Данное приближение справедливо только на малых временах взаимодействия, при этом вопрос о том, как будут формироваться запутанные состояния, в условиях существенно нелинейного трехволнового взаимодействия, остается открытым. Параметрический генератор света, находящийся в надпороговом режиме, представляет собой достаточно простой пример системы, где важно обратное действие сигнальной и холостой мод на моду накачки. Таким

образом, рассмотрение возможных квантовых корреляций присутствующих в данной системе позволит открыть некоторые новые особенности трехволнового взаимодействия.

С точки зрения приложения система связанных осцилляторов является важным объектом для возможного создания интегрированных квантовых устройств. При этом одной из актуальных задач, которые ставятся перед такими устройствами, является формирование пространственно запутанных состояний света. Возможность формирования в таких системах запутанных состояний с фиксированным числом фотонов является довольно хорошо изученной. При этом в квантовой информатике существуют алгоритмы, которые основаны на гауссовых состояниях света, поэтому изучение особенностей формирования таких состояний в решетках нелинейных световодов является вполне актуальной задачей.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Наличие фазового шума в накачке существенным образом влияет на временные и пространственные масштабы существования запутанности в системах, в которых реализуется спонтанное параметрическое рассеяние света.
2. В параметрическом генераторе света, неклассические свойства света (в частности, наличие запутанности) проявляются при параметре накачки существенно превышающем пороговое значение генерации, что отличает данный тип генераторов от лазерных систем.
3. В системе связанных световодов обладающих квадратичной нелинейностью возможна эффективная генерация запутанных состояний между выделенными парами световодов в геометрии, когда классическая накачка заводится только в один из световодов. Также существует оптимальное соотношение между амплитудой накачки и коэффициентом связи между световодами, при котором указанные процесс генерации запутанных состояний наиболее эффективен.

Достоверность полученных результатов

Проведенные исследования основаны на хорошо зарекомендовавших себя методах квантовой оптики и статистической радиофизики. Также достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается тем, что они согласуются с выводами, сделанными в предшествующих работах. Для апробации результатов численного моделирования, работоспособность разработанного программного комплекса проверялась на известных задачах, с известным аналитическим решением. Разработанные в диссертации методы и сделанные на их основе выводы прошли рецензирование и опубликованы в ведущих научных журналах.

Публикации и апробация результатов

Результаты исследований по теме диссертации обсуждались на научных семинарах Института прикладной физики РАН, а также на их основе были сделаны доклады на следующих конференциях:

1. V международная конференция FRONTIERS OF NONLINEAR PHYSICS. Нижний Новгород, 28 июля - 2 августа 2013 года;
2. 20-ая Нижегородская Сессия молодых ученых (естественные, математические науки), с 19 по 22 мая 2015 года;
3. Научные школы „Нелинейные волны-2016“ (г. Нижний Новгород, 27 февраля–4 марта 2016 г.) и „Нелинейные волны-2018“ (г. Нижний Новгород, 26 февраля - 4 марта 2018 г.);
4. Всероссийские школы-семинары «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2016», г. Можайск, с 5 по 10 июня 2016 г.) и «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова («Волны-2017», г. Можайск, с 4 по 9 июня 2017 г.);
5. Международные конференции „Laser Optics - 2016“ (Санкт-Петербург, с 27 июня по 1 июля 2016 г.) и „Laser Optics - 2018“ (Санкт-Петербург, с 27 июня по 1 июля 2016 г.);
6. IV международная конференция по квантовым технологиям (ICQT-2017), Москва, с 12 по 16 июля 2017 г.;

Также основные результаты изложены в следующих работах:

- [A1] V. O. Martynov, V. A. Mironov, L.A.Smirnov. *Influence of classic noise on entangled state formation in parametric systems* // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, vol. 50, n. 8, p. 085501 (2017);
- [A2] В. О. Мартынов, В. А. Миронов, Л. А. Смирнов. *Формирование запутанных состояний в неравновесных квантовых системах в условиях частично когерентной накачки* // Известия РАН. Серия физическая, том 81, № 1, с. 29–33 (2017);
- [A3] В. О. Мартынов, В. А. Миронов, Л. А. Смирнов. *Формирование запутанных состояний света в параметрическом генераторе света с частично когерентной накачкой* // Известия РАН. Серия физическая, том 82, № 1, с. 31–35 (2018);

- [A4] В. О. Мартынов, В. А. Миронов, Л. А. Смирнов. *Влияние классических шумов на формирование запутанных состояний в неравновесных квантовых системах* // Ученые записки физического факультета МГУ 6, 166905 (2016);
- [A5] V.O. Martynov, V.A. Mironov, L.A. Smirnov. *Relaxation in the system of two coupled quantum parametric oscillators* // Сборник трудов V международной конференции FRONTIER OF NONLINEAR PHYSICS, Нижний Новгород (2013);
- [A6] V.O. Martynov, V. A. Mironov, L. A. Smirnov. *Influence of classic noise on entangled state formation in nonequilibrium systems* // Труды конференции Laser Optics International Conference, Санкт-Петербург (2016);
- [A7] В. О. Мартынов, В. А. Миронов, Л. А. Смирнов. *Формирование запутанных состояний света в оптическом параметрическом генераторе с частично когерентной накачкой* // труды XVI Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова («Волны-2017»), г. Можайск (2017);

Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в определении направлений исследований по теме диссертации, включая постановку задач и поиск путей их решения. Автором были получены все основные уравнения и формулы, на которых базируются полученные результаты. Помимо этого автором был разработан высокопроизводительный программный комплекс для расчета диссипативной динамики квантовых систем, который использовался для моделирования в главе 2. Силами автора выполнена также значительная часть работы по подготовке результатов к публикации.

Благодарности

Автор благодарен своим соавторам - кандидатам физико-математических наук Миронову В.А. и Смирнову Л.А. за активное обсуждение результатов и возможного дальнейшего направления исследований, а также за помощь в подготовке публикаций. Кроме того автор благодарен доктору физико-математических наук Токману М.Д. за конструктивную критику проделанной работы, а также за продуктивные дискуссии по особенностям описания открытых квантовых систем. Также выражаю благодарность аспиранту ИПФ РАН Оладышкину И. В., выступавшего в качестве активного слушателя, за моральную поддержку.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения, списка цитированной литературы из 62 наименований. Общий объем диссертации составляет 78 страниц, включая 14 рисунков.

Краткое содержание работы

Первая глава посвящена исследованию процесса формирования запутанных состояний в системе двух параметрически связанных квантовых осцилляторов, каждый из которых помещен в независимый тепловой резервуар, в условиях частично когерентной накачки.

В разделе 1.1 приводится математическая модель для описания динамики запутанности в системе двух осцилляторов. На основе формализма Гейзенберга – Ланжевена, а также с использованием стохастических интегралов Ито, выводится замкнутая система уравнений для средних от квадратичных комбинаций операторов рождения (уничтожения), необходимых для вычисления логарифмической отрицательности: численной характеристики служащей для определения наличия запутанности в системе.

В разделе 1.2 проводится исследование динамики запутанности двух осцилляторов для частного случая когерентной накачки. В данной ситуации удастся получить аналитическое выражение для динамики логарифмической отрицательности:

$$E_N = \max \{0, -\log (I (t))\}, \quad (1)$$

где

$$I (t) = \frac{(2n_T + 1)(1 + 2\bar{n}e^{-\Gamma t(1+2\bar{n})})}{1 + 2\bar{n}}, \quad (2)$$

где $\bar{n} = Q\varepsilon/4$, Q – добротность осцилляторов, ε – безразмерная амплитуда накачки, n_T – равновесное число фотонов при температуре резервуара. Анализ 1 показывает, что логарифмическая отрицательность выходит на определенное стационарное значение. До тех пор пока выполняется условие $n_T < \bar{n}$, стационарное значение логарифмической отрицательности отлично от нуля, и это означает, что в системе присутствует запутанности сколь угодно долгое время.

В разделе 1.3 рассматривается влияние фазовых шумов накачки на процесс формирования запутанных состояний. Демонстрируется, что наличие даже слабого шума приводит к тому, что время жизни запутанности в системе становится конечным. При этом указанное время жизни запутанности существенным образом зависит от спектральной ширины линии накачки (рис. 1). Кроме того, чем больше амплитуда накачки, тем более деструктивное влияние оказывают шумы.

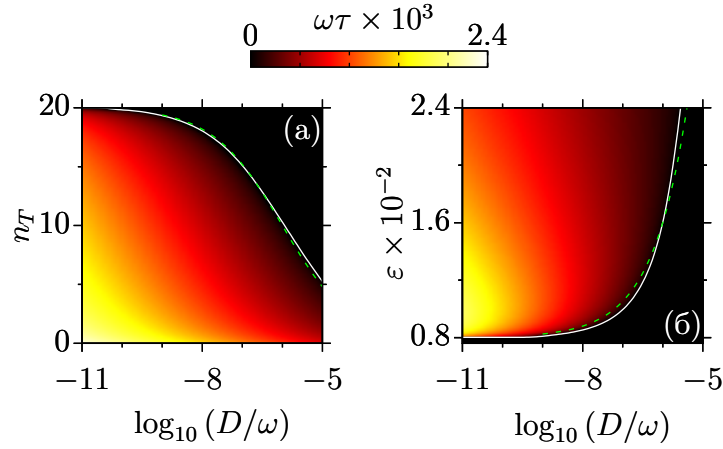


Рис. 1: Распределение времени жизни запутанности между двумя осцилляторами в зависимости от спектральной ширины накачки D , температуры окружения n_T и амплитуды накачки ϵ

Вторая глава посвящена особенностям квантовой динамики параметрического генератора света. В разделе 2.1 описывается модель параметрического генератора, приводится гамильтониан данной системы, а также описывается схема численного моделирования. Модель представляет собой кристалл с квадратичной нелинейностью, помещенный в резонатор. Для трех мод резонатора выполняется фазовый синхронизм для трехволнового взаимодействия, при котором происходит распад фотона накачки на фотон сигнальной и холостой мод.

В разделе 2.2 рассматриваются особенности динамики среднего числа фотонов в модах резонатора. Результаты полученные при моделировании квантовой задачи сравниваются с тем, что можно получить в рамках классического приближения. Демонстрируется, что в рамках классического описания для генератора существует некоторое пороговое значение амплитуды накачки, ниже которого в резонаторе отсутствует излучение в сигнальной и холостой модах. При превышении порогового значения интенсивность в указанных модах линейно зависит от амплитуды накачки. В полностью квантовой задаче показано, что число фотонов в сигнальной моде непрерывно увеличивается при увеличении амплитуды накачки, при этом при значении амплитуды существенно превышающей пороговое значение, число фотонов начинает приближаться к значению предсказанному в рамках классического приближения, однако некоторое различие присутствует при любой накачке, что связано с тем, что в случае когерентной накачки состояние света в резонаторе всегда является не классическим.

В разделе 2.3 рассматриваются особенности динамики логарифмической отрицательности, характеризующей запутанность между сигнальной и холостой модами. Показано, что в случае когерентной накачки данная величина выходит на некоторое ненулевое стационарное значение. Данное обстоятельство означает, что в системе присутствует запутанность в течении длительного времени. Кроме того при увеличении амплитуды накачки квантовые

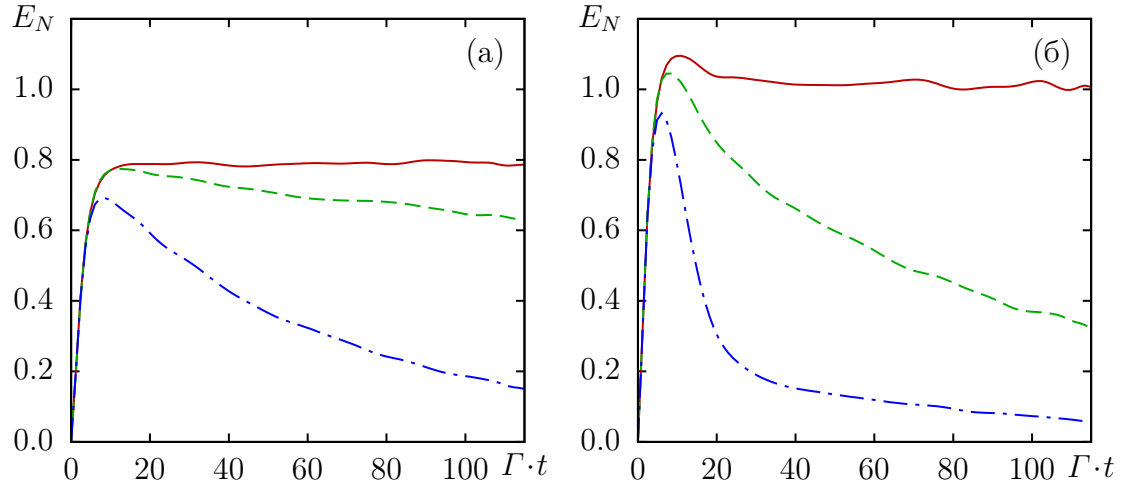


Рис. 2: Динамика логарифмической отрицательности E_N для сигнальной и холостой мод параметрического генератора света; сплошная линия отвечает случаю когерентной накачки; (а) и (б) отвечают разной амплитуде накачки.

корреляции становятся все более выраженными (рис. 2). Наличие фазовых шумов в накачке приводит к тому, что постепенно значение логарифмической отрицательности начинает убывать, т.е. время жизни запутанности в системе становится конечным. При этом чем больше амплитуда накачки тем быстрее происходит разрушение запутанности.

Третья глава посвящена особенностям формирования запутанных состояний в решетке одномодовых связанных световодов, обладающих квадратичной нелинейностью. Рассматривается задача, когда в результате параметрического рассеяния света накачки, которая инжектируется в один из световодов, формируется излучения на половинной частоте, и, в результате наличия взаимодействия между оптическими модами соседних световодов, данное излучение формирует запутанные состояния. В разделе 3.1 соответственно описывается рассматриваемая модель, а также приводятся все необходимые уравнения для описания эволюции квантованного света вдоль решетки, в том числе для вычисления логарифмической отрицательности для отдельных пар световодов.

В разделе 3.2 рассматриваются особенности эволюции среднего числа фотонов в световодах. Демонстрируется, что существует определенное соотношение между амплитудой накачки и коэффициентом связи световодов, при котором характер эволюции качественно меняется: при малых значениях амплитуды накачки среднее число фотонов растет в целом линейно, а при превышении порогового значения рост становится экспоненциальным.

В разделе 3.3 рассматриваются особенности формирования запутанных состояний для частного случая когерентной накачки. Демонстрируется, что постепенно логарифмическая отрицательности, определяющая степень запутанности отдельных пар световодов, выходит на

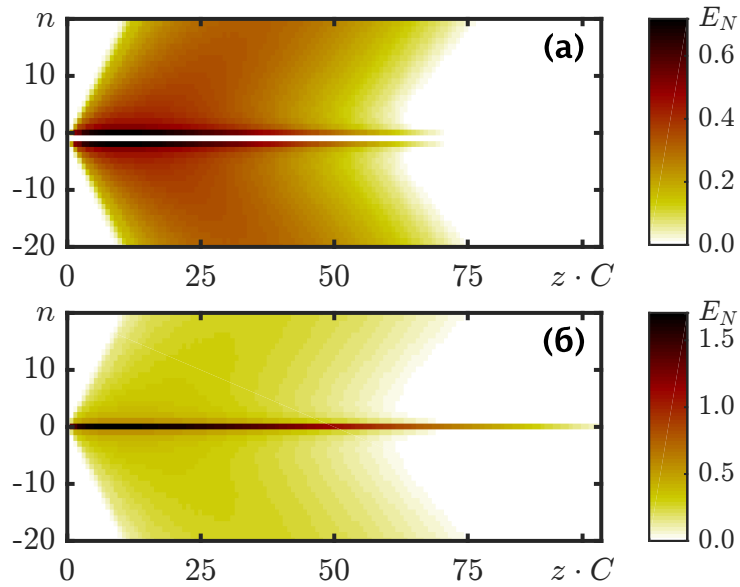


Рис. 3: Эволюция логарифмической отрицательности E_N , вычисленной для световодов с номерами n и $-n$, при распространении вдоль решетки световодов.

стационарное значение. Кроме того в этом стационарном режиме запутанными оказываются только световоды, расположенные симметрично относительно центрального, в который инжектируется накачка. Интересным также оказывается зависимость стационарного значения логарифмической отрицательности от амплитуды накачки: демонстрируется что существует определенное соотношение между амплитудой накачки и коэффициентом связи световодов, при котором процесс формирования запутанных состояний протекает наиболее эффективно.

В разделе 3.4 обсуждается влияние фазовых шумов накачки на процесс формирования запутанных состояний. Демонстрируется, что наличие даже небольшого шума приводит к тому, что на некотором расстоянии запутанные состояния начинают разрушаться (рис. 3). При этом чем больше амплитуда накачки тем быстрее запутанность в системе разрушается. Для небольшой амплитуды расстояние, на котором существует запутанность, на много больше характерного масштаба, определяемого коэффициентом связи световодов, однако по мере приближения амплитуды накачки к пороговому значению указанное расстояние быстро убывает и в окрестности самого порогового значения становится сравнимым с характерным масштабом взаимодействия световодов.

В разделе **Основные результаты** приводятся основные результаты диссертационного исследования.

В **Приложении** вводится формальное математическое определение запутанных состояний, а также приводятся все необходимые для вычисления логарифмической отрицательности, величины определяющей степень запутанности квантовой системы, формулы.

Оглавление

Введение	4
1 Система двух параметрически связанных осцилляторов	16
1.1 Описание модели	17
1.2 Динамика запутанности в случае когерентной накачки	25
1.3 Влияние фазовых шумов в накачке на процесс формирования запутанных состояний	28
1.4 Заключение	32
2 Параметрический генератор света	35
2.1 Описание модели	35
2.2 Динамика числа фотонов внутри резонатора	39
2.3 Запутанность между сигнальной и холостой модами	41
2.4 Заключение	44
3 Одномерная решетка одномодовых нелинейных световодов	45
3.1 Описание модели	46
3.2 Особенности динамики среднего числа фотонов в световодах	52
3.3 Формирование запутанных состояний между модами разных световодов: случай когерентной накачки	56
3.4 Формирование запутанных состояний между модами разных световодов: влияние фазовых шумов накачки	60
3.5 Заключение	63
Основные результаты	65
Приложение. Определение степени запутанности квантовой системы	67
Список литературы	71

Список литературы

- [1] Michael A. Nielsen, Isaac L. Chuang. *Quantum computation and quantum information*. — Cambridge ; New York: Cambridge University Press (2000).
- [2] Ryszard Horodecki, Paweł Horodecki, Michał Horodecki, Karol Horodecki. *Quantum entanglement* // *Reviews of Modern Physics*, **81**, 2, pp. 865–942 (2009).
- [3] Christian Weedbrook, Stefano Pirandola, Raúl García-Patrón, Nicolas J. Cerf, Timothy C. Ralph, Jeffrey H. Shapiro, Seth Lloyd. *Gaussian quantum information* // *Reviews of Modern Physics*, **84**, 2, pp. 621–669 (2012).
- [4] Christian Weedbrook, Stefano Pirandola, Raúl García-Patrón, Nicolas J. Cerf, Timothy C. Ralph, Jeffrey H. Shapiro, Seth Lloyd. *The physics of quantum information: quantum cryptography, quantum teleportation, quantum computation*. — Berlin ; New York: Springer (2000).
- [5] Marlan O. Scully, Muhammad Suhail Zubairy. *Quantum optics*. — Cambridge ; New York: Cambridge University Press (1997).
- [6] Vlatko Vedral. *Quantum physics: Hot entanglement* // *Nature*, **468**, 7325, pp. 769–770 (2010).
- [7] Elisabet Romero, Ramunas Augulis, Vladimir I. Novoderezhkin, Marco Ferretti, Jos Thieme, Donatas Zigmantas, Rienk van Grondelle. *Quantum coherence in photosynthesis for efficient solar-energy conversion* // *Nature Physics*, **10**, 9, pp. 676–682 (2014).
- [8] Alexei Halpin, Philip J. M. Johnson, Roel Tempelaar, R. Scott Murphy, Jasper Knoester, Thomas L. C. Jansen, R. J. Dwayne Miller. *Two-dimensional spectroscopy of a molecular dimer unveils the effects of vibronic coupling on exciton coherences* // *Nature Chemistry*, **6**, 3, pp. 196–201 (2014).
- [9] Fernando Galve, Leonardo A. Pachón, David Zueco. *Bringing Entanglement to the High Temperature Limit* // *Physical Review Letters*, **105**, 18, pp. 180501 (2010).

- [10] T. Figueiredo Roque, J. A. Roversi. *Role of instabilities in the survival of quantum correlations* // Physical Review A, **88**, 3, pp. 032114 (2013).
- [11] Rebecca Schmidt, Jürgen T. Stockburger, Joachim Ankerhold. *Almost local generation of Einstein-Podolsky-Rosen entanglement in nonequilibrium open systems* // Physical Review A, **88**, 5, pp. 052321 (2013).
- [12] Rong-Xin Chen, Li-Tuo Shen, Zhen-Biao Yang, Huai-Zhi Wu. *Transition of entanglement dynamics in an oscillator system with weak time-dependent coupling* // Physical Review A, **91**, 1, pp. 012312 (2015).
- [13] David C. Burnham, Donald L. Weinberg. *Observation of Simultaneity in Parametric Production of Optical Photon Pairs* // Physical Review Letters, **25**, 2, pp. 84–87 (1970).
- [14] Orion Crisafulli, Nikolas Tezak, Daniel B. S. Soh, Michael A. Armen, Hideo Mabuchi. *Squeezed light in an optical parametric oscillator network with coherent feedback quantum control* // Optics Express, **21**, 15, pp. 18371 (2013).
- [15] Alexander S. Solntsev, Frank Setzpfandt, Alex S. Clark, Che Wen Wu, Matthew J. Collins, Chunle Xiong, Andreas Schreiber, Fabian Kitzschmann, Falk Eilenberger, Roland Schiek, Wolfgang Sohler, Arnan Mitchell, Christine Silberhorn, Benjamin J. Eggleton, Thomas Pertsch, Andrey A. Sukhorukov, Dragomir N. Neshev, Yuri S. Kivshar. *Generation of Nonclassical Biphoton States through Cascaded Quantum Walks on a Nonlinear Chip* // Physical Review X, **4**, 3, pp. 031007 (2014).
- [16] Hashem Zoubi, Klemens Hammerer. *Quantum Nonlinear Optics in Optomechanical Nanoscale Waveguides* // Physical Review Letters, **119**, 12, pp. 123602 (2017).
- [17] Alexander S. Solntsev, Andrey A. Sukhorukov. *Path-entangled photon sources on nonlinear chips* // Reviews in Physics, **2**, pp. 19–31 (2017).
- [18] T. Yu, J.H. Eberly. *Sudden death of entanglement: Classical noise effects* // Optics Communications, **264**, 2, pp. 393–397 (2006).
- [19] Crispin W. Gardiner. *Stochastic methods: a handbook for the natural and social sciences*. — Berlin: Springer (2009).
- [20] Todd A. Brun. *A simple model of quantum trajectories* // American Journal of Physics, **70**, 7, pp. 719–737 (2002).
- [21] G. Vidal, R. F. Werner. *Computable measure of entanglement* // Physical Review A, **65**, 3, pp. 032314 (2002).