

На правах рукописи



Баринов Игорь Олегович

**ПЕРЕДАЧА КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ ПО ОПТИЧЕСКИМ
КАНАЛАМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИТОНОВ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир 2013

Работа выполнена на кафедре физики и прикладной математики
ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ).

Научный Доктор физико-математических наук, профессор
руководитель зав. кафедрой физики и прикладной математики ВлГУ
Аракелян Сергей Мартиросович

Официальные Доктор технических наук, профессор
оппоненты: кафедры радиотехники и радиосистем ВлГУ
Полушин Петр Алексеевич

Доктор физико-математических наук, профессор,
Владимирский филиал ФГОБУ ВПО «Финансовый
университет при Правительстве Российской Федерации»,
профессор кафедры математики и информатики
Бутковский Олег Ярославович

Ведущая ФГБОУ ВПО «Московский государственный
организация технический университет радиотехники, электроники
и автоматики»

Защита состоится "24" декабря 2013 г. в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном
университете по адресу: 600000, Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, кор. 3,
ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Владимирского государственного университета.

Автореферат разослан "20" ноября 2013 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью,
просьба направлять по адресу совета университета: 600000, г. Владимир,
ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор


А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Успехи последних десятилетий в развитии полупроводниковой микроэлектроники привели к значительному росту объемов обрабатываемой информации, что в совокупности с сетями на основе оптических волокон и современных технологий мультиплексирования данных позволило достичь значений пропускной способности каналов порядка 10Тб/с. Однако, предел объемов передаваемой и обрабатываемой информации на основе существующих технологий практически достигнут и необходимо развитие принципиально новых подходов.

Перспективное направление исследований в области улучшения требуемых характеристик телекоммуникационных систем проходит по полю квантовых эффектов и масштабов.

Отличие квантовых систем обработки и передачи данных от классических заложено в физическом принципе преобразования информации. В отличие от классических систем, где ячейка памяти содержит только один бит информации и принимает одно из двух возможных значений: "1" или "0", квантовые системы могут характеризоваться суперпозицией двух базисных состояний, которая в теории квантовых вычислений получила название "кубит", что обеспечивает недоступную для классических систем параллельную обработку информации. В квантовых системах имеется множество примеров систем с двумя состояниями: поляризация фотонов, основное и возбужденное состояния электрона в атоме водорода. Для большого объема данных эффективность квантовых вычислений значительно выше классических алгоритмов, которые лежат в основе всех современных систем обработки и защиты данных.

В случае широко применяемых классических алгоритмов шифрования данных, надежность большинства из которых определяется сложностью задач факторизации, увеличение длины ключа требует экспоненциального роста времени его дешифровки. Квантовые вычисления сводят эту задачу к полиномиальному уровню сложности. Таким образом, использование в информационных сетях квантовых ключей на основе кубитов способно значительно повысить защищенность передаваемых данных.

Характерной чертой квантовых коммуникаций является интеграция средств обработки информации в квантовые сети, что обусловлено необходимостью преодоления ограничений дальности ее передачи. В данном аспекте речь идет не о каналах транспортировки информации, считанной из памяти, а о квантовых каналах связи на основе квантовых повторителей, представляющих собой квантовую память и устройства генерации перепутанных состояний. Примером может служить протокол передачи информации Duan-Lukin-Cirac-Zoller (DLCZ). Схема передачи квантовых состояний его основе представляет собой множество сегментов, узлы которых связываются квантовой перепутанностью. Данный подход позволяет преодолеть ограничение дальности передачи квантовых состояний и повысить защищенность канала от несанкционированного доступа на аппаратном уровне, что позволит создать полноценные масштабируемые квантовые телекоммуникационные сети.

Проблемам коммуникаций на основе квантовых протоколов и разработке стандартов совместимости с классическими сетями посвящены работы М.Д. Лукина, К. Шиомото, Я. Токура, Л.М. Дуана, Х.Д. Кимбла и других. Однако, имеющиеся на сегодняшний день решения недостаточно эффективны вследствие ряда причин:

- создание квантовых повторителей и памяти в узлах сетей затруднено в силу крайне низких рабочих температур (вплоть до нК).
- время хранения информации на основе квантовых состояний в узлах сети порядка пикосекунд; этого недостаточно для ее корректного функционирования.
- управление квантовыми сетями осуществляется электронными методами, что является слабым местом в вопросах защищенности.

Данные сложности возможно преодолеть, используя в качестве носителя информации связанные состояния оптической системы и электромагнитного поля – поляритоны. Новый подход позволит предложить новые способы хранения и передачи квантовых состояний, реализовать высокоэффективные устройства для квантовых коммуникаций и создать масштабируемые коммуникационные сети на основе квантовых протоколов.

Объектом исследования являются вопросы передачи и защиты информации в телекоммуникационных оптических сетях.

Предметом исследования являются вопросы передачи квантовых состояний по оптическим каналам связи на основе поляритонов.

Цель работы состоит в разработке новых подходов к транспортировке, хранению и защите квантовых состояний на основе поляритонов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать существующие телекоммуникационные системы на основе протоколов передачи квантовых состояний, выявить недостатки.
2. Предложить методику реализации протокола Duan-Lukin-Cirak-Zoller (DLCZ) передачи квантовых состояний на основе поляритонов.
3. Разработать методику хранения квантовых состояний в узлах сегментов квантовой сети поляритонами, локализованными в специальной пространственно-периодической структуре.
4. Создать методику управления распространением квантовых состояний в узлах сегментов квантовой сети для их согласованной работы, а так же методику клонирования квантовых состояний поляритонами.
5. Разработать способ связи узлов сети перепутанными поляритонами с необходимыми для задач квантовых телекоммуникаций свойствами, который исключает электронные методы воздействия.

Методы исследования

В работе использовались методы теории информации, вычислительной математики, квантовой электроники, статистической физики, квантовой оптики.

Научная новизна:

1. Предложена транспортировка квантовых состояний по волоконно-оптическим каналам на основе поляритонов.
2. Показано, что использование поляритонов в качестве носителей квантовых состояний обеспечивает работу квантовых сетей при температурах порядка комнатных (300К).

3. Показано, что каналы передачи квантовых состояний на основе поляритонов обладают высочайшим уровнем защищенности на логическом и аппаратном уровнях.
4. Предложен способ связи сегментов сетей с помощью поляритонов, позволяющий передавать информацию как в классическом представлении (биты), так и квантовом (кубиты).

Практическая значимость

Практическая ценность работы заключается в пригодности предложенных подходов и методов для реализации масштабируемых телекоммуникационных сетей с высочайшей криптографической защитой на основе протоколов с распределением квантового ключа. Для этого:

- предложенный способ связывания квантовой перепутанностью сегментов сети с полностью оптическим управлением исключает воздействия электронными средствами со стороны потенциальных злоумышленников;

- предложенные подходы к хранению квантовых состояний поляритонами в узлах квантовой сети на основе протокола DLCZ работоспособны при температурах порядка комнатных (300K), что на несколько порядков выше, чем у существующих решений и позволяет реализовать сети без теоретического ограничения их размеров;

- разработанная методика управления распространением информации на основе поляритонного кристалла обеспечивается обработкой и промежуточным хранением квантовых состояний в узле сети в течение порядка 10нс, что в 100 раз больше одноатомных систем и достаточно для реализации устойчивых квантовых коммуникаций, совместимых с классическими сетями передачи информации;

- разработан новый способ связи сегментов телекоммуникационных сетей, позволяющий передавать информацию как в классическом представлении (биты), так и квантовом (кубиты).

Реализация и внедрение результатов работы

Основные результаты получены автором при выполнении работ по заказам министерств РФ. Теоретические решения и запатентованные изобретения нашли применение в учебном процессе ВлГУ и ОАО «Владимирский завод «Электроприбор»».

На защиту выносятся

1. Способ связи сегментов квантовой сети за счет перепутанных поляритонов в их узлах с полностью оптическим управлением.
2. Методика передачи квантовых состояний за счет управления групповой скоростью поляритонов, распространяющихся в пространственно-периодических структурах в узлах сети, а также методика клонирования квантовых состояний поляритонами.
3. Методика временного хранения квантовых состояний в узлах квантовой сети на основе локализованных в специальной структуре поляритонов.

Апробация работы

Основные результаты работы обсуждались на международных конференциях и семинарах: SPIE «Optics and Optoelectronics», Prague, Czech Republic, 2013; VII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (ФПО-2012), Санкт-Петербург, Россия, 2012г.; 2nd Chinese-Russian Summer School on Laser Physics, Fundamental and Applied Photonics, Тяньзинь, Китай, 2012; VII Международная конференция молодых ученых и специалистов "Оптика-2011", Санкт-Петербург, Россия, 2011г.; 1-st Russian-chinese conference, Suzdal/Vladimir, 2011; SPIE «Photonics Europe 2010», г. Брюссель, Бельгия, 2010, Международная конференция «Дубна-Нано 2010» Россия, Дубна, 2010; International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO)/ The Lasers, Applications, and Technologies (LAT)-2010, Kazan, Russia, 2010; Russian-French-German Laser Symposium (RFGLS), Nizhny Novgorod, 2009; III Международная Российско-Французская Школа для Молодых Ученых, г. Санкт-Петербург, Россия, 2008; VI семинар им. Д.Н.Клышко, МГУ им. Ломоносова, г. Москва, Россия, 2009; V семинар по квантовой оптике и квантовой информации, посвященный памяти профессора Д. Клышко МГУ им. Ломоносова, г. Москва, Россия, 2010.

Публикации по работе

По материалам диссертации в журналах из перечня ВАК опубликовано 4 статьи, 11 тезисов в трудах конференций, статей в сборниках и др.

Личный вклад

Выполнены все вычислительные эксперименты по моделированию передачи квантовых состояний в рассматриваемых структурах, произведена оценка пригодности предлагаемых подходов для задач телекоммуникаций.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации составляет 142 страницы, включая 30 рисунков. Библиография включает 171 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, определена методическая основа исследований, изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, и дано краткое содержание работы по главам.

В **первой главе** дается краткий обзор научной литературы по основным тенденциям развития телекоммуникаций исходя из существующих требований к значительному увеличению объемов передаваемой информации и ее защищенности от воздействий как среды, так и потенциальных злоумышленников. Показано, что реализация устройств нового поколения невозможна без совместного использования как последних достижений микроэлектроники, так и оптики.

Показано, что пределы коммуникаций на основе классических битовых данных, когда логический элемент способен принимать одно из двух значений практически достигнуты, а защищенность на основе классических алгоритмов не может быть эффективной в случае квантовых вычислений и оперирования с "кубитами", способными находиться в суперпозиционных состояниях. Это требует развитие принципиально новых подходов.

На примере перспективного протокола передачи квантовых состояний DLCZ, основанного на идее квантового повторителя, показана возможность преодоления проблемы ограниченной дистанции передачи квантовых состояний. Характерной особенностью данного протокола является интеграция приборов обработки, хранения и перепутывания квантовых состояний в сегменты сети в качестве ее неотъемлемой части. Данный факт отражает общую тенденцию в архитектуре квантовых сетей будущего.

В задачах квантовых коммуникаций теоретически возможно использовать специальные системы в условиях бозе-конденсации, например, как генератор перепутанных состояний для квантовых повторителей или как квантовую память, практическое же их применение затруднено требуемыми крайне низкими температурами (порядка нК). Это обусловлено относительно высокой массой атомов. Однако, на сегодняшний день одним из наиболее перспективных подходов для решения данного ограничения является использование поляритонов как нового вида носителей информации, открывающих большие возможности применения в вопросах квантовых телекоммуникаций ввиду возможности их эффективного управления.

Отдельная задача, актуальность которой растет вместе с развитием новых подходов передачи информации, состоит в разработке стандартов телекоммуникационных систем на основе квантовых эффектов, совместимых с уже существующими протоколами передачи информации (TCP/IP для глобальной сети Интернет).

Таким образом, для успешной реализации протокола DLCZ необходимо решить ряд задач:

- Предложить метод, позволяющий организовать квантовую память на основе поляритонов.
- Разработать метод управления скоростью распространения сигналов в поляритонной структуре.
- Предложить способ реализации перепутанности поляритонов в узлах сетей для связи их в единую коммуникационную сеть.

Вторая глава посвящена разработке методики, позволяющего организовать квантовую память для протокола DLCZ на основе поляритонов. Для этой цели предложен новый тип пространственно-периодической структуры – поляритонный кристалл, позволяющий полностью локализовать поляритоны и обрабатывать информацию в узле сети при высоких (порядка комнатных) температурах. Он образован двумерной решеткой удерживаемых двухуровневых атомов, взаимодействующих с электромагнитным полем в резонаторе (или в цепочке туннельно-связанных микрорезонаторов) [1].

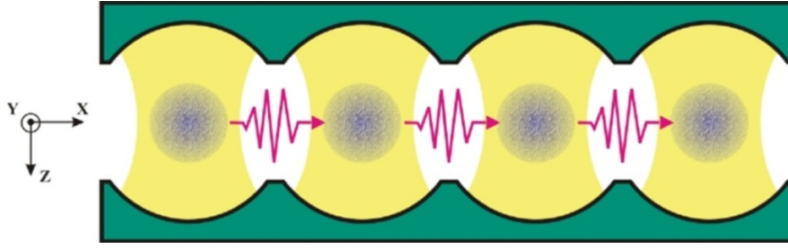


Рисунок 1– Схематическое изображение модели поляритонного кристалла, образованного решеткой микрорезонаторов с макроскопическими ансамблями двухуровневых атомов.

Особенностью такой структуры является возможность полной локализации поляритонов, соответствующие нижней ветви распределения энергии в пределах первой зоны Бриллюэна (рисунок 2). Этот факт может быть использован для временного хранения квантовых состояний.

Важнейшей с точки зрения реализации узлов сегментов сети на рисунок 2 является параболическая область с минимумом при $k\ell = 0$, так как в ней можно получить поляритоны с необходимыми для телекоммуникаций свойствами и эффективно ими управлять. Полученный в работе закон распределения энергии в районе минимума имеет вид:

$$\Omega_2(k) \approx \frac{\hbar k^2}{2m_2} \quad (1)$$

Расчитанная зависимость групповых скоростей $v_{1,2}$ на данном участке имеет практически линейный характер

$$v_2(k) \approx \frac{\hbar k}{m_2} \quad (2)$$

и зависит от массы поляритона. В свою очередь, варирование массой поляритонов возможно за счет изменения отстройки частоты излучения в поляритонном кристалле от резонансного перехода атомов

$$m_{1,2} = \frac{2m_{at}m_{ph}\sqrt{\tilde{\Delta}^2 + 4g^2}}{(m_{at} + m_{ph})\sqrt{\tilde{\Delta}^2 + 4g^2} \pm (m_{at} - m_{ph})\tilde{\Delta}}, \quad (3)$$

где $\tilde{\Delta}$ – некоторая эффективная отстройка, m_{at} и m_{ph} – эффективные массы атомов и фотонов в ловушке, g – параметр атомно-оптического взаимодействия.

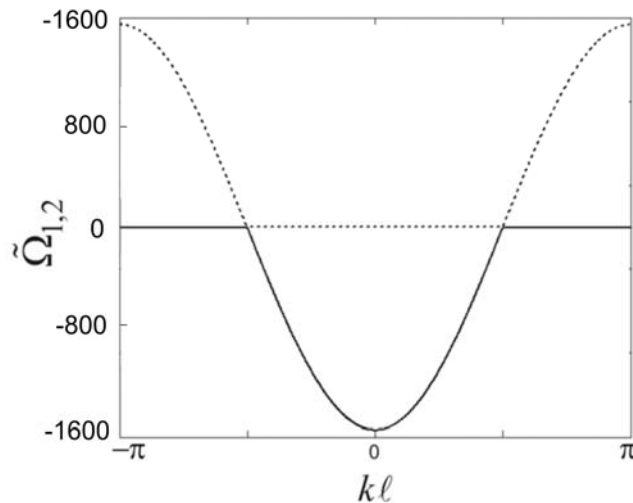


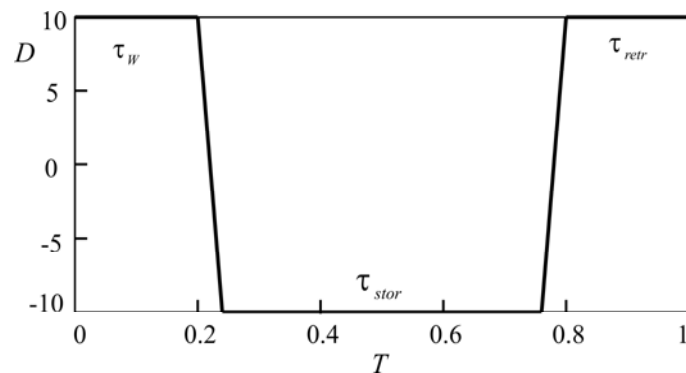
Рисунок 2 – Зависимости частот верхней ($\tilde{\Omega}_1(k)$) и нижней ($\tilde{\Omega}_2(k)$) ветвей поляритонов от приведенного квазиимпульса kl в первой зоне Бриллюэна. Постоянная решетки $\ell = 2$ нм.

Данные связанные состояния имеют огромные перспективы использования в квантовых телекоммуникационных сетях. В этой связи рассмотрены механизмы формирования поляритонов в поляритонном кристалле. Выявлены свойства поляритонов нижней ветви распределения энергии, важные для вопросов телекоммуникаций, и необходимые для реализации сетей на основе квантовых протоколов, которые могут быть реализованы при высокой (комнатной) температуре.

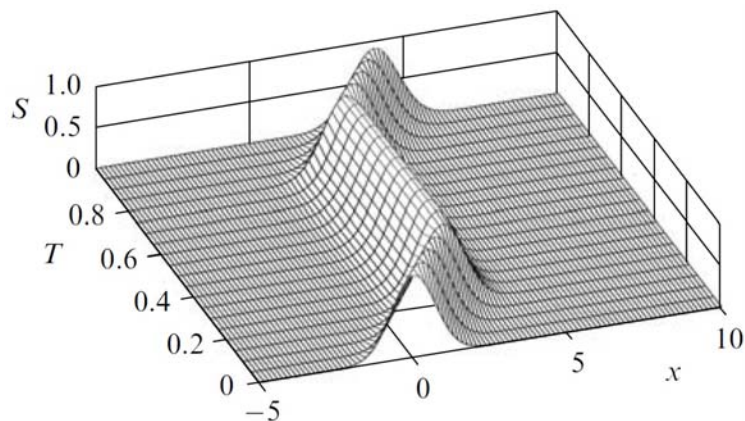
Предложенная математическая модель поляритонного кристалла способна обеспечить хранение квантовых состояний в узле сети в течении порядка 10нс, что достаточно для корректировки и согласованной работы сегментов сети и удовлетворяет требованиям совместимости с классическими сетями, задержки в которых порядка 1 - 500 нс.

В **третьей главе**, для реализации согласованной работы сегментов квантовых сетей, с учетом изученных свойств поляритонов и возможности колоссального замедления групповой скорости пробного светового импульса до значений порядка 0.12м/с, предложена методика записи, хранения и считывания оптической информации на основе управления групповой скоростью поляритонных волновых пакетов, распространяющихся в структуре поляритонного кристалла [2].

Предложена методика управления распространением квантовых состояний основе поляритонов, предполагающая трехшаговый алгоритм реализации – см. рисунок 3. Во-первых (стадия 1), для записи квантового состояния выбираем отрицательную отстройку, при которой поляритоны нижней ветви распределения энергии являются фотоноподобными, и распространяются благодаря туннелированию фотонов в решетке поляритонного кристалла. Волновой пакет при этом распространяется со скоростью v , близкой к скорости света в вакууме. Для отображения квантового состояния фотона на состояния нашей системы переключаем отстройку, сделав ее положительной - стадия 2. В этом пределе поляритоны нижней ветви становятся атомоподобными и их скорость значительно замедляется; информация, содержащаяся в световом пучке, полностью записывается оптической системой. Например, в случае взаимодействия светового поля с атомами рубидия в отсутствии эффектов декогерентности характерное время расплывания пакета равно 10мс при ширине входного пучка 0,04см, что и определяет максимальное время хранения информации.



(a)



(б)

Рисунок 3 – Зависимость (а) приведенного параметра $D = \tilde{\Delta}/2|g|$, (б) нормированной огибающей волнового пакета $S \equiv |\Psi(x,t)|^2 / |\Psi(0,0)|^2$ от нормированного времени $T = \hbar t / m_{ph} f^2$ и нормированной координаты $X = x / f$ для комбинации параметров $k_x f = 10$.

Для восстановления оптической информации на выходе из среды через некоторый временной интервал, определяющий время хранения квантового состояния, необходимо сделать поляритоны фотонopodobными, переключая отстройку в обратном порядке – стадия 3. Проведена оценка относительного параметра качества сохраняемого состояния при учете изменения формы волнового пакета и возможных механизмов его декогерентности.

Так же представлен метод клонирования квантовых состояний оптического поля на поляритонные с помощью линейного усилителя и полупроводниковой структуры, что необходимо для применения в коммуникационных системах с абсолютной криптографической защитой и большой пропускной способностью нового поколения, а также имеет большую актуальность в вопросах маршрутизации пакетов квантовой информации.

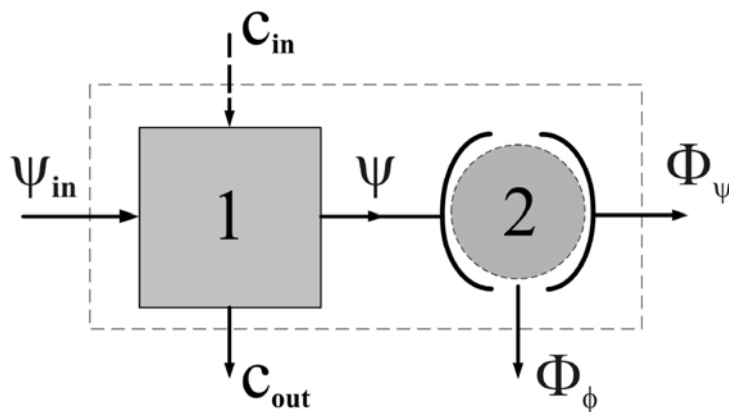
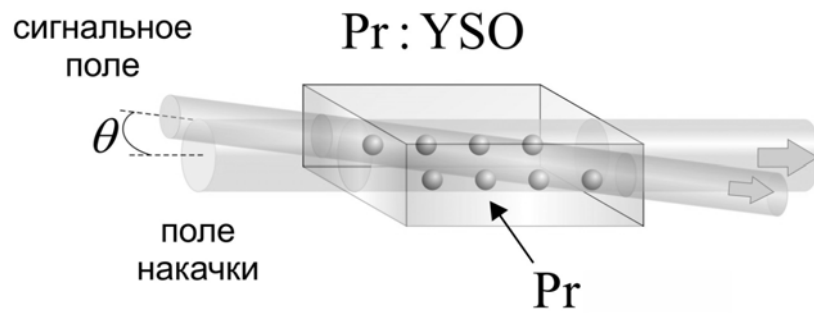


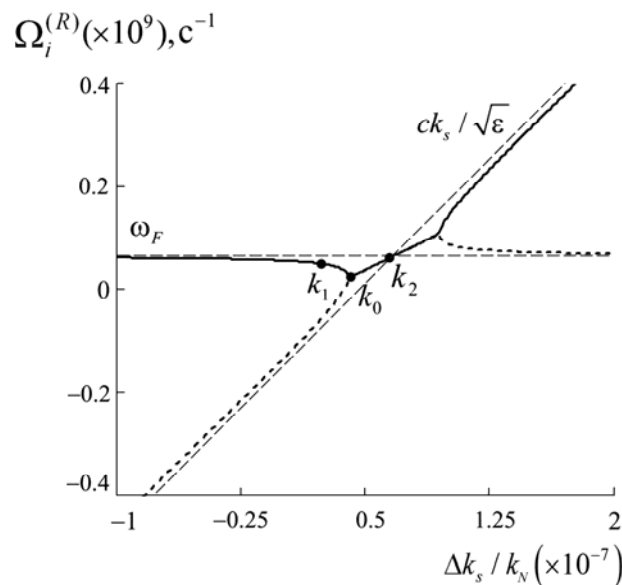
Рисунок 4 – Схема квантового клонирования состояний света с помощью линейного усилителя (1) и полупроводниковой микроструктуры (2). $\Psi_{in}(c_{in})$ – сигнальная (добавочная) моды на входе устройства клонирования, Φ_{ψ} , Φ_{ϕ} – поляритонные моды после процедуры обработки.

Оценка относительного параметра качества показала, что его значение для рассматриваемой системы не менее $2/3$, что соответствует критериям применимости для задач телекоммуникаций на основе квантовых протоколов.

В **четвертой главе** предложен способ создания масштабируемых квантовых сетей на основе протокола DLCZ за счет связи ее сегментов квантовой перепутанности поляритонов в узлах. Особенностью предложенного подхода является отсутствие резонаторов, полностью оптическое управление системой, исключающее воздействие электронными методами со стороны злоумышленников, а так же возможность переключения между режимами передачи данных классических битов и кубитов. В качестве элемента сети предложен кристалл силиката иттрия Y_2SiO_5 (Pr : YSO), длина которого 9мм, содержащий примесные атомы ^{59}Pr (рисунок 5а).



(а)



(б)

Рисунок 5 – Схема взаимодействия оптических полей в допированном атомами ^{59}Pr кристалла Y_2SiO_5 (а). Дисперсионные зависимости $\Omega_i^{(R)}$ (сплошная линия для $i = 1$ и пунктирная для $i = 2$) от нормированной разности волновых векторов $\Delta k_s / k_N$ (б).

Проанализировано формирование перепутанных поляритонов пробного поля для случая рамановской схемы взаимодействия. Исследованы дисперсионные и корреляционные свойства поляритонов. Полученные кривые распределения энергии для поляритонов в рассматриваемой структуре имеют ряд важных с точки зрения перспектив практического применения особенностей [3].

Во-первых, наличие локального минимума энергии в точке k_0 для верхней ветви, вблизи которого могут существовать два поляритона одинаковой энергии, но с различными значениями волнового вектора k_1 и k_2 .

При этом групповая скорость $v_1^g = \frac{\partial \Omega_1^{(R)}}{\partial k}$ поляритона с волновым вектором k_1 становится отрицательной величиной.

Во-вторых, в точке k_0 поглощение полностью отсутствует и, одновременно, групповая скорость представленных поляритонов обнуляется. В среде формируется неподвижный поляритонный пакет, а на выходе из кристалла наблюдаются существенные задержки излучения.

Используя режим сильной связи для рамановского предела работы Λ –схемы взаимодействия, показана возможность усиления как чисто оптических, так и связанных поляритонных состояний, что необходимо для подстройки режимов работы узлов квантовой сети. Переход между указанными процессами может быть осуществлен изменением интенсивности и частоты отстройки поля накачки от резонанса в рамках одной физической системы.

Помимо эффективного оптического управления степенью перепутанности поляритонов и их групповой скоростью в узлах сети, система имеет возможность переключения режимов работы узлов сети между передачей кубитов и битов (классических состояний “0”/”1”).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан способ связи сегментов сети в рамках протокола DLCZ за счет квантовой перепутанности поляритонов с полностью оптическим управлением и возможностью менять режим работы сети между квантовым (транспортировка кубитов) и классическим (транспортировка битов). Пороговая мощность оптической накачки для эффективного усиления поляритонов и динамической подстройки режимов работы узлов сети $P_p = 20$ мВт.
2. Предложена методика временного хранения (в течение порядка 10мс) квантовых состояний поляритонами в узлах квантовой сети. Относительный параметр качества в таком случае $F = 2/3$, что соответствует требованиям квантовых телекоммуникаций, а рабочие температуры узлов сетей порядка комнатных ($T = 300\text{K}$), что на несколько порядков выше существующих решений. Данный способ позволяет реализовать сети без теоретического ограничения их размеров.
3. Разработана методика управления распространением квантовых состояний в узлах квантовой сети, что обеспечивает возможность эффективной подстройки работы сегментов и удовлетворяет требованиям совместимости с классическими сетями. Это осуществляется за счет управления групповой скоростью поляритонов и позволяет замедлять их скорость до значений $v_2 \approx 0.1\text{м/с}$.
4. Для узлов сегментов квантовой телекоммуникационной сети DLCZ предложена новая модель пространственно-периодической структуры (поляритонного кристалла), которая может быть реализована на основе имеющихся технологий и внедрена в существующие сети без изменения их архитектуры.
5. Предложена методика клонирования квантовых состояний поляритонами, что актуально для коммуникационных систем нового поколения с высочайшей криптографической защитой и большой пропускной способностью на основе квантовых оптических маршрутизаторов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях по перечню ВАК:

1. Баринов И.О., Алоджанц А.П., Аракелян С.М. Возбуждение когерентных поляритонов в двумерной решетке атомов // Квантовая электроника. – 2009. – Т.39. – № 7. – С. 685–690.
2. Barinov I.O., Alodjants A.P., Arakelian S.M. Strongly localized polaritons in an array of trapped two-level atoms interacting with a light field // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2010, 43, pp.095502-095511.
3. Баринов И.О., Прохоров А.В., Алоджанц А.П., Аракелян С.М., Генерация рамановских поляритонов в трехуровневых атомных средах // Известия РАН. Серия физическая. – 2012. – Т. – 76. – № 6. – С. 706-713.
4. Баринов И.О., Прохоров А.В., Аракелян С.М., Динамическое усиление и генерация перепутанных поляритонов в допированных средах // Оптика и Спектроскопия. – 2012. – Т. 113. – No. 3. – 341–350.

Публикации в остальных изданиях:

1. Barinov I.O., Prokhorov A.V., Arakelian S.M. Generation of entangled polaritons in doped media // Proc. SPIE 8772, Nonlinear Optics and Applications VII, 2013. – 87720H
2. Barinov I.O., Prokhorov A.V., Alodjants A.P. Arakelian S.M. Formation of entangled polaritons in doped resonant medium // Proceedings of SPIE, 2012- Vol. 8414, P. 84140E.
3. Barinov I.O., Sedov E.S., Chestnov I.Yu., Alodjants A.P., Arakelian S.M. Quantum optics with atomic polaritons // Proceedings of SPIE – 2012 – Vol. 8414. – P. 84140Y.
4. Barinov I.O., Sedov E.S., Alodjants A.P., Arakelian S.M. Phase transition and storage of quantum optical information in spatially periodical atomic structure // Proc. SPIE, 2010. – Vol. 7727. – P. 77270A.
5. Баринов И.О., Прохоров А.В., Алоджанц А.П., Аракелян С.М. Генерация перепутанных поляритонов в допированных средах // Сборник трудов VII международной конференции молодых ученых и специалистов «Фундаментальные проблемы оптики-2012», Санкт-Петербург, 2012. Стр.15-18
6. Barinov I.O., Sedov E.S., Alodjants A.P. Arakelian S.M. BCS-like phase transition for strongly localized polaritons in a lattice // Book of abstracts 1-st

International Russian-Chinese conference/youth school-workshop «Modern laser physics and laser-information technologies for science and manufacture», 2011, pp. 133-136

7. Баринов И.О., Прохоров А.В., Алоджанц А.П., Аракелян С.М. Генерация перепутанных поляритонов в допированных волноводах // Сборник трудов VII международной конференции молодых ученых и специалистов «ОПТИКА – 2011», Санкт-Петербург, 2011. Стр.243-246
8. Barinov I.O., Sedov E.S., Prokhorov A.V., Alodjants A.P., Arakelian S.M. Slow light and phase transition with strongly localized polaritons in a atomic micro-structures // Book of abstracts International Conference on Theoretical Physics “Dubna-NANO2010”, 2010. Dubna, p.20
9. Баринов И.О., Седов Е.С., Алоджанц А.П., Аракелян С.М. Формирование когерентных поляритонов в решетке двухуровневых атомов взаимодействующих с квантовым полем в резонаторах // Труды 2-й международной конференции/молодежной школы-семинара «Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства». – Владимир: Издательство Владимирского государственного университета, 2009, С. 10 – 11.
10. Barinov I.O., Sedov E.S., Alodjants A.P., Arakelian S.M. Slow light and phase transition in the array of atomic polaritons Modern Optics and Photonics // Atoms and Structured Media. Ed. by. G.Yu.Kryuchkyan, World Scientific Publishing – Singapore – 2010, P.237-255
11. Barinov I.O., Sedov E.S., Alodjants A.P., Arakelian S.M. Slow light and phase transition in the array of atomic polaritons // Proceedings of the International advanced Research Workshop on “Modern Problem in Optics and Photonics” МРОМ-2009, 2009, pp.237-239

Патенты:

12. Положительное решение о выдаче патента на изобретение № 2011152291 (2011) «Способ генерации перепутанных поляритонов».

Подписано в печать 15.11.13.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 90 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.