



на правах рукописи

Урманчиев Равиль Василевич

**ОПТИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ НА ФОТОННОМ ЭХО В ОПТИЧЕСКИ
ПЛОТНОЙ СРЕДЕ**

01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2020

Работа выполнена в лаборатории квантовой памяти и коммуникаций Казанского квантового центра и на кафедре радиофотоники и микроволновых технологий в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева–КАИ»

Научный руководитель: **Моисеев Сергей Андреевич**

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры Радиофотоники и
микроволновых технологий, директор
Казанского квантового центра ФГБОУ ВО
«КНИТУ-КАИ»

Официальные оппоненты: **Башаров Асхат Масхудович**, к. ф-м. н.,
старший научный сотрудник НИЦ
«Курчатовский институт», Курчатовский
ядерно-физический комплекс, г. Москва

Куприянов Дмитрий Васильевич, д. ф-м.
н., заведующий лабораторией «Квантовая
оптика и квантовая информатика» ФГАОУ
ВО «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»

Ведущая организация: ФГБУН ВО «Институт физики
полупроводников им. А.В. Ржанова»
сибирского отделения академии наук, г.
Новосибирск

Защита состоится «16» апреля 2020 года в 15 ч 40 мин на заседании диссертационного совета КФУ.01.02 при Казанском (Приволжском) Федеральном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 16а, ауд. 110.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки им. Н.И. Лобачевского при ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 35 и на сайте <http://kpfu.ru/validation/sobstvennyye-sovety-kfu/obyavleniya-o-zaschitah-dissertacij>.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ года.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук



Камалова Д.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Оптические технологии привлекают внимание благодаря высокой частоте оптических фотонов, которая позволяет сократить время проведения отдельной операции и повысить скорость вычислений. Относительно высокая энергия оптических фотонов и распространение оптоволоконных линий связи стимулирует развитие квантовых оптических коммуникаций и вычислений. Кроме того, взаимодействие света с веществом в оптическом диапазоне достаточно сильно, чтобы использовать нелинейные эффекты и создавать устройства оптической памяти [1].

Квантовая память играет важную роль в таких задачах квантовой информатики как создание универсального квантового компьютера и разработка линий квантовых коммуникаций на большие расстояния [3]. Оптическая квантовая память подразумевает хранение фотонных кубитов в течение долгого времени в активной среде с возможностью считать сохраненное состояние в произвольный момент времени [2]. При этом для эффективного поглощения входного сигнала необходимо использовать среду с большой оптической плотностью. Взаимодействие света с веществом в такой среде нелинейно, поэтому необходимо с одной стороны глубоко понимать свойства происходящих нелинейных процессов, а с другой стороны выбрать именно такую среду, которая позволила бы добиться максимальной эффективности извлечения и времени хранения квантового состояния.

Перспективным методом для изучения твердотельных квантовых систем является теорема площадей МакКолла-Хана, которая представляет собой наиболее общий инструмент анализа распространения импульсов света в оптически плотной среде. Она также была успешно применена для анализа схемы оптической памяти на фотонном эхо [7]. Актуальным сегодня представляется разработка и применение теоремы площадей для фотонного эха для анализа схем оптической и квантовой памяти на основе стимулированного и восстановленного эха, а в будущем и для схем оптической памяти в резонаторе.

Одной из наиболее перспективных сред для реализации квантовой памяти являются твердотельные системы, которые локализованы в пространстве и позволяют надолго сохранять квантовое состояние света на долгоживущих подуровнях основного состояния. Среди таких систем выделяются редкоземельные ионы в неорганических кристаллах, у которых $4f$ оболочка экранирована электронами на $5s$ и $5d$ оболочках, благодаря чему оптические переходы внутри $4f$ оболочки обладают большим временем квантовой когерентности. Недостатком таких систем является то, что дипольный момент этих переходов невелик и становится сложно обеспечить большую оптическую плотность, необходимую для полного поглощения сигнала. Одним из наиболее перспективных решений этой проблемы

является помещением ячейки памяти в согласованный оптический резонатор, при этом согласованность обеспечивает полное поглощение сигнального импульса.

Рассматриваемый в качестве твердотельной основы квантовой информатики кристалл $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Tm}^{3+}$ и переход тулия на длине волны 793 нм обладают одновременно узкой, даже по меркам редкоземельных ионов, однородной шириной линии и большим неоднородным уширением, что позволяет использовать такой кристалл для реализации широкополосной квантовой памяти на фотонном эхо [4, 6]. Этот кристалл хорошо известен как в лазерной физике, так и в области оптической квантовой памяти. С использованием данного кристалла было продемонстрировано сразу несколько протоколов оптической квантовой памяти, включая схемы, основанные на эффекте фотонного эха. Однако, полученные в экспериментах параметры пока далеки от необходимых с точки зрения использования в квантовых коммуникациях и квантовых вычислениях.

Оптимизация схем квантовой памяти должна вестись в нескольких направлениях. С одной стороны, необходимо глубокое понимание квантовых процессов взаимодействия света с веществом, сопровождающих формирование сигналов фотонного эха для более точного анализа используемых протоколов, с другой стороны, необходима дальнейшая разработка протоколов квантовой памяти, в том числе их адаптация для использования в оптическом резонаторе.

В данной работе рассматривается и развивается общий инструмент для исследования фотонного эха и взаимодействия импульсов света с двухуровневыми атомами – теорема площадей для фотонного эха. Составлен алгоритм нахождения площади произвольного эхо-сигнала при двухимпульсном возбуждении оптически плотной среды. На его основе получены аналитические выражения для площади первых четырех эхо-сигналов. Для первичного фотонного эха проведено экспериментальное исследование поведения площади эха при больших площадях входных импульсов. На основе полученной теории дана теоретическая оценка максимально достижимой эффективности реализации протокола квантовой памяти на восстановлении сигнала подавленного эха. Полученная оценка подтверждена экспериментально посредством реализации этого протокола с использованием оптически плотного образца $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Tm}^{3+}$.

Актуальность разрабатываемых методов общего анализа схем оптической памяти обоснована их универсальностью и актуальностью задач создания эффективной оптической памяти и квантовой памяти для развития оптических и квантовых технологий.

Целью работы является теоретическая разработка методов реализации эффективной оптической памяти на фотонном эхо в оптически плотных средах и апробация этих методов на практике.

В рамках данной цели были поставлены следующие **задачи**:

- 1) реализовать протокол квантовой памяти на восстановлении подавленного эха в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ в ортогональной геометрии лазерных пучков и оценить различные вклады в эффективность восстановления сигнала;
- 2) составить алгоритм получения аналитического решения уравнения для площади произвольного эхо-импульса при двухимпульсном возбуждении ансамбля двухуровневых атомов и проверить полученные решения на соответствие теореме площадей МакКолла-Хана;
- 3) обобщить теорему площадей для фотонного эха на два важных с экспериментальной точки зрения случая: на случай сложной линии поглощения симметричной формы и на случай пространственно неоднородного пучка в приближении геометрической оптики;
- 4) провести экспериментальное исследование теоремы площадей для фотонного эха в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, получить зависимости площади первичного фотонного эха от площадей входных импульсов при больших площадях входных импульсов, экспериментально и теоретически исследовать влияние неоднородности лазерного пучка на поведение фотонного эха;
- 5) применить развитый подход теоремы площадей для оценки эффективности реализованного протокола оптической памяти и сделать выводы о применимости теоремы площадей для описания протоколов квантовой памяти на фотонном эхо.

Объектами исследования являются оптический переход между уровнями иона тулия ${}^3\text{H}_6(1) \leftrightarrow {}^3\text{H}_4(1)$ ($\lambda=793$ нм) в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ с концентрацией ионов тулия 0.1 ат. % и явление фотонного эха в оптически плотной среде.

Научная новизна работы состоит в получении следующих результатов:

- 1) Впервые получено обобщение теоремы площадей для фотонного эха на случай симметричной линии сложной формы и на случай пространственно неоднородного пучка в приближении геометрической оптики.
- 2) Впервые разработан алгоритм получения аналитического решения для импульсной площади отдельного произвольного импульса эха при двухимпульсном возбуждении оптически плотной среды. С помощью него рассчитаны импульсные площади вторичного, третичного и четвертого по счету импульсов эха при двухимпульсном возбуждении оптически плотной среды.

- 3) Впервые предсказано, что при определенных площадях входных импульсов в оптически плотной среде формируется воспроизводящая последовательность эхо-импульсов, распространяющихся вглубь среды.
- 4) Впервые осуществлено экспериментальное наблюдение поведения фотонного эха при больших ($>2\pi$) площадях входных импульсов.
- 5) Впервые экспериментально показано, что применение пространственной фильтрации позволяет восстановить скрытые нутации теоремы площадей, которые в случае лазерного пучка с Гауссовым поперечным профилем сильно подавлены.
- 6) Впервые реализован протокол оптической квантовой памяти с восстановлением сигнала подавленного эха в ортогональной геометрии распространения контролирующих лазерных пучков.

Научная и практическая значимость. Экспериментальная реализация протокола квантовой памяти на восстановлении сигнала подавленного эха открывает возможность для реализации этого протокола в согласованном оптическом резонаторе. Это является критическим шагом для реализации высокоэффективной квантовой памяти в этом кристалле и на этом протоколе.

Часть работы, посвященная теореме площадей для фотонного эха, решает важную задачу, поставленную в 1971 году [5]. Полученное решение предоставляет новый метод общего исследования протоколов квантовой памяти на основе фотонного эха. В данной работе это продемонстрировано для протокола квантовой памяти на восстановлении сигнала подавленного эха.

Методология и методы исследования. Представленные в работе результаты получены на основе использования редуцированной системы дифференциальных уравнений Максвелла-Блоха в приближении вращающейся волны. Для решения уравнений использовался подход импульсной площади, с помощью которого удалось получить систему дифференциальных уравнений для площадей световых импульсов. Полученные уравнения решались аналитически и численно при помощи стандартного метода Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Экспериментальное исследование проводилось с использованием стандартной техники многоимпульсной оптической эхо-спектроскопии.

Основные положения, выносимые на защиту.

- 1) Основными факторами, влияющими на эффективность в реализованном протоколе квантовой памяти на восстановлении сигнала

подавленного эха, являются точность рефазировки контролирующими импульсами, излучение сигнала в прямом направлении и время жизни когерентности T_2 в этом кристалле.

2) Теорема площадей для фотонного эха прямо обобщена на два практически значимых случая: а) атомных систем, обладающих симметричной формой линии резонансного поглощения, и б) лазерного пучка с неоднородным поперечным профилем в приближении геометрической оптики.

3) При двухимпульсном возбуждении оптически плотной среды в среде возникает самовоспроизводящаяся последовательность импульсов эха, если площадь второго входного импульса достаточно близка к π .

4) Применение пространственной фильтрации пучка с Гауссовым поперечным профилем позволяет проявить подавленные нутации площади фотонного эха.

Достоверность обобщений теоремы площадей обеспечивается корректностью уравнений Максвелла-Блоха и выполняемостью применяемых приближений. Достоверность полученных теоретических результатов подтверждается согласием с прежде полученными результатами. Степень достоверности экспериментальных результатов определяется точностью измерений и корректностью проведения эксперимента, воспроизводимостью и непротиворечивостью полученных результатов, использованием современного сертифицированного экспериментального оборудования и согласием с предыдущими исследованиями.

Полученные результаты были проанализированы в сравнении с результатами других исследователей и обсуждались в рамках научных семинаров, школ и конференций с коллегами, а также опубликованы в рецензируемых научных журналах.

Апробация работы проводилась на 9 международных конференциях:

XV Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы» (Казань, Россия, 2015); Международная научно-технической конференция молодых ученых, аспирантов и студентов: «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы. (г.Казань, 7-8 апреля 2016 г.); XI Международная научная школа-семинар «Фундаментальные исследования и инновации: нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия (Яльчик, Россия, 2016); 4th International Conference on Quantum Technologies: ICQT-2017 (Moscow, Russia, 2017); Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы» (Казань, Россия, 2017); Первая Российская школа по квантовым технологиям (Сочи, Россия,

2018); Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы» (Казань, Россия, 2018); Вторая Российская школа по квантовым технологиям (Сочи, Россия, 2019); Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы» (Казань, Россия, 2019);

Личный вклад автора:

Исследование теоремы площадей было лично выполнено автором под научным руководством Моисеева С. А. Автором лично проведены связанные с этим вычисления и оформлены результаты.

Экспериментальные работы, посвященные теореме площадей, выполнены автором совместно с Моисеевым С. А., Герасимовым К. И., Миннегалиевым М. М. Автор принимал личное участие в сборке и юстировке оптической установки, проведении эксперимента и лично проводил обработку экспериментальных результатов и сопутствующие теоретические расчёты.

Экспериментальная реализация протокола квантовой памяти с восстановлением сигнала подавленного эха проводилась автором совместно с Моисеевым С. А., Герасимовым К. И., Миннегалиевым М. М. Автор лично участвовал в сборе и юстировке экспериментальной установки, проведении эксперимента и обработке результатов.

Образец кристалла $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (выращенный Scientific Materials Corporation) для проведения экспериментальных работ был предоставлен научному коллективу Казанского квантового центра французскими коллегами Chanelière T., Louchet-Chauvet A.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 работ, из них 5 – статьи в журналах, входящих в список, утвержденный Высшей аттестационной комиссией, 4 – тезисы докладов.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 128 страниц, включая 36 рисунков. Список литературы содержит 197 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, а также отражены её научная новизна, практическая значимость и основные защищаемые положения. Кроме того, приводятся сведения о публикациях и апробации результатов.

Первая глава посвящена обзору научной литературы, в котором показано современное состояние данной области науки. В том числе

обсуждается роль квантовой памяти для квантовых коммуникаций на дальние расстояния и квантового повторителя. Обсуждаются основные существующие протоколы квантовой памяти и её характеристики. Приведен обзор работ по теореме площадей и текущее положение исследований в этой области. Далее приведен обзор свойств исследуемого кристалла $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и реализованных на этом кристалле протоколов квантовой памяти.

Вторая глава посвящена экспериментальной реализации протокола квантовой памяти на восстановлении сигнала подавленного эха в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$. Протокол квантовой памяти на восстановлении сигнала подавленного эха является наиболее близким к двухимпульсному фотонному эху, непригодному для создания квантовой памяти. Этот протокол основан на том, чтобы каким-то образом подавить генерацию первичного эха и затем, при помощи дополнительного рефазирующего импульса, считать сохраненную информацию (см. Рис. 1). Таким образом, сигнал эха распространяется в неинвертированной среде и содержит меньше шумов.

Для подавления первичного эха мы использовали схему с ортогональной геометрией распространения сигнального и контролирующего световых полей. Таким образом, условие фазового синхронизма не выполняется для первичного эха, но выполняется для второго эха. Такая схема наиболее удобна для реализации квантовой памяти в одномодовом оптическом резонаторе.

В данной схеме продемонстрирована эффективность восстановления сигнала подавленного эха 13% при времени хранения 36 мкс. Результат

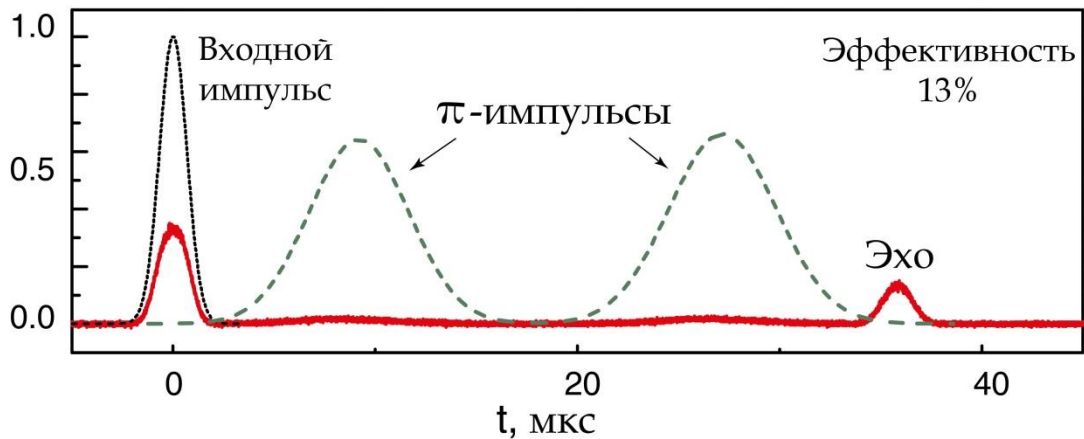


Рисунок 1. Результат записи и считывания импульса света с эффективностью 13% с использованием протокола квантовой памяти на восстановлении сигнала подавленного эха в ортогональной геометрии лазерных пучков.

записи и считывания импульса света с эффективностью 13% представлены на Рис. 1. Также показана возможность записи и считывания последовательностей из нескольких световых импульсов.

Основными факторами, которые позволили достичь эффективности 13 % стали:

а) точная рефазировка когерентности ионов тулия двумя контролирующими лазерными импульсами, в том числе использование импульсов с протяжкой частоты.

б) оптическая плотность образца $\alpha L = 0.8$. В наших экспериментах мы использовали двухпроходную схему для сигнального пучка, благодаря чему оптическая плотность приблизилась к оптимальному для этой схемы значению $\alpha L_{\text{оптим}} = 2$.

в) большое время жизни когерентности $T_2 = 75$ мкс на оптическом переходе тулия. Большое время хранения (которое ограничено T_2) необходимо для использования импульсов с протяжкой частоты с оптимальными параметрами.

Таким образом, рефазировка поляризации при помощи контролирующих импульсов является важным фактором при реализации эффективной памяти на восстановлении сигнала подавленного эха. В последующих главах диссертации представлено исследование теоремы площадей как общего метода анализа взаимодействия импульсов света с неоднородно уширенным ансамблем двухуровневых атомов и применение этого метода для оценки максимально достижимой эффективности реализованного протокола квантовой памяти.

В третьей главе приведен вывод уравнения для площади произвольного импульса фотонного эха при двухимпульсном возбуждении:

$$\partial_z \theta_e(z) = \frac{1}{2} \alpha \left\{ 2 \tilde{v}_0(z) \cos^2 \frac{\theta_e(z)}{2} + \tilde{w}_0(z) \sin \theta_e(z) \right\},$$

здесь $\theta_e(z)$ – искомая площадь эха, $\tilde{v}_0(z)$, $\tilde{w}_0(z)$ – фазирующиеся в момент вылета эха компоненты поляризации и инверсии, α – коэффициент резонансного поглощения.

В этой главе также приведены аналитические выражения для двух прямых обобщений теоремы площадей на два экспериментально важных случая: а) атомных систем, обладающих симметричной формой линии резонансного поглощения, и б) лазерного пучка с неоднородным поперечным профилем в приближении геометрической оптики.

В четвертой главе выведенная теорема площадей применяется для случая, когда площадь второго импульса θ_2 близка к π . С помощью разработанного алгоритма нахождения аналитического выражения для площади произвольного эха при двухимпульсном возбуждении вычисляются площади второго, третьего и четвертого по счёту импульса фотонного эха. Мы показываем, что в случае $\theta_2 \approx \pi$, в оптически плотной среде

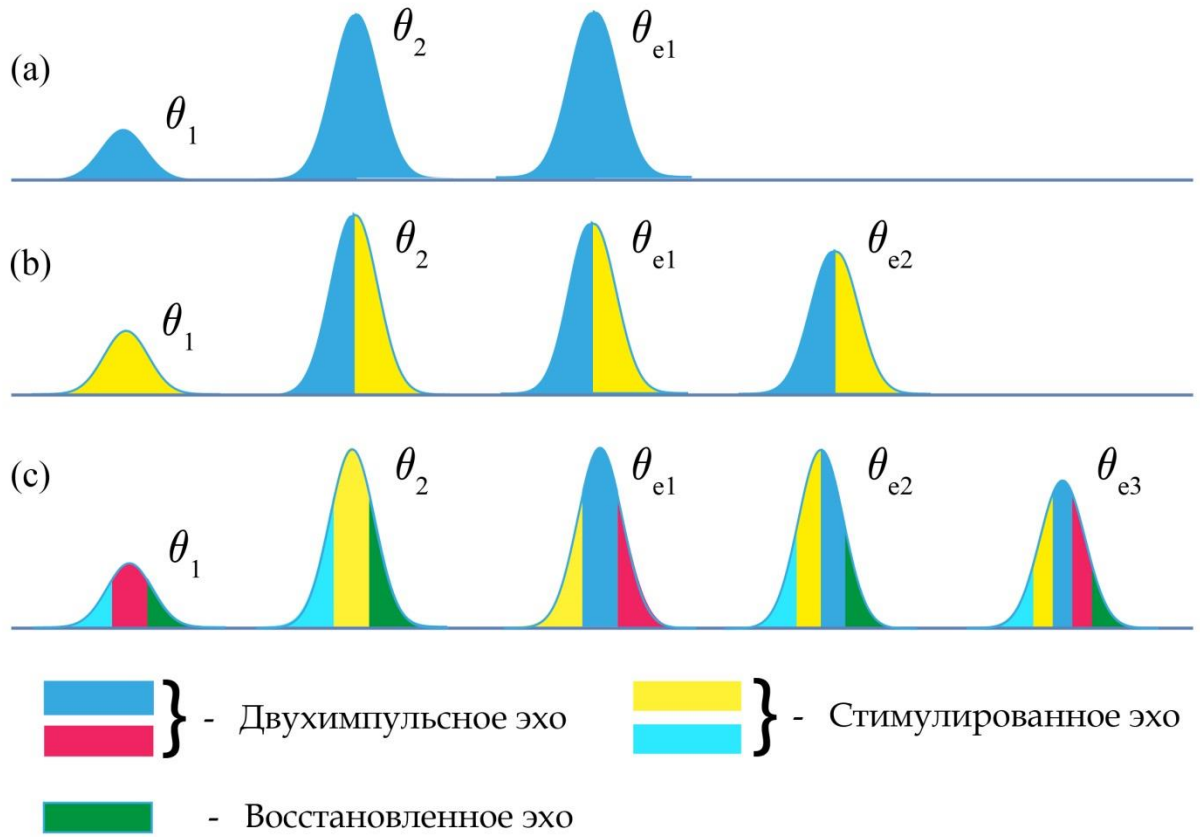


Рисунок 2. Компоненты, дающие вклад в формирование первого (а), второго (б) и третьего по счёту (с) импульсов эха и их физический смысл.

формируется последовательность эхо-импульсов с суммарной площадью близкой к 2π .

Рисунок 2 иллюстрирует физический смысл различных вкладов в $\tilde{v}_0(z)$ и $\tilde{w}_0(z)$ при формировании первых трёх импульсов эха. Слагаемые в $\tilde{v}_0(z)$ и $\tilde{w}_0(z)$ можно условно разделить на три физических типа: двухимпульсное, стимулированное и восстановленное эхо. Чем больше номер эха, тем больше импульсов участвует в его формировании и тем больше в нём различных вкладов.

В конце данной главы получена оценка максимально достижимой при оптимальной рефазировке эффективности восстановления сигнала эха в реализованном протоколе квантовой памяти, описанном в главе 2. Для оценки относительной интенсивности эха мы использовали величину $[\theta_{re}/\theta_1]^2$. Для наших экспериментальных параметров мы получили оценку максимально достижимой эффективности $\eta_m = 16.9\%$. Полученная оценка близка к независимой оценке для данной схемы памяти $\eta'_m = 16.7$, полученной с учетом оптической плотности и времени жизни когерентности T_2 . Небольшое различие между оценками объясняется нелинейностью релаксации в данном кристалле.

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования теоремы площадей в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (концентрация ионов тулия 0.1 ат. %). Были проведены две серии экспериментов по исследованию зависимости импульсной площади фотонного эха от площадей входных импульсов. В первой серии использовался лазерный пучок с Гауссовым поперечным профилем. Во второй серии экспериментов после прохождения кристалла был внесен дополнительный пространственный фильтр в виде диафрагмы диаметром 50 мкм, так что на детектор попадала только узкая центральная часть поперечного профиля пучка. На Рис. 3 представлена упрощенная схема экспериментальной установки.

В случае Гауссова пучка нутации теоремы площадей $\theta_e(\theta_2)$ и $\theta_e(\theta_1)$ оказались сильно подавлены из-за усреднения по поперечному профилю пучка при детектировании. Во второй серии экспериментов удалось проявить скрытые нутации благодаря примененной процедуре пространственной фильтрации. Рисунок 4 иллюстрирует различие между аналогичными зависимостями в случае Гауссова пучка и в случае применения пространственной фильтрации. Влияние пространственной фильтрации на наблюдаемые нутации теоремы площадей выражено в защищаемом положении №4.

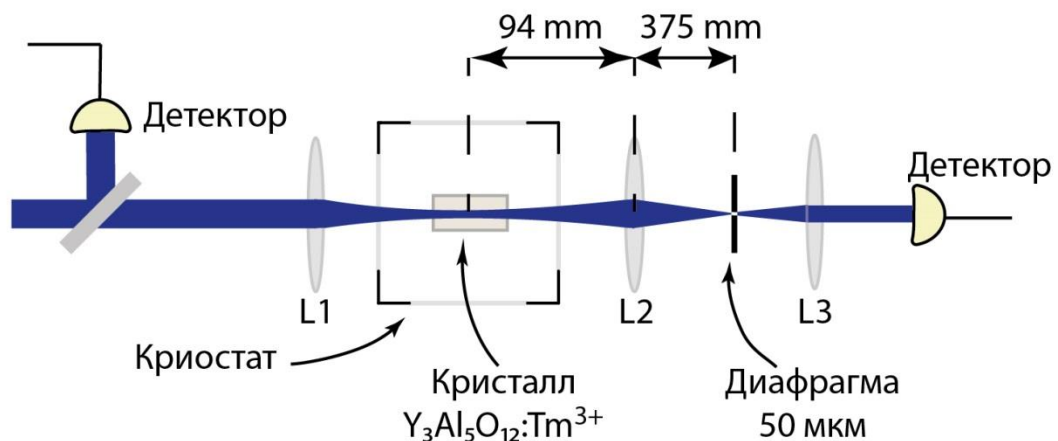


Рисунок 3 Упрощенная схема экспериментальной установки по исследованию теоремы площадей для фотонного эха

При помощи полученного ранее обобщения теоремы площадей удалось качественно и количественно описать первый осцилляционный пик зависимостей $\theta_e(\theta_2)$ и $\theta_e(\theta_1)$ и качественно остальные пики (см. Рис. 3). Кроме того, полученная теория качественно описывает подавление нутаций при увеличении неоднородности поперечного профиля пучка. Для количественного описания поведения последующих нутационных пиков (θ_1 , $\theta_2 > 2\pi$) необходима дальнейшая разработка теории и учет дифракционных и нелинейных эффектов.

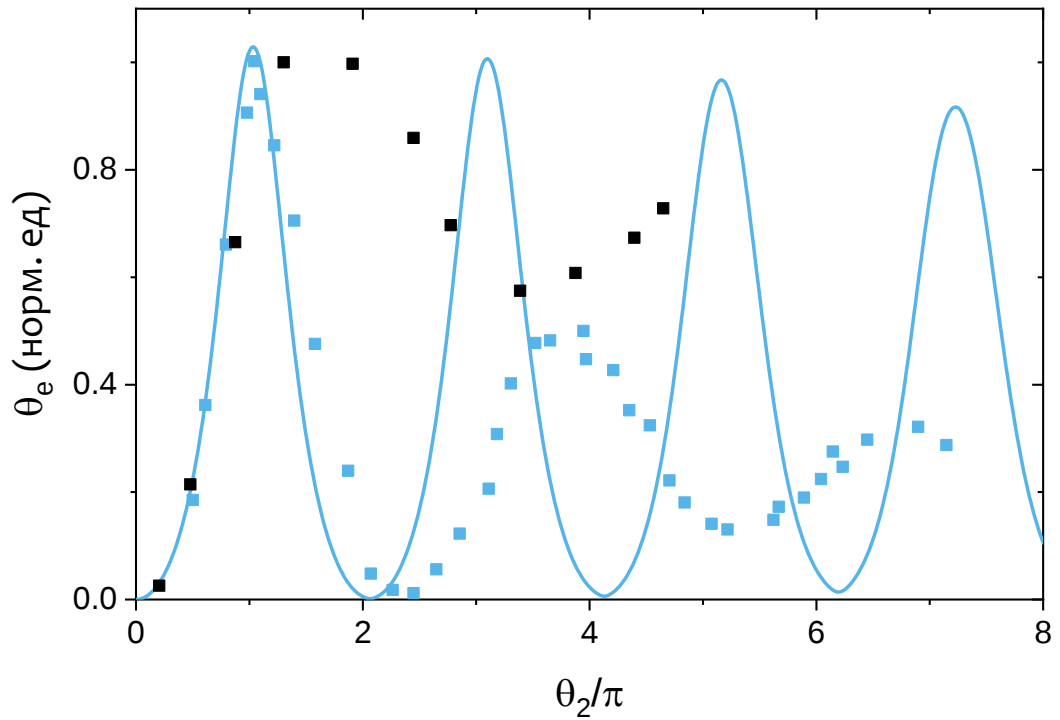


Рисунок 4 Сравнение экспериментальных зависимостей теоремы площадей $\theta_e(\theta_2)$ для двух экспериментов: без пространственной фильтрации, $\theta_1 = 0.3\pi$ (черные квадраты) и с пространственной фильтрацией, $\theta_1 = 0.25\pi$ (голубые кружки). Для эксперимента с пространственной фильтрацией также приведена теоретическая зависимость, полученная в приближении геометрической оптики (сплошная голубая кривая).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе выполнения данной работы были получены следующие значимые научные результаты:

1. Найдено два важных с экспериментальной точки зрения обобщения теоремы площадей для фотонного эха: на случай симметричной линии сложной формы и на случай пространственно неоднородного лазерного пучка (в приближении геометрической оптики).
2. Составлен алгоритм нахождения площади произвольного эхо-сигнала при двухимпульсном возбуждении ансамбля двухуровневых атомов.
3. Предсказано формирование воспроизводящейся последовательности импульсов эхо, распространяющихся вглубь оптически плотной среды, если площадь второго импульса близка к π и суммарная площадь входных импульсов больше π .
4. Впервые экспериментально продемонстрировано восстановление скрытых нутаций теоремы площадей при уменьшении пространственной неоднородности лазерного пучка.

5. Впервые экспериментально наблюдалось поведение площади фотонного эха при больших ($>2\pi$) площадях входных импульсов.
6. Впервые экспериментально продемонстрирована реализация протокола квантовой памяти на восстановлении сигнала подавленного эха в ортогональной геометрии лазерных пучков.

ВЫВОДЫ

1. Ключевую роль в реализации эффективной оптической памяти в схеме с восстановлением подавленного эха играет качество рефазировки системы при помощи контролирующих импульсов, что предсказано решением теоремы площадей.
2. Приближение геометрической оптики позволяет описать осцилляции площади эха при площадях входных импульсов до 2π , но для количественного описания процесса при больших площадях входных импульсов необходим учёт дополнительных, например, дифракционных эффектов.
3. Предсказанные в работе последовательности импульсов эха представляют собой новую аналогию 2π -солитону и 0π -бризеру в оптически плотной среде.
4. Подход на основе теоремы площадей является общим методом анализа схем оптической памяти на фотонном эхе. Дальнейшее развитие этого метода включает в себя:
 - a. учёт дифракционных эффектов при распространении лазерного пучка;
 - b. рассмотрение систем с оптическим резонатором;
 - c. обобщение на случай стимулированного эха;
 - d. рассмотрение импульсов с протяжкой частоты;
 - e. применение его для описания других протоколов оптической памяти.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах:

1. K. I. Gerasimov, M. M. Minnegaliev, S. A. Moiseev, R. V. Urmancheev T. Chanelière, A. Louchet-Chauvet Quantum memory in an orthogonal geometry of silenced echo retrieval // Opt. Spectrosc. 2017. Vol. 123, № 2. P. 211–216.

2. K. I. Gerasimov, M. M. Minnegaliev, S. A. Moiseev, R. V. Urmancheev, T. Chanelière, A. Louchet-Chauvet, Photon echo area theorem for optically dense media // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. Allerton Press, 2017. Vol. 81, № 5. P. 570–574.
3. R. Urmancheev, K. Gerasimov, M. Minnegaliev, T. Chanelière, A. Louchet-Chauvet, and S. Moiseev, Two-pulse photon echo area theorem in an optically dense medium // Opt. Express. 2019. Vol. 27, № 20. P. 28983.
4. R. V. Urmancheev, M. Sabooni and S. A. Moiseev, Photon echoes in optically dense media // Phys. Rev. Research, 2020. Vol. 2. P. 012026(R)
5. Photon echo area theorem for Gaussian laser beams / Urmancheev, R.V., Gerasimov, K.I., Minnegaliev, M.M., et al. // AIP Conference Proceedings – 2018 – V. 1936 – P. 020013

Тезисы и материалы научных конференций:

6. Experimental realization of revival of silenced echo memory protocol in optical cavity / M. Minnegaliev, K. Gerasimov, R. Urmancheev et al. // EPJ Web of Conferences. – 2018. – V. 190. – P. 03007.
7. Реализация ортогональной геометрии восстановления спящего эха в схеме квантовой памяти / К.И. Герасимов, М.М. Миннегалиев, С.А. Моисеев, Р.В. Урманчеев, Т. Chanelière, А. Louchet-Chauvet // Международная научно-техническая конференция «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2017»: Материалы конференции под редакцией О.Г. Морозова. – Казань: изд-во КНИТУ-КАИ, 2017 – с.554-559.
8. Первичное фотонное эхо в оптически плотной среде / Урманчеев Р.В., Герасимов К.И., Миннегалиев М.М., С.А. Моисеев // V Международная научно-техническая конференция «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2018»: Материалы конференции под редакцией А.А. Иванова. – Казань: ООО «Новое знание», 2018 – с.270-273.
9. Вторичное фотонное эхо в оптически плотной среде / Р.В. Урманчеев, С.А. Моисеев // VI Международная научно-техническая конференция «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2019»: Материалы конференции под редакцией А.А. Иванова, Д.Е. Шаронова – Казань: изд-во ИП Сагиева А.Р., 2019 – с. 461-463.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson D.Z. Coherent optical eigenstate memory // Optics Letters. 1986. № 1 (11). С. 56.
2. Appel J. [и др.]. Quantum Memory for Squeezed Light // Physical Review

Letters. 2008. № 9 (100).

3. Bussi res F. [и др.]. Prospective applications of optical quantum memories // Journal of Modern Optics. 2013. № 18 (60). С. 1519–1537.

4. Chanelire T. [и др.]. Light storage protocols in Tm:YAG // Journal of Luminescence. 2010. № 9 (130). С. 1572–1578.

5. Hahn E.L., Shiren N.S., McCall S.L. Application of the area theorem to phonon echoes // Physics Letters A. 1971. № 3 (37). С. 265–267.

6. Lauro R. [и др.]. Thulium doped crystals for quantum information storage // Journal of Luminescence. 2009. № 12 (129). С. 1951–1954.

7. Moiseev S.A. Some general nonlinear properties of photon-echo radiation in optically dense media // Opt. Spectrosc. 1987. № 2 (62). С. 180–185.