

На правах рукописи

Латыпов Ильнур Зиннурович

**КВАНТОВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ
ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫХ БИФОТОННЫХ ПОЛЕЙ**

01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

КАЗАНЬ – 2011 г.

**Работа выполнена в лаборатории нелинейной оптики Учреждения
Российской академии наук Казанского физико-технического института
им.Е.К.Завойского Казанского научного центра Российской Академии
наук**

Научный руководитель: доктор физико–математических наук, профессор
Виталий Владимирович Самарцев

Официальные оппоненты: доктор физико–математических наук, профессор
Ренат Хамитович Гайнутдинов

доктор физико–математических наук, в.н.с
Владимир Геннадьевич Волостников

Ведущая организация: ГОУ ВПО "Самарский государственный
университет"

Защита состоится “ 20 ” октября 2011г. в 14³⁰ часов на заседании Диссертационного Совета Д 212.081.07 в Казанском (Приволжском) федеральном университете по адресу: 420008, г.Казань, ул. Кремлевская, д.18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского федерального университета.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2011г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико–математических наук

Д.И. Камалова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Диссертационная работа посвящена проблемам создания устройств, функционирующих в области квантовой информации. Развитие информационных технологий в XXI веке является одним из главных направлений мировой эволюции. На сегодняшний день совершенно новым этапом этого развития является внедрение устройств, использующих законы квантовой механики для обработки, передачи и хранения информации. Разработка протоколов и физических принципов работы таких устройств активно велась с середины XX века и выявила несколько наиболее перспективных направлений.

Одним из таких направлений является создание высокоэффективных однофотонных и двухфотонных источников с заданными характеристиками, которые используются в качестве носителей информации в квантовой криптографии, квантовых вычислениях, устройствах квантовой памяти [1]. Эффективность таких источников определяется вероятностью зарегистрировать именно один фотон (или два фотона в случае двухфотонного источника) на выходе. Для реализации задач, связанных с передачей квантовой информации на большие расстояния, требуются однофотонные и двухфотонные источники с высокой яркостью [2], а для эффективного взаимодействия таких состояний с другими квантовыми объектами требуется управлять шириной их спектра в широком диапазоне. В частности, важной задачей является создание источников однофотонных состояний с шириной полосы от сотен до десятков МГц, что обусловлено необходимостью взаимодействия таких состояний с атомными системами [3]. Наиболее перспективным и широко применяемым способом получения однофотонных и двухфотонных состояний света является спонтанное параметрическое рассеяние света (СПР) [4]. Создание однофотонных и двухфотонных источников с контролируемым узкопо-

лосным спектром на основе внутриврезонаторного режима СПР является одной из задач, решаемых в диссертационной работе.

Не менее важной задачей квантовой информатики является задача восстановления (реконструкции) квантового состояния после выполнения последовательности преобразований, соответствующих определенным математическим функциям. В качестве таких преобразований удобно применять поляризационные преобразования в силу простоты и надежности экспериментальной реализации и хорошо развитого математического аппарата. В данной диссертационной работе осуществлялись поляризационные преобразования получаемых двухфотонных состояний света и проводилась реконструкция таких состояний методом квантовой поляризационной томографии. На основе таких двухфотонных состояний можно реализовать квантовые вычисления с троичной логикой .

Таким образом, задачи, решаемые в данной диссертационной работе, затрагивают самые современные и активно развивающиеся области квантовой оптики, а тема диссертационной работы является **актуальной**.

Цель работы

Целью диссертации является создание высокоэффективных узкополосных однофотонных и двухфотонных источников на основе внутриврезонаторного режима спонтанного параметрического рассеяния и реализация поляризационной квантовой томографии генерируемых бифотонных полей.

Научная новизна

1. Созданы макеты источников однофотонного состояния света на основе СПР в оптическом резонаторе, позволяющие управлять временной формой волновых пакетов. Впервые получены коррелированные пары узкополосных ортогонально-поляризованных пакетов на длине волны

650 нм в процессе СПР излучения гелий-кадмиевого лазера в кристалле Бета-бората бария (ВВО), находящемся в оптическом резонаторе. Исследована форма корреляционной функции второго порядка бифотонного поля в случае двух- и однорезонаторного параметрического генератора света (ПГС).

2. Впервые с использованием оптического резонатора осуществлена квантовая поляризационная томография узкополосных, ортогонально-поляризованных, коллинеарных, вырожденных по частоте бифотонов и выполнены поляризационные преобразования таких состояний бифотонного поля.

Положения, выносимые на защиту

1. Созданный экспериментальный комплекс позволяет проводить контролируемые поляризационные преобразования бифотонного поля и осуществлять поляризационную томографию таких состояний.

2. Разработанные макеты источников однофотонного состояния света на основе СПР в кристалле ВВО позволяют преобразовывать широкий спектр СПР в набор узких спектральных линий (порядка сотен МГц) с более высокой яркостью.

3. Развитая процедура поляризационной томографии бифотонного поля с помощью набора фазовых пластинок и поляризационных призм Глана является основой для создания устройств троичной логики, использующих узкополосные бифотоны.

4. Развитые методы управления временем когерентности твердотельных носителей информации позволяют повысить информационную емкость оптических эхо-процессоров.

Достоверность результатов

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивалась надежностью используемых экспериментальных методов, высокой точно-

стью измерений, использованием современного экспериментального оборудования, тщательностью обработки полученных экспериментальных данных, воспроизводимостью полученных результатов, хорошим согласием с теоретическими расчетами и многократной апробацией результатов на научных семинарах и конференциях.

Научная и практическая ценность

1. Созданный однофотонный резонаторный источник света на основе СПР характеризуется узкой спектральной шириной бифотонного поля и может быть использован при решении многих задач квантовой оптики.

2. Созданная аппаратура и предложенная процедура поляризационной томографии внутррезонаторных бифотонных состояний может быть использована при создании квантовых устройств троичной логики.

3. Теоретические разработки операций оптических эхо-процессоров могут быть полезными при создании таких устройств квантовой оптики.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференциях молодых ученых и семинаре КФТИ КНЦ РАН (Казань, 2006 г., 2010 г.), на международных молодежных научных школах "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия" (Казань, 2005 г., 2006 г., 2007 г., 2008 г., 2009 г., 2010 г.), на всероссийской конференции "Фундаментальные проблемы оптики" (Санкт-Петербург, 2006 г.), на международных чтениях по квантовой оптике (Самара, 2007 г. и Волгоград, 2011 г.), на международной конференции по когерентной нелинейной оптике ICONO/LAT-2010 (Казань, 2010 г.), на международном симпозиуме по фотонному эхо и когерентной спектроскопии ФЭКС-2009 (Казань, 2009 г.), на всероссийских научных школах-семинарах "Волны" (Звенигород, 2006 г., 2007 г., 2008 г., 2009 г., 2010 г., 2011 г.), на все-

российских семинарах памяти Д.Н. Клышко (Москва, 2009 г., 2011 г.), на семинарах лаборатории нелинейной оптики КФТИ КНЦ РАН.

Тематика диссертации связана с одной из базовых тем КФТИ КНЦ РАН: "Разработка методов когерентной оптической спектроскопии сверхбыстрого разрешения, исследование ультрабыстрых процессов в примесных твердотельных средах, полупроводниках, нанобъектах и поиск оптимальных режимов использования неклассического света в квантовых устройствах обработки информации" (2008-2012 г.г.), с грантами РФФИ № 08-02-00032а и 11-02-00040а, а также №10-02-90000 Бел.а. Индекс основного направления фундаментальных исследований: 2.3.

Основное содержание диссертации изложено в 10 научных работах, из которых 5 статей опубликованы в рекомендованных ВАК научных журналах.

Личный вклад автора

В большинстве совместных работ автором диссертации выполнена основная часть исследований, а также теоретические разработки. Соавторам этих работ принадлежит постановка задач, обсуждение полученных результатов и участие в написании статей.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов, выводов и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 111 страниц машинописного текста, включая 16 рисунков и списка цитируемой литературы из 120 наименований. В конце диссертации сформулированы основные результаты и выводы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит анализ современных тенденций развития квантовой информации, обоснование актуальности темы исследования, формулировку цели работы, основные защищаемые положения и полученные результаты, их новизну и практическую значимость, структуру и содержание диссертации.

Первая глава является обзорной и содержит описание физических принципов и свойств коррелированных пар фотонов (бифотонов), рождающихся в процессе спонтанного параметрического рассеяния света (СПР). В процессе СПР фотон накачки с волновым вектором \mathbf{k}_p в нелинейном кристалле с определенной вероятностью распадается на два фотона с волновыми векторами $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$, причем все три фотона связаны между собой условиями синхронизма для волновых векторов $\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$ и законом сохранения для частот $\omega_p = \omega_2 + \omega_3$.

В первом параграфе дается понятие перепутанности квантовых систем, историческая роль перепутанных состояний в развитии квантовой оптики, примеры перепутанных состояний и способы их получения.

Во втором параграфе описываются основные свойства СПР, его характеристики и условия генерации бифотонов.

В третьем параграфе дан обзор по реализации методов поляризационной квантовой томографии, которые позволяют осуществлять реконструкцию поляризационных состояний неклассических полей.

В четвертом параграфе показано, как на основе трех поляризационных состояний, получаемых в процессе СПР, можно реализовать передачу квантовой информации с помощью кутритов, т.е. используя троичную логику. Таким образом, N кутритов будут охватывать 3^N состояний в отличие от кубитов с состояниями 2^N , что позволит существенно повысить количество записываемой информации.

В пятом параграфе дан обзор по методам получения однофотонных

состояний света, описаны основные свойства однофотонных источников.

Вторая глава посвящена описанию созданных экспериментальных установок, применяемых методик, а также используемой аппаратуры.

В первом параграфе изложены методы и особенности регистрации слабых по интенсивности бифотонных полей. Приводится подробное описание работы и характеристик электрической части экспериментальной установки. Фактически, здесь решаются две экспериментальные задачи: регистрация световых полей в режиме счета одиночных фотонов и измерение корреляций фотоотсчетов в схеме интерферометра Брауна-Твисса.

Во втором параграфе описываются свойства нелинейного кристалла ВВО, используемого диссертантом в экспериментах.

В третьем параграфе приводится описание созданной экспериментальной установки для генерации и регистрации узкополосных однофотонных состояний, получаемых с помощью внутриврезонаторного режима СПР. Блок-схема данной установки приведена на рис.1. Непрерывное излучение гелий-кадмиевого лазера на длине волны $\lambda = 325$ нм направлялось через дисперсионную призму П, ультрафиолетовое зеркало УФЗ и диафрагму Д на нелинейный кристалл ВВО длиной 1 см. Нелинейный кристалл был помещен в оптический резонатор, включающий зеркала РЗ1 и РЗ2, имеющие низкие коэффициенты отражения для излучения накачки и высокие коэффициенты отражения для бифотонного излучения (99,8% для входного зеркала и 97,6% для выходного). Длина резонатора в данном эксперименте составляла порядка 30 см. Бифотонное излучение регистрировалось в схеме интерферометра Брауна-Твисса. В каждом канале фотоны проходили через диафрагму Д, и, с помощью объективов О, фокусировались на лавинные фотодетекторы ФД (SPCM Perkin Elmer AQR-14FC). С фотодетекторов сигнал поступал на комплекс регистрирующей аппаратуры, включающий счетчик импульсов, электрическую наносекундную линию задержки, схему совпадений с временем разрешения 3 нс и персональный компьютер ПК. Каждое

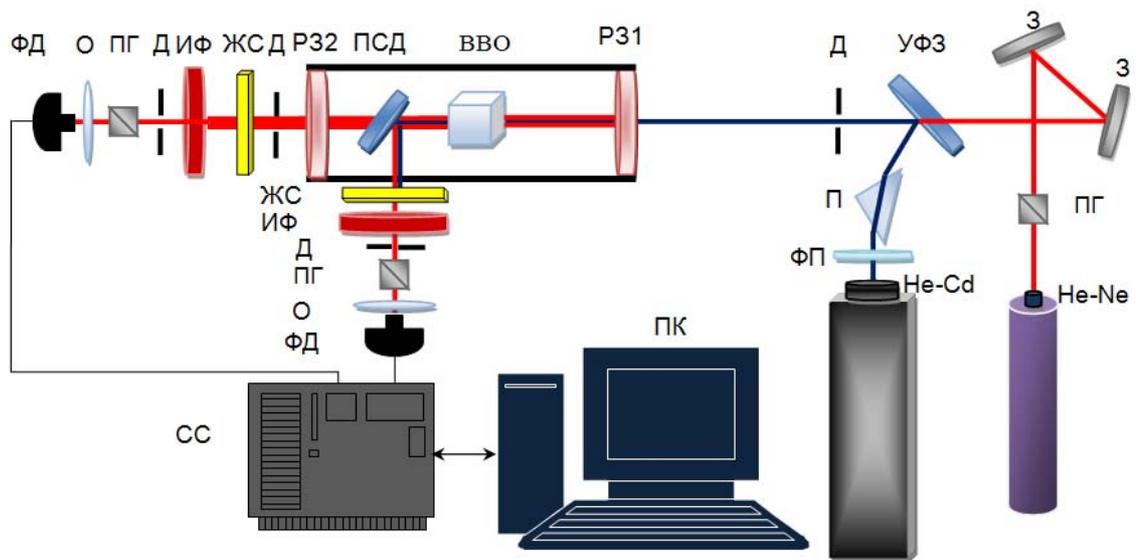


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки в случае однорезонаторного параметрического генератора света (ПГС).

измерение счета совпадений являлось накоплением импульсов за 0,1 с, а каждая экспериментальная точка являлась результатом усреднения по 500 измерениям, так что погрешность измерений не превышала 7%.

В четвертом параграфе представлена блок-схема созданной экспериментальной установки по генерации и регистрации узкополосных двухфотонных состояний света, получаемых в процессе внутррезонаторного режима СПР, а также выполнения поляризационных преобразований бифотонного поля и проведения процедуры квантовой поляризационной томографии. Блок-схема данной установки изображена на рис. 2.

В отличие от предыдущей установки здесь использовался юстировочный диодный лазер ДЛ на длине волны 650 нм для более прецизионной настройки резонатора и фазовых пластинок. Оптический резонатор был установлен таким образом, что его воздействию подвергались и сигнальные, и холостые фотоны, т.е. имел место двойной резонанс. Добротность резонатора и достижение двойного резонанса сильно зависели от юстировки резонаторных зеркал. В качестве измерительного поляри-

ных и холостых фотонов по поляризации с помощью поляризационного светоделителя, установленного внутри резонатора. Таким образом, холостой фотон проходит в боковой канал интерферометра Брауна-Твисса, не испытывая многократных отражений, и не модулируется функцией пропускания резонатора.

В экспериментальных схемах, использующих однопроходной режим СПР (без резонатора), время когерентности и ширина спектра бифотона определяются максимальной разницей во времени рождения сигнального и холостого фотонов, т.е. длиной кристалла. Ширина корреляционной функции второго порядка $G^{(2)}(t_s - t_i)$, где $(t_s - t_i)$ - временная задержка между сигнальным и холостым фотоном, составляет порядка сотен пикосекунд, т.е. корреляционную функцию с помощью электрической линии задержки измерить невозможно.

При помещении нелинейного кристалла ВВО в оптический резонатор время когерентности бифотонов станет определяться временем жизни фотонов в резонаторе, которое пропорционально резкости резонатора F . Таким образом, в данном резонаторе ширина корреляционной функции $G^{(2)}(t_s - t_i)$ могла увеличиваться до 20 нс, а ширина резонаторной моды могла составлять сотни МГц. Так как настройка резонатора является чрезвычайно прецизионной операцией, резкость F резонатора была меньше расчетной и в разных экспериментах немного менялась. Тем не менее, в результате эксперимента были получены узкополосные сигнальные фотоны, свойства которых сильно зависели от параметров резонатора. Результаты эксперимента изображены на рис.3.

В четвертом параграфе решается задача получения узкополосных двухфотонных состояний в схеме двухрезонаторного ПГС. Блок-схема данной установки изображена на рис. 2. Принцип действия резонатора и его параметры были идентичны случаю однорезонаторного ПГС. Отличие состояло в том, что резонатор действовал на сигнальные и холостые фотоны. Полученные двухфотонные узкополосные состояния послужи-

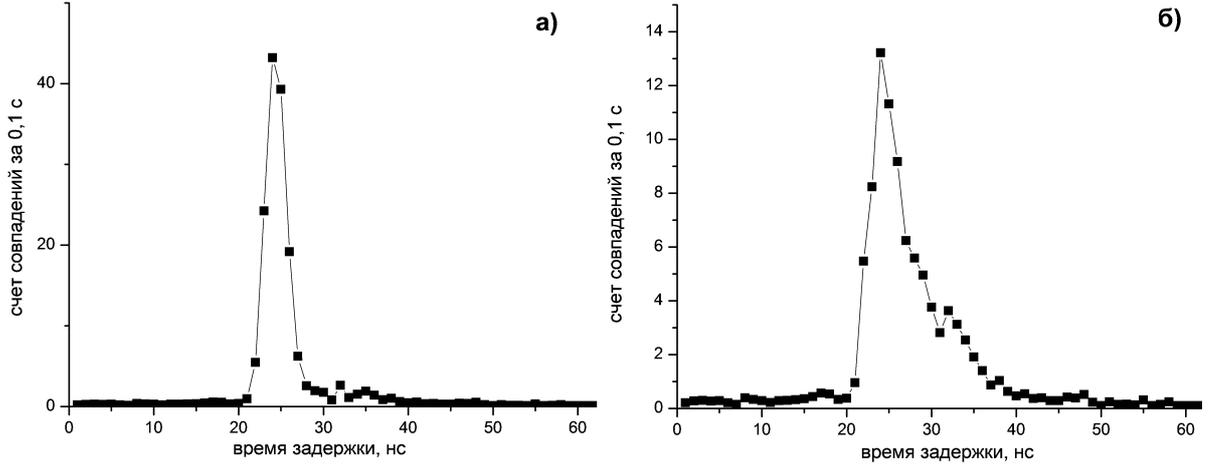


Рис. 3. Зависимость счета совместных совпадений от временной задержки между сигнальным и холостым каналом: а) в отсутствии резонатора; б) в присутствии резонатора.

ли базой для задач, решаемых в следующей главе.

В четвертой главе приводится процедура квантовой поляризационной томографии узкополосных двухфотонных состояний света. *Во первом параграфе* рассмотрена процедура томографии классических полей. *Во втором параграфе* развиты теоретические основы метода поляризационной квантовой томографии, которая состоит в реконструкции поляризационных состояний поля на основе данных только поляризационных измерений. Для определения поляризационных состояний бифотона необходимо получить матрицу когерентности четвертого порядка по полю:

$$K_4 = \begin{bmatrix} A & D & E \\ D^* & C & F \\ E^* & F^* & B \end{bmatrix},$$

элементами которой являются нормально упорядоченные четвертые моменты: $A = \langle a_x^{\dagger 2} a_x^2 \rangle$, $B = \langle a_y^{\dagger 2} a_y^2 \rangle$, $C = \langle a_x^{\dagger} a_y^{\dagger} a_x a_y \rangle$, $D = \langle a_x^{\dagger 2} a_x a_y \rangle$, $E = \langle a_x^{\dagger} a_y^2 \rangle$, $F = \langle a_x^{\dagger} a_y^{\dagger} a_y^2 \rangle$, причем A, B, C - вещественные, а D, E, F - комплексные числа.

В случае идеализированного чистого одномодового (оба фотона принадлежат к одной пространственной и частотной моде) состояния бифото-

тонного поля имеем:

$$|\psi\rangle = c_1|2, 0\rangle + c_2|1, 1\rangle + c_3|0, 2\rangle, \quad (1)$$

где $|m, n\rangle$ означает состояние с m фотонами в поляризаационной моде X и с n фотонами в поляризаационной моде Y . Коэффициенты $c_i = d_i e^{i\phi_i}$ есть комплексные амплитуды вероятности зарегистрировать одно из трех поляризаационных состояний.

При регистрации бифотонных полей в схеме интерферометра Брауна-Твисса экспериментально наблюдаемой является скорость совпадений фотоотсчетов, которая определяется коррелятором

$$G \equiv \langle a_{y1}^{\dagger'} a_{y2}^{\dagger'} a'_{y1} a'_{y2} \rangle, \quad (2)$$

где $a_{y1}^{\dagger'}$, $a_{y2}^{\dagger'}$ - операторы рождения фотонов с вертикальной поляризацией в модах 1,2 после преобразователей поляризации.

Таким образом, экспериментально измеряя, а затем вычисляя функцию коррелятора для различных комбинаций фазовых пластинок в интерферометре Брауна-Твисса (рис. 2) получаем все элементы матрицы когерентности. Набор комбинаций пластинок определяется протоколом квантовой поляризаационной томографии и в нашем случае состоит из 9 измерений.

Третий параграф посвящен экспериментальной реализации поляризаационной томографии и также проведению контролируемых поляризаационных преобразований и их сравнению с теоретическими расчетами.

Получаемые в нашем эксперименте узкополосные бифотоны имели ортогональную поляризацию, т.е. с одним фотоном в моде H и одним фотоном в моде V . Были установлены следующие значения для амплитуд весовых коэффициентов:

$$|c_1|^2 = 0,03 \quad |c_2|^2 = 0,95 \quad |c_3|^2 = 0,03 \quad |c_1|^2 + |c_2|^2 + |c_3|^2 \approx 1.$$

Таким образом, полученные экспериментальные результаты согласуются со II типом синхронизма СПР для чистого состояния одномодовых

бифотонов. Однако, вообще говоря, состояния являются смешанными, и для более точного описания необходимо использовать формализм матрицы плотности.

Следующая задача - проведение поляризационной томографии с использованием контролируемого поляризационного преобразования состояния бифотона. Для поляризационных преобразований была использована четвертьволновая фазовая пластинка ФП, помещенная перед светоделителем СД. Если фазовая пластинка ФП выставлена в нулевое положение, то состояние бифотона не меняется. При повороте фазовой пластинки на 45° происходит преобразование поляризации бифотона из линейной в круговую, и, наоборот, в линейную при повороте еще на 45° . Следовательно, при повороте фазовой пластинки менялись соотношения между коэффициентами $|c_1|^2, |c_2|^2, |c_3|^2$. В процессе измерений находилась зависимость коэффициентов $|c_i|^2$ от поворота фазовой пластинки ФП с шагом 3 градуса и для каждого положения пластинки измерялись все необходимые моменты согласно протоколу квантовой томографии.

Коэффициенты c_i для различных положений четвертьволновой фазовой пластинки определяются с помощью соответствующего оператора G , действующего на исходное поляризационное состояние. Результаты эксперимента приведены на рис.4, где точками обозначены вычисленные из экспериментальных данных значения квадратов модулей амплитуд, а сплошной линией обозначены теоретические кривые. По полученным графикам можно сделать вывод о хорошем согласии теоретического расчета и результатов эксперимента. Следовательно, можно с высокой достоверностью находить неизвестные состояния узкополосных бифотонов.

Пятая глава посвящена теоретической разработке некоторых операций увеличения времени когерентности твердотельных носителей информации из класса ван-флековских парамагнетиков, используемых в оптических эхо-процессорах.

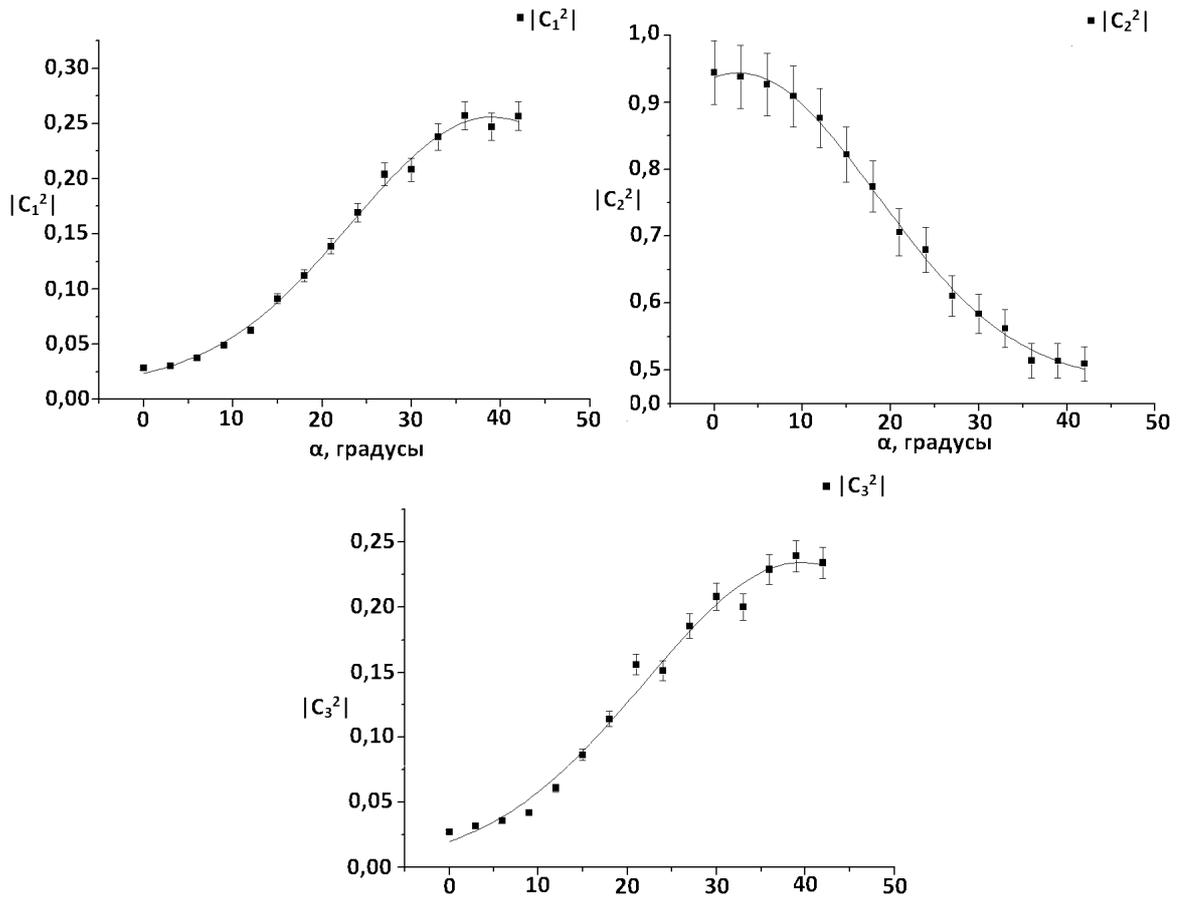


Рис. 4. Зависимость амплитуды весовых коэффициентов $|c_i|^2$ от угла поворота четвертьволновой пластинки

В первом параграфе теоретически исследуется операция фотонного локинга в вышеупомянутом классе кристаллов. При реализации этой операции используется трехимпульсная оптическая последовательность, в которой первый $\pi/2$ - импульс создает узкополосную когерентность на резонансном переходе и носит название подготовительного. Второй протяженный импульс, носящий название зондирующего, имеет поляризацию, направленную вдоль псевдоэлектрических диполей, созданных первым импульсом, благодаря чему осуществляется их захват поляризацией "запирающего" импульса. Третий (пробный) импульс является считывающим и служит для детектирования оптической когерентности. Суть фотонного локинга состоит в том, что в течение времени "захвата" роль времени когерентности выполняет время продольной релаксации T_1 , а не время фазовой релаксации T_2 .

Второй и третий параграфы этой главы посвящены теоретическому анализу других операций сужения линий оптического перехода. Сначала был рассмотрен режим сужения, обусловленный воздействием на резонансную среду оптического аналога четырехимпульсной последовательности WАНУНА. Затем, принимая во внимание доминирующую роль спектральной диффузии, был рассмотрен случай воздействия на ядра "решетки" радиочастотной последовательности WАНУНА. И, наконец, был теоретически исследован режим радиочастотного воздействия (под магическим углом к постоянному магнитному полю) на ядра фтора в кристалле $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$, и объяснена "развязка" дипольного взаимодействия этих ядер между собой связанная с ростом времени фазовой релаксации более чем в 10 раз. Кроме того, проведено компьютерное моделирование поведения локального поля в условиях подобного радиочастотного воздействия на 50 ближайших (к примесному центру) ядерных спинов. Результаты численного расчета кривых спада фотонного эха в этих условиях приведены на рис. 5. Они согласуются с кривыми спада, полученными в эксперименте [5]. В частности, время фазовой релаксации T_2 в условиях радиочастотной "развязки" увеличилось в 10 раз.

Основные результаты выводы

1. Создан экспериментальный комплекс для реализации поляризационных преобразований состояний бифотонного поля и его поляризационной томографии.
2. Созданы действующие макеты источников однофотонных и двухфотонных состояний света на основе СПР в резонаторе. Получены коррелированные пары узкополосных ортогонально поляризованных фотонов на длине волны 650 нм в процессе СПР излучения гелий-кадмиевого лазера в кристалле ВВО, находящимся в оптическом резонаторе. Исследованы формы корреляционных функций второго порядка бифотонного поля в случае двух- и однорезонаторного параметрического генератора

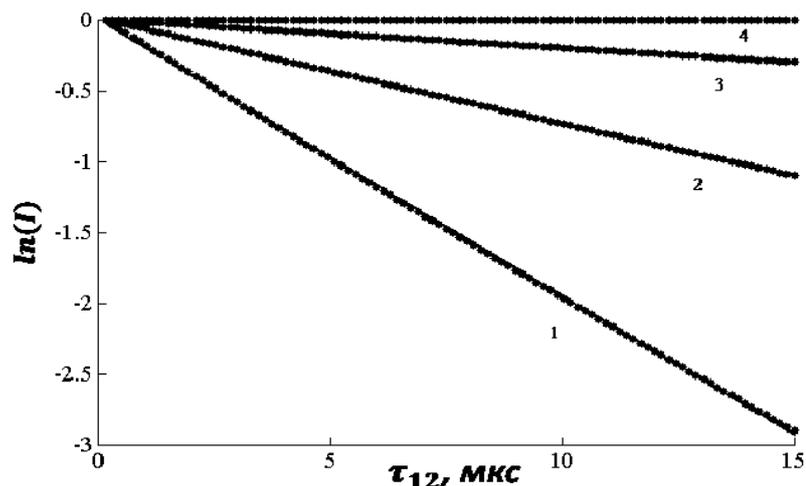


Рис. 5. Результаты расчета спада относительной интенсивности I фотонного эха в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ от промежутка τ_{12} между возбуждающими импульсами при различных значениях β : 1 – $\beta=0^\circ$, $T_2=20,5$ мкс, 2 – $\beta=40^\circ$, $T_2=54,6$ мкс, 3 – $\beta=50^\circ$, $T_2=200$ мкс, 4 – $\beta=54,7^\circ$

света, позволяющие контролировать спектральные характеристики бифотонов.

3. Впервые с использованием оптического резонатора осуществлена квантовая поляризационная томография узкополосных, ортогонально поляризованных, коллинеарных, вырожденных по частоте бифотонов. Проведенные поляризационные преобразования таких состояний бифотонного поля находятся в хорошем согласии с теоретическими расчетами.

4. Осуществлены теоретические разработки ряда актуальных задач функционирования твердотельных фотонных эхо-процессоров, в частности, операций по удлинению времени оптической дефазировки оптическими и радиочастотными методами.

СПИСОК АВТОРСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

[A1] **Латыпов, И.З.** Обращение поляризации "обращенного" фотонного эха / И.З.Латыпов, В.В.Самарцев // В Тр. IX международной молодежной научной школы "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия" под ред. М.Х.Салахова и В.В.Самарцева. Казань.КГУ -2005. -С. 267-270.

[A2] **Латыпов, И.З.** Многоимпульсное управление релаксационными процессами в твердотельных фотонных эхо-процессорах / И.З.Латыпов, С.В.Петрушкин, В.В.Самарцев // В Тр. конференции молодых ученых КФТИ КНЦ РАН под ред. А.Р.Мурсалимова и С.М.Хантимирова. Казань. изд. Новое Знание. -2006. -С. 43-49.

[A3] **Латыпов, И.З.** Многоимпульсные оптические последовательности в твердотельных фотонных эхо процессорах / И.З.Латыпов, В.В.Самарцев // Известия РАН. Серия физическая. -2006. -Т.70. -№12. -С. 1771-1775.

[A4] **Латыпов, И.З.** Пути решения проблемы оптического записывания информации в фотонных эхо процессорах / И.З.Латыпов, С.В.Петрушкин, В.В.Самарцев // Ученые записки КГУ. Физ.-мат. Науки. -2007. -Т.149. -Кн.1. -С. 72-77.

[A5] **Latypov, I.Z.** Modulation of photon echo shape in ruby caused by hyperfine structure of trivalent Cr^{53} / / I.Z.Latypov, T.G.Mitrofanova, V.V.Samartsev, A.M.Shegeda, A.V.Shkalikov, V.V.Samartsev // Proceedings of SPIE. -2008. -V.7024. -P.70240Q (7 pages).

[A6] **Латыпов, И.З.** Обязанная сверхтонкому взаимодействию модуляция формы сигналов первичного и стимулированного фотонного эха в рубине в постоянном магнитном поле / В.В.Самарцев, А.М.Шегеда, А.В.Шкаликов, В.А.Зуйков, И.З.Латыпов, Т.Г.Митрофанова // Ученые записки КГУ. Физ.-мат. Науки. -2008. -Т.150. -Кн.2. -С. 202-206.

[A7] **Латыпов, И.З.** Генерация узкополосных коррелированных пар фотонов в процессе спонтанного параметрического рассеяния света в резонаторе / И.З.Латыпов, А.А.Калинкин, А.В.Шкаликов, А.А.Калачев, В.В.Самарцев // Известия РАН. Серия физическая. -2009. -Т.73. -№12. -С. 1774-1779.

[A8] **Латыпов, И.З.** Однофотонные источники на основе параметрического рассеяния света / И.З.Латыпов, А.А.Калинкин, А.В.Шкаликов, А.А.Калачев, В.В.Самарцев // В Материалах V Международной науч-

ной школы "Наука и инновации-2010" под ред. И.И.Попова. Йошкар-Ола, изд. МарГУ. -2010. -С. 421-428.

[A9] **Латыпов, И.З.** Генерация пар ортогонально-поляризованных фотонов в процессе спонтанного параметрического рассеяния света в резонаторе / И.З.Латыпов, А.В.Шкаликов, А.А.Калинкин, А.А.Калачев, В.В.Самарцев // Ученые записки КГУ. Физ.-мат. Науки. -2010. -Т.152. -Кн.2. -С. 111-118.

[A10] **Латыпов, И.З.** Экспериментальная реализация квантовой томографии узкополосных бифотонных полей / И.З.Латыпов, А.А.Калинкин, А.В.Шкаликов, А.А.Калачев, В.В.Самарцев // В Материалах VI Международной научной школы "Наука и инновации-2011" под ред. И.И.Попова. Йошкар-Ола, изд. МарГУ. -2011. -С. 94-102.

Список цитированной литературы

- [1] **Gisin, N.** Quantum cryptography / N.Gisin, G.Ribordy, W.Tittel, H.Zbinden // Rev. Mod. Phys. -2002. -V.74. -P.145-195.
- [2] **Ursin, R.** Entanglement-based quantum communication over 144 km / R.Ursin, F.Tiefenbacher, T.Schmitt-Manderbach, H.Weier et. al. // Nature. - 2007. - V.3. - P.481-486.
- [3] **Melholt, N.B.** Time gating of heralded single photons for qatomic memories / N.B.Melholt, J.S.Neergard-Nielsen, E.S.Polzik // Opt. Lett. - 2009. - V.34. - P.3872-3874.
- [4] **Клышко, Д.Н.** Фотоны и нелинейная оптика / Д.Н.Клышко. - М:Наука. -1980. -256 с.
- [5] **Macfarlane, R.M.** Optical line narrowing by nuclear spin decoupling in $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$ / R.M.Macfarlane, C.S.Yannoni, R.M.Shelby // Opt. Comm. -1980. -V.32. P.101-104.