



на правах рукописи

Миннегалиев Мансур Марселевич

**ОПТИЧЕСКАЯ КВАНТОВАЯ ПАМЯТЬ НА КРИСТАЛЛАХ,
АКТИВИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ, И ЕЁ
РЕАЛИЗАЦИЯ В ОПТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ**

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 «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ»

Официальные оппоненты:

Ахмеджанов Ринат Абдулхаевич

доктор физико-математических наук, заведующий отделом нелинейной электродинамики ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Голубева Татьяна Юрьевна

доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики-I физического факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет» (МПГУ), г.Москва

Защита состоится «19» марта 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 «__» _____ 2020 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук  Камалова Д.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Квантовая память – это устройство, которое позволяет хранить произвольное квантовое состояние кубитов в течение заданного времени [1; 2]. При этом в оптической квантовой памяти (КП) носителями квантовых состояний (или кубитов) являются фотоны. В таких системах квантовая информация может быть закодирована в различные степени свободы фотона, такие как поляризация, частота, фаза и орбитальный угловой момент. Фотонные кубиты хорошо зарекомендовали себя в существующих системах квантовых коммуникаций. Однако в таких системах вероятность достижения фотонными кубитами адресата на другом конце оптического волокна экспоненциально спадает с длиной канала связи. Этот факт накладывает жесткие ограничения на возможные расстояния передачи информации (несколько сотен километров). В связи с этим возникает потребность в разработке методов, позволяющих увеличить длину канала связи. Одним из решений является создание квантового повторителя [3], который, в отличие от классического повторителя, основан на явлении квантовой телепортации состояний сигнальных фотонов, находящихся на большом расстоянии друг от друга. В этом контексте оптическая КП стала одним из ключевых элементов, необходимых для будущей практической реализации квантовых повторителей. Такая память позволит облегчить передачу запутанных состояний фотонов на очень большие расстояния, переводя на время квантовое состояние распространяющихся фотонов на долгоживущие стационарные кубиты. Стоит отметить, что оптическая КП может быть применима для реализации однофотонных детерминированных источников и детекторов, для проверки законов квантовой механики, для квантовых вычислений и в квантовой метрологии [4].

В качестве стационарных кубитов можно использовать систему атомов, обладающих подходящими квантовыми переходами (оптическими линиями поглощения), на которые отображается квантовое состояние сигнальных фотонных кубитов. Для того чтобы процесс записи был эффективным, необходимо, чтобы система атомов обладала значительной оптической плотностью перехода, позволяющей реализовать практически полное поглощение (запись) входных импульсов света. Для эффективного хранения записанного квантового состояния также необходимо достаточно большое время когерентности выбранных рабочих квантовых переходов. Кристаллы, активированные редкоземельными ионами (РЗИ), активно используются в КП, так как эти ионы слабо взаимодействуют с окружением в кристалле [5]. В РЗИ электроны в $4f$ -оболочке экранированы от окружения полностью заполненными внешними $5s$ и $5p$ оболочками. Вследствие этого такие ионы обладают большими временами когерентности квантовых переходов при криогенных температурах, и, в отличие от атомных ансамблей в свободном пространстве, такие системы не обладают пространственной диффузией.

Наличие у этих ионов долгоживущих электрон-ядерных спиновых состояний, переходы между которыми можно возбуждать с помощью оптического излучения, указывает на возможность увеличения времени хранения в ячейке КП до ~6 часов [6]. При этом некоторые кристаллы обладают относительно большим неоднородным уширением линии поглощения, что позволяет реализовать широкополосную КП. С другой стороны, электрические дипольные переходы между уровнями внутри $4f$ -оболочки запрещены по четности, т.е. дипольные моменты переходов РЗИ имеют малые значения по сравнению с межконфигурационными переходами. Вследствие этого не во всех кристаллах, активированных РЗИ, возможно достижение полного поглощения входных сигналов. Для некоторых протоколов КП, даже при оптимальном поглощении, максимальная эффективность ограничена 54%. Чтобы обойти эти ограничения, в работах [7; 8] было теоретически предложено поместить ячейку КП в согласованный оптический резонатор.

Целью данной работы является экспериментальная разработка протокола оптической квантовой памяти на эффекте фотонного эха в кристаллах, активированных редкоземельными ионами, в резонаторе Фабри-Перо.

Объектами исследования являются кристаллы, активированные редкоземельными ионами, $Y_3Al_5O_{12}: Tm^{3+}$ и ${}^7LiYF_4: {}^{167}Er^{3+}, {}^{166}Er^{3+}$

Для достижения цели диссертационной работы были поставлены и решены следующие **задачи**:

- 1) Расчет параметров оптического резонатора с учетом оценки внутренних потерь, условий согласования связи и возможностей экспериментальной реализации протокола оптической квантовой памяти в схеме восстановления сигнала подавленного эха в кристалле $Tm^{3+}: Y_3Al_5O_{12}$.
- 2) Экспериментальная реализация протокола оптической квантовой памяти в схеме восстановления сигнала подавленного эха в согласованном оптическом резонаторе для ослабленных световых импульсов в кристалле $Tm^{3+}: Y_3Al_5O_{12}$.
- 3) Определение спектроскопических параметров кристалла ${}^{167}Er^{3+}: {}^7LiYF_4$ для оценки перспективности его применения в реализации нерезонансной рамановской схемы квантовой памяти в оптическом резонаторе.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы

Научная новизна работы состоит в получении следующих научных результатов впервые:

- 1) Экспериментально реализована оптическая КП в схеме восстановления сигнала подавленного эха сигнала в согласованном оптическом резонаторе в кристалле $Tm^{3+}: Y_3Al_5O_{12}$, с использованием ортогональной геометрии распространения сигнального и контролирующего полей.

- 2) В кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}(\text{YAG})$ был обнаружен и исследован линейный эффект Штарка, который не должен наблюдаться в данном кристалле. При помощи данного эффекта была продемонстрирована адресная запись и считывание входных сигнальных полей.
- 3) Были экспериментально определены значения g-факторов для состояний ${}^4\text{I}_{13/2}(\Gamma_{78})$, ${}^4\text{I}_{13/2}(\Gamma_{56})$, ${}^4\text{I}_{9/2}(\Gamma_{78})$ ионов ${}^{166}\text{Er}^{3+}$ в кристалле ${}^7\text{LiYF}_4$.
- 4) Исследована сверхтонкая структура для оптического перехода ${}^4\text{I}_{15/2}(\Gamma_{56}) - {}^4\text{I}_{9/2}(\Gamma_{78})$ ионов ${}^{167}\text{Er}^{3+}$ в изотопически обогащенном кристалле ${}^7\text{LiYF}_4$, а для состояний ${}^4\text{I}_{13/2}(\Gamma_{78})$, ${}^4\text{I}_{13/2}(\Gamma_{56})$ впервые исследована сверхтонкая структура во внешнем магнитном поле. В результате проведенной работы были сопоставлены наблюдаемые оптические линии поглощения с конкретными переходами между сверхтонкими подуровнями ионов ${}^{167}\text{Er}^{3+}$. Были определены времена жизни сверхтонких подуровней основного состояния ${}^4\text{I}_{15/2}(\Gamma_{56})$ для этого же кристалла при температуре 1.3 К.
- 5) Определено время когерентности на сверхузком оптическом переходе (неоднородная ширина линии 24 МГц) между сверхтонкими подуровнями состояний ${}^4\text{I}_{15/2}(\Gamma_{56}) - {}^4\text{I}_{9/2}(\Gamma_{78})$ ионов ${}^{167}\text{Er}^{3+}$ в кристалле ${}^7\text{LiYF}_4$ при температуре 4 К и в отсутствие внешнего магнитного поля.
- 6) Было изучено изменение неоднородного и однородного уширения линий на оптическом переходе ${}^4\text{I}_{15/2}(\Gamma_{56}) - {}^4\text{I}_{9/2}(\Gamma_{78})$ ионов ${}^{167}\text{Er}^{3+}$ в волноводных структурах диаметрами от 30 мкм до 100 мкм в кристалле ${}^7\text{LiYF}_4$, которые были изготовлены методом фемтосекундной лазерной печати.

Полученные результаты являются важным шагом на пути к созданию практически значимой оптической КП. Реализация протокола восстановления сигнала подавленного эха в резонаторе позволила значительно улучшить базовые характеристики данной схемы КП, уменьшить уровень квантовых шумов, что является важным шагом для адаптации данной схемы памяти к работе с однофотонными световыми полями. Волноводы, изготовленные методом фемтосекундной лазерной печати, важны для миниатюризации и масштабирования устройства квантового повторителя. Адресная запись и считывание фотонных кубитов позволяет увеличить информационную емкость памяти и сделать её многокубитовой, что является одним из условий, необходимых для создания работающего прототипа квантового повторителя.

Методология и методы исследования:

Во всех экспериментальных схемах источниками излучения являлись узкополосные лазеры. Исследуемые образцы находились в криостате замкнутого цикла при температурах от 1.3 до 4 К. Результаты этой диссертационной работы были получены с использованием следующих методов:

- 1) Метод магнитооптической спектроскопии высокого разрешения для получения спектров поглощения исследуемых ионов в неорганических кристаллах.
- 2) Метод когерентной лазерной спектроскопии был использован для определения времени продольной релаксации и времени когерентности оптических переходов, а именно наблюдение сигналов первичного и стимулированного фотонного эха и выжигание спектральных провалов.
- 3) Метод лазерной спектроскопии накачка-зондирование. Данный метод был использован для определения времени жизни сверхтонких подуровней основного состояния $^4I_{15/2}(\Gamma_{56})$ ионов $^{167}\text{Er}^{3+}$ в кристалле $^7\text{LiYF}_4$.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Главным фактором, уменьшающим эффективность памяти в реализованной схеме восстановления сигнала подавленного эха, является конечное время когерентности оптического перехода.
- 2) Обнаруженный эффект Штарка в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$ позволяет реализовать адресную запись и считывание оптических импульсов.
- 3) Время когерентности на оптическом переходе $^4I_{15/2}(\Gamma_{56}) \rightarrow ^4I_{9/2}(\Gamma_{78})$ в кристалле $^7\text{LiYF}_4: ^{167}\text{Er}^{3+}$ может превосходить 1 мкс в отсутствие внешнего магнитного поля при температуре 4 К.
- 4) Создание волноводных структур методом фемтосекундной лазерной печати в кристалле $^{167}\text{Er}^{3+}: ^7\text{LiYF}_4$ приводит к уменьшению времени когерентности оптического перехода $^4I_{15/2}(\Gamma_{56}) \rightarrow ^4I_{9/2}(\Gamma_{78})$ не более чем в два раза.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается воспроизводимостью и непротиворечивостью полученных результатов, использованием современного сертифицированного экспериментального оборудования, комплексным сочетанием разнообразных экспериментальных методов исследования, согласием полученных экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

Апробация работы проводилась на четырнадцати международных конференциях: Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы» (Казань, Россия, 2015-2019); 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); XI Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии: ФЭКС-2017 (Светлогорск, Россия, 2017);

Семинар-совещание «Состояние и перспективы развития квантовых технологий на предприятиях оборонно-промышленного комплекса» (Казань, Россия, 2017); IV Russian-German-French Laser Symposium (Kazan, Russia, 2018); Первая Российская школа по квантовым технологиям (Сочи, Россия, 2018); XIII International conference on hole burning, single molecule and related spectroscopies: science and applications: HBSM-2018 (Suzdal, Russia, 2018); Вторая Российская школа по квантовым технологиям (Сочи, Россия, 2019).

Личный вклад автора:

Содержание научной работы и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. При непосредственном участии автора была собрана и автоматизирована установка по стационарной и когерентной оптической спектроскопии. Все приведенные экспериментальные результаты были получены и обработаны лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал активное участие в обсуждении результатов исследования и в формулировке выводов, готовил их к публикации и представлению на научных конференциях и школах.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 работ, из них 7 статей в журналах, входящих в список, утвержденный Высшей аттестационной комиссией, 8 – тезисы докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка публикаций автора и списка литературы из 194 наименований. Работа изложена на 132 страницах, содержит 35 рисунков и 8 таблиц.

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 КП в квантовых коммуникациях на дальние расстояния и проблемы реализации требуемого квантового повторителя для такого вида связи. Приводится описание основных критериев, разных схем КП, а также экспериментальных реализаций этих схем в твердотельных системах. В данной главе особое внимание уделено КП в кристаллах, активированных редкоземельными ионами, в схеме восстановления сигнала подавленного эха, схеме квантовой памяти на подходе нерезонансного рамановского эха и

использованию оптических резонаторов с согласованной связью в протоколах КП.

Во второй главе рассмотрены свойства редкоземельных ионов в кристаллах, а именно уровни энергии и Гамильтониан взаимодействия редкоземельного иона с кристаллическим окружением, механизмы уширения спектральных линий. Также приводится обзор научной литературы о ранее исследованных спектроскопических свойствах кристаллов $\text{Er}^{3+}:\text{LiYF}_4$ и $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$.

В третьей главе представлены результаты экспериментальной реализации протокола КП в схеме восстановления сигнала подавленного эха в согласованном оптическом резонаторе в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$. В §3.1 приведены результаты экспериментов по оптической памяти для слабых световых импульсов в схеме восстановления сигнала подавленного эха в оптическом резонаторе в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$ на оптическом переходе ${}^3\text{H}_6(0) - {}^3\text{H}_4(0)$. На Рис. 1 представлен результат восстановления сигнала подавленного эха в оптическом резонаторе с согласованной связью. Эффективность восстановления сигнала подавленного эха составила $\sim 21\%$ для времени хранения 36 мкс. Важно отметить, что использование оптического резонатора позволило в несколько раз увеличить поглощение входного сигнала в кристалле. Так в случае однопроходной схемы памяти без использования резонатора на той же частоте кристаллом поглощается лишь 12.5% от интенсивности входного импульса (синяя штрихпунктирная кривая на Рис. 1). При этом источниками уменьшения итоговой эффективности восстановления сигнала подавленного эха являются неполное согласование связи (порядка 8%) и паразитные потери внутри резонатора (отражения от граней кристалла и окна криостата). Это приводило к тому, что только 60% интенсивности входного сигнала поглощалось ансамблем ионов тулия. Однако главным источником уменьшения квантовой эффективности в данном эксперименте были эффекты декогеренции на оптическом переходе ионов тулия. В этом эксперименте время фазовой памяти составило $T_M = 50$ мкс ($x=1.6$), которое было определено по спаду сигнала двухимпульсного фотонного эха. В итоге конечное время фазовой памяти приводит к падению квантовой эффективности со 100% до 40%, пропорционально $e^{-2(\frac{2\tau}{T_M})^x}$, где 2τ – полное время хранения сигнала в ячейке памяти.

В §3.2 приведены результаты по реализации протокола КП в схеме восстановления сигнала подавленного эха в согласованном оптическом резонаторе для сохранения входного сигнала, который содержал в среднем ~ 8 фотонов. В этом случае сигнал эха содержал в себе в среднем один фотон при уровне сигнал-шум 1. Стоит отметить, что в данном эксперименте удалось улучшить результаты, полученные ранее французской группой в работе [9], а именно удалось в два раза уменьшить число фотонов во входном импульсе для единичного уровня сигнал-шум в момент считывания.

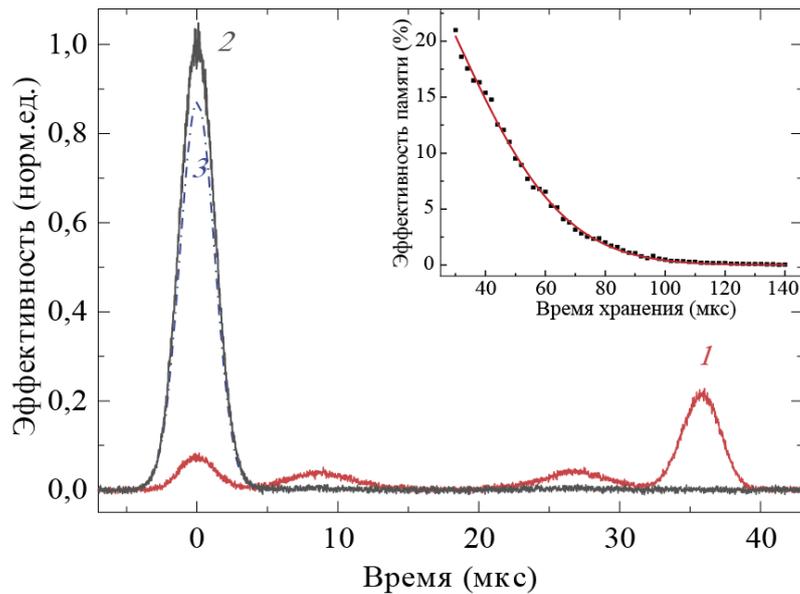


Рис. 1. Оптическая память в схеме восстановления подавленного эхо-сигнала в согласованном оптическом резонаторе в кристалле $Tm^{3+}:YAG$ ($c=0.1$ ат.%), $T=3.8$ К. Эффективность восстановления сигнала подавленного эха (1, красная кривая) составила 21% для времени хранения 36мкс; при $t = 0$ показан входной импульс (2, серая сплошная кривая) и его непоглощенная часть (красная сплошная кривая). Синяя штрихпунктирная кривая (3) демонстрирует непоглощенную часть входного импульса, в случае использования однопроходной схемы без оптического резонатора. Вставка: эффективность памяти в зависимости от времени хранения.

В §3.3 представлены результаты первого наблюдения линейного Штарк-эффекта в кристалле $Tm^{3+}:YAG$ на оптическом переходе $^3H_6(0) - ^3H_4(0)$ при температуре 4 К. Стоит отметить, что ионы тулия в кристалле $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) замещают ионы иттрия в позициях, обладающих локальной симметрией D_2 , в которой линейный Штарк-эффект не должен наблюдаться. Данный эффект был исследован двумя способами: а) методом двухимпульсного фотонного эха б) методом выжигания спектральных провалов. В первом случае импульс внешнего электрического поля прикладывался между входным и рефразирующим оптическим импульсом. На Рис. 2а приведена интенсивность сигнала первичного эха в зависимости от площади импульса внешнего электрического поля. Черными, красными и синими точками изображены три серии экспериментов, где варьировалась длительность импульса электрического поля. Как можно видеть, ни при каких, даже больших значениях площади импульса электрического поля не происходит восстановления эхо-сигнала, который наблюдается при линейном Штарк-эффекте [10].

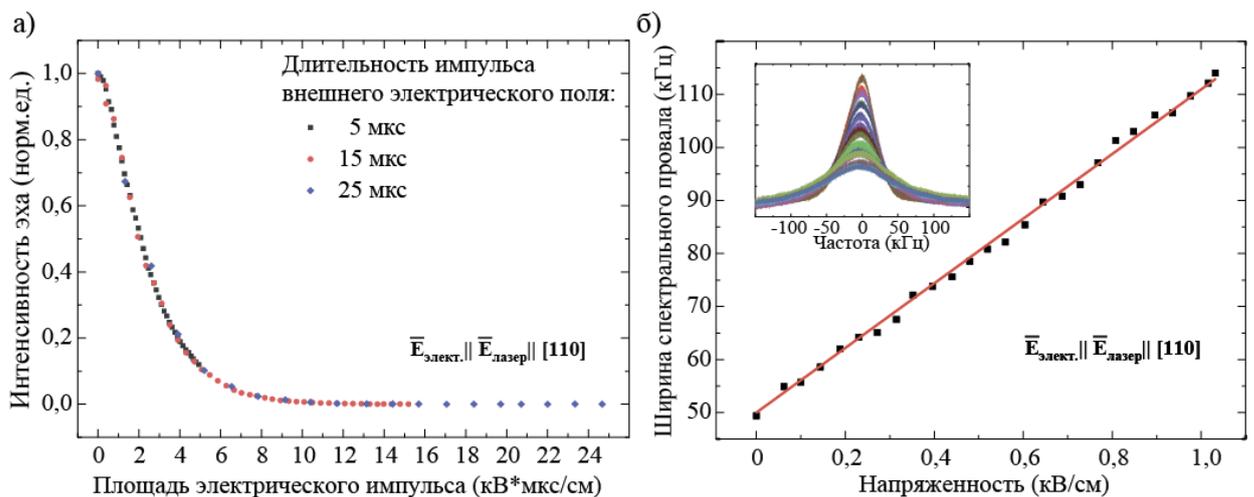


Рис. 2. Исследование Штарк-эффекта в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$ на оптическом переходе ${}^3\text{H}_6(0) - {}^3\text{H}_4(0)$. а) Зависимость интенсивности сигнала первичного фотонного эха от площади импульса внешнего электрического поля. б) Ширина спектрального провала в зависимости от значения напряженности внешнего электрического поля. В обоих случаях кристалл находился в криостате при температуре $T=4$ К, $\vec{E}_L \parallel \vec{E}_0 \parallel [110]$, где \vec{E}_L – поляризация лазерного излучения, \vec{E}_0 – направление внешнего электрического поля.

Во втором случае импульс внешнего электрического поля применялся во время зондирования спектрального провала. При этом расщепления линии спектрального провала не наблюдалось, было обнаружено только линейное уширение линии спектрального провала с увеличением напряженности внешнего электрического поля. Эта зависимость показана на Рис. 2б. Красная линия на Рис. 2б соответствует линейной аппроксимации функцией $y=49.4+61.6 \cdot E_{\text{электр.}}$.

В §3.4 представлены результаты по адресной записи и считыванию входных оптических импульсов в схеме восстановления сигнала подавленного эха в согласованном оптическом резонаторе, при помощи обнаруженного ранее линейного эффекта Штарка в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$ (см. Рис. 3).

Использование внешнего контролирующего электрического поля позволило контролировать запирающие или считывающие входного сигнала с высокой эффективностью, то есть применение внешнего электрического поля слабо влияло на итоговую эффективность памяти. Для успешного считывания входных слабых световых полей необходимо применить электрический импульс после первого или второго π -импульса такой площади, чтобы он смог скомпенсировать набег фаз, который произошел при записи слабых световых полей. Важно отметить, что реализованный

довольно эффективный способ адресации позволит заметно увеличить информационную емкость КП и может быть использован наряду с другими (оптическими) способами адресации.

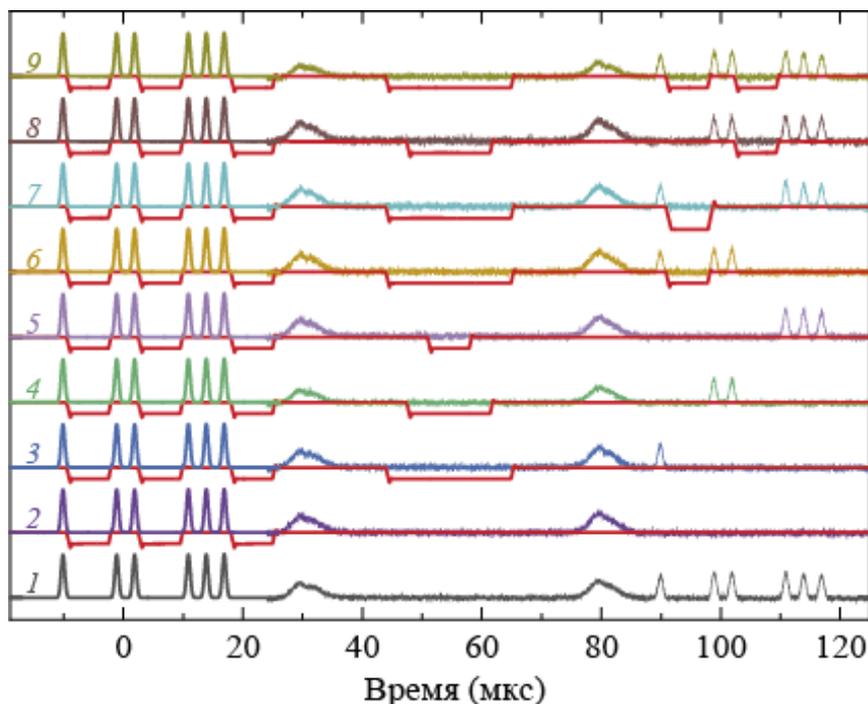


Рис. 3. Адресное считывание сигналов подавленного эха при помощи импульсов внешнего электрического поля в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$ в оптическом резонаторе. Во всех случаях на вход подаются три группы световых импульсов. Нижняя кривая демонстрирует восстановление всех входных световых импульсов в отсутствие электрических импульсов. Остальные кривые соответствуют подавлению всех, считыванию отдельных и восстановлению всех записанных световых импульсов. Красными кривыми показаны импульсы внешнего электрического поля для каждой серии.

В четвертой главе приводятся результаты спектроскопического исследования возможности применения кристалла $\text{Er}^{3+}:\text{LiYF}_4$ в квантовой памяти в схеме нерезонансного рамановского эха. Стоит отметить, что все кристаллы, исследованные в этой главе, были выращены Кораблевой С.Л. и сотрудниками в Казанском федеральном университете. В §4.1 приводятся результаты по оптической спектроскопии кристалла ${}^7\text{LiYF}_4:\text{}^{166}\text{Er}^{3+}$ во внешнем магнитном поле для определения g-факторов, значения которых приведены в Таблице 1. Эта информация необходима для уточнения зеемановского вклада в гамильтониан взаимодействия иона ${}^{167}\text{Er}^{3+}$. Для приведенных мультиплетов ${}^4\text{I}_{13/2}$ и ${}^4\text{I}_{9/2}$ экспериментальные значения g-факторов были получены впервые, а для основного состояния ${}^4\text{I}_{15/2}(\Gamma_{56})$ находятся в хорошем согласии с данными из электронного парамагнитного резонанса [11].

Таблица 1. g-факторы нижних уровней исследуемых трех мультиплетов кристалла ${}^7\text{LiYF}_4: {}^{166}\text{Er}^{3+}$.

Мультиплет	Γ	g_{\perp}	g_{\parallel}
$I_{9/2}$	Γ_{78}	2.94	3.72
${}^4I_{13/2}$	Γ_{56}	5.94	1.30
	Γ_{78}	7.32	1.52
${}^4I_{15/2}$	Γ_{56}	8.10	3.13
	Γ_{56}	8.105 [11]	3.137 [11]

В §4.2 и §4.3 приведены результаты по магнитооптической спектроскопии кристалла ${}^7\text{LiYF}_4: {}^{167}\text{Er}^{3+}$ ($c=0.005$ ат.%). Были получены оптические спектры поглощения для оптических переходов ${}^4I_{15/2}(\Gamma_{56}) \rightarrow {}^4I_{13/2}(\Gamma_{78})$, ${}^4I_{15/2}(\Gamma_{56}) \rightarrow {}^4I_{13/2}(\Gamma_{56})$, ${}^4I_{15/2}(\Gamma_{56}) \rightarrow {}^4I_{9/2}(\Gamma_{78})$. Оптические спектры поглощения ионов ${}^{167}\text{Er}^{3+}$ (ядерный спин $I=7/2$) имеют более богатую структуру по сравнению с четными изотопами из-за сверхтонкого расщепления каждого Крамерсового состояния на 9 подуровней. Были обнаружены оптические линии с очень малым неоднородным уширением, имеющим величины от 35 МГц (на переходе с длиной волны 1.5 мкм) и от 24 МГц (на переходе с длиной волны около 809 нм). На Рис. 4 приведены спектры поглощения для оптического перехода ${}^4I_{15/2}(\Gamma_{56}) \rightarrow {}^4I_{9/2}(\Gamma_{78})$ кристалла ${}^7\text{LiYF}_4: {}^{167}\text{Er}^{3+}$ ($c=0.005$ ат.%). Отметим, что неоднородное уширение линии этого перехода для лучшего образца составило 24 МГц, что очень близко к неоднородной ширине линии (16 МГц), о которой сообщалось в работе [12] для четного (170) изотопа эрбия.

В сотрудничестве с профессором Малкиным Б.З. и доцентом Байбековым Э.И. из Казанского федерального университета был проведен детальный теоретический анализ экспериментальных оптических спектров, который позволил впервые расшифровать оптические линии переходов между основным состоянием мультиплета ${}^4I_{15/2}$ и состояниями возбужденных мультиплетов ${}^4I_{13/2}$ и ${}^4I_{9/2}$. Теоретический анализ полученных оптических спектров позволил нам установить наличие более 30 возможных лямбда-схем на оптическом переходе ${}^4I_{15/2}(\Gamma_{56}) - {}^4I_{9/2}(\Gamma_{78})$ для рамановских переходов в изучаемой системе ионов эрбия с расщеплением между сверхтонкими подуровнями в основном состоянии менее 1 ГГц. Это указывает на возможности для последующих экспериментальных реализаций квантовой памяти на этом кристалле. При этом для нахождения оптимальной лямбда-схемы необходимо проведение дальнейшего детального спектроскопического исследования.

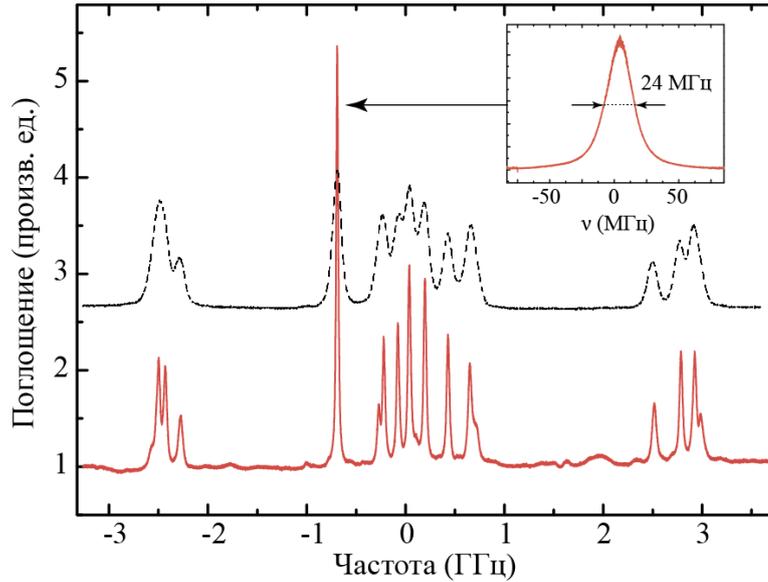


Рис. 4. Спектры кристаллов $^{167}\text{Er}^{3+}:7\text{LiYF}_4$ ($c=0.005$ ат. %) на переходе $^4\text{I}_{15/2}(\Gamma_{56}) - ^4\text{I}_{9/2}(\Gamma_{78})$, $T = 4$ К, $\mathbf{E} \parallel \mathbf{c} \perp \mathbf{k}$, где \mathbf{E} и \mathbf{k} – вектор электрического поля и волновой вектор, \mathbf{c} – ось кристалла четвертого порядка. Черная, пунктирная линия – спектр кристалла, использованного в работе [A1]. Красная, сплошная линия – спектр кристалла использованного в работе [A2]. Ноль частоты соответствует 370.574 ТГц. На вставке рисунка отдельно показана наиболее интенсивная линия поглощения, на которой в дальнейшем проводились эксперименты по фотонному эху.

В §4.4 приведены результаты экспериментов по исследованию оптического перехода $^4\text{I}_{15/2}(\Gamma_{56}) \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}(\Gamma_{78})$ с помощью фотонного эха в отсутствие внешнего магнитного поля и при температуре $T=4$ К. На Рис. 5а представлена экспериментальная зависимость интенсивности сигнала первичного эха в зависимости от времени задержки между двумя возбуждающими импульсами. Результат аппроксимации данных (красная сплошная линия) соответствует времени когерентности перехода $T_2 = 1.80 \pm 0.07$ мкс. При этом была обнаружена модуляция в спаде сигнала фотонного эха, обусловленная суперсверхтонким взаимодействием ионов $^{167}\text{Er}^{3+}$ с ближайшими ионами-лигандами $^{19}\text{F}^-$.

Для определения времени продольной релаксации (T_1) этого перехода была использована последовательность стимулированного фотонного эха. На Рис. 5б приведена экспериментальная зависимость интенсивности сигнала стимулированного эха от времени задержки между вторым и третьим импульсами. Красной сплошной линией на Рис. 5б представлен результат аппроксимации функцией $I(\tau_{23}) = I_0 \left(A_1 e^{-\frac{2\tau_{23}}{T_{11}}} + A_2 e^{-\frac{2\tau_{23}}{T_{12}}} \right)$ с параметрами

$\tilde{T}_{11} \cong 1.1 \pm 0.25$ мкс, $\tilde{T}_{12} \cong 7.5 \pm 0.9$ мкс, $A_1 = 0.75$, $A_2 = 0.25$. В этом случае параметр \tilde{T}_{12} соответствует времени продольной релаксации перехода, и он находится в хорошем согласии со значением определенном в работе [13].

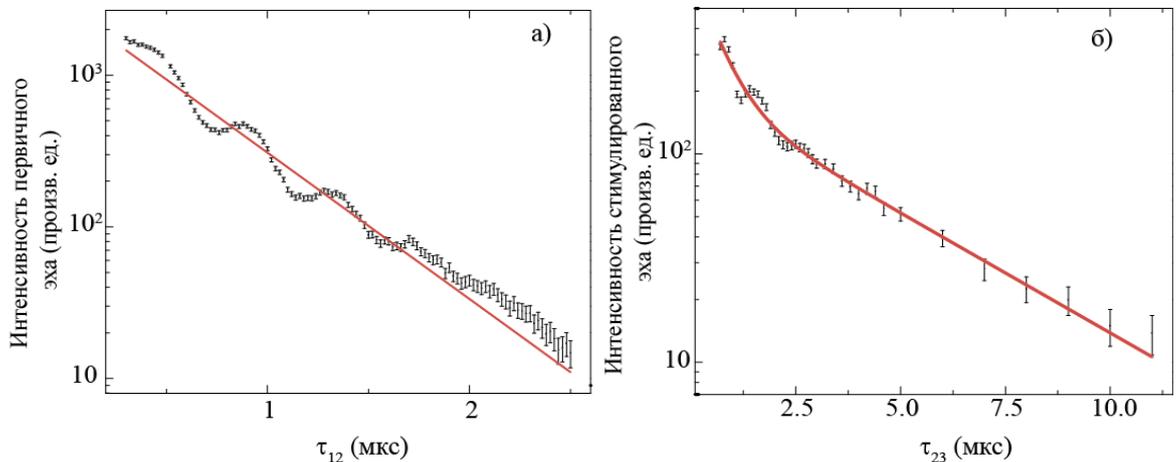


Рис. 5. Зависимость интенсивности сигнала первичного (а) и стимулированного (б) эха в кристалле $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{LiYF}_4$ от времени задержки между импульсами в нулевом магнитном поле, при температуре 4 К на самой интенсивной линии перехода $^4\text{I}_{15/2}(\Gamma_{56}) - ^4\text{I}_{9/2}(\Gamma_{78})$, $\mathbf{E} \parallel \mathbf{c} \perp \mathbf{k}$.

Для реализации высокоэффективной нерезонансной рамановской схемы необходимо выполнение нескольких условий для рабочей λ -схемы (или трехуровневой схемы): 1) Наличие узкого неоднородного уширения оптического перехода; 2) возможность начальной инициализации одного из состояний $|1\rangle$ или $|2\rangle$; 3) время когерентности на переходе $|1\rangle - |2\rangle$ должно быть больше 10 мс, для дальнейшего применения КП в протоколе квантового повторителя. В предыдущих параграфах было показано, что в кристалле $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{LiYF}_4$ неоднородная ширина линии может иметь значения вплоть до 24 МГц, и были найдены более 30 перспективных трехуровневых схем. В §4.5 изложены результаты по определению времени жизни сверхтонких подуровней в основном состоянии при температурах 1.2-4 К, что необходимо для начальной инициализации системы в схеме нерезонансной рамановской КП. Для этого прикладывалось импульсное контролирующее поле на частоте одного сверхтонкого перехода, которое изменяло населенность одного из состояний, а сигнальное поле отстраивалось на частоту другого перехода, и, тем самым, контролировалась населенность другого сверхтонкого подуровня основного состояния. При этом оказалось, что времена жизни сверхтонких переходов меньше оптических (< 10 мс). Благодаря этим экспериментам впервые были определены экспериментальные значения времен продольной

(энергетической) релаксации для нескольких сверхтонких подуровней основного состояния, которые лежат в диапазоне от 0.5 до 3 мс.

Найденные времена указывают на возможность создания значительной неравновесной разности населенностей между сверхтонкими подуровнями основного крамерсова дублета. В то же время проведенные исследования указывают на необходимость дальнейшего изучения этих переходов. Для этого требуется определить времена когерентности переходов между сверхтонкими состояниями, исследовать эти переходы в больших магнитных полях для замораживания динамики ближайших ионов фтора. Полученные экспериментальные данные имеют самостоятельное важное значение, поскольку благодаря узким линиям поглощения $^{167}\text{Er}^{3+}$ в $^7\text{LiYF}_4$, исследованный кристалл может быть использован для изучения изменения основных характеристик (время когерентности и величина неоднородного уширения оптического перехода) при создании искусственных волноводных структур внутри кристалла.

С каждым годом возрастает актуальность создания микро- и наноразмерных схем квантовой памяти в связи с необходимостью её интеграции в существующие квантовые коммуникации. Для этого в данной работе нами были исследованы параметры оптических спектров ионов $^{167}\text{Er}^{3+}$ в волноводных структурах в кристалле $^7\text{LiYF}_4$ (см. Рис. 6а), которые были изготовлены методом фемтосекундной лазерной печати (ФЛП). Результаты данных исследований представлены в §4.6. Наблюдаемые спектры поглощения для немодифицированной части кристалла $^7\text{LiYF}_4: ^{167}\text{Er}^{3+}$ и для ионов в волноводах показаны на Рис. 6б. Ноль на шкале абсцисс соответствует частоте $\nu=370.573$ ТГц. Поляризация света была параллельна оси c кристалла (ось симметрии 4-го порядка). Линии поглощения ионов внутри волновода уширяются за счет дополнительных пространственных неоднородностей из-за локальных напряжений, вызванных процессом создания волновода. Например, неоднородная ширина самой узкой и интенсивной линии поглощения для немодифицированной части кристалла составляла 24 МГц, в то время как неоднородное уширение для этой же линии в волноводе диаметром 30 мкм составило 200 МГц. Оптическая плотность линий поглощения падает вследствие уширения линий. Интересным фактом является смещение всего спектра по сравнению со спектром в немодифицированном кристалле. Так, спектр поглощения, наблюдаемый для волноводов с диаметром 100 и 75 мкм, сдвигается в область низких частот, в то время как спектр для волновода диаметром 30 мкм – в более высокие частоты. Для волновода диаметром 50 мкм сдвига спектра поглощения не наблюдается.

В другом эксперименте мы исследовали первичное фотонное эхо в изготовленных волноводах, которое мы ранее наблюдали в немодифицированном кристалле. Все сигналы фотонного эха

детектировались для линии поглощения расположенной вблизи нуля на частотной шкале на Рис. 6б. Было определено время когерентности оптического перехода ионов $^{167}\text{Er}^{3+}$ в кристалле $^7\text{LiYF}_4$, которое изменялось в диапазоне от 300 нс (для волновода диаметром 30 мкм) до 580 нс (для немодифицированного кристалла).

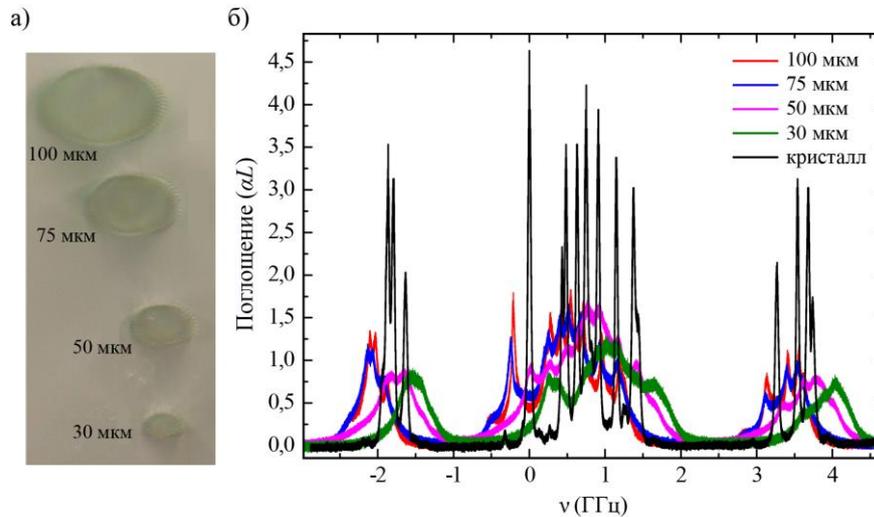


Рис. 6. а) Изображение торца кристалла $^{167}\text{Er}^{3+}:^7\text{LiYF}_4$ ($c=0.005$ ат. %) с изготовленными волноводами разных диаметров методом ФЛП. б) Спектры поглощения ионов $^{167}\text{Er}^{3+}$ в немодифицированном кристалле и в волноводах с разными диаметрами, изготовленные методом ФЛП в кристалле $^7\text{LiYF}_4$ на переходе $^4I_{15/2}(\Gamma_{56}) - ^4I_{9/2}(\Gamma_{78})$, $T = 4$ К, $\mathbf{E} \parallel \mathbf{c} \perp \mathbf{k}$, где \mathbf{E} и \mathbf{k} – вектор электрического поля и волновой вектор, \mathbf{c} – ось кристалла четвертого порядка. Ноль частоты соответствует частоте 370.573 ТГц.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально реализован протокол оптической квантовой памяти в схеме восстановления сигнала подавленного фотонного эха на кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, помещенного в согласованный оптический резонатор. Достигнута эффективность восстановления входного сигнального импульса ~ 21 % с временем хранения 36 мкс. Как показал анализ экспериментальных данных, основными причинами уменьшения квантовой эффективности являлись необратимая дефазировка оптической когерентности и паразитные потери внутри резонатора.
2. Впервые в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ был обнаружен линейный эффект Штарка, который не должен был наблюдаться из соображений симметрии кристаллической ячейки. Данный эффект был исследован методами двухимпульсного фотонного эха и выжиганием спектральных провалов. Было определено, что имеется распределение коэффициента линейного эффекта Штарка по всему ансамблю ионов тулия. Обнаруженный эффект

позволил реализовать адресную запись и считывание входных световых полей с высокой эффективностью для этой схемы памяти.

3. Были проведены эксперименты по магнитно-оптической спектроскопии кристалла ${}^7\text{LiYF}_4$, активированного двумя изотопами (166 и 167) редкоземельного иона эрбия Er^{3+} . В результате была установлена сверхтонкая структура основного (${}^4\text{I}_{15/2}(\Gamma_{56})$) и возбужденных (${}^4\text{I}_{13/2}(\Gamma_{78})$, ${}^4\text{I}_{13/2}(\Gamma_{56})$, ${}^4\text{I}_{9/2}(\Gamma_{78})$) оптических уровней ${}^{167}\text{Er}^{3+}$ и экспериментально изучена сверхтонкая структура этих уровней в магнитных полях до 0.7 Тл. Теоретический анализ полученных оптических спектров позволил установить наличие более 30 возможных лямбда-схем для рамановских переходов в изучаемой системе ионов эрбия.
4. Впервые удалось определить время когерентности (T_2) оптического перехода ${}^4\text{I}_{15/2}(\Gamma_{56}) - {}^4\text{I}_{9/2}(\Gamma_{78})$ в кристалле ${}^{167}\text{Er}^{3+}:{}^7\text{LiYF}_4$ в отсутствие внешнего магнитного поля и при температуре 4К. Также были исследованы изменения параметров этого оптического перехода в волноводных структурах, изготовленных методом фемтосекундной лазерной печати в кристалле ${}^{167}\text{Er}^{3+}:{}^7\text{LiYF}_4$. Проведенная стационарная оптическая спектроскопия показала относительно небольшое дополнительное уширение (менее 200 МГц) линий поглощения с уменьшением диаметра волновода. При этом время когерентности оптического перехода указывало на малую чувствительность к диаметру волновода.
5. Были измерены времена продольной релаксации нескольких сверхтонких подуровней основного состояния ${}^4\text{I}_{15/2}(\Gamma_{56})$ ионов ${}^{167}\text{Er}^{3+}$ в кристалле ${}^7\text{LiYF}_4$. Найденные времена лежат в диапазоне от 0.5 до 3 мс и указывают на возможность создания разности населенностей между сверхтонкими подуровнями основного крамерсового дублета. Однако использование этих уровней в реализации протокола КП на нерезонансном рамановском эхе с высокой эффективностью является затруднительным. Проведенные исследования указывают на необходимость дальнейшего изучения этих переходов в больших магнитных полях для замораживания динамики ближайших ионов фтора.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах:

A1. High-resolution magneto-optical spectroscopy of ${}^7\text{LiYF}_4: {}^{167}\text{Er}^{3+}, {}^{166}\text{Er}^{3+}$ and analysis of hyperfine structure of ultranarrow optical transitions / K.I. Gerasimov, **M.M. Minnegaliev**, B.Z. Malkin et al. // Physical Review B. – 2016. – Vol. 94. – № 5. – P. 054429(1-8).

A2. Photon echo of an ultranarrow optical transition of $^{167}\text{Er}^{3+}$ in $^7\text{LiYF}_4$ crystals / **M.M. Minnegaliev**, E.I. Baibekov, K.I. Gerasimov et al. // Quantum Electronics. – 2017. – Vol. 47. – № 9. – P. 778-782.

A3. DC Stark addressing for quantum memory in Tm:YAG / K. Gerasimov, **M. Minnegaliev**, R. Urmancheev et al. // EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol. 161. – P. 01012(1-2).

A4. Realization of the revival of silenced echo (ROSE) quantum memory scheme in orthogonal geometry / **M.M. Minnegaliev**, K.I. Gerasimov, R. V. Urmancheev et al. // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 1936. – P. 020012(1-4).

A5. 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. – Vol. 190. – P. 03007(1-2).

A6. Observation and investigation of narrow optical transitions of $^{167}\text{Er}^{3+}$ ions in femtosecond laser printed waveguides in $^7\text{LiYF}_4$ crystal / **M.M. Minnegaliev**, I. V. Dyakonov, K.I. Gerasimov et al. // Laser Physics Letters. – 2018. – Vol. 15. – № 4. – P. 045207(1-6).

A7. Quantum memory in the revival of silenced echo scheme in an optical resonator / **M.M. Minnegaliev**, K.I. Gerasimov, R. V. Urmancheev et al. // Quantum Electronics. – 2018. – Vol. 48. – № 10. – P. 894-897.

Тезисы и материалы конференций:

A8. Exploiting of Stark effect in Tm:YAG crystal for addressable optical quantum memory / K. Gerasimov, **M. Minnegaliev**, R. Urmancheev et al. // XIII International Conference on Hole Burning, Single Molecule, and Related Spectroscopies: Science and Applications. Book of abstracts. August 6-12, 2018. Suzdal – Moscow, Russia. – Moscow: Trovant, 2018. – P.160-161.

A9. Миннегалиев, М.М. Оптическая адресная квантовая память в схеме восстановления сигнала подавленного эха в оптическом резонаторе / **М.М. Миннегалиев**, К.И. Герасимов, 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. 456-459.

A10. Minnegaliev, M.M. Addressable optical quantum memory in $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ crystal / **M.M. Minnegaliev**, K.I. Gerasimov, R.V. Urmancheev, S.A. Moiseev // 4th Russian-German-French Laser symposium (23-27 April 2018, Kazan) :Program & abstracts – Казань: изд-во КФТИ ОСП ФИЦ КазНЦ РАН, 2018. – P.38.

A11. **Миннегалиев, М.М.** Экспериментальная реализация оптической адресной квантовой памяти / М.М. Миннегалиев, К.И. Герасимов, Р.В. Урманчеев, 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.258-260.

A12. Исследование спектрально-кинетических параметров переходов ионов $^{167}\text{Er}^{3+}$ в кристалле $^7\text{LiYF}_4$ для приготовления начального квантового состояния / **М.М. Миннегалиев**, К.И. Герасимов, С.А. Моисеев, М.А. Смирнов, Р.В. Урманчеев // 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.502-507.

A13. Долговременная стабилизация частоты лазера / М.А. Смирнов, **М.М. Миннегалиев**, Р.В. Урманчеев, К.И. Герасимов, С.А. Моисеев // Международная научно-техническая конференция «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2017»: Материалы конференции под редакцией О.Г. Морозова. – Казань: изд-во КНИТУ-КАИ, Казань, 2017. – С.539-545.

A14. Gerasimov, K.I. Spectroscopic, kinetic investigations and preparation of pure quantum state of $^{167}\text{Er}^{3+}$ impurity ions in crystals $^7\text{LiYF}_4$ for implementing quantum memory protocol / K.I. Gerasimov, S.A. Moiseev, **М.М. Minnegaliev**, R.V. Urmancheev // Микро- и наноэлектроника – 2016: Труды международной конференции (3–7 октября, 2016, г. Звенигород, Россия): Сборник тезисов – М.: МАКС Пресс, 2016. – С.72.

A15. Магнито-оптическая спектроскопия и кинетика оптических переходов ионов $^{166}\text{Er}^{3+}$ и $^{167}\text{Er}^{3+}$ в кристалле $^7\text{LiYF}_4$ и перспективы использования в квантовой памяти / **М.М. Миннегалиев**, Э.И. Байбеков, К.И. Герасимов, Б.З. Малкин, С.А. Моисеев, Р.В. Урманчеев // XI Международная научная школа-семинара «Фундаментальные исследования и инновации: нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия» (5-9 июля 2016, Йошкар-Ола, Россия): Материалы одиннадцатой международной научной школы – Йошкар-Ола: изд-во ПГТУ, Йошкар-Ола, 2016. – С.66-69.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Chanelière, T. Quantum Optical Memory Protocols in Atomic Ensembles / T. Chanelière, G. Hétet, N. Sangouard // Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2018. – Vol. 67. – P. 77-150.
2. Photon-echo quantum memory in solid state systems / W. Tittel, M. Afzelius, T. Chanelière et al. // Laser & Photonics Reviews. – 2009. – Vol. 4. – № 2. – P. 244-267.
3. Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics / N. Sangouard, C. Simon, H. de Riedmatten et al. // Reviews of Modern Physics. – 2011. –

Vol. 83. – № 1. – P. 33-80.

4. Quantum memories: emerging applications and recent advances / K. Heshami, D.G. England, P.C. Humphreys et al. – 2016. – Vol. 63. – № 20. – P. 2005-2028.
5. Macfarlane, R.M. High-resolution laser spectroscopy of rare-earth doped insulators: a personal perspective / R.M. Macfarlane // *Journal of Luminescence*. – 2002. – Vol. 100. – № 1-4. – P. 1-20.
6. Optically addressable nuclear spins in a solid with a six-hour coherence time / M. Zhong, M.P. Hedges, R.L. Ahlefeldt et al. // *Nature*. – 2015. – Vol. 517. – № 7533. – P. 177-180.
7. Moiseev, S.A. Efficient multimode quantum memory based on photon echo in an optimal QED cavity / S.A. Moiseev, S.N. Andrianov, F.F. Gubaidullin // *Physical Review A*. – 2010. – Vol. 82. – № 2. – P. 022311.
8. Afzelius, M. Impedance-matched cavity quantum memory / M. Afzelius, C. Simon // *Physical Review A*. – 2010. – Vol. 82. – № 2. – P. 022310.
9. Photon echo with a few photons in two-level atoms / M. Bonarota, J. Dajczgeward, A. Louchet-Chauvet et al. // *Laser Physics*. – 2014. – Vol. 24. – № 9. – P. 094003.
10. Macfarlane, R.M. Optical Stark spectroscopy of solids / R.M. Macfarlane // *Journal of Luminescence*. – 2007. – Vol. 125. – № 1-2. – P. 156-174.
11. Sattler, J.P. Electron-Paramagnetic-Resonance Spectra of Nd³⁺, Dy³⁺, Er³⁺ and Yb³⁺ in Lithium Yttrium Fluoride / J.P. Sattler, J. Nemanich // *Physical Review B*. – 1971. – Vol. 4. – № 1. – P. 1-5.
12. Thiel, C.W. Rare-earth-doped materials for applications in quantum information storage and signal processing / C.W. Thiel, T. Bottger, R.L. Cone // *Journal of Luminescence*. – 2011. – Vol. 131. – № 3. – P. 353-361.
13. Radiative Transition Probabilities of Trivalent Rare-Earth Ions in LiYF₄ / C. Li, Y. Guyot, C. Linares et al. // *Advanced Solid State Lasers*. – Washington, D.C.: OSA, 1993. – P. NL7.