

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

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД  
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Наблюдение оптических когерентных эффектов в ансамблях ионов Nd<sup>3+</sup>  
в кристалле YLF и NV<sup>-</sup>-центров в алмазе»**

**Аспирант:** Низов Николай Алексеевич

---

*(подпись аспиранта)*

**Научный руководитель:**

Ахмеджанов Ринат Абдулхаевич, д.ф.-м.н.,  
заведующий лабораторией ИПФ РАН

---

*(подпись научного руководителя)*

**Направление подготовки:**

03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность (профиль) подготовки:**

01.04.21 Лазерная физика

**Форма обучения:** очная

Нижний Новгород

2019

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

В настоящее время происходит бурный рост в области квантовой обработки информации, а именно в таких разделах как квантовые коммуникации (квантовая криптография), квантовые вычисления, квантовая метрология [1]. На данный момент наиболее разработанной областью, наиболее приближенной к реальному практическому использованию, является сфера квантовых коммуникаций. Квантовые коммуникации позволяют организовать достоверно секретную передачу данных посредством использования квантовых состояний света. Для реализации квантовых коммуникаций на большие расстояния при использовании оптоволоконных сетей необходимо создание квантовой памяти [2], т. е. актуальной задачей является поиск сред позволяющих неразрушающе (когерентно) записывать квантовые состояния света в состояние среды и в дальнейшем произвести считывание. Исследование оптических когерентных свойств сред также интересно для приложений в области квантовых вычислений; манипулирование квантовыми состояниями при помощи света является одним из перспективных методов, наряду со сверхпроводящими кубитами [1]. Базовым критерием, определяющим пригодность среды для использования в области квантовой обработки информации, является способность проявлять квантово-интерференционные свойства. На данный момент известно множество когерентных оптических эффектов: осцилляции Раби, самоиндуцированная прозрачность [3], эффект Ханле [4], квантовые биения, фотонное эхо (по сути являющийся одной из реализаций квантовой памяти) [5], нерезонансное рамановское взаимодействие. Другими примерами являются родственные эффекты когерентного пленения населённости (КПН) [6] и электромагнитно индуцированной прозрачности (ЭИП), которые позволяют убедиться в наличии и охарактеризовать  $\Lambda$ -схему уровней, необходимую для большинства квантово-оптических приложений.

Наряду с поиском подходящих сред, обладающих хорошими когерентными характеристиками, актуальной задачей является поиск условий, позволяющих улучшить эти характеристики и тем самым повысить их привлекательность для области квантовой обработки информации.

Остановимся более подробно на описании эффектов фотонного эха, электромагнитно индуцированной прозрачности и когерентного пленения населённости, экспериментальному наблюдению которых посвящена эта работа.

Классический эффект фотонного эха, по аналогии со спиновым эхом открытым Ханом, основанный на обращении дефазировки ансамблей атомов при помощи  $\pi$ - и  $\pi/2$ -импульсов, плохо подходит для сохранения именно квантовых однофотонных состояний, что обусловлено наличием шума из-за спонтанного излучения вызванного наличием большой населённости верхнего уровня [5]. Поэтому используются модификации фотонного эха – эхо на атомной частотной гребёнке (AFC, Atomic Frequency Comb), эхо при помощи техники управляемого обращения неоднородного уширения (CRIB, Controlled Reversible Inhomogeneous Broadening) и градиентное эхо (GEM, Gradient Echo Memory).

В этих протоколах квантовой памяти для обращения дефазировки используется специальная подготовка или управление спектральным профилем поглощения атомов. Например, в протоколе AFC приготавливается профиль поглощения, состоящий из периодической решётки пиков, и эхо сигнал возникает из-за восстановления фазировки отдельных пиков (набег фазы кратен  $2\pi$ ) через время  $2\pi/\Delta$ , где  $\Delta$  – период решётки. В протоколах CRIB и GEM при помощи неоднородного внешнего электрического поля создаётся неоднородно уширенный профиль поглощения, после обращения знака поля происходит компенсация набег фазы. Эхо на атомной частотной гребёнке имеет преимущества с точки зрения реализации квантовой памяти для квантовых коммуникаций из-за лучшей масштабируемости для организации мультиплексирования (подробнее см. раздел 1.1 диссертации).

Для того, чтобы достичь больших значений эффективности памяти, необходимых для многих практических приложений, можно использовать среды, обладающие большой оптической толщиной [7–9], или воспользоваться усилением взаимодействия при помещении образца в резонатор [10; 11]. Второй подход более предпочтительный, т. к. например высокая эффективность может быть получена в слабопоглощающих образцах, обладающих лучшими когерентными характеристиками; также при этом подходе снимается ограничение на максимальное значение эффективности памяти без использования техники считывания в обратном направлении (см. раздел 1.1 диссертации).

В случае использования резонатора, полоса пропускания памяти ограничивается шириной пика пропускания резонатора. Поэтому, для достижения большой полосы пропускания квантовой памяти, необходимо использовать малодобротные резонаторы, или обладающие малой длиной обхода (ширина пика пропускания тем больше, чем меньше длина резонатора при том же значении резкости). Такие резонаторы предпочтительны для сочетания малой оптической толщины и малых линейных размеров, что уменьшает паразитные потери и увеличивает общую эффективность. Поэтому, реализация квантовой памяти с использованием резонатора является актуальной задачей.

В отличие от фотонного эха, наблюдаемого при резонансном взаимодействии света с двухуровневой системой, квантово-интерференционные эффекты КПН и ЭИП в общем случае (также возможно использование вырожденных систем) требуют приложения двух оптических полей, удовлетворяющих условию двухфотонного резонанса, и соответственно, наличия  $\Lambda$ -схемы уровней. Перечисленные эффекты имеют широкое применение в спектроскопии высокого разрешения (ширина резонансов КПН и ЭИП меньше «естественной» ширины, т. к. их ширина в случае малых интенсивностей определяется временем жизни когерентности между нижними уровнями, которое может сильно превышать времена жизни верхнего уровня).

Электромагнитно индуцированная прозрачность (ЭИП, EIT - Electromagnetically Induced Transparency) — это квантово-интерференционный эффект, наблюдаемый в многоуровневых системах, заключающийся в уменьшении резонансного поглощения и появлении узкого окна прозрачности из-за когерентного взаимодействия с сильным управляющим полем [12; 13]. Образование узкого провала в профиле поглощения вызывает большую дисперсию и усиление нелинейных эффектов, что используется в ряде приложений, таких как

реализация «медленного света» [14; 15], оптическая память [16], высокоточные измерения [17; 18], генерация лазерного излучения без инверсии [19] и т.д. В частности, ЭИП является основой одного из протоколов оптической квантовой памяти (запись в тёмные поляритоны [20]), необходимой для масштабируемых квантовых вычислений и квантовых коммуникаций на дальние расстояния [21—23]. Поэтому важной задачей является исследование ЭИП в перспективных средах для квантовой памяти.

Для реализации протокола квантовой памяти на основе ЭИП требуется как можно меньшая ширина и как можно большая глубина провала. Время жизни когерентности между подуровнями основного состояния можно увеличить (а следовательно уменьшить ширину резонанса ЭИП) путем устранения взаимодействий, разрушающих когерентность. Например, это можно сделать приложением определённого магнитного поля, соответствующего условию зануления первого порядка эффекта Зеемана (ZEFOZ, Zero First-Order Zeeman shift); в этом случае сверхтонкие переходы между подуровнями основного состояния становятся нечувствительными к флуктуациям магнитного поля [24]. ZEFOZ переходы могут обладать намного большими временами спиновой когерентности [25], что очень интересно для приложений квантовой памяти.

Эффект когерентного пленения населённостей состоит в том, что при приложении двух оптических полей примерно одинаковой интенсивности, частоты которых совпадают с частотами переходов  $\Lambda$ -схемы уровней, происходит откачка населённости в тёмное состояние (верхний уровень не возбуждается). Это наблюдается как появление узкого провала в спектральном профиле флуоресценции при сканировании одного из полей по частоте. Как уже говорилось ранее, широкое применение эффекта КПП обусловлено малой шириной резонансов (как и в случае ЭИП), что используется в спектроскопии, разработке стандартов частоты [26], магнитометрии [27].

Понятно, что для прикладного использования квантово-интерференционных свойств требуются среды, обладающие большими временами жизни когерентности. Широко применяются газы щелочных металлов [28], ансамбли ионов в оптических ловушках [29]. Но наиболее привлекательными с точки зрения реализации являются твердотельные системы – ансамбли примесных центров в прозрачных кристаллах; в последнее время также интерес представляют волоконные [30] и фотонно-кристаллические системы.

Например, кристаллы, допированные редкоземельными ионами считаются одной из наиболее перспективных сред [31], благодаря наличию больших времен когерентности как на оптических, так и спиновых переходах, большой оптической плотности, отсутствию атомной диффузии, возможности регулирования резонансных частот и управления атомными взаимодействиями при помощи внешних электрических и магнитных полей. В частности, эффект ЭИП активно изучался в кристаллах, активированных ионами празеодима [32—37], например, наибольшее время памяти на основе ЭИП (1 мин) и наибольшая эффективность (70%) были продемонстрированы в кристалле  $\text{Pr}^{3+} : \text{Y}_2\text{SiO}_5$  [36; 37]. ЭИП также был зарегистрирован на телекоммуникационной длине волны (1.5 мкм) в таком же кристалле, допированном ионами эрбия.

Первые две главы этой работы посвящены наблюдению когерентных эффектов в изотопически чистом кристалле  $^{143}\text{Nd}^{3+} : \text{YLiF}_4$ . Кристаллы, допированные ионами неодима, являются одними из наиболее перспективных материалов для квантовой памяти благодаря относительно большой силе оптических переходов среди редкоземельных элементов. Длина волны соответствующих переходов (860 нм) является удобной для однофотонного детектирования и легко доступной из-за наличия подходящих диодных лазеров. Нечётные изотопы неодима обладают сверхтонкой структурой с полной шириной расщепления порядка нескольких гигагерц, что перспективно для записи широкополосных фотонов. Времена спиновой когерентности достигают 9 мс при криогенных температурах [38]. С другой стороны, продемонстрировано, что ионы эрбия и неодима, допированные в изотопически чистые кристаллы  $\text{YLiF}_4$  (имеющие только атомы изотопа  $^7\text{Li}$ ), обладают узкой шириной оптических переходов (10 МГц) [39; 40]. Наличие таких узких оптических переходов позволяет существенно упростить наблюдение когерентных эффектов, т. к. снимается необходимость процедуры спектральной «чистки» (селекции) [41].

Другой вызывающей широкий интерес средой являются центры окраски в алмазе, что обусловлено уникальными особенностями алмаза, такими как оптическая прозрачность, слабое электрон-фононное взаимодействие, высокая стабильность оптически активных центров, в том числе при комнатной температуре. Одним из перспективных считается NV-центр из-за возможного его применения для наноразмерного зондирования магнитных и электрических полей [42], температуры [43], реализации квантовых вычислений [44], а также стабильных флуоресцентных био-маркеров [45]. Режим электромагнитно индуцированной прозрачности в ансамблях NV-центров в алмазе реализован на сегодняшний день в условиях антипересечения уровней основного состояния при наложении сильного внешнего магнитного поля [46], и при квазиуловых магнитных полях при внутренних или внешних напряжениях, соответствующих антипересечению уровней возбуждённого состояния [47]. Эксперименты в геометрии когерентного пленения населённости проводились, в основном, при малых магнитных полях [48; 49] и преимущественно с одиночными центрами. В третьей главе настоящей работы представлены результаты экспериментального наблюдения эффекта когерентного пленения населённости в ансамбле азот-вакансионных центров в условиях антипересечения уровней основного состояния.

**Целью** данной работы является экспериментальное наблюдение оптических когерентных эффектов в ансамблях ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в кристалле YLF и  $\text{NV}^-$ -центров в алмазе в условиях, позволяющих повысить их привлекательность для применения в области квантовой информатики.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследование возможности увеличения эффективности фотонного эха (протокол AFC квантовой памяти) при использовании резонатора.
2. Изучение зависимости спектрального профиля эффекта электромагнитно индуцированной прозрачности от величины приложенного магнитного поля при приближении к точке ZEFOZ.

3. Реализация режима КПН в ансамблях NV-центров в алмазе в условиях антипересечения уровней основного состояния.

**Научная новизна:**

1. Впервые для увеличения эффективности квантовой памяти использована конфигурация перестраиваемого резонатора внутри криостата.
2. Впервые эффект электромагнитно индуцированной прозрачности наблюдался в изотопически чистом кристалле  $^{143}\text{Nd}^{3+} : \text{YLiF}_4$ . Показано, что при определённом значении и направлении внешнего магнитного поля в рассматриваемом кристалле реализуется режим зануления эффекта Зеемана первого порядка. Впервые в режиме электромагнитно индуцированной прозрачности зарегистрирована структура окна прозрачности, обусловленная суперсверхтонким взаимодействием ионов неодима с окружающими ионами фтора.
3. Выполнено оригинальное исследование режима КПН в ансамблях NV-центров в алмазе в условиях антипересечения уровней основного состояния.

**Практическая значимость** результатов первой главы состоит в демонстрации увеличения эффективности квантовой памяти при помощи резонатора. Применение такого подхода является универсальным, и может использоваться для реализации эффективной квантовой памяти в других слабопоглощающих образцах. Результаты второй главы демонстрируют способность разрешения суперсверхтонкого расщепления уровней основного состояния в кристалле  $^{143}\text{Nd}^{3+} : \text{YLiF}_4$  в условиях ZEFOZ, что делает этот кристалл в перспективе интересным для реализации квантовой памяти на основе нерезонансного рамановского взаимодействия при использовании суперсверхтонких подуровней без необходимости процедуры спектральной селекции. Наличие суперсверхтонкой структуры указывает на возможность оптического управления спиновыми состояниями соседних атомов фтора, что перспективно для реализации долговременной квантовой памяти. Полученные результаты третьей главы являются еще одним экспериментальным подтверждением возможности формирования суперпозиционных состояний в ансамблях NV-центров в алмазе и полностью оптического контроля спиновыми состояниями без использования микроволнового излучения.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Использование малодобротного резонатора, удовлетворяющего условию согласования импедансов, позволяет увеличить эффективность квантовой памяти на основе протокола атомной частотной гребёнки в кристалле  $^{143}\text{Nd}^{3+} : \text{YLiF}_4$  более чем на порядок.
2. В кристалле  $^{143}\text{Nd}^{3+} : \text{YLiF}_4$  наблюдается эффект электромагнитно индуцированной прозрачности, являющийся основой одноимённого протокола квантовой памяти. Вблизи точки ZEFOZ (63.6 мТл) проявляется модуляционная структура окна прозрачности, обусловленная суперсверхтонким взаимодействием ионов неодима с окружающими ионами фтора.
3. В ансамбле NV-центров в алмазе возможна реализация эффекта когерентного пленения населённости в условиях антипересечения уровней основного состояния.

**Достоверность** результатов первой главы обеспечивается качественным соответствием с результатами, полученными другими авторами с использованием альтернативных конфигураций резонатора. Результаты второй главы согласуются с теоретическими оценками и косвенно подтверждаются работой [50], в которой суперсверхтонкое расщепление в таком же кристалле наблюдается методом ЭПР. Полученные результаты третьей главы соотносятся с результатами наблюдения другими авторами эффекта ЭИП в отличных условиях.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на симпозиумах International Laser Physics Workshop (LPHYS) Erevan, Armenia (2016), Kazan, Russia (2017); и на XVIII научной школе «Нелинейные Волны — 2018», Нижний Новгород (2018). Результаты второй главы были отмечены второй премией XXI Конкурса работ молодых учёных ИПФ РАН и третьей премией IV открытого конкурса научных работ молодых нижегородских учёных в области физики, химии и технологии наноструктур и элементов наноэлектроники (ИФМ РАН).

**Личный вклад.** Автор принимал участие в подготовке и проведении всех описанных экспериментов в составе коллектива лаборатории нелинейной спектроскопии ИПФ РАН, а также обрабатывал полученные результаты.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 — в тезисах докладов. Одна публикация принята к печати в журнал, рекомендованный ВАК [A3].

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 57 страниц, включая 20 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 67 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** посвящена наблюдению эффекта фотонного эха на атомной частотной гребёнке (являющегося одним из протоколов квантовой памяти) с использованием резонатора, удовлетворяющего условию согласования импедансов. Вводная часть первой главы даёт краткое представление об основных приложениях оптической квантовой памяти: квантовом повторителе и источнике одиночных фотонов. Указывается, что создание квантового повторителя (неотъемлемой частью которого является устройство квантовой памяти) позволяет преодолеть главную проблему реализации квантовых коммуникаций (невзламываемых за счёт коллапса волновой функции фотона при попытке перехвата) на дальние расстояния — оптические потери в волокне.

В **разделе 1.1** приводится описание протокола атомной частотной гребёнки. Отмечено, что использование двух дополнительных управляющих импульсов позволяет

организовать квантовую память с контролируемым временем хранения, а также существенно увеличить время хранения за счёт переноса возбуждения на спиновый подуровень основного состояния. Даются определения основным характеристикам квантовой памяти (fidelity, эффективность, модовая ёмкость). Приводится формула, позволяющая оценить эффективность квантовой памяти для считываемого импульса в прямом направлении.

В разделе 1.2 описываются общие оптические свойства редкоземельных элементов, допированных в диэлектрические кристаллы, которые необходимы для понимания их отличительных черт. Расшифровывается спектроскопическое обозначение используемого перехода  ${}^4I_{9/2} - {}^4F_{3/2}$ . Характеризуется используемый образец изотопически чистого кристалла Nd:YLF, имеющий только атомы изотопов  ${}^{143}\text{Nd}$  и  ${}^7\text{Li}$ .

В разделе 1.3 обсуждается возможность увеличения эффективности квантовой памяти при использовании резонатора, удовлетворяющего условию согласования импедансов. Проводится теоретическое рассмотрение эффективности квантовой памяти в случае использования резонатора с учётом потерь. Приводятся характеристики используемого резонатора и измерена величина потерь в резонаторе с кристаллом внутри (на длине волны лазера отстроенной от поглощающего перехода).

Раздел 1.4 посвящён описанию экспериментальной реализации квантовой памяти. Приводится описание оптической схемы установки и используемых приборов. Параметры атомной частотной гребёнки и требуемая длина кристалла для выполнения условия согласования определены по результатам наблюдений фотонного эха без использования резонатора. Представлены результаты проведённых экспериментов. Продемонстрировано 15-кратное увеличение эффективности квантовой памяти по отношению к случаю без использования резонатора.

В разделе 1.5 сформулированы краткие выводы по первой главе диссертации.

Вторая глава посвящена исследованию эффекта электромагнитно индуцированной прозрачности в магнитном поле вблизи точки ZEFOZ.

В разделе 2.1 определено значение магнитного поля, соответствующее условию зануления первого порядка эффекта Зеемана (63.6 мТл). Для этого осуществлён расчёт зависимости сдвига энергетических уровней основного и возбуждённого состояний кристалла  ${}^{143}\text{Nd}^{3+} : \text{YLiF}_4$  от магнитного поля. В качестве параметров гамильтониана использованы константы, полученные из экспериментально измеренного спектра исследуемого перехода в магнитном поле 60.5 мТл. Согласно расчётам, в точке ZEFOZ также образуется симметричная  $\Lambda$ -схема между двумя сверхтонкими подуровнями основного состояния и сверхтонким подуровнем возбуждённого состояния.

В разделе 2.2 описана последовательность проведения экспериментов. Отмечается, что управляющий и пробный лучи совмещались до максимизации глубины дырки, выжженной управляющим лучом, и сканированной пробным. Выделение нужной гармоники пробного луча после модуляции ЕОМом осуществлялось при помощи интерферометра Фабри-Перо.

В разделе 2.3 представлены экспериментальные результаты. Установлено, что максимальное значение прозрачности достигается в магнитном поле, соответствующем условию



ZEFOZ. При этом в профиле ЭИП проявляется структура из девяти равноудалённых пиков с расстоянием 2.8 МГц и шириной каждого пика 1 МГц. При отстройке магнитного поля от точки ZEFOZ, ширина каждого пика увеличивается, при этом расстояние между пиками остаётся неизменным. Отмечено, что наблюдаемое расщепление профиля ЭИП вызвано суперсверхтонким взаимодействием спинов 4f электронов неодима с ядерным спином близлежащих атомов фтора.

**Раздел 2.4** содержит выводы по второй главе диссертации.

**Третья глава** посвящена исследованию режима когерентного пленения населённостей в ансамблях  $NV^-$ -центров в алмазе в условиях антипересечения уровней основного состояния. В вводной части третьей главы даётся общее представление о  $NV^-$ -центрах в алмазе, рассмотрены условия, при которых возникает  $\Lambda$ -схема уровней, необходимая для наблюдения эффекта КПН.

**Раздел 3.1** посвящён описанию проведённого эксперимента. Для повышения чувствительности при измерениях зависимости флуоресценции  $NV^-$ -центров от двухфотонной отстройки использовалась схема детектирования на основе синхронного усилителя.

В **разделе 3.2** представлены экспериментальные результаты. Контраст полученных КПН резонансов очень мал (не превышает долей процента). Показано, что возможной причиной малого контраста является спектральное перекрытие каналов возбуждения  $\Lambda$ -схемы из-за большой однородной ширины оптических переходов, превышающей значение двухфотонной отстройки вблизи антипересечения подуровней основного состояния.

В **разделе 3.3** подведены краткие итоги третьей главы диссертации.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

## Основные результаты работы

1. Реализована квантовая память на основе фотонного эха (на атомной частотной гребёнке) в резонаторе (кристалл  $^{143}\text{Nd}^{3+} : \text{YLiF}_4$ ). Показано, что использование резонатора позволяет повысить эффективность памяти в несколько раз (до 15) по сравнению с однопроходовой схемой без резонатора.
2. Осуществлён эффект электромагнитно индуцированной прозрачности в изотопически чистом кристалле  $^{143}\text{Nd}^{3+} : \text{YLiF}_4$ . Достигнута степень просветления 28%. Показано, как теоретически так и экспериментально, что при определённом значении и направлении внешнего магнитного поля в рассматриваемом кристалле реализуется режим зануления эффекта Зеемана первого порядка (ZEFOZ), в окрестности которого проявляется модуляционная структура окна прозрачности, обусловленная суперсверхтонким взаимодействием ионов неодима с окружающими ионами фтора.
3. Продемонстрирован эффект когерентного пленения населённостей в ансамблях  $NV^-$ -центров в алмазе в условиях антипересечения уровней основного состояния.

## Публикации автора по теме диссертации

- A1. Cavity-assisted atomic frequency comb memory in an isotopically pure  $^{143}\text{Nd}^{3+}:\text{YLiF}_4$  crystal / R. A. Akhmedzhanov [и др.] // Laser Physics Letters. — 2016. — Т. 13, № 11. — С. 115203. — URL: <https://doi.org/10.1088/1612-2011/13/11/115203>.
- A2. Electromagnetically induced transparency in an isotopically purified  $\text{Nd}^{3+}:\text{YLiF}_4$  crystal / R. Akhmedzhanov [и др.] // Physical Review B. — 2018. — Июнь. — Т. 97, № 24. — С. 245123. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.97.245123>.
- A3. Наблюдение когерентного пленения населённости в ансамблях оптических центров в алмазе в условиях антипересечения уровней основного состояния / Р. А. Ахмеджанов [и др.]. — Принято к публикации в журнал «Оптика и спектроскопия».
- A4. Cavity-Assisted Quantum Memory in an Isotopically Pure  $\text{YLiF}_4:\text{Nd}^{3+}$  Crystal / R. A. Akhmedzhanov [и др.] // LPHYS'16. — 2016. — URL: <https://www.lasphys.com/workshops/abstracts/files/2016/2d/ef/5a/dabae203bf82ba0b3742f23368/abstract.pdf>.
- A5. Electromagnetically induced transparency in  $^{143}\text{Nd}^{3+}:\text{Y}^7\text{LiF}_4$  around the ZEFOZ point / D. A. Sobgayda [и др.] // LPHYS'17. — 2017. — URL: <https://www.lasphys.com/workshops/abstracts/files/2017/dd/85/7d/1b8cc77415448d1cd6539b1ee3/abstract.pdf>.
- A6. Эффект электромагнитно индуцированной прозрачности в изотопически чистом кристалле  $\text{Nd}:\text{YLF}$  / Р. А. Ахмеджанов [и др.] // Тезисы докладов молодых учёных научной школы «Нелинейные волны – 2018». — 2018. — URL: [http://www.nonlinearwaves.sci-nnov.ru/images/Tezis\\_NV-2018-n1.pdf](http://www.nonlinearwaves.sci-nnov.ru/images/Tezis_NV-2018-n1.pdf).

## Список литературы

1. The quantum technologies roadmap: a European community view / A. Acín [и др.] // New Journal of Physics. — 2018. — Т. 20, № 8. — С. 080201. — URL: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/aad1ea>.
2. Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics / N. Sangouard [и др.] // Reviews of Modern Physics. — 2011. — Март. — Т. 83, № 1. — С. 33–80. — URL: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.33>.
3. Полуэктов, И. Эффект самоиндуцированной прозрачности / И. Полуэктов, Ю. М. Попов, В. Ройтберг // Успехи физических наук. — 1974. — Т. 114, № 9. — С. 97–131. — URL: [http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi\\_Fiz\\_Nauk/1974/9/r749e.pdf](http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi_Fiz_Nauk/1974/9/r749e.pdf).
4. Новиков, Л. Эффект Ханле / Л. Новиков, Г. Скромцкий, Г. Соломахо // Успехи физических наук. — 1974. — Т. 113, № 8. — С. 597–625. — URL: [http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi\\_Fiz\\_Nauk/1974/8/r748b.pdf](http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi_Fiz_Nauk/1974/8/r748b.pdf).

5. Why the two-pulse photon echo is not a good quantum memory protocol / J. Ruggiero [и др.] // *Physical Review A*. — 2009. — Т. 79, № 5. — С. 053851. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.79.053851>.
6. Когерентное пленение населенностей в квантовых системах / Б. Агапьев [и др.] // *Успехи физических наук*. — 1993. — Т. 163, № 9. — С. 1—36. — URL: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0163.199309a.0001>.
7. Coherent Optical Memory with High Storage Efficiency and Large Fractional Delay / Y.-H. Chen [и др.] // *Physical Review Letters*. — 2013. — Февр. — Т. 110, № 8. — С. 083601. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.083601>.
8. Efficient quantum memory for light / M. P. Hedges [и др.] // *Nature*. — 2010. — Июнь. — Т. 465, № 7301. — С. 1052—1056. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nature09081>.
9. High efficiency coherent optical memory with warm rubidium vapour / M. Hosseini [и др.] // *Nature Communications*. — 2011. — Февр. — Т. 2, № 1. — С. 174. — URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms1175>.
10. Efficient Quantum Memory Using a Weakly Absorbing Sample / M. Sabooni [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2013. — Март. — Т. 110, № 13. — С. 133604. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.133604>.
11. Cavity-enhanced storage in an optical spin-wave memory / P. Jobez [и др.] // *New Journal of Physics*. — 2014. — Т. 16, № 8. — С. 083005. — URL: <http://doi.org/10.1088/1367-2630/16/8/083005>.
12. *Harris, S. E.* Electromagnetically Induced Transparency / S. E. Harris // *Physics Today*. — 1997. — Июль. — Т. 50, № 7. — С. 36—42. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.881806>.
13. *Fleischhauer, M.* Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media / M. Fleischhauer, A. Imamoglu, J. P. Marangos // *Reviews of Modern Physics*. — 2005. — Июль. — Т. 77, № 2. — С. 633—673. — URL: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.77.633>.
14. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas / L. V. Hau [и др.] // *Nature*. — 1999. — Февр. — Т. 397, № 6720. — С. 594—598. — URL: <https://doi.org/10.1038/17561>.
15. Nonlinear Magneto-optics and Reduced Group Velocity of Light in Atomic Vapor with Slow Ground State Relaxation / D. Budker [и др.] // *Physical Review Letters*. — 1999. — Авг. — Т. 83, № 9. — С. 1767—1770. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.1767>.
16. Storage of Light in Atomic Vapor / D. F. Phillips [и др.] // *Physical Review Letters*. — 2001. — Янв. — Т. 86, № 5. — С. 783—786. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.783>.

17. Resonant nonlinear magneto-optical effects in atoms / D. Budker [и др.] // *Reviews of Modern Physics*. — 2002. — Ноябрь. — Т. 74, № 4. — С. 1153–1201. — URL: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.1153>.
18. Electromagnetically Induced Transparency in a Diamond Spin Ensemble Enables All-Optical Electromagnetic Field Sensing / V. M. Acosta [и др.] // *Physical Review Letters*. — 2013. — Май. — Т. 110, № 21. — С. 213605. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.213605>.
19. Experimental Demonstration of Laser Oscillation without Population Inversion via Quantum Interference in Rb / A. S. Zibrov [и др.] // *Physical Review Letters*. — 1995. — Август. — Т. 75, № 8. — С. 1499–1502. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.1499>.
20. *Fleischhauer, M.* Dark-State Polaritons in Electromagnetically Induced Transparency / M. Fleischhauer, M. D. Lukin // *Physical Review Letters*. — 2000. — Май. — Т. 84, № 22. — С. 5094–5097. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.5094>.
21. *Lvovsky, A. I.* Optical quantum memory / A. I. Lvovsky, B. C. Sanders, W. Tittel // *Nature photonics*. — 2009. — Т. 3, № 12. — С. 706–714. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2009.231>.
22. Prospective applications of optical quantum memories / F. Bussi eres [и др.] // *Journal of Modern Optics*. — 2013. — Октябрь. — Т. 60, № 18. — С. 1519–1537. — URL: <https://doi.org/10.1080/09500340.2013.856482>.
23. Quantum memories: emerging applications and recent advances / K. Heshami [и др.] // *Journal of Modern Optics*. — 2016. — Март. — Т. 63, № 20. — С. 2005–2028. — URL: <https://doi.org/10.1080/09500340.2016.1148212>.
24. *Fraval, E.* Method of Extending Hyperfine Coherence Times in  $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  / E. Fraval, M. Sellars, J. Longdell // *Physical review letters*. — 2004. — Т. 92, № 7. — С. 077601. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.077601>.
25. Hyperfine characterization and spin coherence lifetime extension in  $\text{Pr}^{3+}:\text{La}_2(\text{WO}_4)_3$  / M. Lovri c [и др.] // *Physical Review B*. — 2011. — Т. 84, № 10. — С. 104417. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.104417>.
26. *Vanier, J.* Atomic clocks based on coherent population trapping: a review / J. Vanier // *Applied Physics B*. — 2005. — Июль. — Т. 81, № 4. — С. 421–442. — URL: <https://doi.org/10.1007/s00340-005-1905-3>.
27. Picotesla magnetometry with coherent dark states / M. St ahler [и др.] // *Europhysics Letters (EPL)*. — 2001. — Май. — Т. 54, № 3. — С. 323–328. — URL: <https://doi.org/10.1209/epl/i2001-00245-y>.
28. *Katz, O.* Light storage for one second in room-temperature alkali vapor / O. Katz, O. Firstenberg // *Nature Communications*. — 2018. — Т. 9, № 1. — С. 2074. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04458-4>.

29. Efficient quantum memory for single-photon polarization qubits / Y. Wang [и др.] // Nature Photonics. — 2019. — С. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0368-8>.
30. Quantum storage of entangled telecom-wavelength photons in an erbium-doped optical fibre / E. Saglamyurek [и др.] // Nature Photonics. — 2015. — Янв. — Т. 9, № 2. — С. 83—87. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.311>.
31. *Thiel, C.* Rare-earth-doped materials for applications in quantum information storage and signal processing / C. Thiel, T. Böttger, R. Cone // Journal of Luminescence. — 2011. — Март. — Т. 131, № 3. — С. 353—361. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlumin.2010.12.015>.
32. Observation of Ultraslow and Stored Light Pulses in a Solid / A. V. Turukhin [и др.] // Physical Review Letters. — 2001. — Дек. — Т. 88, № 2. — С. 023602. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.023602>.
33. Stopped Light with Storage Times Greater than One Second Using Electromagnetically Induced Transparency in a Solid / J. J. Longdell [и др.] // Physical Review Letters. — 2005. — Авг. — Т. 95, № 6. — С. 063601. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.063601>.
34. Experimental observation of electromagnetically induced transparency in  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  / R. Akhmedzhanov [и др.] // Journal of Modern Optics. — 2006. — Ноябрь. — Т. 53, № 16/17. — С. 2449—2458. — URL: <https://doi.org/10.1080/09500340600894113>.
35. Long coherence lifetime and electromagnetically induced transparency in a highly-spin-concentrated solid / P. Goldner [и др.] // Physical Review A. — 2009. — Март. — Т. 79, № 3. — С. 033809. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.79.033809>.
36. *Heinze, G.* Stopped Light and Image Storage by Electromagnetically Induced Transparency up to the Regime of One Minute / G. Heinze, C. Hubrich, T. Halfmann // Physical Review Letters. — 2013. — Июль. — Т. 111, № 3. — С. 033601. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.033601>.
37. Stopped Light at High Storage Efficiency in a  $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  Crystal / D. Schraft [и др.] // Physical Review Letters. — 2016. — Февр. — Т. 116, № 7. — С. 073602. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.073602>.
38. Coherent Storage of Microwave Excitations in Rare-Earth Nuclear Spins / G. Wolfowicz [и др.] // Physical Review Letters. — 2015. — Апр. — Т. 114, № 17. — С. 170503. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.170503>.
39. *Macfarlane, R. M.* Inhomogeneous broadening by nuclear spin fields: A new limit for optical transitions in solids / R. M. Macfarlane, A. Cassanho, R. S. Meltzer // Physical Review Letters. — 1992. — Июль. — Т. 69, № 3. — С. 542—545. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.69.542>.

40. *Macfarlane, R.* Optical measurement of the isotope shifts and hyperfine and superhyperfine interactions of Nd in the solid state / R. Macfarlane, R. Meltzer, B. Malkin // *Physical Review B*. — 1998. — Сент. — Т. 58, № 9. — С. 5692. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.5692>.
41. Hole-burning techniques for isolation and study of individual hyperfine transitions in inhomogeneously broadened solids demonstrated in  $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  / M. Nilsson [и др.] // *Physical Review B*. — 2004. — Дек. — Т. 70, № 21. — С. 214116. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.70.214116>.
42. High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution / J. M. Taylor [и др.] // *Nat Phys*. — 2008. — Сент. — Т. 4, № 10. — С. 810–816. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nphys1075>.
43. Nanometre-scale thermometry in a living cell / G. Kucsko [и др.] // *Nature*. — 2013. — Авг. — Т. 500, № 7460. — С. 54–58. — URL: <https://doi.org/10.1038/nature12373>.
44. Quantum Register Based on Individual Electronic and Nuclear Spin Qubits in Diamond / M. V. G. Dutt [и др.] // *Science*. — 2007. — Июнь. — Т. 316, № 5829. — С. 1312–1316. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1139831>.
45. Fluorescent nanodiamonds: past, present, and future / M. H. Alkahtani [и др.] // *Nanophotonics*. — 2018. — Т. 7, № 8. — С. 1423–1453. — URL: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2018-0025>.
46. Raman-excited spin coherences in nitrogen-vacancy color centers in diamond / P. Hemmer [и др.] // *Optics Letters*. — 2001. — Т. 26, № 6. — С. 361–363. — URL: <http://doi.org/10.1364/ol.26.000361>.
47. Electromagnetically Induced Transparency in a Diamond Spin Ensemble Enables All-Optical Electromagnetic Field Sensing / V. M. Acosta [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2013. — Май. — Т. 110, № 21. — С. 213605. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.213605>.
48. Coherent Population Trapping of Single Spins in Diamond under Optical Excitation / C. Santori [и др.] // *Physical Review Letters*. — 2006. — Дек. — Т. 97, № 24. — С. 247401. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.247401>.
49. *Golter, D. A.* Nuclear-spin-dependent coherent population trapping of single nitrogen-vacancy centers in diamond / D. A. Golter, K. N. Dinyari, H. Wang // *Phys. Rev. A*. — 2013. — Март. — Т. 87, № 3. — С. 035801. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.87.035801>.
50. Superhyperfine structure of the EPR spectra of impurity ions in the  $\text{LiYF}_4 : \text{Nd}^{3+}$  system doped by  $^{143}\text{Nd}$  isotopes / L. K. Aminov [и др.] // *Physics of the Solid State*. — 2015. — Дек. — Т. 57, № 12. — С. 2400–2403. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063783415120033>.