

На правах рукописи

ШЕРЕМЕТ Александра Сергеевна

**КВАНТОВАЯ ПАМЯТЬ ДЛЯ СВЕТА
В МНОГОУРОВНЕВЫХ АТОМНЫХ СИСТЕМАХ**

Специальность: 01.04.02 - теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Куприянов Дмитрий Васильевич

Официальные оппоненты: **Иванов Вадим Константинович**
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой "Экспериментальная
физика" ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский
государственный политехнический университет"
Пржибельский Сергей Григорьевич
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник, ведущий научный сотрудник
ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский
национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики"

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский
государственный университет"

Защита состоится 18 декабря 2013 г. в 17 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 при ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ауд. 118 Главного здания.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Автореферат разослан " ____ "ноября 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.ф.-м.н.

Ермакова Наталья Юрьевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Представленная диссертация посвящена исследованию взаимодействия оптических полей с многоуровневыми атомными системами, с целью разработки и совершенствования систем квантовой памяти, основанных на явлении вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и связанном с ним эффекте электромагнитной индуцированной прозрачности (ЭИП) [1] - [2]. Квантовая память является ключевым элементом при разработке квантовых информационных сетей и связана с такими инновационными направлениями фундаментальной физики как передача информации посредством телепортационного протокола [3], квантовая криптография [4], квантовое моделирование [5] и, в перспективе, создание квантового компьютера [6].

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование механизма контролируемой временной задержки в распространении светового импульса, при его прохождении через ансамбль поляризованных атомов, взаимодействующих с внешним управляющим полем. При этом принципиальным является исследование эффектов, связанных с многоуровневой структурой как самого атома, так и с коллективной квазиэнергетической структурой в случае проявления кооперативного взаимодействия в атомном ансамбле высокой плотности. Процесс задержки распространения света рассмотрен в контексте протоколов квантовой памяти, основанных на различных проявлениях явления вынужденного комбинационного рассеяния в атомной среде.

Научная новизна представленной работы состоит в следующем:

1. Впервые выполнен расчет многоуровневой резонансной структуры Аутлера-Таунса с учетом конечности сверхтонкого взаимодействия возбужденного состояния атома. Обнаружено, что эффекты интерференции возбуж-

денных подуровней влияют на восприимчивость среды. В частности, проведенный расчет показал, что вследствие конечности сверхтонкого взаимодействия в возбужденном состоянии атома, исчезают условия, соответствующие идеальной реализации эффекта электромагнитной индуцированной прозрачности.

2. Данные результаты получили экспериментальное подтверждение при исследовании спектра восприимчивости ^{133}Cs и были использованы в экспериментах, демонстрирующих эффекты квантовой памяти в ансамбле щелочных атомов, помещенных в магнито-оптическую ловушку.

3. Впервые рассмотрена схема задержки и "остановки" сигнального импульса в случае, когда его несущая частота настроена между компонентами сверхтонкой структуры D_1 -линии щелочного атома. Впервые в этой многоуровневой конфигурации продемонстрирована эффективность использования управляющего поля, распространяющегося в обратном направлении на этапе восстановления.

4. Впервые проведен расчет полного сечения рассеяния света в плотной системе атомов с вырожденной структурой основного состояния, разделенных расстоянием порядка длины волны излучения. Обнаружено, что в случае рассеяния света на системе атомов с вырожденным основным состоянием спектральный профиль полного сечения сохраняет выраженную резонансную структуру вблизи исходного атомного резонанса.

5. Впервые проведен расчет поглотительной и дисперсионной спектральных зависимостей для плотной системы двухуровневых атомов с вырожденным основным состоянием в присутствии сильного управляющего поля. Показано, что в этом случае эффективной задержки импульса можно добиться при существенно меньшем количестве атомов, чем в разреженном атомном ансамбле.

Научная и практическая ценность работы связана с возрастающим

интересом и возможностью инновационных разработок в области квантовой информатики. Основной проблемой, сдерживающей развитие квантово-информационных сетей, является ограниченность радиуса действия квантовых корреляций. Предполагается, что квантовые повторители, основанные на системах квантовой памяти, помогут в решении данной проблемы. Этот вопрос более детально отражен в первой главе диссертации. Также данная диссертационная работа может представлять интерес с точки зрения развития методов спектроскопии высокого разрешения в системах холодных атомов.

Методология и методы исследования. Результаты, приведенные в данной диссертации, получены с помощью использования современного аппарата теоретической и математической физики. Взаимодействие света с атомной средой рассматривается на основе квантово-электродинамического подхода в полном соответствии с представлениями и требованиями современной квантовой оптики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что в ансамбле многоуровневых атомов эффект просветления, связанный с управляющим полем, не является идеальным и лимитирован величиной сверхтонкого взаимодействия в возбужденном состоянии атома. В спектре возбуждаемого атома наблюдается сложная многокомпонентная резонансная структура Аутлера-Таунса.

2. Показано, что световой импульс с несущей частотой, настроенной в области между сверхтонкими компонентами D_1 -линии щелочного атома, испытывает бóльшую временную задержку, чем это предсказывается модельным трехуровневым приближением.

3. Показано, что схема квантовой памяти ВКР-типа может использоваться для сохранения "закрученного" света, пространственные моды которого селектированы значением орбитального углового момента.

4. Исследовано явление электромагнитной индуцированной прозрачно-

сти с учетом кооперативных эффектов, проявляющихся при рассеянии света в системе холодных атомов с плотностью порядка одного атома в объеме длины волны излучения. Показано, что можно достичь высоких оптических толщин и, как следствие, эффективной задержки светового импульса для существенно меньшего количества атомов в ансамбле, чем в стандартных условиях магнито-оптической ловушки.

Степень достоверности результатов и выводов диссертации подтверждается использованием адекватных методов теоретической и математической физики. В тех случаях, где это возможно, проведено сравнение с экспериментальными данными.

Апробация работы Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих Российских и Международных конференциях: VII Международная Конференция по Лазерной Физике и Оптическим Технологиям (Минск, Беларусь, 2008), XII International Conference on Quantum Optics and Quantum Information (Vilnius, Lithuania, 2008), VI семинар по квантовой оптике, посвященный памяти Д.Н. Клышко (Москва, Россия, 2009), XVIII International Laser Physics Workshop (The Annual International Seminar on Quantum Information Science) (Barcelona, Spain, 2009), Международный Симпозиум по Фотонному Эхо и когерентной Спектроскопии (Казань, Россия, 2009), XIII International Conference on Quantum Optics and Quantum Information (Kyiv, Ukrain, 2010), Pre-Doctoral school "Ultracold atoms, metrology and quantum optics" (Les Houches, France, 2010), VI Международная Конференция "Фундаментальные проблемы оптики" (Санкт-Петербург, Россия, 2010), VII семинар по квантовой оптике, посвященный памяти Д.Н. Клышко (Москва, Россия, 2011), XX International Laser Physics Workshop (The Annual International Seminar on Quantum Information Science) (Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2011), International Workshop on Nonlinear Photonics (Saint-Petersburg, Russia, 2011), International Conference on Atomic Physics (Paris, France,

2012), VIII Международная Конференция "Фундаментальные проблемы оптики" (Санкт-Петербург, Россия, 2012), VIII семинар по квантовой оптике, посвященный памяти Д.Н. Клышко (Москва, Россия, 2013), International Conference on Nonlinear Optics, ICONO/LAT - 2013 (Moscow, Russia, 2013), II International Conference on Quantum Technology (Moscow, Russia, 2013), а также на семинарах кафедры "Теоретическая физика" СПбГПУ, городском межинститутском семинаре по квантовой оптике при РГПУ им. А.И. Герцена, семинаре лаборатории Каствлера-Бросселя (Университет Пьера и Марии Кюри, Париж, Франция).

Вклад автора в проведенные исследования. Основные теоретические результаты, представленные в диссертации, получены автором лично; выбор общего направления исследования, обсуждение и постановка рассматриваемых задач осуществлялись совместно с научным руководителем. Экспериментальные результаты получены группой под руководством Е. Джакобино и Ж. Лора в Лаборатории Каствлера-Бросселя Университета Пьера и Марии Кюри (Париж, Франция) во время стажировок автора в данной лаборатории и в рамках совместного сотрудничества.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений на 11 страницах. Полный объем диссертационной работы составляет 133 страницы, в том числе 21 рисунок в основном тексте диссертации и 3 рисунка, входящих в состав приложений, список литературы (93 наименования) на 13 страницах.

Содержание работы

Во **введении** определена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, перечислены выносимые на защиту положения, обоснована достоверность и значимость полученных результатов, представлены сведения об апробации и структуре диссертации.

Глава 1 посвящена краткому описанию основных направлений теории квантовой информации, работа которых связана с такими важными понятиями квантовой теории, как перепутывание и неопределенность (неклонированность), впервые введенными Э. Шрёдингером в работе [7] в 1935 г. Подчеркивается потенциальное преимущество квантово-информационных сетей и каналов связи перед их классическими аналогами. Приведены последние экспериментальные достижения в этой области, и сформулированы существующие физические пределы, преодоление которых возможно с помощью создания систем квантовой памяти. Описан принцип протокола квантового повторителя и квантовой памяти и приведены основные характеристики процессов отображения и восстановления квантового состояния света, диктуемые требованием секретности оптического канала связи.

Глава 2 посвящена описанию взаимодействия пробной моды с многоуровневой атомной системой в присутствии сильного управляющего поля. Впервые подобное динамическое возмущение энергетической структуры атома было рассмотрено теоретически и продемонстрировано экспериментально Аутлером и Таунсом в 1955 г. [8]. В качестве атомной среды в диссертации рассматривается ансамбль щелочных атомов ^{133}Cs , для которых пробное и управляющее поля действуют на сверхтонких переходах D_1 - линии атома. Важной оптической характеристикой, описывающей взаимодействие среды с электромагнитным полем, является ее восприимчивость, получаемая в результате решения системы уравнений Блоха для элементов матрицы плотности совместно с уравнениями Максвелла. Принципиальной особенностью представленного в данной главе расчета является учет конечности сверхтонкого взаимодействия возбужденного состояния атома, что игнорируется в часто используемом трехуровневом моделировании задачи приближением Λ -схемы, предполагающим это взаимодействие неограниченно сильным [10]. Результаты нашего расчета сравниваются с результатами, полученными в

Λ - приближении. В рассматриваемой схеме возбуждения в D_1 - линии атома ^{133}Cs сверхтонкие подуровни возбужденного состояния разделены энергетическим интервалом 1167.68 МГц или 256γ , где γ - естественная ширина линии. Эта величина расщепления является максимальной среди всех щелочных металлов и соответствует наиболее слабой интерференции возбужденных состояний атома. На рис. 1 приведены мнимые части восприимчивости, соответствующие спектру поглощения света атомной средой, представленные как функции отстройки пробного поля от атомного резонанса. Приведенные зависимости демонстрируют отличия расчета, выполненного в многоуровневом приближении (сплошные кривые), от Λ - приближения (пунктирные кривые). Представленные зависимости соответствуют интенсивности управляющего поля, характеризуемой частотой Раби $\Omega_c = 15\gamma$ и настроенного либо резонансно атомному переходу (рис. 1 (а)), либо отстроенного на $\Delta = 50\gamma$ от нижнего подуровня возбужденного состояния (рис. 1 (b)). Обнаружено, что вследствие конечности сверхтонкого взаимодействия и интерференции всех участвующих сверхтонких переходов исчезают идеальные условия для наблюдения эффекта электромагнитной индуцированной прозрачности, существующие в Λ - приближении, что акцентировано на вставке к рис. 1 (а). Отметим, что в данном случае (^{133}Cs) эффект является незначительным, однако в случае легких щелочных атомов (Na, K) данный эффект будет заметно существеннее. В свою очередь, это будет приводить к заметному поглощению сигнального импульса в условиях электромагнитного индуцированного просветления оптически плотной среды для легких атомов и делает их, фактически, непригодными для осуществления протоколов квантовой памяти. Результаты, приведенные на рис. 1 (а) показывают, что уже при нулевой отстройке управляющего поля $\Delta = 0$ в крыле D_1 - линии наблюдается отклонения в структуре восприимчивости по сравнению с Λ - приближением. В случае отстройки частоты пробной моды между сверхтонкими компонентами

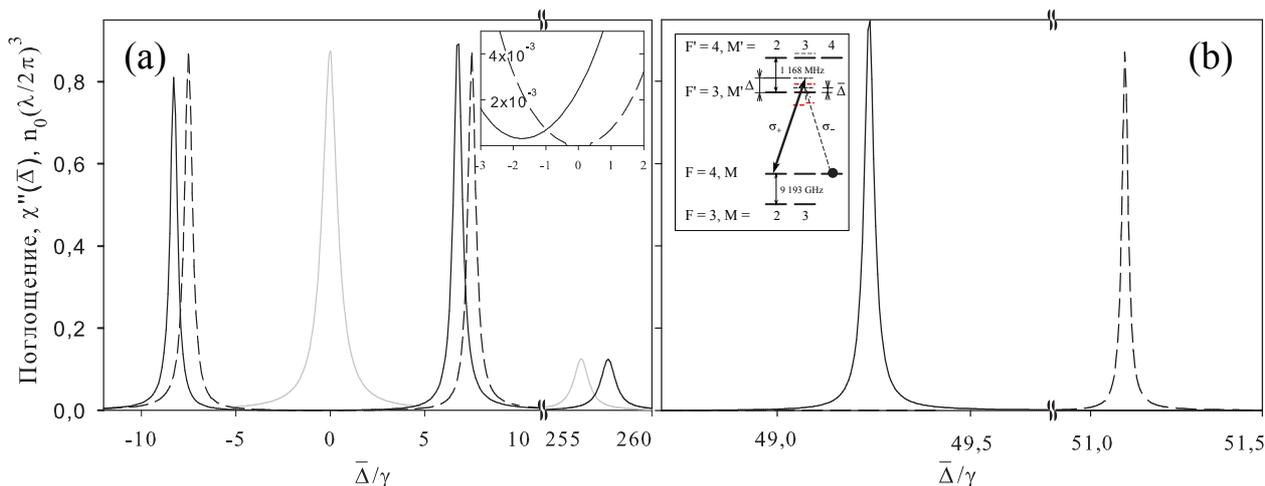


Рис. 1. Сравнение поглощательных профилей восприимчивости среды в D_1 -линии ^{133}Cs , полученных на основе многоуровневого расчета с результатами, полученными при использовании Λ - приближения [10]. Серым профилем показан спектр поглощения, невозмущенный действием управляющего поля. Сплошные кривые соответствуют учету всех сверхтонких переходов, пунктирными кривые - Λ - приближению. Частота Раби $\Omega_c = 15\gamma$, и отстройка управляющего поля от нижнего сверхтонкого подуровня составляет (а) $\Delta = 0$ (атомный резонанс) и (b) $\Delta = 50\gamma$. На вставке (а) в увеличенном масштабе показано поведение восприимчивости в окрестности двухфотонного резонанса ЭИП. На вставке (b) показана схема энергетических уровней и возбуждаемых переходов D_1 -линии атома ^{133}Cs .

возбужденного состояния, см. 1 (b), отличия становятся весьма существенными.

Расчет восприимчивости был также проведен для D_2 -линии ^{133}Cs для описания эксперимента по наблюдению эффекта ЭИП в ансамбле атомов цезия. В последней части главы приведено сравнение теоретических результатов с результатами, полученными в эксперименте по наблюдению резонансной структуры Аутлера-Таунса [12]. Проведенное сравнение подтверждает наше теоретическое наблюдение о существенной роли интерференции сверхтонких переходов атома, что должно учитываться при оптимизации протоколов квантовой памяти ВКР-типа.

В **Главе 3** рассмотрен протокол квантовой памяти, основанный на эф-

фекте ВКР для сигнального импульса, характеризуемого прямоугольным пространственно-временным профилем [13]. Динамика сигнального импульса в присутствии управляющего поля описывается волновым уравнением, следующим из уравнений Максвелла, и представленным для медленно меняющейся амплитуды поля:

$$\left[\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \right] \epsilon_p(\mathbf{r}_\perp, z; t) = 2\pi i \frac{\bar{\omega}}{c} \int_{-\infty}^t dt' \tilde{\chi}(\mathbf{r}_\perp, z; t, t') \epsilon_p(\mathbf{r}_\perp, z; t') \quad (1)$$

где $\epsilon_p(\mathbf{r}_\perp, z; t)$ и $\bar{\omega}$ - медленно меняющаяся амплитуда и несущая частота пробного поля и $\tilde{\chi}(\mathbf{r}_\perp, z; t, t')$ - неоднородная компонента диэлектрической восприимчивости среды, вычислению которой посвящена предыдущая глава.

Анализ динамики светового импульса в атомной среде длительностью $T = 10\gamma^{-1}$, оптимальной в условиях выбранных параметров оптической толщины и частоты Раби управляющего поля, показал, что вариация его несущей частоты и, тем самым, перекрытия его спектрального профиля с резонансом Аутлера-Таунса, приводит к различной эффективности его отображения и изменению пространственного профиля спиновой когерентности в среде. В ходе восстановления квантового состояния света управляющим полем, имеющим различные направления, было выяснено, что наиболее выигрышным представляется использование импульса управляющего поля, распространяющегося в противоположном направлении, так как распределение атомной когерентности пространственно неоднородно, и максимальное число атомных возбуждений сосредоточено вблизи входного края образца. В эксперименте наших партнеров была продемонстрирована возможность записи квантового состояния света, обладающего орбитальным угловым моментом, что является одной из первых демонстраций канала многомодовой квантовой памяти [14] - [15]. Наши расчеты, в целом, неплохо воспроизводят результаты эксперимента и дают основания рассматривать схемы ВКР-типа как основу

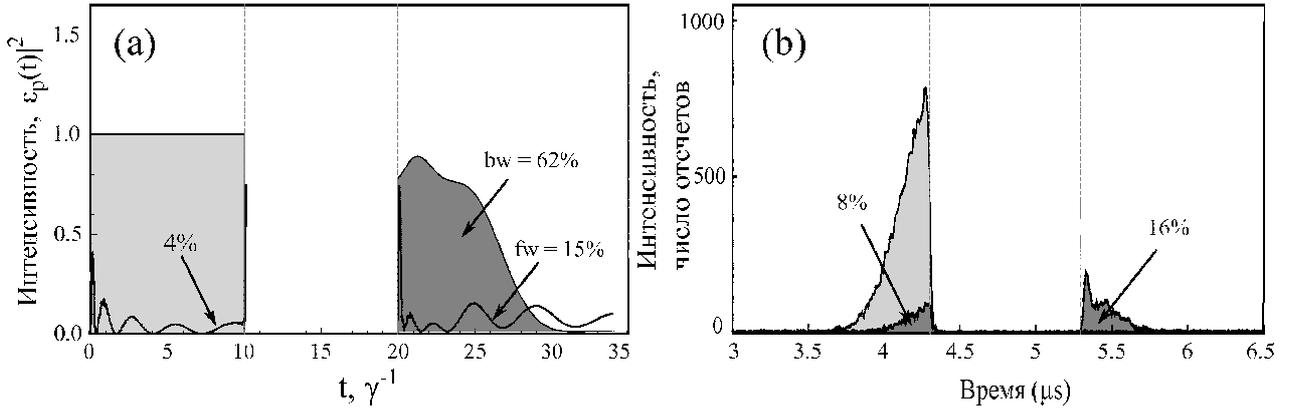


Рис. 2. Демонстрация протокола квантовой памяти. (а) Теория: Прямоугольный сигнальный импульс с длительностью $T = 10\gamma^{-1}$ отображается на атомную среду с оптической плотностью $b_0 = 50$. После временной задержки управляющее поле включается повторно. Временной профиль, показанный сплошной кривой, соответствует распространению восстанавливающего поля в первоначальном направлении, затененная область показывает временной профиль, восстановленный управляющим полем, распространяющимся в обратном направлении [13]. (b) Эксперимент: Сигнальный импульс обрезанной гауссовой формы длительностью $0.5\mu\text{s}$ отображается на спиновую когерентность атомной среды с оптической толщиной $b_0 = 15$. Считывающее управляющее поле включается с временной задержкой $t = 900\text{ ns}$ в первоначальном направлении [15].

систем многомодовой квантовой памяти.

На рис. 2 (а) представлен результат расчета протокола квантовой памяти, проведенного для ансамбля атомов ^{133}Cs , находящихся в магнито-оптической ловушке, с оптической толщиной $b_0 \sim n_0(\lambda/2\pi)^2L = 50$, где n_0 - концентрация атомов, λ - длина волны излучения и L - длина среды. Управляющее поле действует между сверхтонкими компонентами возбужденного состояния и отстроено от нижнего подуровня на $\Delta = 50\gamma$ так, как это показано на рис.1(b), и характеризуется частотой Раби $\Omega_c = 15\gamma$. Из приведенных зависимостей непосредственно видно преимущество схемы восстановления управляющим импульсом, распространяющимся в обратном направлении. Для качественного сравнения на рис. 2 (b) приведены результаты эксперимента, демонстрирующие эффект квантовой памяти, для ансамбля атомов

^{133}Cs с оптической толщиной $b_0 = 15$. В эксперименте использовался эффект ЭИП в D_2 -линии и частота Раби управляющего поля - $\Omega_c \sim \gamma$, что соответствовало значительному перекрытию спектрального профиля сигнального импульса, имеющего обрезанный гауссовый временной профиль, с резонансом Аутлера-Таунса. Так как восстановление осуществлялось управляющим полем, распространяющимся с первоначальным направлением, то его эффективность оказалась невысокой, что качественно согласуется с результатами нашего расчета.

Глава 4 посвящена изучению кооперативных эффектов, проявляющихся при взаимодействии света с плотным ансамблем двухуровневых атомов, имеющих вырожденное основное состояние, когда в объеме длины волны такой среды содержится порядка одного атома [16]. Рассмотрение плотных атомных сред позволяет рассчитывать на определенные преимущества по сравнению с разреженными ансамблями, связанные с возможностью задействовать ансамбли, содержащие значительно меньшее количество атомов, обеспечив, вместе с тем, большие оптические толщины.

В квантовой теории сечение рассеяния сложной коллективной системой выражается через амплитуду рассеяния, нахождение которой требует построения оператора резольвенты (функции Грина) рассеивающей системы. Поскольку для реализации протокола квантовой памяти необходимо осуществить взаимодействие двух импульсов, действующих в ортогональных поляризациях, с ансамблем атомов, имеющих Λ -конфигурацию состояний нижнего уровня, то в данной части работы рассматриваются простейшие двухуровневые атомы, имеющие трехкратно вырожденное основное состояние, см. рис 3 (b). Однако даже для таких атомов полный оператор резольвенты определен в подпространстве размерности $N \cdot 3^{(N-1)}$, где N - число атомов в ансамбле, и при макроскопических значениях N задача не допускает даже численного решения.

Для рассмотрения влияния конфигурации (взаимного расположения) атомов в ансамбле был проведен сравнительный расчет сечения рассеяния света в системе атомов Λ -типа с результатами, полученными для атомов V -типа (атомы Дике [9], для которых основное состояние не вырождено) при небольших значениях N . Анализ результатов показал, что в отличие от атомов V -типа, для атомов Λ -типа спектр рассеяния характеризуется центральным резонансом, имеющим максимальную амплитуду. Коллективные эффекты проявляются, в основном, из-за взаимодействия через ближнее статическое поле и существенны только для атомов разделенных расстоянием порядка длины волны излучения. Удержав в расчете диполь-дипольное взаимодействие между ближними соседними атомами, можно провести приближенный расчет оператора резольвенты для системы с макроскопическим числом рассеивателей N . Также наличие самоусреднения спектра рассеяния (т.е. его слабая зависимость от случайной конфигурации распределения атомов в ансамбле) позволяет использовать подобные системы как эффективные поглотители даже при небольшом количестве атомов. В свою очередь, использование эффекта электромагнитной индуцированной прозрачности может обеспечить эффективную задержку сигнального импульса и использоваться в качестве системы квантовой памяти.

На рис. 3 (а) приведена спектральная зависимость, соответствующая профилю поглощения света средой, состоящей из $N = 50$ атомов, в присутствии управляющего поля $\Omega_c = 2\gamma$, действующего на незаселенном переходе и настроенного в атомный резонанс, как функция отстройки пробной моды от невозмущенного атомного резонанса. В представленном расчете связывание кооперативных вкладов в собственно-энергетический оператор учитывались для трех ближайших соседей. Достаточность этого приближения проверялась на системах из меньшего числа атомов. Как видно из приведенных зависимостей, для разреженной среды $n_0(\lambda/2\pi)^3 = 0.01$ (серая кривая), где процесс

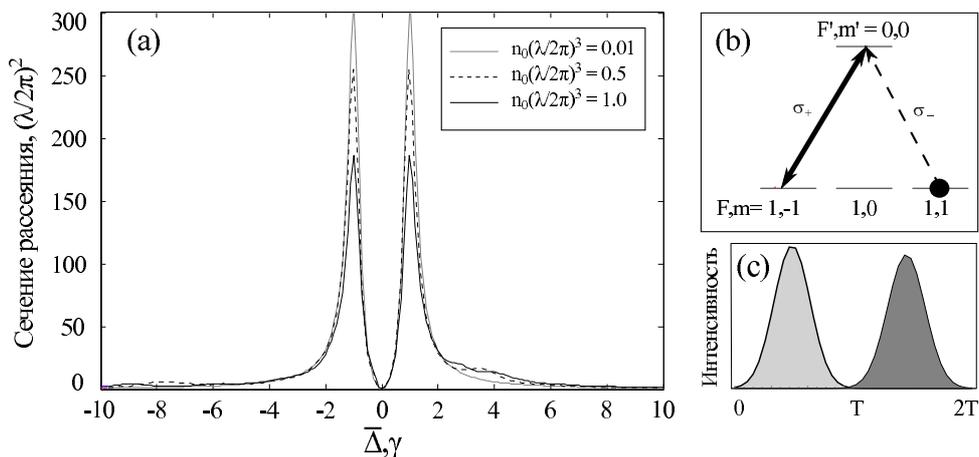


Рис. 3. (а) Профиль поглощения света системой, состоящей из $N = 50$ атомов, подверженных влиянию управляющего поля с частотой Раби $\Omega_c = 2\gamma$, действующего на незаселенном смежном атомном переходе. Атомы характеризуются случайным распределением в пространстве с плотностью: $n_0(\lambda/2\pi)^3 = 0.01$ (серая кривая), $n_0(\lambda/2\pi)^3 = 0.5$ (пунктирная кривая) и $n_0(\lambda/2\pi)^3 = 1.0$ (сплошная кривая). В расчете удерживались кооперативные вклады в собственно-энергетический оператор для трех ближайших соседей каждого атома ансамбля. (б) Схема возбуждения атома, обладающего Λ -конфигурацией энергетических уровней. Тонкой пунктирной линией показано пробное поле, действующее на заселенном переходе в левой поляризации, толстой сплошной - управляющее поле, действующее на смежном незаселенном переходе в правой поляризации. (в) Эффект задержки сигнального импульса в слое вещества с плотностью $n_0(\lambda/2\pi)^3 = 1$, содержащего 200 атомов. Импульс имеет гауссову форму и его спектр сосредоточен внутри окна ЭИП.

рассеяния света происходит на каждом атоме системы независимо и в случае высокой плотности вещества $n_0(\lambda/2\pi)^3 = 1.0$ (черная кривая), с точки зрения общего поведения восприимчивости среды профиль поглощения и структура резонанса ЭИП меняется несущественно. Сохранение формы профиля поглощения позволяет добиться увеличения оптической толщины, увеличивая плотность атомов, а не их число. Как следствие, на рис. 3 (в) видно, что слой вещества, состоящий всего из двухсот атомов, действительно, способен привести к эффективной задержке гауссова импульса, спектрально распределенного внутри окна прозрачности.

В **Заключении** к диссертации приводятся основные результаты и выводы, полученные в работе и составляющие основу положений, выносимых на защиту:

1. В диссертации проведен расчет восприимчивости среды в присутствии управляющего поля с учетом конкуренции оптического и сверхтонкого взаимодействия в возбужденном состоянии D_1 - линии щелочного атома ^{133}Cs . Показано, что корректный учет сверхтонкого взаимодействия, которое в обычных условиях не является сильным и сопоставимо со скоростью радиационного распада атома, необходим для правильного расчета динамической восприимчивости среды. В частности, обнаружено, что исчезают идеальные условия для реализации эффекта электромагнитной индуцированной прозрачности, что может существенным образом проявиться при использовании этого явления для задержки импульса в оптически плотной атомной среде.

2. Проведен расчет эффекта вынужденного комбинационного рассеяния при настройке управляющего поля и несущей частоты сигнального импульса между сверхтонкими компонентами сверхтонкой структуры D_1 -линии возбужденного состояния щелочного атома и выявлены преимущества данного канала по сравнению с отстройками во внешние крылья линий.

3. Проведены количественные оценки эффективности квантовой памяти, основанной на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния ансамблем атомов ^{133}Cs с учетом его многоуровневой структуры. Показано, что для оптимальной настройки можно получить высокую эффективность квантовой памяти и восстановить пространственно-временной профиль сигнального импульса при его восстановлении управляющим полем, распространяющимся в обратном направлении.

4. Проведен микроскопический расчет полного сечения рассеяния света плотной системой атомов с вырожденной структурой основного состояния. В ходе сравнительного анализа полученных результатов с результатами эталон-

ной задачи Дике обнаружено, что для двухуровневых атомов с вырожденным основным состоянием спектральное поведение сечения вблизи центрального резонанса описывается гладким профилем.

5. Обнаружено, что система двухуровневых атомов с вырожденным основным состоянием остается "самоусредняемой" даже в случае высокой плотности и проявления кооперативной динамики. Полное сечение рассеяния света на системе таких атомов характеризуется центральным резонансом, имеющим доминирующую амплитуду по сравнению с сателитными резонансами, что позволяет рассматривать данную систему как эффективный поглотитель при относительно небольшом количестве участвующих атомов.

6. Проведен расчет поглотательной и дисперсионной спектральных зависимостей для плотной системы двухуровневых атомов с вырожденным основным состоянием в присутствии сильного управляющего поля, действующего в круговой поляризации. Показано, что электромагнитное индуцированное просветление системы и связанная с этим частотная дисперсия, действительно позволяет ожидать эффективной задержки сигнального импульса даже при небольшом количестве атомов в ансамбле. С практической точки зрения, это означает уменьшение количества рабочих атомов с нескольких миллиардов до сотен тысяч.

Литература

1. *M. Fleischhauer* Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media / M. Fleischhauer, A. Imamoglu, J. P. Marangos // Rev. of Mod. Phys. - 2005. - Vol. 77 - p.p. 633 - 673.
2. *C. Simon* Quantum memory / C. Simon, M. Afzelius, J. Appel, et al. // Eur. Phys. J. D - 2010. - Vol. 58. - p.p. 1 - 22.
3. *C. H. Bennett* Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels / C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crepeau, et al. // Phys. Rev. Lett. - 1993. - Vol. 70. - p.p. 1895 - 1899.
4. *N. Gisin* Quantum cryptography / N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, and H. Zbinden // Rev. of Mod. Phys. - 2002. - Vol. 74. - p.p. 145 - 195.
5. *I. Bloch* Quantum simulations with ultracold quantum gases / I. Bloch, J. Dalibard and S. Nascimbene // Nature Physics - 2012. - Vol. 8. - p. 267.
6. *R.P. Feynman* Simulating physics with computers / R.P. Feynman // Int. J. Theor. Phys. -1982. - Vol. 21. - p.p. 467 - 488.
7. *E. Schrodinger* Die gegenwartige Situation in der Quantenmechanik / E. Schrodinger // Naturwissenschaften. - 1935. - Vol. 23, no. 48. - p.p. 807-812.
8. *S.H. Autler* Stark Effect in Rapidly Varying Fields. / S.H. Autler, C.H. Townes // Phys.Rev. - 1955. - Vol. 100. - p.p. 703 - 722.
9. *R.H. Dicke* Coherence in spontaneous radiation processes / R.H. Dicke // Phys. Rev. - 1954. - Vol. 93. - p.p. 99 - 110.
10. *О.С. Мишина* Эффект Аутлера-Таунса в сверхтонкой структуре в

- D_1 -линии щелочного атома./О.С.Мишина, А.С.Шеремет, Н.В.Ларионов, Д.В.Куприянов//Оптика и Спектроскопия.-2010.-Т.108,№ 2.-стр.343-348.
11. *A.S. Sheremet* Atomic quantum memories for light / A.S. Sheremet, O.S. Mishina, E. Giacobino, D.V. Kupriyanov //Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Quantum Cryptography and Computing: Theory and Implementations. - 2010. - p.p. 231 - 238.
 12. *L. Giner* Experimental investigation of the transition between Autler-Townes splitting and electromagnetically induced transparency models. / L. Giner, L. Veissier, B. Sparkes, A.S. Sheremet, A. Nicolas, O.S. Mishina, M. Scherman, S. Burks, I. Shomroni, D.V. Kupriyanov, P.K. Lam, E. Giacobino, and J. Laurat // Phys. Rev. A. - 2013. - Vol. 87. - p. 013823
 13. *A.S. Sheremet* Quantum memory for light via stimulated off-resonant Raman process: beyond the three-level lambda-scheme approximation. / A.S. Sheremet, L.V. Gerasimov, I.M. Sokolov, D.V. Kupriyanov, O.S. Mishina, E. Giacobino, J. Laurat // Phys. Rev. A. - 2010. - Vol. 82. - p. 033838
 14. *L. Veissier* Towards a multimode quantum memory for single photons. / L. Veissier, A. Nicolas, L. Giner, D. Maxein, A.S. Sheremet, M. Scherman, S. Burks, J. Laurat, E. Giacobino // International Journal of Quantum Information. - 2012. - Vol. 10, no. 8. - p. 1241011
 15. *L. Veissier* Reversible optical memory for twisted photons. / L. Veissier, A. Nicolas, L. Giner, D. Maxein, A.S. Sheremet, E. Giacobino, and J. Laurat // Optics Letters. - 2013. - Vol. 38, no. 5. - p.p. 712 - 714
 16. *A.S. Sheremet* Cooperative light scattering on an atomic system with degenerate structure of the ground state. / A.S. Sheremet, A.D. Manukhova, N.V. Larionov, and D.V. Kupriyanov//Phys.Rev.A.-2012.-Vol.86.-p.043414