Лосев, Александр Сергеевич. Преобразование световых импульсов в условиях электромагнитно индуцированной прозрачности при вырождении атомных уровней : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.02 / Лосев Александр Сергеевич; [Место защиты: Рос. гос. пед. ун-т им. А.И. Герцена].- Санкт-Петербург, 2012.- 120 с.: ил. РГБ ОД, 61 12-1/761

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Российский государственный педагогический университет**

**им. А. И. Герцена”**

**На правах рукописи УДК 535.370**



**Лосев Александр Сергеевич Преобразование световых импульсов в условиях электромагнитно индуцированной прозрачности при вырождении атомных уровней**

**Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук**

**Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика**

**Научный руководитель доктор физ.-мат. наук, профессор А.С. Трошин**

**Санкт-Петербург**

**2012**

Содержание

[**Введение 4**](#bookmark2)

[**ГЛАВА 1. Электромагнитно индуцированная прозрачность. Полуклассическая теория 13**](#bookmark5)

[§ 1.1 Одиночный атом 13](#bookmark6)

[§ 1.2 Многоатомная среда 17](#bookmark13)

[§ 1.3 Электромагнитное поле 19](#bookmark14)

[§ 1.4 Эффект электромагнитно индуцированной прозрачности ... 21](#bookmark22)

**ГЛАВА 2. Электромагнитно индуцированная**

**прозрачность в двухуровневых схемах с вырождением 25**

[§ 2.1 Эффект ЭИП в открытой Л-схеме 28](#bookmark27)

[§ 2.2 Эффект ЭИП в AV-схеме и MW-схеме 35](#bookmark34)

[§ 2.3 Эффект ЭИП в МЛ-схеме 49](#bookmark45)

[§ 2.4 Эффект ЭИП в WV-схеме и \¥ЗУ-схеме 55](#bookmark53)

§ 2.5 Выводы по второй главе 69

**ГЛАВА 3. Управление световыми импульсами**

**в условиях электромагнитно индуцированной**

**прозрачности при вырождении уровней 75**

§ 3.1 Эффекты записи, хранения и воспроизведения пробного

импульса 75

§ 3.2 Эффекты записи, хранения и воспроизведения двух

пробных импульсов 83

[§ 3.3 Изменение очередности импульсов при их воспроизведении . . 91](#bookmark72)

[§ 3.4 Копирование светового импульса 96](#bookmark73)

[§ 3.5 Выводы по третьей главе 103](#bookmark75)

**Заключение 105**

**Список литературы 107**

**Приложение А 119**

**Приложение Б 120**

Введение

**Актуальность** исследования нелинейных оптических эффектов, воз­никающих при резонансном взаимодействии лазерного излучения с ансам­блями атомов в условиях электромагнитно индуцированной прозрачности (ЭИП) обусловлена проявлением многочисленных нетривиальных следствий, которые могут быть использованы в различных приложениях. Эффект ЭИП был предсказан и экспериментально наблюдался еще в конце 60-х - начале 70-х годов — нелинейный интерференционный эффект [1]—[6], однако термин „электромагнитно индуцированная прозрачность" был введен только в 1990 году [7], когда явление вновь стало активно исследоваться [8]—[10]. Вслед за этим последовал ряд экспериментальных работ [11]—[13]. Суть эффекта ЭИП заключается в том, что в результате деструктивной интерференции ампли­туд вероятностей квантовых переходов возникает крутой ход кривой диспер­сии. Это приводит к значительному возрастанию нелинейной восприимчи­вости в спектральной области индуцированной прозрачности среды [14]. Об­зоры по этой тематике представлены в работах [15]—[18]. В настоящее время эффект ЭИП исследуется в различных контекстах и получил широкое раз­витие. Например, для усиления и генерации света без инверсии населенности [16]; в нелинейной оптике, в том числе при энергии взаимодействующих из­лучений соответствующей нескольким фотонам [19, 20]; при генерации суб- фемтосекундных импульсов [21]; для управления атомной когерентностью [16, 22] и др. ЭИП приводит к необычным законам распространения резо­нансных импульсов в среде — согласованные импульсы [23, 24], импульсы, “одетые11 полем [25] и адиабатоны [26, 27], которые распространяются без поглощения и изменения своей формы на расстояния, превышающие длину линейного поглощения на несколько порядков по величине [28]—[31], а также к гигантскому (в 107 раз и более) замедлению групповой скорости светового импульса („медленный свет“). В экспериментах ультра-медленное распро­странение наблюдалось в бозе-эйнштейновском конденсате атомов натрия (~ 17 м/с [32] и ~ 1 м/с [33]), в парах рубидия (~90 м/с [34] и ~8 м/с [35]). Зависимость групповой скорости от температуры рассматривалась в [36]. Малая скорость (десятки и менее м/с) распространения пробного импульса позволила авторам [37] предложить и экспериментально продемонстриро­вать в парах рубидия способ записи, хранения и воспроизведения (считыва­ния) световых импульсов, время включения и выключения которых много больше времени жизни возбужденного состояния. Эта же идея была реа­лизована в бозе-конденсате атомов натрия [38]. Другие работы на эту тему были представлены авторами [39]—[47].

Эффект ЭИП и близкие к нему, такие как когерентное пленение насе­ленности [14, 22, 48, 3] и адиабатический перенос населенности [14, 49, 50], открывают возможности для создания новых типов оптоэлектронных при­боров, оптических транзисторов [51], оптической памяти [52, 53], для хране­ния квантового перепутанного состояния света [16, 54, 55]. Они позволяют управлять оптическими и нелинейно-оптическими характеристиками среды. К числу наиболее впечатляющих достижений в этом направлении можно от­нести уже упомянутое замедление распространения импульсов до скоростей порядка метров в секунду, наблюдение гигантской керровской нелинейно­сти [56, 57] и проявление нелинейных взаимодействий при энергиях импуль­сов порядка энергии одного фотона с возможным применением в квантово­оптических информационных технологиях [58, 59, 60], создание атомных ла­зеров [61, 62].

Существует три основных конфигурации атомных схем, используемых для создания ЭИП [17, 18]. Наиболее часто исследуемой является Л-схема (лямбда-схема) [14, 16, 17, 18, 32, 37], [39]—[47], [63]—[68]. Две другие конфи­гурации, это *V*-схема [69] и 0-схема (тета-схема, или „каскадная14) [70[—[76]. Кроме того учёт вырожденных атомных состояний, без снятия вырождения, даёт возможность рассматривать более сложные конфигурации, такие как

М-схема W-схема и их сочетания [74, 77, 78]. Частичное рассмотрение ЭИП в таких схемах было проведено в работах [39, 84]. Также часто в задачах, где одна из мод играет роль управляющего поля, меняющего нелинейные свойства среды для пробной моды, используют триподную атомную конфи­гурацию [78]—[83].

**Целью** настоящей работы является исследование эффекта ЭИП при ре­зонансном взаимодействии лазерного излучения с холодными атомарными газами при вырождении актуальных атомных уровней. В рамках достиже­ния этой цели в диссертации:

1. Проведен анализ динамики индуцированной поляризованности и насе­ленности подуровней сверхтонкой структуры для различных значений квантового числа углового момента *F* при сохранении вырождения уровней энергии.
2. Определены особенности нелинейного взаимодействия световых им­пульсов, обусловленные вырождением уровней, установлена возмож­ность и эффективность проявления ЭИП.
3. Исследованы эффекты записи, хранения и воспроизведения пробного импульса для различных схем с вырождением уровней. Определены схемы и методы возбуждения, обеспечивающие наименьшую группо­вую скорость распространения пробного импульса в среде.
4. Исследованы эффекты записи, хранения и воспроизведения двух проб­ных импульсов при наличии одного управляющего поля в схемах с вырождением уровней.
5. Исследована возможность управляемого изменения очередности им­пульсов при их воспроизведении.
6. Проанализированы возможности создания двух и более копий пробно­го импульса.

**Достоверность и научная обоснованность** результатов и выводов диссертации обеспечивается четкой формулировкой поставленных задач и физических условий, последовательным использованием надежных методов теории резонансного взаимодействия электромагнитного излучения с атома­ми, сопоставлением предельных частных случаев с более ранними результа­тами других авторов, а также, где это возможно, сопоставлением получен­ных расчетных и имеющихся экспериментальных данных.

**Научная новизна** работы заключается в том, что в ней, для холодных атомарных газов щелочных металлов получены следующие результаты:

1. Установлено посредством качественного анализа и прямого численно­го решения полной системы уравнений полуклассического подхода, что при вырождении по проекции *Мр* полного углового момента *F* атома все связанные с ЭИП эффекты реализуются во всех рассмотренных схемах, кроме двух, но предваряются (подготавливаются) перезаселе- нием состояний (оптической накачкой).
2. Показано, что при учете вырождения подуровней сверхтонкой струк­туры можно выделить три группы схем атомных переходов, в которых эффект ЭИП проявляется с разной степенью эффективности, вплоть до исчезновения эффекта.
3. Предложен и проанализирован метод записи, хранения и воспроизве­дения одновременно для двух пробных импульсов в триподной атомной схеме, построенной на вырожденных подуровнях сверхтонкой структу­ры в условиях ЭИП.
4. Предложен и проанализирован метод изменения очередности двух проб­ных импульсов в процессе их воспроизведения при вырождении атом-

ных уровней в условиях ЭИП.

1. Предложен и проанализирован метод, позволяющий в условиях ЭИП в атомных схемах с вырождением получить на выходе из среды две копии вошедшего пробного импульса, при том, что сам импульс рассе­ивается средой.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. При сохранении вырождения подуровней сверхтонкой структуры по­сле вхождения в среду интенсивного управляющего светового импуль­са и процесса установления (перезаселения квантовых состояний) воз­никают условия проявления эффектов, связанных с ЭИП: значитель­ного сокращения групповой скорости пробного импульса, сохранения фазовой памяти атомов, генерации атомарной средой импульсов, ана­логичных пробному, после “темных41 пауз [А7].
2. Эффективное сокращение групповой скорости световых импульсов при формировании области электромагнитно индуцированной прозрачно­сти существенно зависит от кратностей вырождения уровней использу­емой атомной схемы и длительности пробного импульса (в любом слу­чае — превышающей время жизни возбужденных состояний). Мини­мальная групповая скорость достижима, если кратность вырождения возбужденного уровня меньше или равна кратности основного; в про­тивоположном случае фактически не достигаются условия электромаг­нитно индуцированной прозрачности и сильного снижения групповой скорости (переходный процесс завершается перезаселением состояний и возможным простветлением среды) [А1, А2, АЗ, А4, А7].
3. Эффект электромагнитно индуцированной прозрачности и связанные с ним возможности записи, хранения и воспроизведения пробного им-

пульса проявляются в триподной атомной конфигурации одновременно для двух пробных импульсов [А5].

1. В условиях электромагнитно индуцированной прозрачности в трипод­ной атомной схеме существует метод изменения очередности выхода двух пробных импульсов, вошедших в среду [А7].
2. В условиях электромагнитно индуцированной прозрачности в трипод­ной атомной схеме существует метод получения двух копий пробно­го импульса, при этом данный исходный импульс рассеивается средой [Аб].

**Практическая значимость** работы.

1. Предложен и проанализирован эффект записи, хранения и воспроиз­ведения одновременно двух пробных импульсов в условиях электро­магнитно индуцированной прозрачности. Даннные результаты могут быть использованы для реализации многомодовых ячеек памяти.
2. Предложены и проанализированы эффект изменения последователь­ности воспроизведения двух импульсов в условиях электромагнитно индуцированной прозрачности и эффект получения двух копий проб­ного импульса в условиях электромагнитно индуцированной прозрач­ности. Данные результаты могут быть использованы в схемах преоб­разования и оптической задержки импульсов в устройствах квантовой информации.

**Теоретическая значимость** работы. Фундаментальными методами по- луклассической теории взаимодействия света с веществом детально исследо­ваны особенности взаимодействия нескольких мод электромагнитного поля с холодными атомами щелочных металлов, обусловленные вырождением энер­гетических уровней; для ряда схем уровней и переходов, различных типов поляризации света найдены количественные характеристики ЭИП, замедле­ния и управляемого воспроизведения световых импульсов.

**Апробация работы.** По материалам диссертации сделаны доклады на следующих конференциях и семинарах:

1. Международная конференция “Фундаментальные проблемы оптики" (Санкт-Петербург, 2007 **г.);**
2. Международные чтения по квантовой оптике (Самара, 2007 **г.);**
3. Международная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия“ (Казань, 2007 г.);
4. Международная конференция “Фундаментальные проблемы оптики" (Санкт-Петербург, 2008 **г.);**

Мемориальный семинар памяти Д.Н. Клышко (Москва, 2009 г.);

IX Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спек­троскопии (Казань, 2009 г.);

Ecole Predoctorale de Physique des Houches „Ultracold Atoms, Metrology and Quantum Optics" (Лез Уш, Франция, 2010 г.);

1. Международная конференция “Фундаментальные проблемы оптики\* (Санкт-Петербург, 2010 г.);

XI Международные чтения по квантовой оптике (Волгоград, 2011 г.);

XV Международная научная молодежная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия" (Казань, 2011 г.);

Городской межвузовский семинар по квантовой оптике при РГПУ им А.И. Герцена.

**Основные содержание и результаты диссертации** отражены в сле­дующих публикациях:

[А1] Лосев А.С., Трошин А.С. К теории эффектов, связанных с электромаг­нитно-индуцированной прозрачностью: композиция Л- и V-схем. // Физи­ческий вестник. Сборник научных статей. 2007. Вып.1. С.9-17.

[А2] Лосев А.С., Трошин А.С., Васильев Н.А. Эффект электромагнитно- индуцированной прозрачности и сокращение групповой скорости света в вырожденных двухуровневых атомах. // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. Сборник статей. 2007. Вып.11. С.102-105.

[АЗ] Лосев А.С., Трошин А.С. Электромагнитно-индуцированная прозрач­ность и преобразование импульсов в схемах с вырожденными уровнями. // Материалы международной конф. “Фундаментальные проблемы оптики - 2008“. 2008. С.29-31.

[А4] **Losev A.S., Troshin A.S., Vasil’ev N.A. To the theory of effects associated with electromagnetically induced transparency: composi­tion of A- and V-types. // SPIE Proceedings. 2008. V.7024. P.70240B.** [A5] **Лосев А.С., Трошин А.С. Воспроизведение сложных опти­ческих импульсов различной поляризации при электромагнитно- индуцированной прозрачности. // Ученые записки Казанского уни­верситета. Физ.-мат. науки. 2010. Т.152. Кн.2. С.119-126.**

[А6] Лосев А.С., Трошин А.С. Оптическая ориентация, электромагнитно- индуцируемая прозрачность и варианты управления световыми импульсами при вырождении уровней. // Материалы VI Международной конференции „Фундаментальные проблемы оптики - 2010“. 2010. С.129-132.

[А7] **Лосев А.С., Трошин А.С. Варианты управления световыми импульсами в условиях электромагнитно-индуцированной прозрач­ности при вырождении уровней. // Оптика и спектроскопия. 2011. Т.110. № 1. С.71-77.**

**Личный вклад автора** в получении представленных в диссертации научных результатов состоит в том, что им проанализированы публикации по теме исследования, предложены ранее не изученные другими авторами схемы эффективной реализации ЭИП, разработаны алгоритмы, составлены программы и проведены аналитические и численные расчеты. Совместно с

научным руководителем выбраны объект и предмет исследования, опреде­лены методы решения, проведен анализ результатов.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. Полный объем составляет 120 страниц, в том числе 67 рисунков и список литературы (100 источников).

Заключение

Сформулируем основные результаты и выводы исследования:

1. На примере D2 линии атома натрия в двухуровневых атомных схемах с вырождением сверхтонкой структуры, где главным признаком разде­ления двух импульсов лазерного излучения является их поляризация, возможна реализация эффекта ЭИП в четырех схемах из шести рас­смотренных. Эффект наблюдается в Л-, Л V-, МЛ- и MW-схеме. WV- схема и **W3V-cxeMa** в результате оптической накачки управляющим полем трансформируются в схемы с одним основным и одним возбуж­денным состояниями, где для случая тонкой среды может проявляться просветление для управляющего поля вследствие насыщения.
2. Численным моделированием резонансного взаимодействия двухмодо­вого поля лазерного излучения с облаком холодного атомарного газа Na и аналитическим расчетом линейной восприимчивости среды пока­зано, что в среде, состоящей из МЛ-атомов, время прохождения проб­ного импульса через ансамбль таких атомов является наибольшим.
3. На примере ансамбля атомов, рассматриваемых в виде МЛ-схем, по­казано, что для схем с вырождением в условиях ЭИП возможны эф­фекты записи, хранения и воспроизведения пробного импульса.
4. Показано, что в условиях ЭИП в атомной схеме с вырождением, об­разующей триподную конфигурацию, под управлением одной сильной квазимонохроматической волны возможно одновременное прохожде­ние, а также запись и воспроизведение средой, двух слабых пробных импульсов сложной формы.
5. Показано, что в условиях ЭИП в протяженной атомной среде с вырож­дением сверхтонкой структуры за счет последовательной работы двух

сильных управляющих импульсов возможна временная перестановка двух пробных импульсов, пущенных последовательно.

1. В атомарных газах с вырождением уровней сверхтонкой структуры по­казана возможность получить две копии вошедшего в среду пробного импульса в условиях ЭИП.

Данные явления носят нелинейный характер, что подтверждает их трактов­ку для схем с вырождением в рамках эффекта электромагнитно индуциро­ванной прозрачности.

Список литературы

1. Маныкин Э.А., Афанасьев А.М. Об одной возможности “Просветления,, среды при многоквантовом резонансе. // ЖЭТФ. 1967. Т.52. Вып.5. С.1246.
2. Arimondo Е. Nonabsorbing atomic coherences by coherent two-photon transitions in a three-level optical pumping. // Lettere A1 Nuovo Cimento. 1976. V.17. Iss.10. P.333.
3. Gray H.R., Whitley R.M., Stroud Jr. C.R. Coherent trapping of atomic populations. // Opt. Lett. 1978. V.3. Iss.6. P.218.
4. Раутиан С.Г., Смирнов Г.И., Шалагин A.M. Нелинейные резонансы в спектрах атомов и молекул. Новосиб.: Наука. 1979.
5. Попов А.К. Введение в нелинейную спектроскопию. Новосиб.: Наука. 1983.
6. Попов А.К. Усиление без инверсии и лазерно-индуцированная прозрач­ность на дискретных переходах и переходах в континуум. // Изв. РАН. Сер. физич. 1996. Т.60. Вып.6. С.99.
7. Harris S.E., Field J.E., Imainoglu A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency. // Phys. Rev. Lett. 1990. V.64. P. 1107.
8. Смирнов B.C., Тумайкин A.M., Юдин В.П. Стационарные когерент­ные состояния атомов при резонансном взаимодействии с эллиптически поляризованным светом. Когерентное пленение населенностей (общая теория). // ЖЭТФ. 1989. Т.96. Вып.5. С.1613.
9. Scully M. Enhancement of the index of refraction via quantum coherence. // Phys. Rev. Lett. 1991. V.67. Iss.14. P.1855.
10. Parkins A.S., Marte P., Zoller P. Synthesis of arbitrary quantum states via adiabatic transfer of zeeman coherence. // Phys. Rev. Lett. 1993. V.71. Iss.19. P.3095.