

на правах рукописи

Дацюк Владимир Миронович

Динамические эффекты при рассеянии света оптически плотными ансамблями холодных атомов

Специальность 01.04.02 - теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2006

Работа выполнена на кафедре "Теоретическая физика" в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ГОУ ВПО) "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор, Соколов Игорь Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Голубев Юрий Михайлович
кандидат физико-математических наук,
доцент
Горбачев Валерий Николаевич

Ведущая организация: Российский государственный
педагогический университет
им. А. И. Герцена

Защита состоится "18" октября 2006 г. в 17 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.05 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, II уч. корпус, ауд.265.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан " " сентября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

Титовец Ю.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение процессов многократного рассеяния квазирезонансного излучения в оптически плотной среде холодных атомов занимает важное место в современной атомной физике и квантовой оптике. Это обусловлено целым рядом причин. Во-первых, многократное рассеяние накладывает ограничения на предельно достижимое охлаждение атомов. Во-вторых, распространение света в оптически плотной среде холодных атомов отличается от хорошо изученного переноса излучения в условиях сильного доплеровского уширения. Оно также отличается от диффузии света в среде классических рассеивателей. Так, эксперимент показывает, что скорость диффузии света в плотной воздушной взвеси частиц TiO_2 со средним диаметром 220 нм оказалась на порядок меньше скорости света в вакууме. Для атомов, охлажденных в магнитооптических ловушках (МОЛ), эта скорость уже на пять порядков меньше скорости света. В-третьих, многократное рассеяние оказывает влияние на эффекты, связанные с атомной когерентностью, такие как когерентное пленение населенностей и электромагнитно - индуцированная прозрачность (ЭИП), что чрезвычайно важно в задачах квантовой информатики. Наконец, особый интерес представляют возможные интерференционные эффекты при многократном рассеянии в неупорядоченной среде холодных атомов. Одним из таких эффектов является когерентное обратное рассеяние (КОР) света, которое состоит в наличии резко анизотропной добавки к сечению рассеяния, отличной от нуля только в узком конусе вблизи направления, противоположного направлению падающей на среду плоской волны. Понимание интерференционных эффектов важно также для успешной реализации так называемого эффекта сильной локализации света, явления, аналогичного андерсоновской локализации электронов в твердом теле и проявляющегося в резком подавлении диффузии в плотной среде.

Несмотря на большое число работ, посвященных анализу процессов взаимодействия света с холодными атомными ансамблями, многие аспекты такого взаимодействия исследованы недостаточно подробно. Так лишь незначительное число работ выходит за рамки анализа стационарного рассеяния и посвящено динамическим, нестационарным эффектам, имеющим место при многократном рассеянии импульсного излучения. Отметим, что именно при рассеянии импульсного излучения эффекты пленения наблюдаются непосредственно и проявляются наиболее ярко. Кроме этого, при теоретическом описании исследования обычно проводятся на модельных системах:

атомы предполагаются двух или трехуровневыми, реальная сверхтонкая и зеемановская структура игнорируется. Подобные упрощения не позволяют корректно рассматривать поляризационные эффекты при рассеянии света атомными ансамблями. Как правило, в имеющихся работах также не учитывается возможная неоднородность пространственного распределения атомов, хотя и это обстоятельство существенно влияет на характер рассеяния. В данной работе эффектам, связанным с динамическими закономерностями, сверхтонкой и зеемановской структурой атомов, а также пространственной неоднородностью атомного облака, уделено особое внимание.

Характер рассеяния существенным образом изменяется при воздействии на атомное облако вспомогательного, так называемого, управляющего поля. Такое воздействие приводит к созданию лазерно-индуцированной когерентности в атомных, молекулярных системах, вызывая существенную модификацию их оптических характеристик, что наблюдается по изменению свойств пробного, слабого света. Наведенная атомная когерентность лежит в основе как достаточно хорошо изученных оптических явлений - когерентного пленения населенностей и электромагнитно - индуцированной прозрачности, так и ряда новых, именуемых в литературе терминами "замедление света" и "остановка света".

В подавляющем большинстве исследований, посвященных оптически - индуцированным эффектам, основное внимание уделяется свойствам прошедшего пробного излучения, что в терминах задачи рассеяния соответствует анализу когерентного рассеяния вперед, т.е. рассеяния в моду, изначально заполненную пробным излучением. Рассеяние в другие моды практически не анализируется. Однако, несмотря на относительную малость, некогерентное рассеяние может представлять интерес с нескольких разных точек зрения. Во-первых, наличие некогерентно рассеянных фотонов может повлиять на характер когерентного состояния среды и поэтому важно при описании процессов индуцированной прозрачности. Во-вторых, некогерентное рассеяние очень чувствительно к параметрам эксперимента, поэтому является чрезвычайно информативным, достаточно сказать, что в идеальном стационарном случае оно просто отсутствует. Наконец, особый интерес представляет влияние управляющего поля на характер интерференционных эффектов при многократном рассеянии в неупорядоченных средах, в частности на КОР.

Отметим еще одну особенность рассеяния в условиях ЭИП, важную для его описания и не исследованную в настоящее время в должной мере. Изменение направления волнового вектора фотона пробного излучения при некогерентном рассеянии приводит к необходимости корректного описания рас-

пространения света в атомной среде в произвольном направлении по отношению к направлению управляющего поля. В определенных ситуациях управляющее поле по-разному взаимодействует с разными зеемановскими переходами, что приводит в условиях электромагнитно-индуцированной прозрачности к появлению в атомных средах анизотропных оптических свойств – дихроизма и двулучепреломления. Данные эффекты требуют корректного учета реальной структуры атомных уровней и не проявляются для модельных трехуровневых систем.

Основной **целью настоящей работы** является исследование динамики рассеяния импульсного излучения ансамблями холодных атомов в условиях пленения, в том числе при наличии управляющего поля. В рамках достижения этой цели в диссертации:

1. Исследованы спектральные и поляризационные эффекты при рассеянии света оптически плотными атомными ансамблями в магнитооптических ловушках.
2. Проведен анализ анизотропных свойств холодных атомных ансамблей в условиях действия управляющего поля.
3. Изучено некогерентное рассеяние света в условиях электромагнитно - индуцированной прозрачности.
4. Проведен анализ когерентного обратного рассеяния в условиях электромагнитно - индуцированной прозрачности.

Поставленные задачи решены с учетом всех значимых факторов - неоднородности пространственного распределения атомов в облаке, конечной оптической толщины, сверхтонкой и зеемановской структуры атомов, произвольной взаимной ориентации пробного и управляющего полей.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней для оптически плотного ансамбля холодных атомов впервые:

- Предсказана зависимость степени поляризации рассеянного света от времени при рассеянии импульсного излучения, проведен анализ углового распределения интенсивности рассеянного света, рассмотрено влияние оптической толщины среды и поперечных размеров лазерного луча на исследуемые закономерности.

- Установлено существенное влияние нерезонансных сверхтонких уровней, а также пленения излучения в облаке на спектральную зависимость степени поляризации рассеянного света.
- В условиях ЭИП вычислен тензор диэлектрической восприимчивости с помощью которого исследованы анизотропные свойства атомного ансамбля - двулучепреломление и дихроизм. В частности, исследованы спектры пропускания атомной среды в зависимости от поляризации пробного света, величины управляющего поля, угла между направлениями распространения пробного и управляющего полей.
- Исследован характер некогерентного рассеяния в условиях ЭИП. Проведен учет влияния поляризации падающего света и параметров управляющего поля на время задержки и искажение формы импульса при рассеянии импульсного излучения. Изучены особенности рассеяния в рэлеевском и рамановском каналах.
- Рассмотрен эффект когерентного обратного рассеяния света в условиях ЭИП. Предсказано наличие, при определенных условиях, деструктивной интерференции при рассеянии назад.

Научная и практическая значимость. Исследования, проведенные в работе, позволяют лучше понять физику происходящих при рассеянии света многоатомными системами процессов. Полученные в диссертации аналитические решения для фотонных функций Грина в условиях действия управляющего поля могут быть использованы для описания распространения излучения в неупорядоченных, неоднородных атомных средах с наведенной оптической анизотропией. Анализ свойств рассеянного света и интерференционных явлений при рассеянии может быть использован в качестве метода диагностики состояния холодных атомных ансамблей. Анализ динамических закономерностей можно рассматривать как метод выделения парциальных вкладов рассеяния различной кратности. В частности, анализ поляризационных свойств рассеянного света может рассматриваться как метод исследования выстраивания в атомном ансамбле. Измерение интенсивности некогерентно рассеянного излучения в условиях ЭИП может использоваться в качестве метода исследования межатомных взаимодействий в среде холодных атомов, а также анализа точности настройки в резонанс в квантовых стандартах частоты, основанных на эффекте ЭИП. В квантово-информационных задачах некогерентное рассеяние является основным каналом потерь фотонов, а следовательно, и потерей информации. Понимание физики процес-

сов некогерентного рассеяния, даст возможность выбрать режимы работы устройств, позволяющие уменьшить эти потери. Сильное влияние управляющего поля на характеристики атомного облака может использоваться для разработки механизмов быстрого управления его оптическими свойствами, и как следствие, позволяет предложить механизмы создания линий задержек и переключающих устройств для целей оптической связи и обработки информации.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Пленение излучения в облаке при рассеянии импульсного излучения приводит к возникновению немонотонной зависимости степени поляризации рассеянного света от времени.
2. Нерезонансные сверхтонкие уровни, а также конечная оптическая толщина атомного облака оказывают существенное влияние на спектральную зависимость степени поляризации рассеянного света.
3. Возникающие в условиях электромагнитно-индуцированной прозрачности анизотропные оптические свойства атомного ансамбля влияют на характер как когерентного, так и некогерентного рассеяния.
4. Управляющее поле существенным образом меняет характер интерференционных эффектов при рассеянии назад. В условиях электромагнитно-индуцированной прозрачности, возможно возникновение деструктивной интерференции при когерентном обратном рассеянии, что демонстрируется наличием спектральных областей для падающего света, в которых фактор усиления меньше единицы.

Апробация работы. Изложенные в работе материалы неоднократно докладывались на научных семинарах кафедры теоретической физики СПбГПУ, на кафедре теоретической физики и астрономии РГПУ им. Герцена и на факультете атомной физики Old Dominion University (Норфолк, США). По материалам статей сделаны доклады на следующих конференциях и семинарах: X Международной конференции по квантовой оптике (Минск, май 2004); конференции "Фундаментальные проблемы оптики" (Санкт-Петербург, октябрь 2004); Международной конференции по квантовой и нелинейной оптике ICONO/LAT (Санкт-Петербург, май 2005); 3-м семинаре по квантовой оптике, посвященном памяти Д. Н. Клышко (Москва, май 2005); XI Международной конференции по квантовой оптике (Минск,

май 2006); Международной конференции по когерентному управлению фундаментальными процессами в оптике ССФР-06 (Нижний Новгород, июль 2006)

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 4 статьях, список которых приведен в конце реферата.

Личный вклад автора. Подавляющее большинство, представленных в диссертации результатов, получены автором лично; выбор общего направления исследований, оптимальных методик вычислений и постановка рассматриваемых задач осуществлялись совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из четырех глав. Помимо общего введения, все главы сопровождаются отдельными вводными частями, содержащими детальную постановку конкретных задач и обзор соответствующей литературы. Основные результаты работы разделены по главам и приведены в заключениях к каждой главе. Объем диссертации составляет 107 страниц, в том числе 43 рисунка. Библиография включает 99 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, отмечены научная новизна и практическая значимость, а также сформулированы основные цели работы.

Первая глава посвящена описанию методов, используемых в дальнейшем при выполнении конкретных вычислений. Для решения задач, поставленных в диссертации, в качестве базового выбран метод расчета взаимодействия света с атомными ансамблями, основанный на диаграммной технике Константинова - Переля - Келдыша. Данный метод позволяет учесть основные, существенные для рассмотрения, факторы - конечную оптическую толщину, неоднородность пространственного распределения в облаке, сверхтонкую и зеемановскую структуру атомов, их распределение по подуровням основного состояния. В отличие от традиционно используемых уравнений переноса, данный метод позволяет избежать сложной проблемы граничных условий и рассмотреть облака произвольной формы.

Вначале рассмотрен случай оптически тонких сред. Влияние вакуумного термостата, определяющее спонтанную релаксацию, учтено введением точных атомных гриновских функций возбужденного состояния атомов. По-

правки к корреляционной функции, связанные с учетом конечной оптической толщины, разделены на две группы – поправки к запаздывающей и опережающей функциям Грина, описывающие когерентное рассеяние вперед, и поправки, связанные с некогерентным рассеянием, т.е. с рассеянием, при котором происходит изменение волнового вектора фотона в среде. Диаграммная техника позволяет получить для корреляционных функций света, рассеянного оптически плотной средой в произвольном направлении, явные выражения в виде разложения по числу актов некогерентного рассеяния. В параграфе 1.1 приведены аналитические выражения для первых двух членов этого разложения, описывающих вклады однократного и двукратного рассеяния света облаком.

Далее в данной главе производится обобщение методики расчета на случай наличия управляющего поля. В рамках такого обобщения рассмотрены две задачи. Первая задача - об учете управляющего поля при вычислении амплитуд рассеяния и тензора восприимчивости, вторая - о влиянии спонтанного распада на формирование и эволюцию атомных когерентностей. Обобщение процедуры вычислений сечения рассеяния на случай наличия управляющего поля произведено в параграфе 1.2. Управляющее поле приводит к изменению физических свойств атомного ансамбля, что в конкретных вычислениях учитывается модификацией атомных функций Грина. Явное аналитическое выражение для атомных функций Грина получено решением соответствующего уравнения Дайсона. В параграфе 1.3 показано, что спонтанный распад оказывает влияние на когерентность между нижними уровнями в часто используемой модельной трехуровневой лямбда системе. Для этого методом, близким к классическому методу Вигнера-Вайскопфа, получено уравнение спонтанного распада Λ -системы, содержащее члены, учитывающие генерацию когерентности. Уравнение дополняется динамическими слагаемыми, описывающими взаимодействие с внешним классическим полем, и решается для двух случаев – когерентных монохроматических и некогерентных широкополосных полей. При этом анализируются как стационарные режимы, так и переходные процессы, приводящие к их установлению. Также показано, что для атомов с реальной сверхтонкой и зеемановской структурами эффект генерации когерентностей основного состояния, вызванный спонтанным распадом населенностей возбужденного состояния, вследствие правил отбора, имеет место только при неравномерном заселении сверхтонких подуровней этого состояния.

Вторая глава посвящена анализу динамических и спектральных эффек-

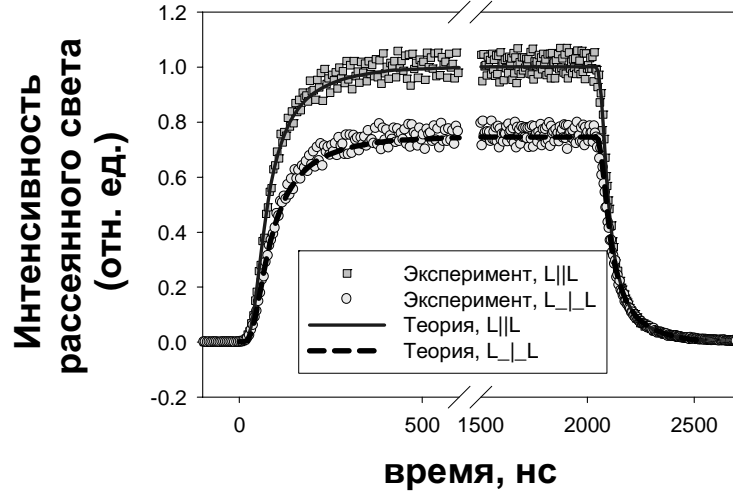


Рис. 1: Интенсивность рассеянного под углом 90° света. Поляризационные каналы с сохраняющейся и меняющейся на ортогональную линейной поляризацией обозначены как $L \parallel L$ и $L \perp L$ соответственно. $b = 8$. Экспериментальные данные отмечены точками.

тов при рассеянии импульсного излучения ансамблями холодных атомов. Основное внимание в ней уделяется теоретической интерпретации результатов экспериментов, описанных в работе [3] и посвященных рассеянию света ансамблями атомов Rb^{85} , охлажденными в МОЛ.

Анализ условий эксперимента, проведенный в параграфе 2.1, показал, что достигаемая температура ансамбля такова ($T \sim 100$ мКл), что естественная ширина атомных уровней γ существенно превышает доплеровский сдвиг и, следовательно, при проведении расчетов атомы можно считать неподвижными. Квазиизотропное воздействие охлаждающих лазеров (в процессе регистрации рассеянного света охлаждающие лазеры выключены) приводит к равномерному заселению по зеemanовским подуровням в атомах. Облако неоднородно, его пространственное распределение хорошо аппроксимируется сферически симметричной функцией Гаусса $n(r) = n_0 \exp(-r^2/2r_0^2)$, $r_0 = 0.1$ см. Максимальная плотность атомов $n_0 = 3.2 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$, число атомов в ловушке порядка 10^9 . При таких концентрациях средние расстояния между атомами значительно больше длины световой волны, что позволяет не учитывать зависимость рассеяния на парах близко расположенных атомов в облаке. Для облака гауссовой формы оптическая плотность для пути, проходящего через центр облака, определяются по формуле $b = \sqrt{2\pi}n_0\sigma_0r_0$ (σ_0 - сечение резонансного рассеяния) и равняется для таких значений параметров 10. Это означает необходимость учета многократных рассеяний. В конкретных расчетах мы варьировали концентрацию и размеры облака, рассматривая значения оптической толщины $b = 5 \div 10$.

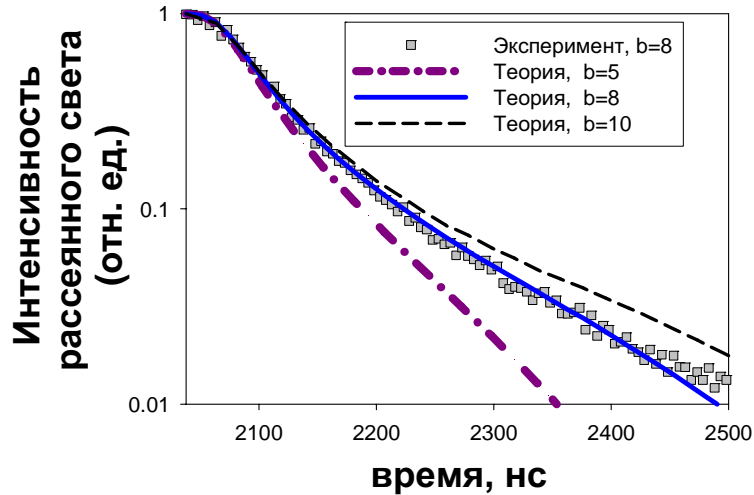


Рис. 2: Интенсивность рассеянного под углом 90^0 света после выключения импульса для различных оптических толщин. Поляризационный канал $L \parallel L$. Экспериментальные данные отмечены точками.

В параграфе 2.2 для описанных выше условий анализируется динамика рассеяния импульсного излучения с несущей частотой, резонансной атомному переходу (рис. 1). Исследованы переходные процессы при включении - выключении лазерного импульса, в частности, детально исследован процесс послесвечения атомного облака после выключения пробного излучения. Показано, что на больших временах динамика послесвечения определяется многократно рассеянными фотонами и хорошо аппроксимируется экспоненциальной кривой, при этом константа в показателе экспоненты зависит от оптической толщины атомного облака (рис. 2).

Исследован вклад различных порядков рассеяния в формировании сигнала флуоресценции. Проведено сравнение с результатами более простых подходов: скорость распада, полученная с помощью теории Бибермана-Холстейна, для рассматриваемого случая в полтора раза меньше в сравнении с результатами измерений и наших расчетов, что объясняется тем, что оптическая толщина $b = 8$ не является большой и использование теории Бибермана-Холстейна в этом случае возможно только для получения приближенных оценок.

Сигналы флуоресценции, наблюдаемые в двух поляризационных каналах, различны (рис. 2а). Интенсивность рассеянного света с линейной поляризацией, параллельной исходной I_{\parallel} , больше интенсивности рассеянного света с поляризацией, перпендикулярной исходной I_{\perp} . При описании экспериментов вводится относительная величина - степень линейной поляризации, определяемая соотношением $P = (I_{\parallel} - I_{\perp}) / (I_{\parallel} + I_{\perp})$.

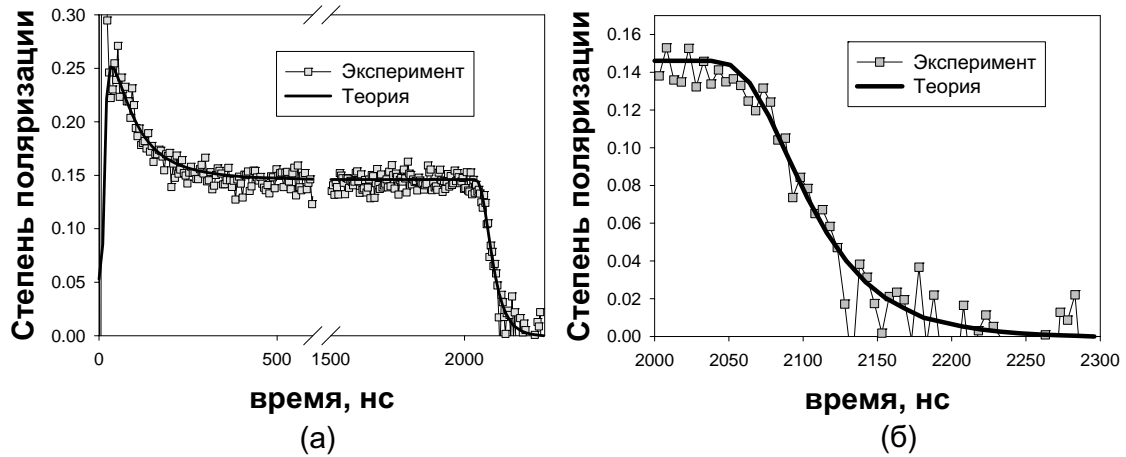


Рис. 3: Зависимость степени поляризации света, рассеянного под углом 90° от времени. Теоретические и экспериментальные данные для $b = 8$.

В разделе 2.3.1 исследована динамика степени поляризации при рассеянии импульсного излучения в условиях пленения (рис. 3). Показано, что степень поляризации не монотонна на начальном этапе, а после выключения пробного света падает значительно быстрее, чем интенсивность (рис. 3б). Такая зависимость объясняется пленением излучения в облаке, а также тем обстоятельством, что степень поляризации быстро уменьшается при увеличении кратности рассеяния. В разделе 2.3.2 показано, что величина стационарного значения степени поляризации зависит от несущей частоты импульса (рис. 4). Выявлено существенное влияние нерезонансных сверхтонких и зеемановских уровней атома Rb^{85} на величину стационарного значения степени поляризации. Исследована спектральная зависимость степени поляризации для различных оптических толщин. В области резонансной частоты имеется локальный минимум, при увеличении частоты падающего излучения в область положительных частотных отстроек степень поляризации возрастает, при уменьшении частоты от нуля в область отрицательных отстроек степень поляризации сначала возрастает, потом убывает. Показано, что для корректного описания данной зависимости требуется учет всей сверхтонкой и зеемановской структуры атома Rb^{85} , - при учете только резонансных переходов зависимость от частоты отсутствует.

Спектральная зависимость степени поляризации исследована для различных оптических толщин.

В параграфе 2.4 проведен анализ рассеяния импульсного излучения с нерезонансной несущей частотой. Показано, что на больших временах динамика послесвечения, также как и в случае резонансной несущей частоты,

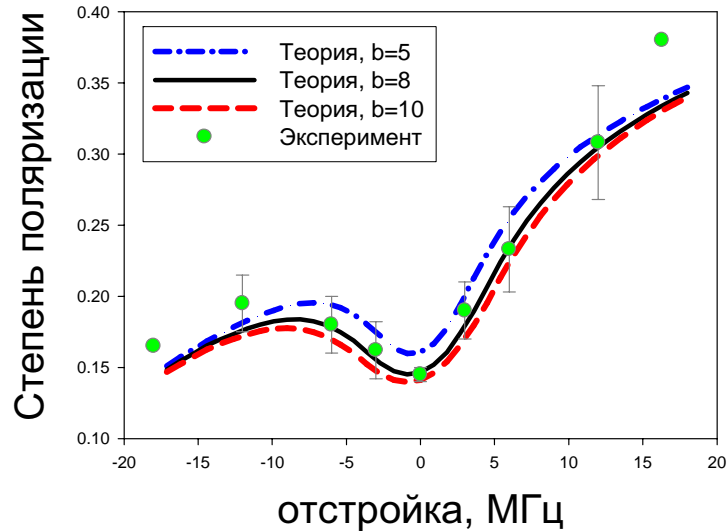


Рис. 4: Стационарное значение степени поляризации рассеянного света в зависимости от отстройки. Теоретические и экспериментальные результаты. Теоретические результаты для оптической толщины $b = 5$ получены с учетом 11 порядков по числу некогерентных рассеяний, для $b = 8$ с учетом 19, для $b = 10$ с учетом 22.

хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью, при этом константа в показателе экспоненты не зависит от отстройки падающего излучения. Такое поведение объясняется тем, что на больших временах динамика послесвечения определяется резонансными фотонами. Проведен учет влияния конечной спектральной ширины лазера и формы импульса на послесвечение атомного облака. Продемонстрировано, что данные факторы существенно влияют на величину интенсивности послесвечения атомного облака на больших временах.

В параграфе 2.5 данной главы исследовано влияние поперечных размеров лазерного луча на наблюдаемые величины. Лазерный луч, поперечные размеры которого в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, меньше размеров облака, будем называть узким, в отличие от широкого луча, перекрывающего своими поперечными размерами все атомное облако. В силу пространственной неоднородности атомного облака, узкий луч взаимодействует с атомами, средняя плотность которых больше средней плотности атомов для широкого луча. В данном параграфе рассмотрено влияние поперечных размеров лазерного луча на интенсивность рассеянного света и степень поляризации. Показано, что для случая поперечно узкого лазерного луча при рассеянии на малые углы интенсивность рассеянного света от времени на этапах включения и выключения импульса ведет себя не монотонно. Стационарное значение степени поляризации существенно за-

висит от направления наблюдения для узкого луча и почти не зависит для широкого.

Третья глава посвящена анализу рассеяния импульсного излучения ансамблями холодных атомов в условиях ЭИП.

Во введении и параграфе 3.1 дается постановка задачи и формулируются основные приближения. При проведении вычислений в этой и следующей главах рассматриваются атомы Rb^{87} . Предполагается также, что в ловушке остаются только атомы на сверхтонком подуровне $F = 1$ основного состояния, причем распределение по зеемановским подуровням равномерное. Рассеиваемое излучение считаем квазирезонансным переходу $F = 1 - F' = 1$ D_1 линии. Управляющее поле приложено на переходе $F = 2 - F' = 1$ и для определенности везде далее считается право циркулярно поляризованным. В качестве меры интенсивности управляющего поля используется величина частоты Раби. Значения частот Раби для трех зеемановских подуровней возбужденного состояния с $m' = -1, 0, 1$ различны и относятся как $\sqrt{6} : \sqrt{3} : 1$. В конкретных расчетах фиксируется Ω_e для $|e\rangle \equiv |J, F', M'\rangle = |1/2, 1, 0\rangle$ и соответствующий параметр обозначается Ω_c . Оптическая толщина в отсутствие управляющего поля b варьировалась в пределах $5 \div 50$.

В параграфе 3.2 анализируются свойства излучения, прошедшего сквозь атомный ансамбль, что в задаче рассеяния соответствует излучению, когерентно рассеянному вперед. Рассматривается узкий луч пробного света, такой, что в области его действия концентрация атомов в поперечном направлении меняется незначительно. Задача о распространении света в облаке атомов Rb^{87} в условиях ЭИП решается методом функций Грина. Для этого вычисляется тензор диэлектрической проницаемости облака, а затем решается уравнение для гриновских функций. Тензор диэлектрической проницаемости вычислен двумя способами - решением в первом исчезающем порядке по пробному полю уравнения для стационарной матрицы плотности и диаграммным методом. Оба расчета дали одинаковый результат.

На основе полученных аналитических выражений для запаздывающих функций Грина исследуются анизотропные свойства атомных ансамблей в условиях ЭИП - двулучепреломление и дихроизм. Показано, что спектральная зависимость амплитуды прошедшего света для право и лево поляризованного света различна. Для света левой циркулярной поляризации спектральная ширина области прозрачности больше, чем для света с правой циркулярной поляризацией. Это связано с тем, что лево и право поляризованный свет взаимодействует с разными зеемановскими подуровнями возбуж-

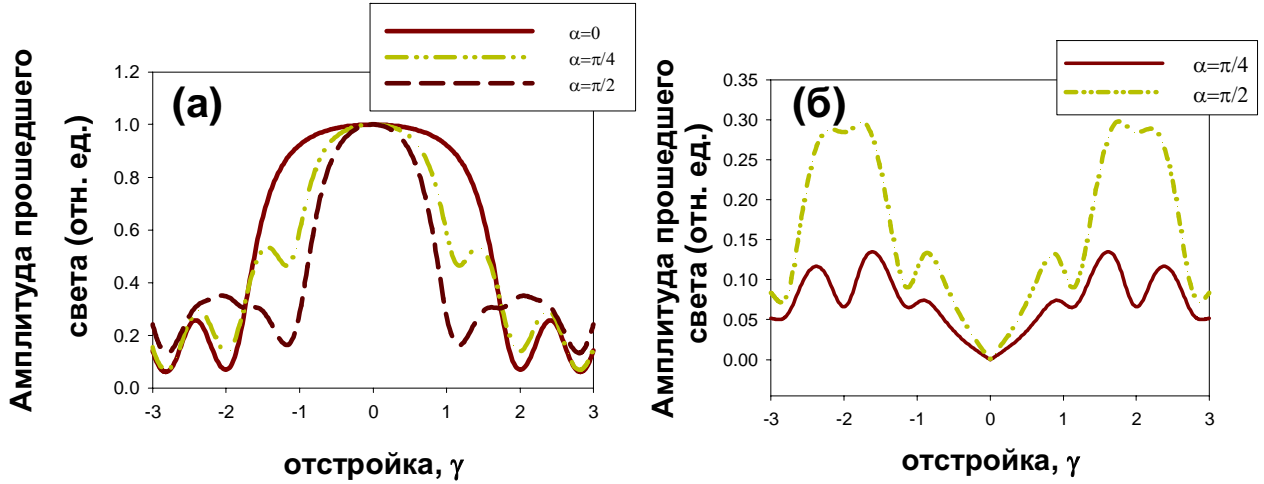


Рис. 5: Спектральная зависимость амплитуды прошедшего света от угла α между волновым вектором пробного поля и волновым вектором управляющего поля. (а) - В поляризационном канале $H^- \rightarrow H^-$, (б) - В поляризационном канале $H^- \rightarrow H^+$. H^+ соответствует правой спиральности, H^- - левой. $\Omega_c = 2\gamma$; $n_0 = 3.2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; $r_0 = 0.5 \text{ см}$.

денного состояния, которые по-разному возмущены управляющим полем. Спектры пропускания рассчитаны для различных значений частоты Раби управляющего поля. Показано, что с увеличением интенсивности управляющего поля наряду с уширением области прозрачности в спектральной зависимости амплитуды прошедшего света появляются области дополнительного просветления среды.

Проанализирована зависимость амплитуды прошедшего света от взаимной ориентации пробного и управляющего полей (рис. 5а). Обнаружено, что при угле между направлениями распространения пробного и управляющего полей, отличном от нуля, на выходе наблюдается и компонента света с поляризацией, ортогональной исходной (рис. 5б). Сложная спектральная структура для больших значений управляющего поля связана с расщеплением Аутлера-Таунса. Помимо стационарного случая проведен анализ прохождения импульсов пробного излучения сквозь облако атомов Rb^{87} . Показано, что групповая скорость зависит от поляризации падающего света и взаимной ориентации пробного и управляющего полей. Обнаружена существенная зависимость формы импульса на выходе из атомного облака от типа поляризационного канала. Исследованы особенности распространения импульсов с несущей частотой, попадающей в область аномальной дисперсии, и показано, что при определенном выборе параметров имеет место опережение максимума выходного импульса по сравнению с максимумом выходного импульса в отсутствие среды.

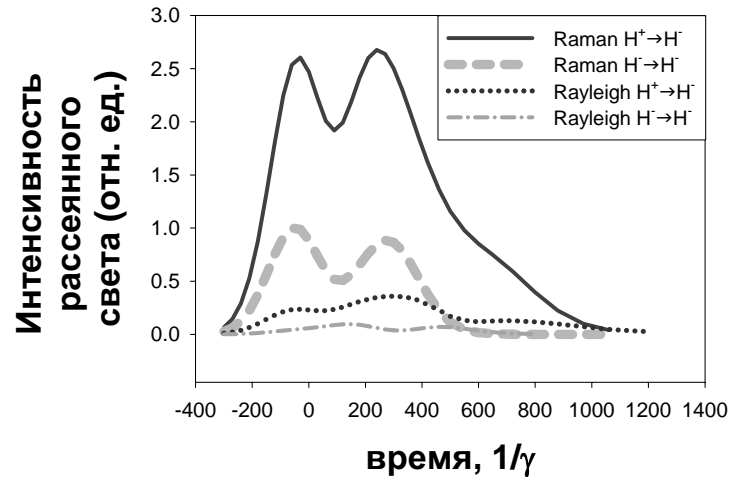


Рис. 6: Интенсивность рассеянного под углом 90^0 света в рамановском и рэлеевском каналах для различных поляризационных схем. $b = 50$. Символу *Raman* соответствует рассеяние в рамановском канале ($F = 1 \rightarrow F' = 1 \rightarrow F = 1$), символу *Rayleigh* в рэлеевском - ($F = 1 \rightarrow F' = 1 \rightarrow F = 2$). На выходе наблюдается свет с левосторонней спиральностью (H^-). Спиральность на входе левая или правая (H^- или H^+).

В параграфе 3.3 рассматривается некогерентное рассеяние, т.е. происходящее с изменением волнового вектора фотона в среде. Исследовано рассеяние в рамановском и рэлеевском каналах. Показано, что имеет место существенное искажение формы импульса рассеянного излучения по сравнению с формой падающего (рис. 6). Обусловленный эффектом ЭИП спектральный провал в сечении рассеяния света атомами приводит к эффекту биений во временной зависимости интенсивности рассеянного света.

Продемонстрировано, что задержка импульса по отношению к исходному сигналу зависит от поляризационного канала, угла наблюдения и интенсивности управляющего поля. Сама задержка связана с уменьшением групповой скорости импульса в среде. Рассмотрена зависимость интенсивности рассеянного света от интенсивности управляющего поля. Интенсивность рассеянного света тем меньше, чем сильнее управляющее поле. Это связано с уширением области прозрачности при увеличении управляющего поля. Исследована угловая зависимость рассеяния. Показано, что при наличии управляющего поля угловая зависимость интенсивности рассеянного света зависит от поляризации падающего света. Для левополяризованного света угловая зависимость рассеяния не монотонна в диапазоне углов от 0 до π , причем интенсивность света, рассеянного на угол $\pi/2$, меньше интенсивности света, рассеянного на большие и малые углы.

Четвертая глава посвящена анализу влияния управляющего поля на

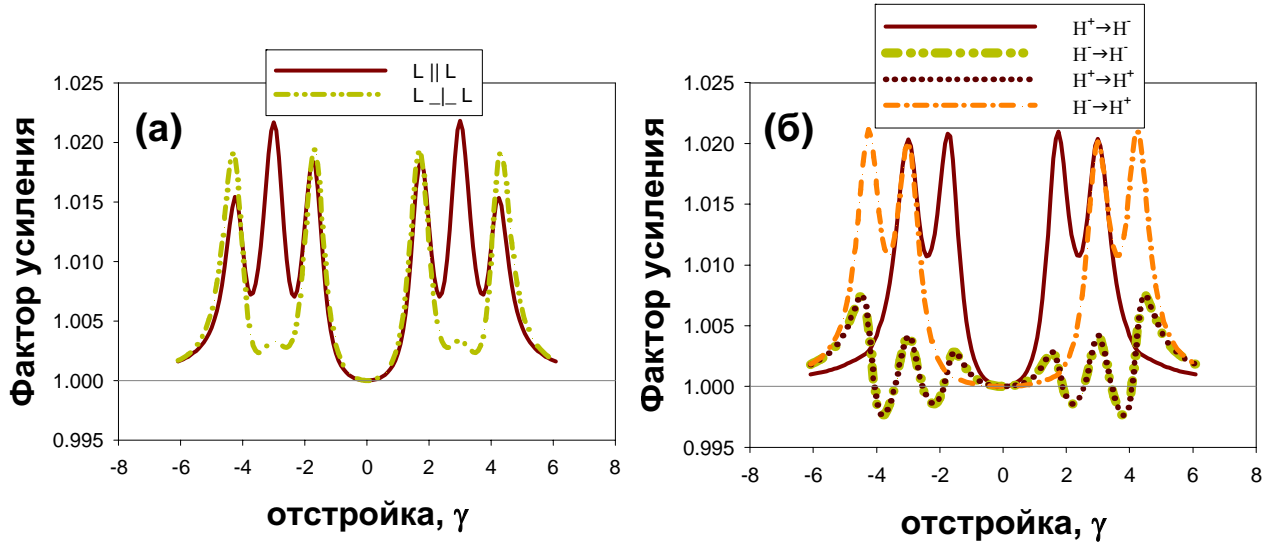


Рис. 7: Спектральные зависимости фактора усиления для различных поляризационных каналов. $\Omega_c = 3\gamma$. $n_0 = 3.2 \cdot 10^{10} \text{см}^{-3}$; $r_0 = 0.5 \text{ см}$.

интерференционные эффекты при рассеянии. Основной ее целью является рассмотрение явления КОР света облаком холодных атомов в условиях ЭИП. В данном разделе на основе общих соотношений, полученных в первой главе, рассчитывается интенсивность рассеянного назад света, ее интерференционная составляющая, а также фактор усиления, являющийся основной количественной характеристикой КОР. Фактор усиления вычисляется как отношение полной интенсивности рассеянного строго назад света к неинтерференционной составляющей. В данной главе проанализирована как зависимость полной интенсивности рассеянного назад света, так и фактора усиления (рис. 7) от частоты падающего для различных поляризационных каналов, различных интенсивностей управляющего поля и оптических толщин атомного облака. Выявлено существенное влияние управляющего поля на интерференционные эффекты. Продемонстрировано наличие провалов фактора усиления ниже единичного значения (рис. 7б), что показывает возможность деструктивной интерференции переходов между различными зеемановскими подуровнями возбужденного состояния.

Также проведен анализ динамики интерференционных эффектов: рассмотрена зависимость фактора усиления от времени при рассеянии импульсного излучения. Показано, что для оптической толщины порядка пяти фактор усиления отличен от нуля в небольшой временной области, много меньшей длительности импульса. Такая зависимость объясняется различным временным поведением неинтерференционной составляющей, определяемой

однократным некогерентным рассеянием и интерференционной составляющей, определяемой двукратным рассеянием. Для большей оптической толщины $b = 50$ динамика фактора усиления носит сложный немонотонный характер.

В **приложении А** приведены атомные функции Грина в отсутствие управляющего поля. В **приложении В** приведены фотонные функции Грина в отсутствие управляющего поля.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ.

1. Дацюк В. М., Матисов Б. Г., Соколов И. М. Подавление эффекта когерентного пленения населенностей при спонтанном распаде возбужденного состояния // Оптика и спектроскопия. – 2005. – Т. 98. – С. 181-187.
2. Дацюк В. М., Куприянов Д. В., Ларионов Н. В., Соколов И. М. Корреляционные и динамические эффекты при когерентном обратном рассеянии света оптически плотными ансамблями холодных атомов // Квант. электроника. – 2005. – Т. 35. – С. 693-697.
3. Alignment dynamics of slow light diffusion in ultracold atomic Rb85 / S. Balik, R. G. Olave, C. I. Sukenik, V. M. Datsyuk, I. M. Sokolov, D. V. Kupriyanov // Phys. Rev. A. – 2005. – Vol. 72. – Pp. 051402.1-051402.4
4. Дацюк В. М., Соколов И. М. Когерентное обратное рассеяние в условиях пленения импульсного излучения // ЖЭТФ. – 2006. – Т. 129. – С. 530-543.