ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Խաչատրյան Դավիթ Նիկոլայի

ՏԱՐԱԾԱԿԱՆ ԴԻՍՊԵՐՍԻԱՆ և ԿՈՀԵՐԵՆՏ ԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐՆ ԱԼԿԱԼԻ ՄԵՏԱՂՆԵՐԻ ԳՈԼՈՐՇԻՆԵՐՈՎ ՌԵԶՈՆԱՆՍԱՅԻՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ՏԱՐԱԾՄԱՆ ԸՆԹԱՑՔՈՒՄ

Ա.04.05 – «Օպտիկա» մասնագիտությամբ
Ֆիզիկա-մաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան – 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Хачатрян Давид Николаевич

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИСПЕРСИЯ И КОГЕРЕНТНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПАРАХ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.04.05 – “Оптика”

Ереван – 2019

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտում

Գիտական ղեկավար՝ ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր
Գ. Հ. Գրիգորյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Ա. Ժ. Մուրադյան
ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Գ. Գ. Դեմիրխանյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Երևանի պետական համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2019թ. հունիսի 29-ին ժամը 12.00-ին Երևանի պետական համալսարանում (0025, ք. Երևան, Ալեք Մանուկյան 1), ԲՈԿ-ի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի նիստում:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է մայիսի 17-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝
Ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ Վ. Պ. Քալանթարյան

Тема диссертации утверждена в Институте физических исследований НАН РА

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук
Г. Г. Григорян

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор
А. Ж. Мурадян
доктор физ.-мат. наук, профессор
Г. Г. Демирханян

Ведущая организация: Ереванский государственный университет

Защита диссертации состоится 29 июня 2019г. в 12.00 часов, в Ереванском государственном университете (0025, г. Ереван, ул. Алека Манукяна 1) на заседании специализированного совета ВАК Физика-049.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 17 мая 2019г.

Ученый секретарь специализированного совета:
Кандидат физ.-мат. наук, доцент В. П. Калантарян

Общая характеристика работы

Актуальность темы:

Исследование распространения резонансного излучения через пары щелочных металлов актуально как в фундаментальном плане, так и для практических применений. Относительно узкие спектральные линии в разряженных парах атомов, позволяют непосредственно изучать внутреннюю структуру атомов и взаимосвязанные процессы взаимодействия атом-поле и атом-атом. Среди наиболее интенсивно исследуемых процессов в парах щелочных металлов можно назвать параметрическое преобразование частоты излучения, лазерная генерация на парах щелочных металлов, фотоассоциация молекул, увеличение времени резонансного взаимодействия в присутствии буферного газа, сужение спектральных линий в плотных парах (сужение Дике), вращение плоскости поляризации (эффект Фарадея), изменение диаграммы направленности и степени поляризации света (Эффект Ханле), магнитооптика и возможность создания прецизионного оптического магнитометра, возможность расщепления атомных пучков и т.д. Создание наноячеек, в которых толщина атомного слоя составляет нанометры (т. е. меньше длины волны) открыло новые уникальные возможности для исследований взаимодействия резонансного излучения с парами щелочных металлов.

Микроскопическая теория резонансного взаимодействия электромагнитного излучения с атомами развита достаточно полно, однако при переходе к макроскопическим объемам возникает целый ряд вопросов, остающихся на сегодняшний день открытыми. Теория бинарных столкновений в первую очередь, это вопрос о пространственных масштабах, на которых могут реализовываться процессы, идущие на отдельных атомах, а также обмена энергией между импульсом и средой и между разными импульсами, одновременно распространяющимися в среде. Другим, не менее важным вопросом является однородное и неоднородное уширение спектральных линий. Однородное уширение спектральных линий в парах щелочных металлов обусловлено в основном межатомными столкновениями. В разряженных парах, в которых межатомными столкновениями можно пренебречь, доминирующим механизмом уширений является тепловое движение атомов. При этом наличие стенок ячейки, ограничивающих объем взаимодействия, с которыми сталкиваются движущиеся атомы, приводит к формированию переходных слоев с существенно неравновесными свойствами (пространственная дисперсия). Детальному исследованию этой задачи посвящена первая часть диссертационной работы.

Вторая часть диссертационной работы посвящена изучению когерентных процессов при распространении резонансного излучения в парах щелочных металлов. Исследования когерентных взаимодействий резонансного излучения с отдельными атомами и атомарными средами проводились с самого начала развития нелинейной оптики и лазерной физики с 60-х годов прошлого столетия. Однако в последние годы количество публикаций в этой области физики значительно возросло в связи с бурным развитием экспериментальной техники. Успешные эксперименты по распространению света со сверхмедленной скоростью и со скоростью, превышающей скорость света в вакууме, электромагнитно-индуцированной прозрачности, когерентному пленению атомных населённостей и возможностью когерентного контроля над состоянием атома, эффективному возбуждению ридберговских атомов получили широкое практическое применение в таких областях исследований, как лазерное охлаждение атомов, генерация без инверсии, новые прецизионные методы магнитометрии, когерентный контроль над химическими реакциями и т. д.

Теоретические модели, лежащие в основе всех этих процессов, в основном, ограничиваются моделью трехуровневой системы, однако использование многоуровневых систем может иметь ряд преимуществ по сравнению с трёхуровневыми. Теоретические исследования когерентных взаимодействий лазерного излучения с изолированными многоуровневыми системами, а также с многоуровневыми средами является актуальной задачей, так как открывает новые возможности и перспективы для применений в различных областях физики и смежных наук.

Целью работы является:

1. Исследование распространения резонансного излучения в интерферометре Фабри-Перо.
2. Изучение влияния пространственной дисперсии, обусловленной тепловым движением атомов, на электромагнитно-индуцированную прозрачность.
3. Исследование возможности эффективного возбуждения высоколежащих атомных уровней в пятиуровневом макроскопическом объёме.

Научная новизна работы:

1. Разработана самосогласованная теория селективного отражение и прохождение в парах щелочных металлов, заключённых в интерферометре Фабри-Перо.

2. Построена теория электромагнитно-индуцированной прозрачности в интерферометре Фабри-Перо, учитывающая тепловое движение атомов.
3. Разработан новый метод эффективного возбуждение высоколежащих уровней в макроскопическом объёме.

Практическая ценность работы:

Практическая ценность работы определяется ее актуальностью. Разработанные методы определения столкновительной ширины спектральной линии, плотности резонансного газа и дисперсионной кривой могут быть использованы для прецизионной диагностики газовых смесей. Эффективное возбуждение ридберговских состояний атомов и возможность когерентного контроля атомных состояний могут найти непосредственное применение во многих задачах квантовой информатики. Теоретические исследования электромагнитно-индуцированной прозрачности в условиях пространственной дисперсии могут быть использованы при планировании и интерпретации экспериментов в различных областях физики, таких как нелинейная оптика, спектроскопия, магнитометрия, охлаждение атомов и разделение изотопов.

Основные защищаемые положения:

1. Асимптотические решения самосогласованной задачи селективного отражения, хорошо согласующиеся с экспериментальными результатами и позволяющие с высокой степенью точности определять различные спектроскопические параметры.
2. Теория электромагнитно-индуцированной прозрачности в атомарных средах с пространственной дисперсией, обусловленной тепловым движением атомов.
3. Эффективный метод четырехфотонного возбуждения ридберговских состояний атомов в макроскопическом объеме пятиуровневой среды.

Апробация работы:

Полученные в диссертационной работе результаты докладывались на республиканских и международных конференциях – “Студенческая годичная научная конференция” РАУ (Ереван, Армения, 2015), “Optics & its applications, (OPTICS-2015)” (Yerevan-Ashtarak, Armenia, 2015), “Photonica 2017, VI International School and Conference on Photonics” (Belgrade, Serbia, 2017), “Laser Physics 2017” (Ashtarak, Armenia, 2017), “IONS Yerevan 2018” (Yerevan, Armenia, 2018), “International Workshop

on Optical Magnetometry” (Arzakan, Armenia, 2018), “Laser Physics 2018” (Ashtarak, Armenia, 2018), а также обсуждались на семинарах ИФИ НАН РА.

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах (из них две в международных журналах) и 7 тезисов докладов конференций.

Объем работы:

Содержание диссертации изложено на 101 страницах, включая 42 рисунка. Список литературы содержит 139 названий.

Краткое содержание диссертации:

Во **Введении** сформулированы актуальность работы, цели, научная новизна и практическая ценность работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** исследуется распространение резонансного излучения через кювету с плоскопараллельными окнами, заполненную парами щелочных металлов. В параграфе 1.1 приводится обзор литературы и формулируется постановка задачи. В параграфе 1.2 приведены известные формулы для однократного и многократного отражения при стационарном решении, необходимые для дальнейшего изложения материала.

В параграфе 1.3 рассмотрена простейшая двухуровневая модель. Поляризация среды определяется из нестационарного решения уравнений для матрицы плотности. При этом предполагается, что атомы теряют свою поляризацию после столкновения со стенками, отлетая от стенки в основном состоянии. Подобные граничные условия приводят к существенной зависимости линейной восприимчивости среды от координаты. Подставляя найденное выражение для поляризации среды в уравнение Максвелла, мы получаем интегро-дифференциальное уравнение. Полученное асимптотическое решение этого уравнения в области выходного окна позволяет, используя условия непрерывности полей в качестве граничных условий, определить коэффициенты отражения и прохождения. Тем самым мы определяем поле, выходящее из кюветы, и отраженное поле. Показано, что в среде распространяются две встречные волны, волновые вектора которых можно найти с помощью итерационной процедуры.

В параграфе 1.4 приводится сравнение между классическими и полученными формулами для отражения от интерферометра Фабри-Перо, наполненного парами щелочных металлов. По аналогии с классическими формулами введено понятие эффективного показателя преломления для селективного однократного отражения и

для многократного отражения от интерферометра Фабри-Перо. Вычислены спектры этих величин и показано, что мнимая часть эффективного показателя преломления в случае многократного отражения имеет лорентцовский профиль, а для однократного отражения спектральный профиль имеет красный сдвиг, обусловленный предположением, что все атомы после столкновения со стенкой теряют поляризацию.

В параграфе 1.5 построены и детально исследованы спектры однократного и многократного селективного отражения. Получен спектр селективного отражения для D_1 линии паров натурального рубидия, который хорошо согласуется с известными экспериментальными данными. Продемонстрирована зависимость спектров многократного отражения вблизи резонансной линии от оптической длины интерферометра Фабри-Перо, наполненного парами щелочных металлов (см. Рис. 1).

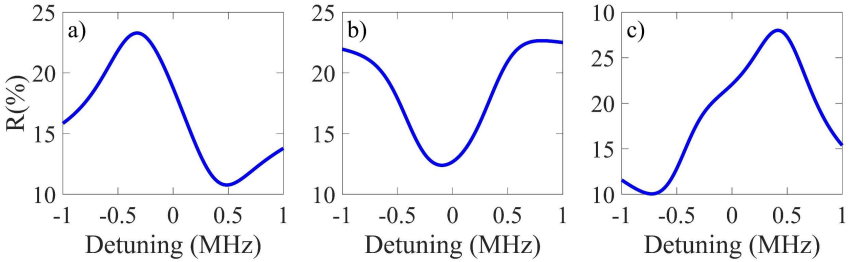

Рис. 1. Селективное отражение от ячеек с разными длинами среды. Графики a) - c) соответствуют следующим длинам кюветы: L = 0.2, 0.3, 0.65 (см). Плотность атомов равна $N = 10^{11}$ см$^{-3}$.

В параграфе 1.6 и 1.7 исследована D_2 спектральная линия рубидия, который являлся примесным газом в плотных парах цезия. Полученные экспериментальные и теоретические результаты для спектров отражения и прохождения хорошо согласуются друг с другом. По осцилляциям отраженного сигнала, возникающего в результате интерференции лучей, отраженных от переднего и заднего окон ячейки, при сканировании частоты лазера в достаточно широком диапазоне, охватывающем все переходы, был построен экспериментальный спектр группового показателя преломления. Данный спектр был сравнен с теоретической кривой, полученной с помощью эффективного показателя преломления интерферометра Фабри-Перо, и показано их хорошее взаимосогласие (см. Рис. 2). Продемонстрировано сильное увеличение группового показателя преломления вблизи всех резонансных переходов сверхтонкой структуры рубидия.

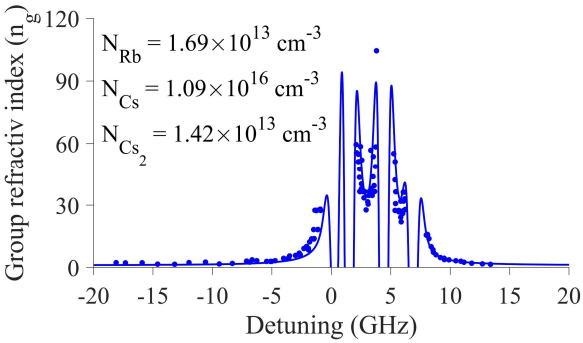

Рис. 2. Зависимость группового показателя преломления от частоты излучения, взятая из эксперимента (точки) и полученная из теории (сплошная линия) области D_2 линии атомов Rb. Нулевая расстройка частоты установлена на сверхтонком переходе $F_g = 2 \rightarrow F_e = 1$ атома ^{87}Rb.

В параграфе 1.8 обсуждается формирование в эксперименте волноводного режима распространения.

Заключение к главе 1 изложено в параграфе 1.9.

В **Главе 2** исследуется влияние пространственной дисперсии, обусловленной тепловым движением атомов в трехуровневой среде, заполняющей интерферометр Фабри-Перо при взаимодействии с двумя лазерными импульсами, действующими на смежных переходах. Вычислены коэффициенты отражения и прохождения, которые, как правило, измеряются в экспериментах.

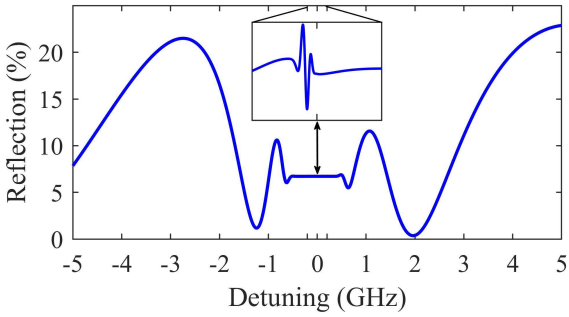

Рис. 3. Спектр отражения от резонатора Фабри-Перо при электромагнитно-индуцированной прозрачности. В вставке увеличенная область вблизи резонанса от значений –0.2 МГц до 0.2 МГц. Параметры: поперечная релаксация $\Gamma_1 = 20$ МГц, скорость распадов нижних подуровней $\gamma_c = 10^{-3}$ МГц, плотность атомов $N = 10^{12}$ см$^{-3}$, частота Раби $\Omega_c = 3\cdot10^{-2}$ МГц, длина кюветы $L = 1$ см.

В параграфе 2.1 приводится краткий обзор литературы с обсуждением известных результатов по теме электромагнитно-индуцированной прозрачности. В параграфе 2.2

приведены не стационарные уравнения матрицы плотности и дана оценка при которой можно перейти к стационарному режиму.

В параграфе 2.3 в линейном приближении по пробному полю получено нестационарное решение уравнений для матрицы плотности и определена поляризация среды, существенно зависящая от пространственной координаты. В параграфе 2.4 из уравнений Максвелла с помощью итерационной процедуры построено асимптотическое решение для поля вблизи выходного окна.

В параграфе 2.5 проанализировано поведение эффективного показателя преломления среды с пространственной дисперсией. Показано смещение частоты от точного резонанса, обусловленное тепловым движением атомов как в красную, так и синюю сторону в зависимости от взаимной конфигурации полей.

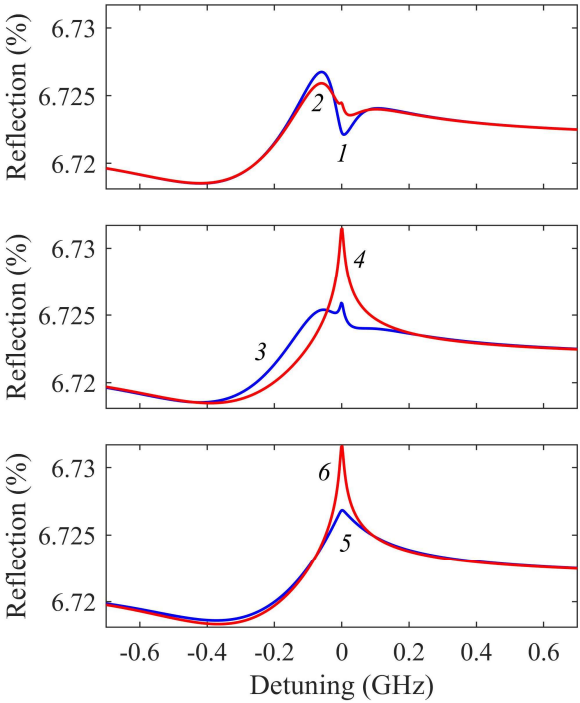

Рис. 4. Однократное отражение при электромагнитно-индуцированной прозрачности для разных значений γ_c. Кривые 1-4 соответствуют графикам при неколлинеарном распространении полей, а кривые 5 и 6 соответствуют графикам при коллинеарном распространении полей. Значения для γ_c:
1. – $\gamma_c = 10^{-3}$ МГц,
2. – $\gamma_c = 5\cdot10^{-3}$ МГц,
3. – $\gamma_c = 9\cdot10^{-3}$ МГц,
4. – $\gamma_c = 0.1$ МГц,
5. – $\gamma_c = 10^{-3}$ МГц,
6. – $\gamma_c = 0.1$ МГц.
Остальные параметры те же что на Рис. 3.

В параграфе 2.6 проанализированы спектры отражения в режимах встречного и коллинеарного распространения пробного и управляющего полей. Показано, что дисперсионные свойства среды с электромагнитно-индуцированной прозрачностью хорошо проявляются в спектрах однократного отражения при режиме встречных

полей. Получены графики многократного отражения, в которых продемонстрировано формирование окна прозрачности (Рис. 3).

Показана сильная зависимость спектров селективного отражения от оптической длины кюветы и от параметра γ_c, характеризующего скорость разрушения когерентности нижних подуровней (см. Рис. 4). Продемонстрированная чувствительность спектров к оптической длине может найти практическое применение для детектирования примесей в газовых смесях.

В параграфе 2.7 получены спектры прохождения в случае как коллинеарного распространения пробного и управляющего полей, так и встречного. Показано, что в отличии от спектров отражения, в случае встречного распространения полей, электромагнитно-индуцированная прозрачность подавляется из-за теплового движения атомов. Проанализирована зависимость спектров прохождения от величины частоты Раби и от скорости распада когерентности, наводимой на нижних подуровнях. Показано смещение спектров прохождения в синюю сторону от точного резонанса.

Заключение к главе 2 изложено в параграфе 2.8.

В **Главе 3** разработан метод эффективного четырехфотонного возбуждения высоколежащих уровней в макроскопическом объёме. С учётом первой неадиабатической поправки рассмотрено распространение четырёх лазерных импульсов в среде, состоящей из пятиуровневых атомов лестничного типа.

В параграфе 3.1 приводится обзор литературы по когерентным взаимодействиям коротких импульсов с резонансными средами и по методам возбуждения ридберговских состояний и формулируется постановка задачи.

В параграфе 3.2 выведены уравнения распространения в условиях, когда во всем объёме среды формируется собственное состояние гамильтониана взаимодействия, имитирующее трёхуровневую систему. Условия формирования такого состояния на одном атоме, требуют равенства нулю всех трёх двухфотонных резонансов, но больших однофотонных расстроек (для наносекундных импульсов однофотонные расстройки должны быть больше 10 ГГц). При распространении в среде это приводит к ограничениям на длину среды, определяемым условием, имеющим наглядный физический смысл: для эффективного возбуждения атомов на пятый уровень число атомов должно быть меньше, чем число фотонов во втором импульсе.

В параграфе 3.3 получено аналитическое решение уравнений распространения для всех лазерных импульсов. В линейном приближение по интенсивности второго импульса определены групповые скорости распространения импульсов, определена длина распространения x_0, при которой групповая задержка между импульсами становится порядка их длительности, что приводит к прекращению четырехфотонного взаимодействия. В общем случае произвольных интенсивностей нелинейные групповые скорости приводят не только к групповым задержкам, но и к существенному

искажению формы импульсов и перераспределению плотности потока фотонов между ними (см. Рис. 5).

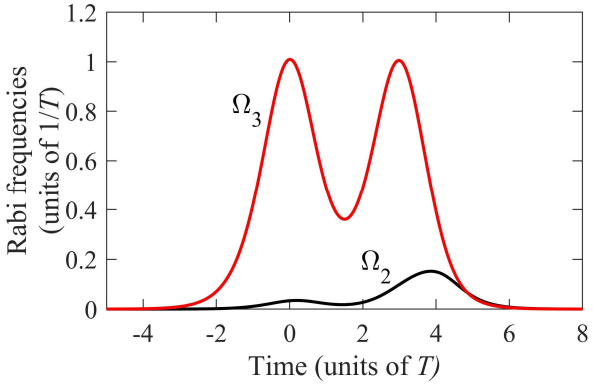

Рис. 5. Временная эволюция нормированных частот Раби импульсов Ω_2 и Ω_3 на длине прохождения x_0 в случае равных сил осцилляторов $q_2 = q_3 = q$. Здесь T – наименьшая из длительностей импульсов.

В параграфе 3.4 продемонстрирована возможность полного переноса населённости с первого атомного уровня на пятый. Преимущество предлагаемого в этой работе метода возбуждения ридберговских состояний по сравнению с традиционным методом STIRAP (вынужденный адиабатический перенос населенностей) заключается в том, что в течение всего времени взаимодействия населённость промежуточного третьего уровня остаётся равной нулю. Поскольку времена жизни четвёртого и пятого уровней достаточно большие, реальные потери в среде будут обусловлены только релаксационными потерями со второго уровня. Однако при однофотонной расстройке в 10 ГГц эти потери также пренебрежимо малы. Показано, что полное инвертирование системы возможно, когда число атомов в среде не превосходит число фотонов во втором импульсе.

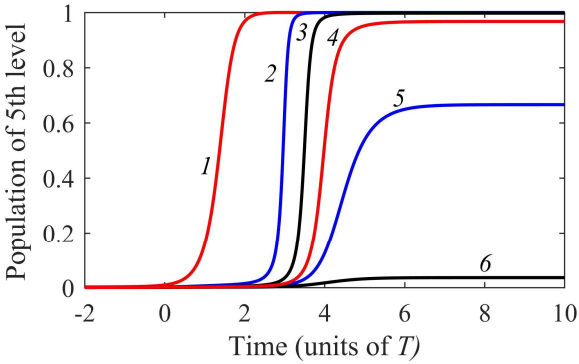

Рис. 6. Динамика населённости пятого уровня при различных длинах прохождения:
1 – $x/x_0 = 0$, 2 – $x/x_0 = 1$, 3 – $x/x_0 = 1.5$, 4 – $x/x_0 = 1.8$, 5 – $x/x_0 = 2$ и 6 – $x/x_0 = 2.5$.

Проанализирована эффективность переноса населённостей в зависимости от отношения сил осцилляторов на смежных переходах. Показано, что критическая длина

среды x_0, на которой прекращается взаимодействие (область перекрытия импульсов обращается в нуль) тем больше, чем меньше отношение сил осцилляторов на втором и третьем переходах q_2 / q_3. Получена динамика заселения населённости пятого уровня при различных длинах прохождения (см. Рис. 6).

Заключение к главе 3 изложено в параграфе 3.5, где приводится схема уровней паров атома Cs, для переходов $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 7S_{1/2} \rightarrow 8P_{1/2} \rightarrow 52D_{3/2}$, как пример, где можно осуществить предлагаемую схему эффективного четырехфотонного возбуждения высоколежащих уровней в макроскопическом объёме.

В **Заключении** приводятся основные результаты, полученные в работе.

Основные результаты, полученные в работе и определяющие ее научную новизну и практическую ценность, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Разработана самосогласованная теоретическая модель для распространения резонансного излучения в интерферометре Фабри-Перо. Построено асимптотическое решение, справедливое в переходных слоях с сильной дисперсией вблизи окон ячейки. Разработана численная программа для итерационной процедуры, позволяющая с необходимой степенью точности вычислять спектры отражения и прохождения. Получены частотные зависимости линейных комплексных показателей преломления для встречных волн, распространяющихся в интерферометре Фабри-Перо. А также, получен спектр эффективного показателя преломления для резонансной среды. Теоретические расчеты использованы при исследовании распространения излучения, резонансной D_2 линии рубидия, являющегося примесным газом в ячейке с плотными парами цезия. Полученная высокая точность совпадения расчетных и экспериментальных кривых позволила определить плотность примесных паров рубидия, а также столкновительную ширину атомов рубидия с цезием.

Показано сильное увеличение группового показателя преломления при сканировании частоты лазера вблизи резонансов тонкой структуры D_2 линии рубидия. Предложен метод построения дисперсионной кривой для сверхтонкой структуры D_2 линии примесного рубидия в плотных парах буферного газа, находящихся в интерферометре Фабри-Перо.

2. Проанализировано влияние теплового движения атомов щелочных металлов, находящихся в кювете с плоскопараллельными окнами, на формирование электромагнитно-индуцированной прозрачности в Λ-системе. Получено аналитическое нестационарное решение уравнений для матрицы плотности, учитывающее наличие стенок кюветы. Построено асимптотическое решение

уравнений Максвелла, позволяющее получить коэффициенты отражения и прохождения для пробного поля. Численно исследованы спектры однократного и многократного отражения, а также спектры прохождения при различных оптических длинах и при различных параметрах взаимодействия. Показано, что в спектрах прохождения электромагнитно-индуцированная прозрачность сильно подавляется при встречном распространении волн из-за доплеровского уширения, однако хорошо проявляется при коллинеарном распространении. В спектрах отражения наблюдается противоположная картина, электромагнитно-индуцированная прозрачность ярче выражена при неколлинеарном распространении волн. Проанализирована зависимость спектров от величины частоты Раби управляющего поля, от скорости разрушения когерентности, наводимой между нижними подуровнями Λ-системы и от оптической длины прохождения. Продемонстрированы смещения от резонанса как в красную, так и в синюю сторону в зависимости от конфигурации полей.

3. Исследовано распространение четырех лазерных импульсов в пятиуровневой системе лестничного типа в случае произвольных интенсивностей и разных сил осцилляторов, когда во всем объеме среды формируется одно из собственных состояний гамильтониана взаимодействия. С учётом первой неадиабатической поправки выведены уравнения распространения. Получено аналитическое решение этих уравнений и обобщенный критерий адиабатичности взаимодействия в пятиуровневой среде. Проанализирована динамика распространения импульсов, показано, что второй и третий импульсы испытывают значительную деформацию по мере распространения. Получены условия эффективного возбуждения пятого уровня в макроскопическом объеме, оценена величина этого объема в зависимости от параметров взаимодействия. Проанализировано влияние отношения сил осцилляторов на смежных переходах на процесс переноса населенностей. Показано, что эффективный перенос населённости с первого уровня на пятый осуществляется на длине прохождения, определяемой отношением плотности потока фотонов во втором импульсе, проинтегрированному по всему времени взаимодействия, к эффективному числу атомов.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. A. Papoyan, S. Shmavonyan, D. Khachatryan, G. Grigoryan, “Straightforward retrieval of dispersion in a dense atomic vapor helped by buffer gas-assisted radiation channeling”, JOSA B, 34, № 4, pp. 877-883 (2017).
2. D. Khachatryan, “The theory of selective reflection for a Fabry–Perot interferometer”, Opt. Commun., 436, pp. 76-81 (2019).
3. Д. Н. Хачатрян, Г. Г. Григорян, “Селективное отражение в интерферометре Фабри-Перо в условиях электромагнитно-индуцированной прозрачности”, Известия НАН Армении, Физика 54, № 2, ст. 185-197 (2019).
4. Э. А. Газазян, Г. Г. Григорян, Д. Н. Хачатрян, “Четырехфотонное адиабатическое возбуждение ридберговских состояний”, Известия НАН Армении, Физика, 53, № 4, ст. 391-401 (2018).
5. D. Khachatryan, G. Grigoryan, “Selective reflection of a resonant vapor in the cell with plane-parallel windows”, Book of abstracts “Optics & its applications (OPTICS-2015)”, p. 95, Yerevan-Ashtarak, Armenia (2015).
6. A. Papoyan, S. Shmavonyan, D. Khachatryan and G. Grigoryan, “Retrieval of group refractive index in a dense atomic vapor helped by buffer gas-assisted radiation channeling”, Book of abstracts “Photonica 2017, VI International School and Conference on Photonics”, p. 161, Belgrade, Serbia (2017); Book of abstracts “EGAS49”, p. 143, Durham University, UK (2017).
7. G. G. Grigoryan, E. A. Gazazyan, D. Khachatryan, “Influence of different oscillator strength on coherent process in five-level media”, Book of abstracts “Laser Physics 2017”, pp. 53-54, Ashtarak, Armenia (2017).
8. A. Papoyan, S. Shmavonyan, D. Khachatryan, G. Grigoryan, “The selective reflection spectra of Rb vapors and retrieval of group refractive index”, Book of abstracts “Laser Physics 2017”, pp. 17-18, Ashtarak, Armenia (2017).
9. D. Khachatryan, G. Grigoryan, “Theory of selective reflection spectroscopy in a cell with parallel windows”, Book of abstracts “Laser Physics 2017”, pp. 58-59, Ashtarak, Armenia (2017).
10. D. Khachatryan, “Selective reflection from the dilute Fabry-Perot interferometer”, Book of abstracts “IONS Yerevan 2018”, p. 18, Yerevan, Armenia (2018).
11. D. Khachatryan “Self-consisting theory of selective reflection for a dilute Fabry-Perot interferometer”, Book of abstracts “Laser Physics 2018”, pp. 14-15, Ashtarak, Armenia (2018).

Ամփոփագիր

Աշխատանքի նպատակներն են.

1. Ուսումնասիրել ռեզոնանսային ճառագայթման տարածումը Ֆաբրի-Պերո ինտերֆերոմետրում:
2. Հետազոտել ատոմների ջերմային շարժումով պայմանավորված տարածական դիսպերսիայի ազդեցությունը էլեկտրամագնիսականորեն մակածված թափանցիկության վրա:
3. Ուսումնասիրել մակրոսկոպիկ ծավալում ատոմական բարձր էներգետիկ մակարդակների արդյունավետ գրգռման հնարավորությունները:

Մշակվել է Ֆաբրի-Պերո ինտերֆերոմետրում ռեզոնանսային ճառագայթման տարածման համար ինքնահամաձայնեցված տեսական մոդել: Ալկալիական մետաղական գոլորշիներով լցված բջջի պատուհանների մոտ գտնվող ուժեղ տարածական դիսպերսիայով անցումային շերտերի համար ստացվել է լազերային դաշտի համար ասիմպտոտային լուծում: Մշակվել է իտերացիոն պրոցեդուրայի համար թվային ծրագիր, որը թույլ է տալիս անհրաժեշտ ճշտությամբ ստանալ անդրադարձման և անցման սպեկտրները: Ստացվել են Ֆաբրի-Պերո ինտերֆերոմետրում տարածվող հակադիր ալիքների համար գծային կոմպլեքս բեկման ցուցիչների սեկտրները: Ինչպես նաև, ստացվել է ռեզոնանսային միջավայրի էֆֆեկտիվ բեկման ցուցչի սպեկտրը: Տեսական հաշվարկները օգտագործվել են նոսր Rb և մեծ խտությամբ բուֆերային Cs ատոմական գոլորշիների խառնուրդի միջով Rb-ի D_2 սպեկտրային գծին ռեզոնանսային դաշտի տարածումը ուսումնասիրելիս: Տեսական և փորձարարական կորերի միջև ստացված լավ համաձայնությունը թույլ է տվել ստանալ խառնուրդային Rb ատոմների խտությունը, Rb և Cs ատոմների բախումներով պայմանավորված սպեկտրային լայնացումը:

Ցույց է տրվել խմբային բեկման ցուցչի զգալի մեծացում, երբ լազերային հաճախության սկանավորումը մոտենում է Rb-ի ատոմների D_2 սպեկտրային գծի նորբ կառուցվածքի ռեզոնանսներին: Առաջարկվել է մեծ խտությամբ բուֆերային գոլորշիներով շրջապատված խառնուրդային Rb գազի D_2 գծի գերնուրբ կառուցվածքի համար խմբային բեկման ցուցչի սպեկտրի կառուցման մեթոդ:

Հետազոտվել է հարթ զուգահեռ պատուհաններով բջջում գտնվող ատոմների ջերմային շարժման ազդեցությունը Λ-համակարգում էլեկտրամագնիսականորեն մակածված թափանցիկության ձևավորման վրա: Ստացվել է բջջի սահմանների առկայությունը հաշվի առնող խտության մատրիցայի հավասարումների ոչ ստացիոնար անալիտիկ լուծում: Ստացվել է Մաքսվելի հավասարումների

ասիմպտոտային լուծումը, որը թույլ է տալիս “փորձնական” դաշտի ("probe" field) համար գտնել անդրադարձման և անցման գործակիցները: Թվային հաշվարկների շնորհիվ ստացվել են եզակի և բազմակի անդրադարձման սպեկտրներ, ինչպես նաև, անցման սպեկտրներ՝ տարբեր օպտիկական երկարությունների և տարբեր փոխազդեցության պարամետրերի դեպքում: Ցույց է տրվել, որ անցման սպեկտրներում էլեկտրամագնիսականորեն մակածված թափանցիկությունը համուղղված դաշտերի դեպքում լավ արտահայտված է ի հակադրություն հակադիր դաշտերի դեպքի, երբ էլեկտրամագնիսականորեն մակածված թափանցիկությունը դոպլերյան լայնացման պատճառով գործնականորեն չի երևում: Անդրադարձման սպեկտրներում դիտվել է հակառակ պատկերը. էլեկտրամագնիսականորեն մակածված թափանցիկությունը լավ արտահայտված է հակադիր դաշտերի դեպքում: Հետազոտվել է սպեկտրների կախվածությունը անցման օպտիկական երկարությունից, “ղեկավորող” դաշտի ("control" field) Ռաբի հաճախությունից և Λ-համակարգի ստորին մակարդակների միջև կոհերենտության մարման արագությունից: Ցույց է տրվել, որ ռեզոնանսային հաճախությունը դաշտերի դասավորությունից կախված ստանում է կապույտ կամ կարմիր շեղում:

Ուսումնասիրվել է հինգ մակարդականի աստիճանային տիպի համակարգում կամայական ինտենսիվությամբ և տարբեր օսցիլատորային ուժերի դեպքում չորս լազերային իմպուլսների տարածումը, երբ միջավայրի ամբողջ ծավալում իրացվում է փոխազդեցության Համիլտոնյանի սեփական արժեքներից մեկը: Հաշվի առնելով առաջին ոչ ադիաբատիկ ուղղումը՝ դուրս են բերվել տարածման հավասարումները: Ստացվել է այդ հավասարումների անալիտիկ լուծումը և հինգ մակարդականի համակարգում փոխազդեցության ադիաբատիկության ընդհանրացված չափանիշը: Ուսումնասիրվել է տարածվող իմպուլսների դինամիկան և ցույց է տրվել, որ երկրորդ ու երրորդ իմպուլսները տարածվելիս զգալիորեն դեֆորմացվում են: Ստացվել են մակրոսկոպիկ ծավալում հինգերորդ էներգետիկ մակարդակի արդյունավետ գրգռման պայմանները: Գնահատվել է փոխազդեցության պարամետրերի կախվածությամբ այդ ծավալի մեծությունը: Հետազոտվել է հարևան անցումների վրա օսցիլատորների ուժերի հարաբերության ազդեցությունը բնակեցվածության տեղափոխման պրոցեսի վրա: Ցույց է տրվել, որ առաջին էներգետիկ մակարդակից հինգերորդ մակարդակ արդյունավետ բնակեցվածության տեղափոխումը տեղի է ունենում մինչև որոշակի անցման երկարություն, որը որոշվում է երկրորդ իմպուլսի՝ փոխազդեցության ամբողջ ժամանակով ինտեգրված ֆոտոնային հոսքի և փոխազդող ատոմների քանակի հարաբերությամբ:

SPATIAL DISPERSION AND COHERENT PROCESSES WHEN RESONANCE RADIATION PROPAGATES THROUGH ALKALI METAL VAPORS

Davit Nikolay Khachatryan

Summary

The objectives of the article are:

1. To study propagation of the resonance radiation in the Fabry-Perot interferometer.
2. To investigate the influence of spatial dispersion caused by thermal motion of atoms on electromagnetically induced transparency.
3. To study the possibilities of effective excitation of high energetic levels in five-level macroscopic volume.

We obtained a self-consistent theoretical model for propagation of resonance radiation in Fabry-Perot interferometer. Asymptotic solution was obtained for transitional layers with strong spatial dispersion near the windows of the vapor cell. We developed a numerical program for the iteration procedure, which allows to calculate the reflection and transmission spectra with the required degree of accuracy. The spectra of linear complex refractive indices for counterpropagating waves in a Fabry-Perot interferometer are obtained. Also, we obtained the spectrum of the effective refractive index for the resonant medium. The theoretical calculations were used to study the propagation of radiation, which is resonant to the D_2 line of residual Rb atomic vapor strongly buffered by Cs vapor. The obtained good agreement between theoretical and experimental curves made it possible to determine the density of residual rubidium vapors, as well as the broadening caused by Rb-Cs atomic collisions.

We demonstrated a strong enhancement of group refractive index near the resonances of the fine structure of Rb D_2 line. A method was proposed for obtaining the spectrum of group refractive index for the hyperfine structure of D_2 line of Rb atoms, buffered by a high-density vapor filled in a Fabry-Perot cavity.

We studied the influence of the thermal motion of alkali metal atoms in a cell with plane-parallel windows on the formation of electromagnetic-induced transparency in the Λ-system. An analytical non-stationary solution of the density matrix equations was obtained, taking into account the presence of the walls of the cell. An asymptotic solution of Maxwell's equations was obtained, which allows to obtain the reflection and transmission coefficients for the probe field. We numerically studied the spectra of single and multiple reflection, as well as the transmission spectra at different optical lengths and at different interaction parameters. It is shown that in the transmission spectra the electromagnetically induced transparency is

strongly suppressed when the waves are counter-propagating to each other due to Doppler broadening, however, it is well manifested in the collinear propagation. The opposite behavior is observed in the reflection spectra, i.e. the electromagnetically induced transparency is more pronounced with non-collinear wave propagation. We analyzed the dependences of the spectra on the optical transmission length, on the control field's Rabi frequency and on the dephasing rate induced between the lower sublevels of the Λ-system. Depending on the field configuration we observed redshift or blueshift of resonance line.

The propagation of four laser pulses in a five-level ladder-type system is investigated in the case of arbitrary intensities and different oscillator strengths, when one of the eigenstates of the interaction Hamiltonian is formed throughout the medium. Taking into account the first non-adiabatic correction, the propagation equations are derived. We obtained an analytical solution of these equations and a generalized criterion for adiabatic interaction in a five-level medium. The dynamics of the propagation of pulses are analyzed, and it is shown that second and third pulses experience significant deformation as they propagate. The conditions for the effective excitation of the fifth level in a macroscopic volume are obtained. That volume was estimated with dependences on the interaction parameters. We analyzed the influence of the relation of oscillator strengths of adjacent transitions on the process of population transfer. It is shown that the effective transfer of the population from the first level to the fifth level is carried out along though the transmission length, determined by the ratio of the photon flux density in the second pulse, integrated over the entire interaction time, to the effective number of atoms.