На правах рукописи

Sta

Гордеев Максим Юрьевич

РАССЕЯНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РЕШЕТКАХ АТОМНОЙ ПЛОТНОСТИ

Специальность 01.04.05 – Оптика (физико-математические науки)

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, Рождественский Юрий Владимирович
Официальные оппоненты:	Венедиктов Владимир Юрьевич доктор физико-математических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)», главный научный сотрудник кафедры лазерных измерительных и навигационных систем
	Вергелес Сергей Сергеевич кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук, научный сотрудник
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук

Защита состоится «23» сентября 2019 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 999.022.02 при АО «ГОИ им. С.И. Вавилова», АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова» по адресу: 199053, Санкт-Петербург, Кадетская линия В.О., дом 5, корпус 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» по адресу: 199053, Санкт-Петербург, Кадетская линия, д.5, корп.2 и на сайте <u>http://www.npkgoi.ru</u>

Автореферат разослан «_____» ____ 2019 года.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 999.022.02, кандидат физико-математических наук Журенков А.Г.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Актуальность работы заключается в возможности локализации атомов в одном из внутренних состояний на масштабах δx , значительно меньших длины волны оптического излучения $\lambda \Box \delta$. Как известно, существует ограничение на область локализации атома, которая не может согласно неопределенности Гейзенберга превышать половины длины детектирующего фотона (микроскоп Гейзенберга). волны Однако пространственная локализация населенностей атома позволяет достигнуть точности в несколько нанометров, благодаря тому, что происходит локализация не атома в целом, а лишь внутренних состояний атомов. В результате становится возможным как определение положений отдельных атомов, так и проведение различных измерений на основе поглощающих световых масок.

В задаче когерентного контроля состояния среды под действием оптического излучения ключевой проблемой является создание стационарных пространственно-зависимых распределений интенсивности стоячих волн, которые задают состояния атомов, помещенных в область взаимодействия с электромагнитным полем. Фактически задача сводится к созданию нужной световой маски стоячими волнами и введению атомов в область взаимодействия. В результате создается пространственно-зависимая структура атомов С заданными состояниями, то есть происходит пространственная локализация населенностей атомов. Отметим, что не принципиален способ задания такой световой маски и профиль интенсивности поля стоячих волн. В нашем случае инертность, т.е. быстрота отклика на воздействие, составляет время оптической накачки, а минимальный размер «зерна», т.е. минимальный размер области, который может быть отражен таким «экраном», составляет порядка 2 нм. При этом возможность получения такого разрешения непосредственно связана со значениями скоростей атомов и может быть реализована на атомных ансамблях, охлажденных до температуры энергии отдачи.

стороны, актуальной проблема С другой является быстрого пространственного переключения света для многих оптических задач, одной из которых является создание компактного оптического роутера или свитчера. Основными свойствами таких устройств является существенная компактность порядка нескольких сантиметров и высокая эффективность перераспределения интенсивности поля в максимумы первого порядка. В работе представлена возможная схема создания такого устройства, удовлетворяющего требованиям эффективности перераспределения оптического компактности и высокой излучения пробной волны.

Основой для создания такого устройства является эффект перераспределения интенсивности оптического излучения на электромагнитно индуцированных решетках. Рассеяние электромагнитного излучения на электромагнитно индуцированной решетке представляет собой оптическое явление интерференции, где интерференционная картина используется для построения пространственной «дифракционной структуры» в материи. Другими словами, поле изменяет равновесное распределение населенностей в атомах, оно становится пространственно-зависимым, и пробное поле «дифрагирует» на этой решетке населенностей. Таким образом становится возможным одновременное обеспечение как компактности и быстродействия, так и высокой эффективности перераспределения интенсивности пробного поля.

Основой решения как задачи пространственной локализации пространственного населенностей, перераспределения так задачи И интенсивности оптического излучения являются световые маски. С одной пространственную стороны, ОНИ ПОЗВОЛЯЮТ создать структуру атомов, населенности которых локализуются соответственно профилю интенсивности оптических полей, с другой стороны, возможно задание таких параметров среды, как коэффициенты преломление и поглощения, что дает возможность получения дифракционных картин при прохождении оптическим излучением среды, модулированной световой маской.

Цель работы заключается В обобщение получения метода пространственной локализации населенностей на примере классической трехуровневой Λ – схемы в одномерном случае, изучение увеличения эффективности пространственной локализации населенностей на примере четырехуровневой N – схемы, изучения возможностей пространственной локализации населенностей В одномерном И двумерном случае для четырехуровневых схем двойного каскада, трипод и щелочноземельной, пространственного разработка метода получения перераспределения интенсивности пробного поля на электромагнитно индуцированной решетке на примере трехуровневой Λ – схемы и изучения на основе отработанной методики возможности пространственного перераспределения интенсивности пробного поля на электромагнитно индуцированной решетке в среде с трипод-атомами.

Научная новизна:

1. Впервые исследована возможность пространственной двумерной локализации населенностей в поле только бегущих волн для четырехуровневых схем двойного каскада и трипод.

2. Впервые исследована возможность одномерной и двумерной пространственной локализации населенностей для четырехуровневого щелочноземельного атома.

3. Получены аналитические выражения для населенностей всех состояний системы для четырехуровневых атомов с двойной каскадной, трипод и щелочноземельной конфигурацией состояний атомов. Полученные выражения являются обобщенными, не содержат ограничений на параметры системы и могут быть использованы для широкого спектра задач, связанных как с квантовым контролем состояний описанных атомов, так и с использованием световых масок.

4. Получена высокая степень эффективности (порядка 65%) пространственного перераспределения интенсивности пробного поля на электромагнитно индуцированной решетке в среде с трипод – атомами в максимумы первого порядка. Размеры ячейки со средой, для которой получены результаты, составляют всего лишь 1 сантиметр.

5. Разработан физический принцип для реализации переключения направления распространения света пробной волны для электромагнитно индуцированных решеток в среде с атомами с замкнутой Λ -конфигурацией состояний.

Теоретическая и практическая значимость заключается в том, что результаты исследований диссертационной работы могут быть использованы в области квантового контроля состояния атома, нанолитографии и практических задач, связанных с использованием оптических масок, а также для создания компактных быстродействующих оптических маршрутизаторов.

Методология и методы исследования. Для задач пространственной локализации населенностей использовался аппарат матрицы плотности и квантовое уравнение Лиувилля. Из системы уравнений для элементов матрицы плотности в дипольном приближении и приближении вращающейся волны аналитически были получены выражения для населенностей состояний атомов, которые использовались для дальнейшего анализа. Численный расчет выполнялся в программе Wolfram Mathematica 9 по алгоритму, написанному соискателем. Данные численного расчета обрабатывались в программе OriginPro 8, в результате были получены профили пространственной зависимости населенностей атомов, а также прочие рисунки, используемые в работе.

Для задач пространственного перераспределения интенсивности оптического излучения на электромагнитно индуцированных решетках в среде использовалась самосогласованная системы уравнений, состоящая из квантового Лиувилля для элементов матрицы плотности в дипольном уравнения приближении и приближении вращающейся волны и укороченного волнового уравнения в приближении медленно меняющихся амплитуд. Из системы уравнений для элементов матрицы плотности находились аналитические выражения для коэффициентов поглощения и преломления среды, которые использовались при решении укороченного волнового уравнения. В результате находился вид функции трансляции среды, которая использовалась в интеграле Фраунгофера для получения профиля интенсивности поля оптического излучения на выходе из среды в зависимости от угла. Численный расчет выполнялся в программе Wolfram Mathematica 9 по алгоритму, написанному соискателем. Данные численного расчета обрабатывались в программе OriginPro 8, в результате были получены профили пространственного перераспределения интенсивности оптического излучения на выходе из среды от угла, профили коэффициентов поглощения и преломления среды, профили трансляционной функции среды, а также прочие рисунки, используемые в работе.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретически предсказана возможность одномерной пространственной локализации населенностей в одном из внутренних состояний под действием полей стоячих волн в пространственной области порядка 0.1 длины стоячей волны для среды, состоящей из трехуровневых Л-атомов. Для среды, состоящей из четырехуровневых N-атомов, теоретический расчет демонстрирует возможность достижения области одномерной пространственной локализации

населенностей в одном из внутренних состояний порядка 0.01 длины стоячей волны.

2. Для четырехуровневых схем двойного каскада, трипод и схемы щелочноземельного могут быть получены профили атома узкие пространственных распределений населенностей при взаимодействии с полями стоячих волн как в одномерной конфигурации, так и в случае двумерной конфигурации стоячих волн. Впервые теоретически предсказана возможность пространственной локализации населенностей двумерной В одном ИЗ внутренних состояний только под действием полей бегущих волн для четырехуровневых атомов с двойной каскадной и трипод схемами состояний.

3. Эффективность пространственного перераспределения интенсивности пробного поля в максимумы первого порядка на электромагнитно индуцированных решетках в среде из атомов в трипод конфигурации квантовых состояний может достигать 65%. Расчетный размер ячейки со средой в этом случае может составлять порядка 1 см.

4. Эффект разрушения когерентного пленения населенностей при изменении суммарной фазы волн на $\pi/2$ в среде с трехуровневыми Λ -атомами в замкнутой конфигурации может быть использован для создания компактного, эффективного и быстродействующего фазового переключателя направления распространения пробного поля для электромагнитно индуцированных решеток.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались на конференциях:

- 1. VII Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика 2011» (Россия, Санкт-Петербург);
- 2. The 23rd International Conference on Atomic Physics ICAP 2012 (Франция, Париж);
- 3. 15th International Conference on Laser Optics 2012 (Россия, Санкт-Петербург);
- 4. VII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» «ФПО – 2012» (Россия, Санкт-Петербург);
- 5. 2-я Международная школа-семинар "Лазерная фотоника" 2013 (Россия, Санкт-Петербург);
- 6. 46th Conference of the European Group on Atomic Systems 2014 (Франция, Лилль);
- 7. IX Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2015» (Россия, Санкт-Петербург);
- 8. XLV Научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО 2016 (Россия, Санкт-Петербург).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 8 печатных работах, из них 3 статьи в периодических рецензируемых изданиях [1, 2, 3], отвечающих требованиям Scopus, Web of Science, 1 статья [4] из перечня ВАК и 4 публикации тезисов [5, 6, 7, 8] в сборниках трудов конференций.

Личный вклад автора. Постановка задач и выбор вариантов решения осуществлялись совместно автором и научным руководителем. Компьютерная

программа для численного моделирования, аналитические выражения и все результаты моделирования являются результатом самостоятельной работы диссертанта. Ответственность за корректность представленных результатов лежит полностью на авторе. Подготовка к публикации полученных результатов осуществлялась диссертантом.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Диссертация содержит 124 страницы, из них – 81 страница текста, 49 рисунков и список литературы из 87 наименований на 8 страницах.

Содержание работы

Во введении показана актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи, кратко охарактеризованы основные результаты, полученные в работе, их новизна, научная и прикладная ценность. Дан краткий обзор основных результатов, полученных в изучаемой области.

Глава 1 содержит представление формализма матрицы плотности, который является основой квантово-механического описания взаимодействия системы «атом + поле», а также простейшие схемы пространственной локализации населенностей атомов с классической трехуровневой Λ – схемой и четырехуровневой N – схемой энергетических уровней. Глава 1 состоит из трех параграфов.

В <u>параграфе 1.1</u> описан аппарат матрицы плотности. Матрица плотности является более универсальным инструментом для описания задач взаимодействия сильного оптического излучения с веществом по сравнению с волновыми функциями, так как обладает рядом свойств, существенно упрощающих математическое и физическое рассмотрение подобных процессов. В <u>параграфе 1.2</u> представлена схема простейшей одномерной пространственной локализации населенностей трехуровневого Λ – атома (Рисунок 1а).



Рисунок 1 - (а) Схема взаимодействия трехуровневой Λ - системы с полем световых волн, (б) пространственная зависимость населенности уровня $|1>\Lambda$ -атома

Из уравнения Лиувилля для элементов матрицы плотности в дипольном приближении и приближении вращающейся волны получены аналитические зависимости населенностей квантовых состояний от параметров системы. На основе полученных выражений исследованы оптимальные параметры, при которых наблюдается высокая степень локализации атома в одном из внутренних состояний, а также возможные конфигурации полей. В итоге получены распределения, при которых область локализации атома составляет всего лишь порядка одной сотой длины волны падающего излучения (Рисунок 16).

В <u>параграфе 1.3</u> рассматривается возможность увеличения эффективности локализации населенностей путем добавления к классической трехуровневой – схеме дополнительного уровня – в результате такого добавления формируется четырехуровневая N – схема (Рисунок 2а).



Рисунок 2 - (а) Схема взаимодействия четырехуровневой *N*-системы с полем световых волн, (б) пространственная зависимость населенности состояния $|2\rangle$ *N*-атома

Как видно на рисунке 26 для N – атома возможно получение гораздо более узких пространственных распределений населенностей. Область локализации атома для рисунка 26 составляет порядка нескольких тысячных длины волны падающего оптического излучения.

Глава 2 посвящена рассмотрению возможности пространственной локализации атомов для трех различных четырехуровневых схем: двойной каскадной, трипод и щелочноземельной.

В *параграфе 2.1* показаны три различные схемы пространственной локализации населенностей атома с двойной каскадной системой квантовых состояний (Рисунок 3).



Рисунок 3 - Двойная каскадная система четырехуровневого атома

Для двойной каскадной системы были получены аналитические выражения населенностей атома в зависимости от параметров системы из квантового уравнения Лиувилля для элементов матрицы плотности в дипольном приближении и приближении вращающейся волны:

$$\rho_{11} = \frac{A}{A+B+C+1}, \ \rho_{22} = \frac{B}{A+B+C+1}, \ \rho_{33} = \frac{1}{A+B+C+1}, \ \rho_{44} = \frac{C}{A+B+C+1},$$
(2)

где

$$A = \frac{16\Delta_{21}^{2}(\Omega_{1}^{2} + \gamma^{2}) + (4\Delta_{1}\Delta_{21} - \Omega_{2}^{2})^{2}}{16\Delta_{21}^{2}\Omega_{1}^{2}}, B = \frac{16\Delta_{21}^{2}(\Omega_{2}^{2} + \gamma^{2}) + \Omega_{2}^{2}(\Omega_{2}^{2} - 4\Delta_{1}\Delta_{21}) + 4\Delta_{2}\Delta_{21}(\Omega_{2}^{2} + 4\Delta_{2}\Delta_{21})}{16\Delta_{21}^{2}\Omega_{2}^{2}}, C = \frac{6\Omega_{3}^{2}}{6\Omega_{3}^{2} - 2,25\gamma^{2} - \Delta_{3}^{2}}.$$

В результате для всех трех случаев были получены как высокая степень локализации населенностей атома, так и оригинальные профили пространственных распределений населенностей (Рисунок 4).



Рисунок 4 - Пространственные распределения населенностей атома с двойной каскадной схемой квантовых состояний в трех пространственных конфигурациях: (а) в одномерной, (б) в двумерной в поле стоячих волн, (в) в двумерной в поле бегущих волн

В *параграфе 2.2* показаны три различные схемы пространственной локализации населенностей атома с трипод конфигурацией квантовых состояний (Рисунок 5).



Рисунок 5 - Четырехуровневый атом в трипод конфигурации

Для атома с трипод конфигурацией были получены аналитические выражения населенностей атома в зависимости от параметров системы из квантового уравнения Лиувилля для элементов матрицы плотности в дипольном приближении и приближении вращающейся волны:

$$\rho_{11} = \frac{Num_1}{Den}, \quad \rho_{22} = \frac{Num_2}{Den}, \quad \rho_{33} = \frac{Num_3}{Den}, \quad \rho_{44} = \frac{1}{Den}, \quad (3)$$

$$\begin{split} Num_{1} &= 1 + \frac{3\gamma^{2}}{4\Omega_{1}^{2}} + \frac{\Omega_{2}(\Omega_{2}A - \Omega_{1}B)}{\Omega_{1}\Delta_{12}} + \frac{\Omega_{3}(\Omega_{3}A - \Omega_{1}C)}{\Omega_{1}\Delta_{13}} - \frac{\Delta_{1}A}{\Omega_{1}}, \\ Num_{2} &= 1 + \frac{3\gamma^{2}}{4\Omega_{2}^{2}} + \frac{\Omega_{1}(\Omega_{2}A - \Omega_{1}B)}{\Omega_{2}\Delta_{12}} + \frac{\Omega_{3}(\Omega_{3}B - \Omega_{2}C)}{\Omega_{2}\Delta_{23}} - \frac{\Delta_{2}B}{\Omega_{2}}, \\ Num_{3} &= 1 + \frac{3\gamma^{2}}{4\Omega_{3}^{2}} + \frac{\Omega_{1}(\Omega_{3}A - \Omega_{1}C)}{\Omega_{3}\Delta_{13}} + \frac{\Omega_{2}(\Omega_{3}B - \Omega_{2}C)}{\Omega_{3}\Delta_{23}} - \frac{\Delta_{3}C}{\Omega_{3}}, Den = 1 + Num_{1} + Num_{2} + Num_{3}. \end{split}$$

В результате для всех трех случаев были получены как высокая степень локализации населенностей атома, так и оригинальные профили пространственных распределений населенностей (Рисунок 6).



Рисунок 6 - Пространственные распределения населенностей атома с трипод конфигурацией квантовых состояний в трех пространственных конфигурациях: (а) в одномерной, (б) в двумерной в поле стоячих волн, (в) в двумерной в поле бегущих волн В *параграфе 2.3* показаны три различные схемы пространственной локализации населенностей щелочноземельного атома (Рисунок 7).



Рисунок 7 - Схема квантовых состояний четырехуровневого щелочноземельного атома Для щелочноземельного атома были получены аналитические выражения населенностей атома в зависимости от параметров системы из квантового уравнения Лиувилля для элементов матрицы плотности в дипольном приближении и приближении вращающейся волны:

$$\rho_{11} = \frac{d(3b-2a-1+e(a-2b+1))+c(e+a-1-3b+d(a-b-e+1))}{b(1-3(c-d)+cd+2e(d-1))+e(1+a(3d-1)+2e(1-d))+2d(c-a)+ac(1+d)+3d-1}, \\
\rho_{22} = \frac{d(b+e+ae-2be-1)+c(d+e-de+1)}{b(1-3(c-d)+cd+2e(d-1))+e(1+a(3d-1)+2e(1-d))+2d(c-a)+ac(1+d)+3d-1}, \\
\rho_{33} = \frac{d(e(a-2b-1)+b+1)}{b(2e(d-1)+c(3+d)-3d+1)-a(c-d(c-2)+e(d-1))+e(2c(d-1)-3d-1)+d(3-2c)+1}, \\
\rho_{44} = \frac{b(2e-1)+e(1-a)-1}{b(1-3(c-d)+cd+2e(d-1))+e(1+a(3d-1)+2e(1-d))+2d(c-a)+ac(1+d)+3d-1}, \\
\Gamma \Box e$$

$$a = \frac{\gamma^2}{\Omega_1^2}, \ b = \frac{\gamma^2}{\Omega_2^2}, \ c = \frac{\Omega_3^2}{\Omega_2^2}, \ d = \frac{\Gamma_4}{2\gamma}, \ e = \frac{\Omega_1^2}{\Omega_2^2}$$

В результате для всех трех случаев были получены как высокая степень локализации населенностей атома, так и оригинальные профили пространственных распределений населенностей (Рисунок 8).



Рисунок 8 - Пространственные распределения населенностей щелочноземельного атома в трех конфигурациях: (а) одномерной, стоячая волна действует на переходе $|1\rangle - |2\rangle$; (б) одномерной, стоячая волна действует на переходе $|3\rangle - |4\rangle$; (в) двумерной, в поле стоячих волн

Глава 3 посвящена рассмотрению возможности пространственного интенсивности пробного перераспределения поля на электромагнитно индуцированных решетках (ЭМИР) для двух конфигураций: классической трехуровневой Л – схемы и четырехуровневой трипод схемы. Механизм формирования ЭМИР заключается пространственной В модуляции коэффициентов пропускания и поглощения среды под действием поля стоячих волн таким образом, чтобы на выходе из среды наблюдалась дифракционная картина с существенным перераспределением интенсивности пробного поля в максимумы первого порядка.

В *параграфе 3.1* рассматривается возможность создания ЭМИР в среде с Λ – атомами. Две стоячие волны, направленные вдоль оси X, создают пространственную модуляцию среды в то время, как бегущая волна распространяется перпендикулярно стоячим волнам вдоль оси Z сквозь модулированную среду (Рисунок 9).



Рисунок 9 - Принципиальная схема эксперимента с ЭМИР в среде с Л атомами Состояние системы описывается квантовым уравнением Лиувилля для элементов матрицы плотности в дипольном приближении и приближении вращающейся волны. Из системы уравнений аналитически вычисляется матричный элемент *ρ*₂₃, вещественная часть которого пропорциональна коэффициенту преломления среды, часть пропорциональна а мнимая коэффициенту поглощения среды.

11

$$a_{r} = \frac{-\Delta_{2}(\gamma^{2} + (\Delta_{2} - \Delta_{1})^{2} + (\Delta_{2} - \Delta_{1})\Omega_{1}^{2}Sin^{2}(\pi x))}{((1 + \Delta_{2}^{2})(\gamma^{2} + (\Delta_{2} - \Delta_{1})^{2} + 2(\gamma - \Delta_{2}(\Delta_{2} - \Delta_{1}))\Omega_{1}^{2}Sin^{2}(\pi x)) + \Omega_{1}^{4}Sin^{4}(\pi x))},$$

$$a_{i} = -\frac{\gamma^{2} + (\Delta_{2} - \Delta_{1})^{2} + \gamma\Omega_{1}^{2}Sin^{2}(\pi x)}{((1 + \Delta_{2}^{2})(\gamma^{2} + (\Delta_{2} - \Delta_{1})^{2} + 2(\gamma - \Delta_{2}(\Delta_{2} - \Delta_{1}))\Omega_{1}^{2}Sin^{2}(\pi x)) + \Omega_{1}^{4}Sin^{4}(\pi x))}.$$
(5)

При выводе выражений (5) учитывались только линейные по пробному полю члены.

Распространение пробного поля в среде описывается укороченным волновым уравнением в виде

$$-i\frac{\partial^2 \Omega_2}{N_F \partial x^2} + \frac{\partial \Omega_2}{\partial z} = (\alpha_r + i\alpha_i)\Omega_2$$
(6)

Решая уравнение (6), мы находим значение поля на выходе из среды. Отношение поля на выходе Ω_{2out} и поля на входе Ω_{2in} дает нам вид функции трансляции среды толщиной *L* (по оси Z) по отношению к полю:

$$T(x) = e^{\alpha_r(x)L} e^{i\alpha_i(x)L},$$
(7)

где $T(x) = \Omega_{2out} / \Omega_{2in}$, L – толщина среды вдоль оси Z.

Рассматривая вклад только дальнего поля (дифракция Фраунгофера) и считая, что волна пробного поля плоская и имеет одинаковую амплитуду поперек пучка ширины $M\Lambda_x$, где Λ_x – пространственный период ЭМИР, М – целое число, мы можем определить зависимость интенсивности пробного поля $I_{out}(\theta)$ на выходе из среды от угла как

$$I_{out}(\theta) = \left|\Omega_2^1(\theta)\right|^2 \frac{Sin^2(M\pi\Lambda_xSin\theta/\lambda_2)}{M^2Sin^2(\pi\Lambda_xSin\theta/\lambda_2)},$$
(8)

где

$$\Omega_2^1(\theta) = \int_0^1 T(x) \exp[-i2\pi\Lambda_x x Sin\theta / \lambda_2] dx \,. \tag{9}$$

Полученные аналитические выражения (5,7,8) дают возможность численно исследовать эффективность пространственного перераспределения интенсивности пробного поля на ЭМИР.

Максимальное значение эффективности пространственного перераспределения интенсивности пробного поля на ЭМИР в среде с Λ – атомами составляет 30% (Рисунок 10).



Рисунок 10 - Зависимость нормированной интенсивности I_{out} от синуса угла $\sin \theta$ В *параграфе 3.2* приведена теоретическая часть задачи пространственного перераспределения интенсивности пробного поля на атомах с трипод конфигурацией квантовых состояний (Рисунок 5). Две стоячие волны, направленные вдоль оси X, создают пространственную модуляцию среды в то время, как бегущая волна распространяется перпендикулярно стоячим волнам вдоль оси Z сквозь модулированную среду (Рисунок 11). Для описания данной задачи использовался метод, описанный в *параграфе 3.1*.



Рисунок 11 - Принципиальная схема эксперимента с ЭМИР в среде с трипод - атомами В *параграфе 3.3* численно исследована возможность и эффективность пространственного перераспределения интенсивности пробного поля на ЭМИР в среде с трипод атомами. Получены профили зависимости интенсивности пробного поля от таких параметров системы, как частоты Раби модулирующих полей Ω_1 и Ω_3 , отстройки модулирующих полей Δ_1 и Δ_3 , отстройка пробного поля Δ_2 , длина ячейки L (рисунок 12).

Также получены дифракционные картины для амплитуды |T(x)| и фазы $\exp[i\Phi(x)]$ функции трансляции (рисунок 13). На основе этих зависимостей показано, что основной вклад в перераспределение интенсивности пробного поля вносит фазовая часть функции трансляции $\exp[i\Phi(x)]$.

В результате получены оптимальные параметры системы, при которых наблюдается максимальное перераспределение интенсивности пробного поля в максимумы первого порядка (Рисунок 14). Эффективность для полученных зависимостей составляет порядка 65%. С учетом компактности размеров ячейки (1 см) и простоты экспериментальной реализации полученные результаты являются перспективной основой создания оптических устройств быстрого пространственного переключения света.



Рисунок 12 - Зависимость нормированной интенсивности I_{out} от синуса угла $\sin \theta$ при различных значениях (а) частот Раби модулирующих полей, (б) отстроек модулирующих полей, (в) отстройки пробного поля; (г) зависимость максимальной интенсивности I_{out} в первых порядках дифракции от длины ячейки со средой L



Рисунок 13 - Зависимость интеграла Фраунгофера по амплитуде |T(x)| и фазе $\Phi(x)$ трансляционной функции от пространственной координаты X на одном пространственном периоде решетки



Рисунок 14 - Зависимость нормированной интенсивности I_{out} от синуса угла $\sin \theta$

14

В параграфе 3.4 разработан физический механизм, на основе которого возможна реализация фазового переключателя направления распространения света пробной волны для электромагнитно индуцированных решеток в среде трехуровневыми Λ-атомами в замкнутой конфигурации. Принципиальная схема моделируемого эксперимента представлена на рисунке 15.



Рисунок 15 - Принципиальная схема эксперимента с фазовым переключателем для ЭМИР в среде с Л-атомами в замкнутой конфигурации

Для исследования данной задачи использовался математический аппарат, разработанный в параграфе 3.1. В результате решения и анализа полученных выражений удалось продемонстрировать возможность переключения направления распространения света пробной волны, контролируемого только изменением суммарной фазы Ф трех полей, взаимодействующих на переходах системы (Рисунок 16).



Рисунок 16 - Зависимость нормированной интенсивности I_{out} от синуса угла $\sin \theta$

Заключение

Обобщена теория пространственной локализации населенностей для классической трехуровневой Λ – схемы. Полученная теория была расширена на трехфотонное взаимодействие в четырехуровневой N – схеме, благодаря чему предсказано уменьшение области пространственной локализации населенностей на порядок до значения нескольких сотых длины волны падающего излучения.

Теоретически предсказана высокая степень пространственной локализации населенностей атомов с двойной каскадной схемой квантовых состояний в одномерном случае, а также в двумерном в стоячих и только бегущих волнах. По отработанной методике рассчитана возможность получения высокой степени пространственной локализации населенностей атомов в трипод конфигурации квантовых состояний в одномерной конфигурации, в двумерной в стоячих волнах и только бегущих волнах. Исследована пространственная локализация населенностей для четырехуровневого щелочноземельного атома. Теоретически предсказана высокая степень локализации для двух одномерных конфигураций и случая двумерной пространственной локализации в стоячих волнах.

На примере классической трехуровневой Λ – схемы отработана методика расчета пространственного перераспределения интенсивности пробного поля в максимумы первого порядка на ЭМИР. Расчетная эффективность составляет порядка 30% для Λ – системы.

На примере разработанного алгоритма исследована возможность пространственного перераспределения интенсивности оптического излучения на ЭМИР в среде из атомов с трипод конфигурацией квантовых состояний. Предсказана высокая эффективность перераспределения интенсивности в максимумы первого порядка (65%) при достаточно компактных размерах ячейки со средой (порядка 1 см).

Для замкнутой трехуровневой Λ – схемы разработана теоретическая модель для создания компактного, простого в реализации и быстродействующего оптического фазового переключателя направления распространения пробного поля с высокой степенью эффективности.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

- E.A. Efremova, M.Yu. Gordeev, Yu.V. Rozhdestvensky Localisation of atomic populations in the optical radiation field // Quantum Electronics – 2014. - 44 (10). – pp. 939 – 943. - 0,3 п.л.
- 2. E. A. Efremova, M. Yu. Gordeev, E. Yu. Perlin, and Yu. V. Rozhdestvenskii Spatial Localization of Atomic Populations in the Field of Stationary Waves // Optics and Spectroscopy – 2015. - Vol. 118. - No. 3. - pp. 342–349. - 0,6 п.л.
- 3. Gordeev M.Y., Efremova E., Rozhdestvensky Y.V. Atom localization with double-cascade configuration // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 2016, Vol. 49, No. 6, pp. 065001. 0,5 п.л.
- 4. Ефремова Е.А., Гордеев М.Ю., Рождественский Ю.В. Двумерная локализация атомных населенностей в четырехуровневых квантовых системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики 2014. № 4(92). С. 12-17. 0,4 п.л.
- 5. Гордеев М.Ю. Пространственная локализация трех- и четырехуровневых квантовых систем // Сборник трудов Международной конференции и семинаров. Т.1. «Оптика-2011» 2011. Т. 1. С. 97. 0,01 п.л.
- Гордеев М.Ю. Численное моделирование дифракционной картины на амплитудно-фазовых решетках населенностей в четырехуровневых схемах // Сборник трудов Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2012» 2012. С. 57. - 0,01 п.л.
- M. Gordeev, E. Efremova, and Yu. Rozhdestvensky Numerical investigation of electromagnetically induced grating for tripod scheme // Book of Abstracts – 23d International conference on atomic physics 2012, p. 220. - 0,01 п.л.
- 8. Gordeev M.Y. Localization of atomic populations due to field of running waves // Book of Abstracts – EGAS 46th conference of the European Group of Atomic Systems, IET 2014, Vol. 38 D, pp. 85. - 0,01 п.л.