

На правах рукописи



Мисюрин Артём Геннадьевич

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА
ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ
В УСЛОВИЯХ ПРОЯВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
КОГЕРЕНТНЫХ ЭФФЕКТОВ И РЕЗОНАНСНОГО
САМОВОЗДЕЙСТВИЯ**

Специальность: 01.04.21 – Лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Научный руководитель: **Пластун Инна Львовна,**
доктор физико-математических наук,
доцент

Официальные оппоненты: **Мельников Леонид Аркадьевич,**
доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина
ЮА.», заведующий кафедрой приборостроения

Конюхов Андрей Иванович,
кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВПО
«Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского»,
доцент кафедры компьютерной физики и метаматериалов

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Самарский государственный
университет»

Защита состоится «18» января 2013 г. в 12:00 на заседании
диссертационного совета Д 212.243.05 при Саратовском государственном
университете имени Н.Г.Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов,
ул. Астраханская, 83, корпус 3, ауд.34.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке
им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета (Саратов,
ул. Университетская, 42).

Автореферат разослан «14» декабря 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.ф-м.н., профессор



В.Л. Дербов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Взаимодействие лазерного излучения с нелинейно-оптической средой в условиях резонанса частоты излучения и частоты атомного перехода исследуется с момента зарождения нелинейной оптики. Результатом подобного взаимодействия, как правило, является изменение параметров распространяющихся лазерных сигналов и оптических характеристик вещества. Практическое применение данных эффектов весьма широко и разнообразно: от преобразования частот и управления амплитудой и фазой оптических сигналов до параметрических генераторов и оптических усилителей.

Развитие и постоянное совершенствование оптоволоконных линий связи давно привлекает внимание исследователей к проблеме оптимизации и повышения степени устойчивости передачи модулированных лазерных сигналов. Известен ряд работ, в которых исследуется распространение протяжённых лазерных пучков в резонансных и нерезонансных нелинейных средах (Ахманов С.А., Сухоруков А.П., Луговой В.Н., Прохоров А.М., Javan A., Kelley P., Аскаръян Г.А., Бутылкин В.С., Каплан А.Е., Хронопуло Ю.Г., Кандидов В.П., Карамзин Ю.Н., Трофимов В.А., Альтшуллер Г.Б. и др.). При этом основное внимание уделялось пространственным характеристикам пучков (изменения поперечного профиля пучка, его радиуса, продольной зависимости интенсивности на оси пучка в условиях керровской, тепловой и резонансной самофокусировки, самоканалирования и других эффектов самовоздействия). Исследования динамики лазерных сигналов, как правило, проводились на примере импульсного излучения (Розанов Н.Н., Ханин Я.И., Кившарь Ю.С., Agraval G.P., Мельников Л.А., Маломед Б.А., Фрадкин Э.Е., Пулькин С.А., Козлов С.А., Выслоух В.А. и др.), а анализ нелинейно-динамических свойств лазерных систем - на примере лазеров различных типов (Ханин Я.И., Haken G., Mandel P. и др.) и поперечных структур лазерных пучков (Otsuka K., Abraham N., Lugiato L., Воронцов М.А., Желтиков А.М., Мельников Л.А., Конюхов А.И. и др.).

В этой связи вопросы анализа нелинейно-динамических характеристик непрерывных частотно-модулированных лазерных пучков с распределением интенсивности по сечению в условиях резонансного самовоздействия являются малоисследованными. При этом можно ожидать появления новых эффектов, связанных с неравномерным распределением интенсивности по сечению пучка, и накапливающимися в процессе его распространения в условиях резонансного самовоздействия. Вследствие этого характеристики лазерного сигнала на выходе из среды могут существенно отличаться от входных значений, что становится принципиально важным при оптическом зондировании атмосферы на длинных трассах, передаче сигналов по волоконно-оптическим линиям

связи, в спектроскопии насыщения, в системах оптического усиления сигналов, линиях задержки и других прикладных задачах.

Основной причиной нестабильного поведения лазерных сигналов в подобных условиях является неравномерное распределение показателя преломления в пространстве, на которое влияют: с одной стороны - различный уровень интенсивности лазерного пучка, а с другой стороны – частотные отстройки распространяющегося модулированного сигнала от резонанса с атомным переходом.

Сложность и нелинейность подобных задач требуют развития математических моделей и применения эффективных вычислительных методов, которые могли бы сочетать в себе подходы макроскопической теории волн и квантово-механического описания нелинейного отклика среды. Математическим выражением объединения этих двух подходов являются волновые уравнения для распространяющихся в среде полей, учитывающие локальные характеристики среды – восприимчивости, несущие информацию об энергетических уровнях и состояниях образующих среду частиц. С другой стороны, анализ степени устойчивости рассматриваемой системы должен проводиться на основе методов нелинейной динамики.

Подобное объединение возможно только на основе методов математического моделирования, причём для полноценного анализа требуется выполнить очень большой объём вычислений, что ещё несколько лет назад было труднореализуемой задачей. С развитием технологий параллельных вычислений на основе видеопроцессоров, существенно ускоряющих процедуры расчётов, решение подобных задач стало весьма доступным.

Таким образом, **целью диссертационной работы** является исследование методами численного моделирования пространственно-временного поведения и динамических свойств лазерных пучков, модулированных по частоте, в условиях проявления нестационарных когерентных эффектов и резонансного самовоздействия, а также анализ влияния частотных характеристик лазерного сигнала на оптические свойства среды.

Для достижения этой требуется выполнить следующие **основные задачи**:

- Разработка программного комплекса, реализующего алгоритм решения системы уравнений Максвелла-Блоха на основе метода расщепления по направлениям и разложения поперечного профиля поля по модам Гаусса-Лагерра.

- Оптимизация численных экспериментов на основе реализации параллельных вычислений и векторизации алгоритма.

- Исследование динамических характеристик частотно-модулированных протяженных лазерных пучков в двухуровневой среде с насыщением поглощения и дисперсии.

- Анализ влияния резонансного самовоздействия и нестационарных когерентных эффектов на характеристики частотно-модулированного лазерного пучка и оценка степени стабильности рассматриваемой системы на основе серии проводимых численных экспериментов.

Научная новизна.

Научная новизна результатов диссертации состоит как в обнаружении ранее не исследовавшихся физических эффектов и свойств рассмотренных систем, так и в разработке оригинальных программных комплексов, реализованных на основе современных технологий параллельных вычислений на видеопроцессорах, ранее не использовавшихся для решения подобных классов задач.

- Впервые исследованы динамические характеристики частотно-модулированных протяжённых лазерных пучков, распространяющихся в двухуровневой среде с насыщением поглощения и дисперсии.

- В протяженных лазерных пучках, модулированных по частоте, впервые выявлены условия и природа возникновения оптической нутации и исследовано влияние резонансного самовоздействия пучка на этот эффект.

- Впервые на основе проведенных численных экспериментов было обнаружено, что лазерный пучок, модуляция частоты которого сравнима с временами релаксации, распространяющийся в нелинейно-оптических средах с насыщением поглощения или усиления является системой, где реализуется режим цикла периода $1T$ и переход через бифуркацию удвоения периода к циклу периода $2T$ в условиях проявления резонансного самовоздействия. В условиях взаимного влияния оптической нутации и резонансного самовоздействия реализуется режим цикла периода $4T$.

- Впервые для задач нелинейной оптики, связанных с распространением модулированных лазерных пучков, была выполнена оптимизация вычислений на основе векторизации использованного численного алгоритма и проведён сравнительный анализ эффективности параллельных вычислений на различных типах видеопроцессоров с применением технологий CUDA, GLSL, OpenCL, OpenMP, что позволило за счёт существенного повышения скорости вычислений провести подробный анализ динамических характеристик модулированного лазерного пучка, распространяющегося в условиях насыщения поглощения и дисперсии.

Методы исследования

Решение задач, поставленных в диссертационной работе, проводилось на основе методов математического моделирования, включающих численное решение начально-краевых задач для нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных; разработку программного комплекса, реализующего параллельные вычисления на видеопроцессорах NVidia и ATI на основе технологий CUDA, GLSL,

OpenCL, OpenMP, а также вычислительные эксперименты с помощью разработанных программных средств.

Для реализации программных комплексов были использованы языки программирования C#, C, C++ и программная платформа .Net.

Практическая значимость

- Полученные в диссертации результаты позволяют оценить влияние резонансного самовоздействия пучка в экспериментах нелинейной лазерной спектроскопии на протяжённых трассах и при оптическом зондировании атмосферы, использовать эти эффекты для оптимизации распространения лазерного сигнала в волоконно-оптических линиях связи и оптических линиях задержки, где благодаря эффекту самоканалирования возможно увеличение степени проникновения лазерного сигнала. Оценка частотных изменений, возникающих при распространении модулированного лазерного сигнала в условиях насыщения поглощения и дисперсии, позволяет более точно вычислить сигнал ошибки, возникающий при регистрации субдоплеровских спектров в фазово-модуляционной спектроскопии насыщения и при использовании метода переноса спектра модуляции, используемого при стабилизации частоты лазеров. Использование в ходе исследований безразмерных величин позволяет применять эти оценки в широком диапазоне лазерных мощностей и параметров нелинейной среды путём соответствующего масштабирования.
- Разработанные в ходе диссертационного исследования программные комплексы, алгоритмы и расчётные методики могут быть использованы для анализа пространственно-временной динамики и частотных характеристик протяжённых лазерных пучков, распространяющихся в нелинейно-оптических системах различных типов.
- Полученные в диссертации результаты используются в учебном процессе на факультете электронной техники и приборостроения Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. при чтении курсов «Сети ЭВМ и коммуникации», «Системы и сети передачи данных», «Компьютерное моделирование» для студентов специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем».

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных математических методов и моделей и следует из сравнения расчётных и экспериментальных данных, сопоставления результатов, полученных различными численными методами, совпадения результатов расчётов с предсказаниями более простых приближений.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 7 международных и 2 всероссийских конференциях, научных школах и семинарах: International School for Young Scientists on Optics, Laser Physics and Biophysics (Saratov Fall Meeting (SFM)) (Saratov,

Russia, 2010, 2011, 2012); Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Инновации и актуальные проблемы техники и технологий» (Саратов, 2009, 2010); Всероссийская школа-конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (Саратов, 2010); Международная научно-техническая конференция «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-23, 24, 25) (Саратов, 2010; Киев, 2011; Волгоград 2012), XV Международная зимняя школа-семинар по электронике СВЧ и радиофизике (Саратов, 2012)

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 13 печатных работах, включающих 5 статей в периодических изданиях, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ, а также авторское свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад соискателя заключается в том, что все представленные численные результаты получены лично автором. Обсуждение полученных результатов проводилось автором при участии научного руководителя и соавторов работ. Автором разработан программный комплекс для решения системы уравнений Максвелла-Блоха на основе метода расщепления по направлениям и разложения поперечного профиля поля по модам Гаусса-Лаггера, а также выполнена векторизация используемого алгоритма для реализации параллельных вычислений на графических процессорах NVidia и ATI с применением технологий CUDA, GLSL, OpenMP, OpenCL.

На защиту выносятся следующие положения:

- Эффекты резонансного самовоздействия, такие как наведённая рефракция и насыщение поглощения приводят к существенному искажению осцилляций выходной интенсивности частотно-модулированного лазерного пучка как в случае точного резонанса (двукратный проход через резонанс), так и при отстройке несущей частоты на величину, равную амплитуде модуляции (однократный проход через резонанс).

- Нестационарная оптическая нутация, возникающая при распространении протяженного лазерного пучка с модуляцией частоты в случае, когда амплитуда модуляции в несколько раз превышает ширину линии поглощения, существенно сглаживается при высоких интенсивностях пучка, приводящих к насыщению поглощения и выравниванию населённостей энергетических уровней.

- Лазерный пучок с частотной модуляцией, сравнимой со скоростью релаксации, распространяющийся в нелинейно-оптических средах с насыщением поглощения или усиления представляет собой систему, где реализуется режим цикла периода $1T$ с переходом через бифуркацию удвоения периода к циклу периода $2T$ в условиях проявления резонансного

самовоздействия. В условиях взаимного влияния оптической нутации и резонансного самовоздействия реализуется режим цикла периода $4T$.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, состоящего из 123 наименований. Общий объём диссертации 140 страниц текста, включающего 28 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обозначен предмет исследования, дан краткий анализ современного состояния проблемы, обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, охарактеризованы новизна полученных результатов и практическая ценность работы, приводятся сведения о методах исследования, апробации работы, структуре диссертации и публикациях по её теме, а также определяется личный вклад автора работы.

В **первой главе** анализируется состояние экспериментальных и теоретических исследований эффектов резонансного самовоздействия и динамики лазерных пучков, изложены фундаментальные основы методики исследования нелинейно-динамических систем, обосновывается необходимость исследования нелинейно-динамических характеристик частотно-модулированных лазерных сигналов в протяжённых нелинейно-оптических средах с насыщением поглощения и дисперсии.

Во **второй главе** диссертации описывается пространственно-временная численная модель распространения лазерного пучка, модулированного по частоте, в нелинейно-оптической двухуровневой среде с насыщением поглощения и дисперсии, а также приводятся описание реализации используемого в работе алгоритма на основе технологии параллельных вычислений на видеопроцессорах и сравнительный анализ оптимальности работы различных технологий.

Основу численной модели, изложенной в первом разделе главы, составляет система уравнений Максвелла-Блоха (1)-(3), куда входит волновое уравнение, или уравнение Максвелла (1), описывающее пространственно-временную эволюцию пучка, и два уравнения Блоха для параметров среды: разности заселённостей уровней D и поляризации среды P :

$$2ik \left(\frac{\partial E}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) E = gP; \quad (1)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -\gamma [D - 1 + i(E^* P - E P^*)]; \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -(\Gamma + i\Delta)P - \frac{i}{2}\Gamma DE, \quad (3)$$

где g – коэффициент поглощения, γ , Γ – скорости релаксации заселенности и поляризации, соответственно, $D(z, \rho, \varphi, t)$ – разность заселённостей, нормированная на её величину в отсутствие насыщения, $E(z, \rho, \varphi, t)$, $P(z, \rho, \varphi, t)$ – медленно меняющиеся амплитуды электрического поля и поляризации, соответственно, Δ – отстройка несущей частоты от частоты атомного перехода. Данная система уравнений решалась в приближении медленно меняющихся амплитуд, означаящем, что исследуется поведение огибающей модулированного лазерного сигнала, а не колебания вектора напряженности электрического поля, поскольку в исходном состоянии среда является слабо нелинейной и слабо поглощающей, и амплитуды волн будут изменяться на малую величину при прохождении волной расстояния порядка её длины, т.е. амплитуды волн будут медленно изменяющимися функциями эволюционной координаты z и времени t . Уравнения решались при начальных условиях, соответствующих задаче Коши: $E(z=0, \rho, \varphi, t) = E^0(z=0, \rho, \varphi, t)$; $E(z, \rho, \varphi, t=0) = 0$; $D(z, \rho, \varphi, t=0) = 1$; $P(z, \rho, \varphi, t=0) = 0$.

Для повышения удобства и скорости расчётов была использована так называемая система «бегущих» координат, когда время выражается через продольную координату: $(z, t) \rightarrow (z, t - z/c)$, где c – скорость распространения пучка, выраженная в условных единицах: $c = 1$ (в единицах $ka^2/2\pi\gamma$, где a – начальный радиус пучка, γ – скорость релаксации, k – волновое число). В этом случае расчет эволюции по времени происходит по слоям (шагам), причем на каждом новом слое решается задача пространственной эволюции пучка, где в качестве начальных условий используются значения, полученные на предыдущем слое, а приращение по времени происходит по шагам, связанным с шагом по продольной координате z : $t = t + h_z/c$, где h_z – шаг по z .

Во втором разделе главы описывается неявная разностная схема второго порядка, основанная на методе расщепления по направлениям, где используется разложение поля по поперечной координате по модам Гаусса-Лаггера. Данная расчётная схема использовалась в диссертационной работе для решения уравнений (1)-(3). Длина распространения пучка берётся конечной: $z_{max} = Kh$. Данная расчётная схема имеет второй порядок по h .

В третьем разделе главы представлен краткий обзор различных технологий параллельных вычислений на графических процессорах и сфер применения подобных технологий в научно-технических расчётах.

В четвёртом разделе приводится описание векторизации алгоритма разложения поперечного профиля поля и поляризации среды по модам Гаусса-Лаггера, необходимой для организации мультипоточности, а также приводятся результаты сравнительного анализа реализации используемой

в диссертационной работе расчётной схемы на основе технологий CUDA, GLSL, OpenMP, OpenCL, выполненной на видеокартах различных типов.

В ходе численных экспериментов было установлено, что наибольшее преимущество в скорости вычислений даёт новая кроссплатформенная технология GLSL, реализованная на видеоускорителе ATI от AMD (рис. 1), чуть меньший выигрыш в скорости наблюдается при реализации алгоритма на основе более популярного сочетания технологии CUDA и видеокарты NVidia. При этом необходимо отметить, что точность вычислений на видеопроцессорах ATI в несколько раз превышает точность вычислений на NVidia, что весьма существенно для научных расчётов.

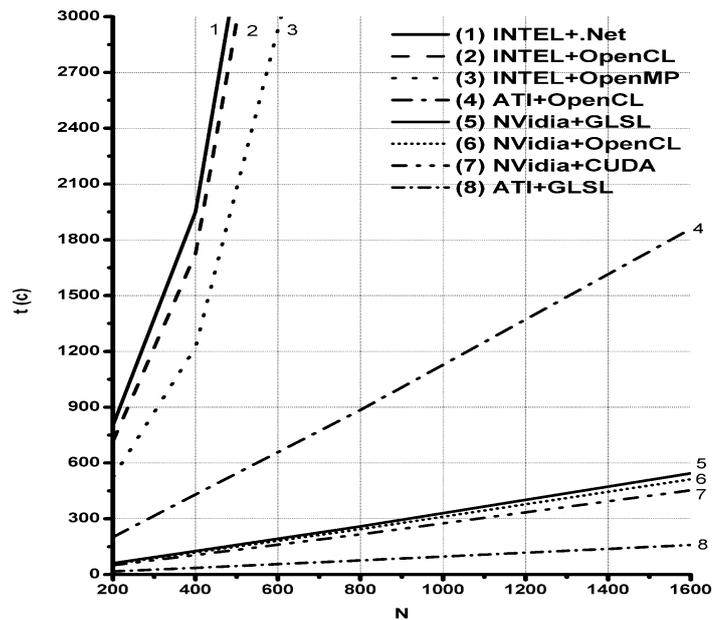


Рис. 1. Сравнительный анализ времени выполнения расчета на основе различных мультипоточных технологий в зависимости от степени точности N (N – количество точек по поперечной координате z)

В третьей главе изложены основные физические результаты диссертационного исследования, полученные в ходе численных экспериментов.

Были рассмотрены протяжённые лазерные пучки, симметричные относительно оси распространения, что соответствует большинству физических экспериментальных задач по распространению лазерных сигналов.

Частота пучка на входе в среду гармонически модулировалась по времени, $\omega = \omega_0 + \omega_1 \sin \Omega t$, где ω_0 – несущая лазерная частота, ω_1 – амплитуда модуляции частоты, Ω – частота модуляции. Профиль пучка на входе в среду брался гауссовым, таким образом, начальная комплексная амплитуда входного поля имела вид

$$E^0(\rho, \varphi, t) = E(0, \rho, t) = E_0 \exp\left(-\frac{\rho^2}{2a^2}\right) \exp\left[i \frac{\omega_1}{\Omega} \cos(\Omega \cdot t)\right]. \quad (4)$$

Начальный радиус пучка a во всех рассматриваемых случаях был взят равным 1. Время и частота нормированы на времена релаксации. Для упрощения были взяты равные значения $\gamma = \Gamma = 1$. Амплитуда частотной модуляции бралась порядка $\omega_1 = 1$, это означает, что отстройка частоты поля от резонанса составляет одну полуширину линии. Исследуемыми параметрами являются интенсивность пучка на выходе из среды $I(z, r, t, \omega)$, размер пятна $w(t)$, определяемый как второй момент поперечного распределения нормированной интенсивности:

$$w^2(t) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\infty \rho^3 d\rho |E(Z, \rho, \varphi, t)|^2 \left\{ \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\infty \rho d\rho |E(Z, \rho, \varphi, t)|^2 \right\}^{-1}, \quad (5)$$

а также разность заселённостей D и абсолютное значение поляризации среды P . Линейное поглощение в рассматриваемых случаях принималось равным $g = 1$, и, таким образом, интенсивность на выходе из среды оказывалась небольшой из-за поглощения и дифракционного расплывания. Рассматривался режим низкочастотной модуляции, ($\Omega = 0,5$), когда спонтанные эффекты отклика среды пренебрежимо малы.

Были рассмотрены режимы, когда центральная несущая частота ω_0 равна частоте атомного перехода ($\Delta = 0$ в (3)), а также когда несущая частота отстроена от резонанса на величину амплитуды модуляции ω_1 .

В первом случае частота модулированного поля осциллирует симметрично по отношению к точной величине резонанса, а при отстройке несущей в фокусирующую или дефокусирующую область за один период модуляции резонанс достигается только один раз, а всё остальное время пучок испытывает влияние околорезонансной фокусировки или дефокусировки. Временные зависимости интенсивности на оси пучка, соответствующие этим трём ситуациям, продемонстрированы на рис. 2.

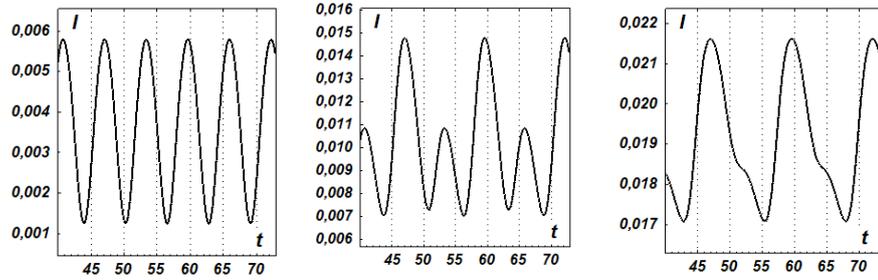
Видно, что в слабых полях ($E_0 = 0,1$, рис. 2а), не вызывающих насыщения поглощения и дисперсии, симметричные изменения поглощения вызывают равные скачки интенсивности, причём в случае отстройки от резонанса на величину, равную амплитуде модуляции, частота осцилляций интенсивности уменьшается вдвое. При увеличении интенсивности входного сигнала эффекты насыщения поглощения и дисперсии вызывают возникновение наведённой фокусировки и дефокусировки, приводящим к асимметрии осцилляций интенсивности ($E_0 = 5; 10$, рис. 2 б, в).

При увеличении амплитуды модуляции до величин, превышающих ширину линии перехода ($\omega_1 = 3$ и выше) начинает проявляться эффект нестационарной оптической нутации, что соответствует условию, налагаемому на частоту Раби Ω :

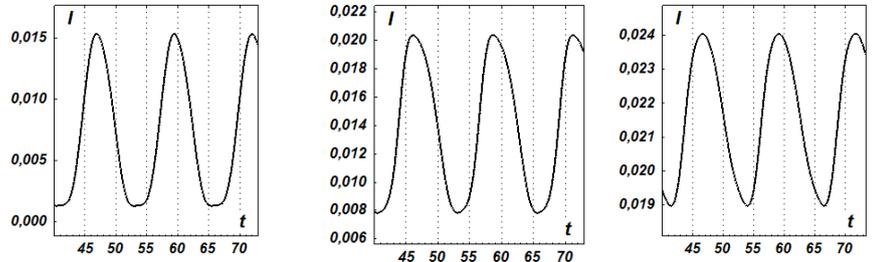
$$\Omega(\Delta) = \sqrt{\Delta^2 + (d / \hbar) 2E} > \Gamma, \quad (6)$$

где d – дипольный момент перехода ($d = 1$).

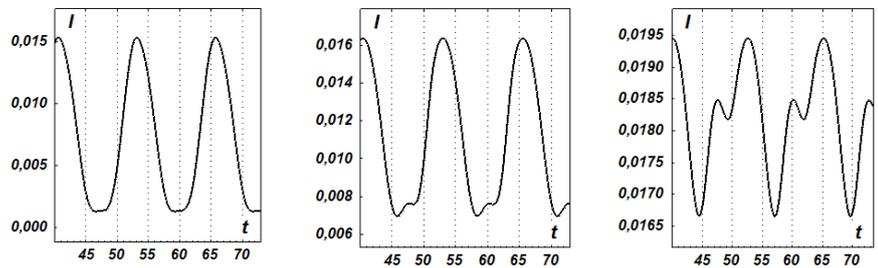
Точный
резонанс:
 $\Delta=0$



Отстройка
от резонанса
в область
дефокусировки
 $\Delta=-1$



Отстройка
от резонанса
в область
фокусировки
 $\Delta=1$



а

б

в

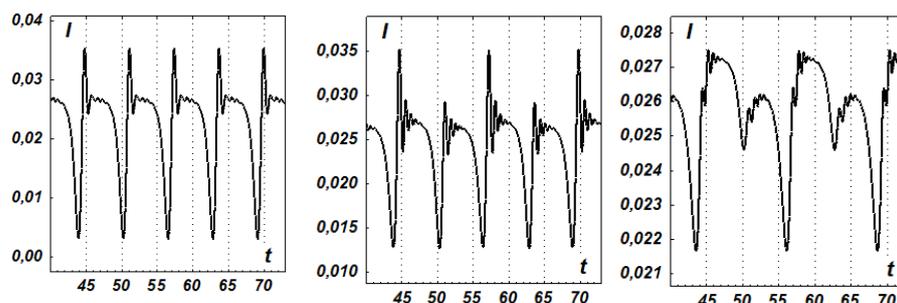
Рис.2. Зависимость от времени выходной интенсивности на оси пучка $I(t)$ при (а) $E_0=0,1$; (б) $E_0=5$; (в) $E_0=10$;

На рис. 3 продемонстрированы проявления оптической нутации в случае точного резонанса несущей частоты и при её отстройке на величину амплитуды модуляции $\omega_1=10$. Таким образом, при точном резонансе частота лазерного пучка дважды пересекает линию поглощения, что вызывает не только удвоение частоты модуляции, но и более ярко выраженный сигнал оптической нутации (рис. 3, верхний ряд). При отстройке несущей частоты от резонанса таким образом, чтобы частота модулированного пучка попадала в резонанс только один раз, наблюдается существенное уменьшение амплитуды осцилляций, что можно объяснить менее резким переходом в область более сильного поглощения с последующим возвратом (рис. 3, средний и нижний ряды).

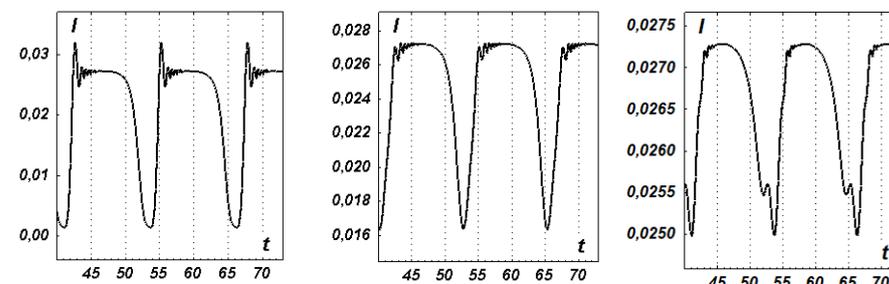
Природа затухающих колебаний объясняется осцилляциями поляризации (рис. 4), вызванными переходами частиц с одного уровня на другой.

При сильном насыщении ($E_0=20$), когда возможно достичь инверсии заселённостей уровней, проявления оптической нутации сглаживаются за счёт уменьшения величины поглощения, способствующей более плавным колебаниям интенсивности (рис. 3в) при неизменном характере релаксации поляризации.

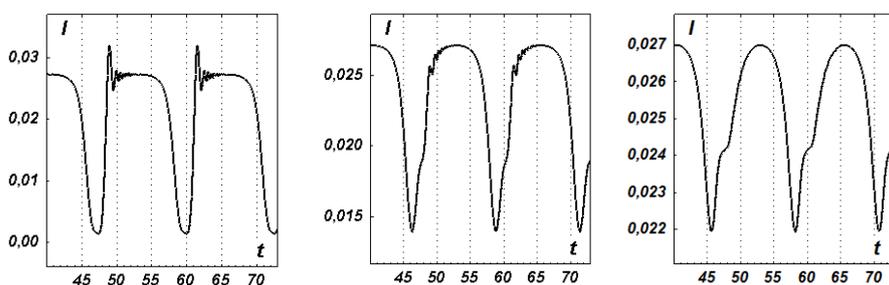
Точный
резонанс:
 $\Delta=0$



Отстройка
от резонанса
в область
дефокусировки
 $\Delta=-10$



Отстройка
от резонанса
в область
фокусировки
 $\Delta=10$

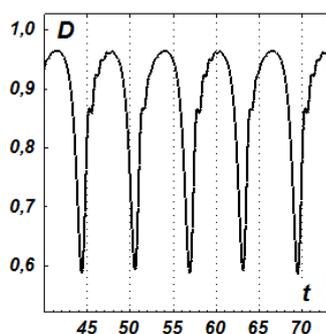


а

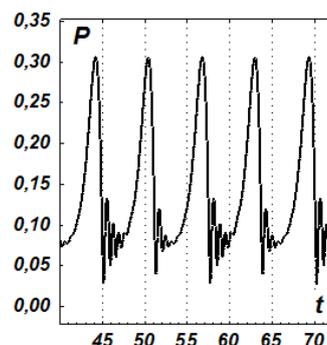
б

в

Рис. 3. Проявление оптической нутации при различных отстройках несущей частоты: (а) в случае отсутствия насыщения ($E_0=0,1$), (б) при среднем насыщении ($E_0=10$), (в) при сильном насыщении ($E_0=20$)



а



б

Рис.4. Динамика разности заселённости D (а) и поляризации P (б) в условиях проявления нестационарной оптической нутации: $E_0=5, \Omega=0.5$, амплитуда модуляции $\omega_1=10$

Четвёртая глава диссертации посвящена анализу нелинейно-динамических свойств частотно-модулированного лазерного пучка, распространяющегося в двухуровневой среде с насыщением поглощения или насыщением усиления в условиях резонансного самовоздействия.

В первом разделе главы с целью исследования нестационарного поведения системы были проанализированы фазовые диаграммы на

плоскости «поляризация среды P – разность заселенностей D », иллюстрирующие динамику отклика среды на воздействующее излучение, а также спектры мощности, рассчитанные по реализации интенсивности на оси пучка на выходе из среды, показанные на рис. 5.

В линейном режиме (рис. 5а), когда модуляция выходной интенсивности близка к гармонической, на фазовом портрете поляризации среды P и разности заселенностей D , а также на спектре мощности интенсивности можно наблюдать режим периодических колебаний с частотой модуляции $1/T$.

В режиме насыщения (рис. 5б, в) полупериоды модуляции становятся неравными, при этом возникает субгармоника, хорошо заметная и на фазовом портрете, и на спектре мощности, которая постепенно с увеличением интенсивности поля подавляет первую гармонику, что объясняется постепенным уменьшением разности заселенностей D и нарастающим влиянием эффекта дефокусировки на частотах ниже резонансной.

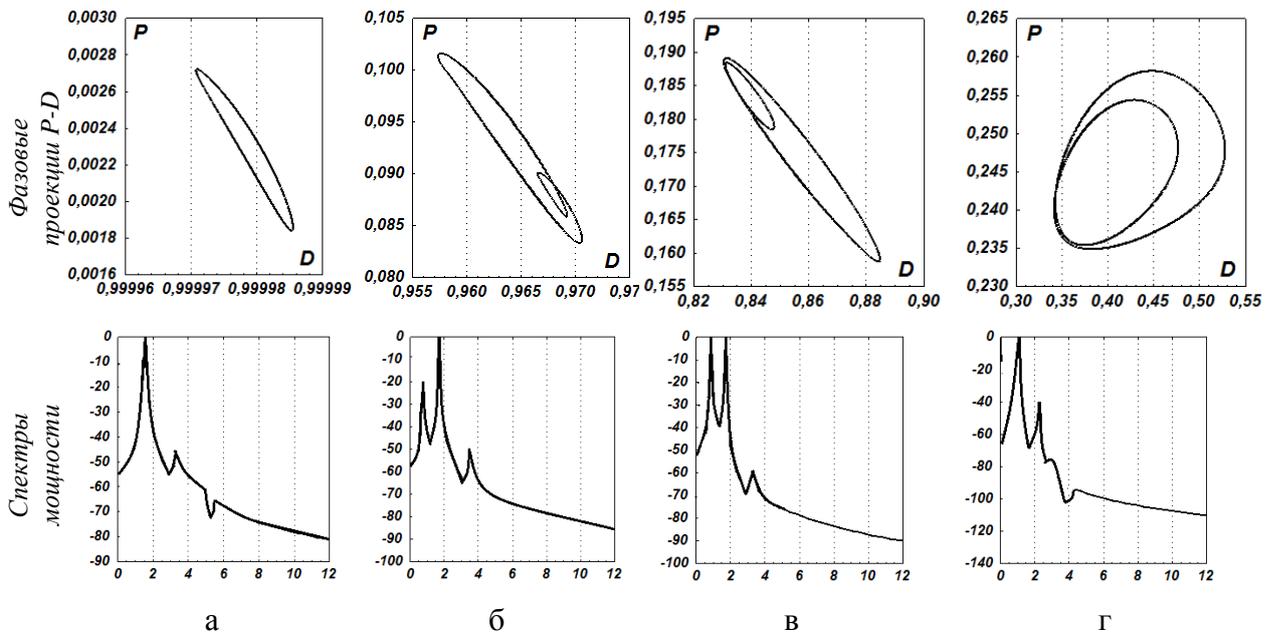


Рис. 5. Проекция фазового пространства системы на плоскость «поляризация среды P – разность заселенностей D » (сверху) и спектры мощности, рассчитанные по реализации интенсивности на оси пучка на выходе из среды (снизу) при (а) $E_0=0,1$; (б) $E_0=3$; (в) $E_0=5$; (г) $E_0=10$

Таким образом, при определённой интенсивности поля возникает эффект деления частоты модуляции, что может оказать существенное влияние на более точное вычисление и идентификацию сигнала ошибки, возникающего при регистрации субдоплеровских спектров в фазово-модуляционной спектроскопии насыщения и при использовании метода переноса спектра модуляции, используемого при стабилизации частоты лазеров.

Во втором разделе главы представлен анализ нелинейно-динамических свойств рассматриваемой системы на основе вычисления показателей Ляпунова, построения сечения Пуанкаре и построения карты динамических режимов.

Анализ динамических свойств рассматриваемой системы проводился на основе вычисления старшего показателя Ляпунова:

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{d(t)}{d(0)}, \quad (7)$$

где $d(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta x_i^2(t)}$ – расстояние между соседними траекториями, а

$d(0) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta x_i^2(0)}$ – начальное расстояние между траекториями.

По вычисленным показателям Ляпунова были построены карты динамических режимов, одна из которых представлена на рис. 6.

Данные карты позволяют визуально оценить, при каких значениях параметров в системе реализуются регулярные или хаотические режимы. Для более точного анализа хаотических режимов были построены сечения Пуанкаре.

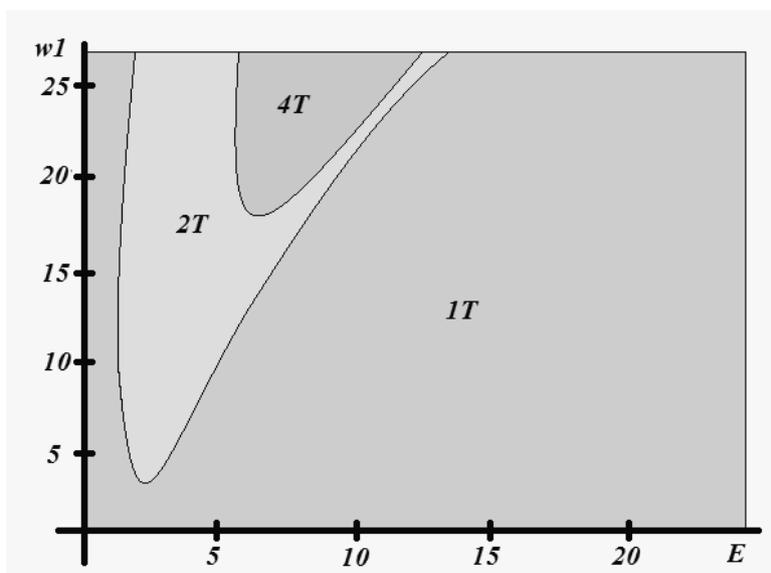


Рис. 6. Карта динамических режимов системы для среды с насыщением поглощения

Необходимо отметить, что как в случае среды с насыщением поглощения, так и с насыщением усиления нелинейно-динамическое поведение системы практически идентично: при отсутствии насыщения в слабых полях система полностью стабильна, то есть реализуется режим цикла периода 1Т.

При увеличении интенсивности поля возникает насыщение, и проявляются эффекты резонансного самовоздействия, вследствие чего

возникает субгармоника и происходит перекачка энергии из основного колебания в субгармонику с последующим делением частоты наведенной амплитудной модуляции. Это характеризуется режимом цикла периода $2T$, хорошо заметным и на проекциях фазового пространства, и на спектрах мощности, и на карте динамических режимов.

При увеличении амплитуды модуляции лазерного пучка возникает эффект нестационарной оптической нутации, на который в случае сильного насыщения накладывается эффект резонансной самофокусировки. Это является дополнительным дестабилизирующим фактором, приводящим к тому, что система переходит в режим цикла периода $4T$.

Дальнейшее увеличение интенсивности поля приводит к просветлению среды, следствием которого является возврат системы в стабильное состояние.

В ходе численных экспериментов было установлено, что общим свойством рассматриваемой системы является переход к циклу периода $2T$, а затем – к циклу периода $4T$ через бифуркацию удвоения периода при изменении управляющих параметров – начальная интенсивность задаваемого сигнала и амплитуда модуляции – в диапазоне значений от 0.1 до 30.

Относительная стабильность рассматриваемой системы объясняется тем, что частотно-модулированный пучок, распространяющийся в двухуровневой среде с насыщением поглощения или усиления, представляет собой нелинейную диссипативную систему, где диссипацию вызывает поглощение и дифракционное распыление пучка.

Устойчивость подобной системы свидетельствует о том, что ее можно использовать в качестве активного элемента в усилителях оптических сигналов в системах волоконно-оптической связи и в оптических линиях задержки.

В **Заключении** приводятся основные результаты и выводы по диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан программный комплекс для численного решения системы уравнений Максвелла-Блоха на основе метода расщепления по направлениям и спектральном разложении по модам поперечного распределения поля и поляризации среды. Данный комплекс предназначен для численного исследования динамики протяжённого лазерного пучка, модулированного по частоте, распространяющегося в нелинейно-оптической двухуровневой среде с насыщением поглощения и дисперсии. Программный комплекс предоставляет возможность исследования как пространственно-временных и частотных характеристик распространяющегося сигнала и отклика среды, так и нелинейно-динамических свойств рассматриваемой системы. Он обладает развитым

пользовательским интерфейсом с разнообразным графическим представлением результатов и возможностью распараллеливания вычислений.

2. С целью реализации параллельных вычислений на основе технологий CUDA, GLSL, OpenMP, OpenCL была проведена векторизация используемого численного алгоритма разложения поперечного распределения поля и поляризации среды по модам Гаусса-Лагерра.

3. Впервые для задач нелинейной волновой оптики, связанных с численным моделированием распространения протяжённых лазерных пучков, были реализованы параллельные вычисления на основе графических процессоров NVidia и ATI и проведён сравнительный анализ быстродействия различных технологий: CUDA, GLSL, OpenMP, OpenCL.

4. Методами численного моделирования исследовано распространение частотно-модулированных протяжённых лазерных пучков в двухуровневой среде с насыщением поглощения и дисперсии. Показано, что благодаря эффектам резонансного самовоздействия по мере роста интенсивности распространяющегося сигнала возрастает степень влияния наведённой рефракции, что, в свою очередь, вызывает существенные искажения осцилляций выходной интенсивности частотно-модулированного лазерного пучка как в случае точного резонанса (двукратный проход через резонанс), так и при отстройке несущей частоты на величину, равную амплитуде модуляции (однократный проход через резонанс).

5. В протяженных лазерных пучках, модулированных по частоте, исследованы условия появления эффекта оптической нутации и обнаружено, что эффекты резонансного самовоздействия пучка сглаживают оптическую нутацию в случае сильных полей, вызывающих насыщение поглощения и инверсию населённостей уровней.

6. Впервые исследованы нелинейно-динамические характеристики и степень устойчивости лазерных пучков, модулированных по частоте, распространяющихся в средах с насыщением поглощения и с насыщением усиления. Анализ показателей Ляпунова, спектров мощности, рассчитанных по реализации интенсивности на оси пучка, проекций фазовых портретов отклика среды и сечений Пуанкаре показал, что рассматриваемая система отличается высокой степенью устойчивости, где реализуются только режим цикла $1T$, режим цикла периода $2T$ и режим цикла периода $4T$, переход к которым идёт через бифуркацию удвоения периода.

7. Устойчивость системы, включающей нелинейно-оптическую среду с насыщением поглощения и дисперсии и распространяющийся в ней частотно-модулированный протяжённый лазерный пучок, объясняется наличием диссипации и может обеспечивать стабильное распространение лазерных сигналов при использовании подобных сред в качестве активных элементов в оптических усилителях и линиях задержки.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в периодических изданиях, включённых в список ВАК РФ

1. Нестационарное резонансное самовоздействие лазерного сигнала, модулированного по частоте / И.Л. Пластун, А.О. Мантуров, А.Г. Мисюрин, В.Б. Байбурин // Вестник СГТУ. 2009. №. 4 (43). Вып. 2. С. 24-27.

2. Пластун И.Л., Мисюрин А.Г. Оптическое деление частоты при распространении лазерного излучения в среде с насыщением поглощения и дисперсии // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. №3. С.292-296.

3. Пластун И.Л., Мисюрин А.Г. Пространственно-временная динамика модулированного лазерного пучка в протяжённой нелинейно-оптической среде // Известия СГУ Новая серия. Серия физика. 2011. Т. 11. Вып. 1. С. 14-19.

4. Пластун И.Л., Мисюрин А.Г. Использование многопоточных технологий в расчетах задач распространения лазерных пучков в условиях самовоздействия // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36. № 3. С. 316-326.

5. Пластун И.Л., Мисюрин А.Г. Нестационарная оптическая нутация в частотно-модулированных протяжённых лазерных пучках в условиях резонансного самовоздействия // Известия СГУ Новая серия. Серия физика. 2012. Т. 12. Вып. 2. С. 52-57.

Статьи в сборниках трудов научных конференций и других изданиях

6. Мисюрин А.Г., Вдовухин А.А. Численное исследование резонансного самовоздействия и нестационарных эффектов в нелинейно-оптических средах // Инновации и актуальные проблемы техники и технологий: материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Саратов: СГТУ, 2009. С. 23-25.

7. Пластун И.Л., Мисюрин А.Г. Анализ нестационарности поведения лазерного пучка, моделируемого системой уравнений Максвелла-Блоха // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23: сборник трудов XXIII Международной научной конференции. Саратов: СГТУ, 2010, Т. 7. Секция 8. С. 80-82.

8. Мисюрин А.Г., Пластун И.Л. Математическое моделирование нестационарных эффектов в нелинейно-оптических двухуровневых средах // Инновации и актуальные проблемы техники и технологий: материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Саратов: СГТУ, 2010. Т. 1. С.195-197.

9. Мисюрин А.Г., Пластун И.Л. Анализ динамики лазерного пучка, распространяющегося в условиях резонансного самовоздействия // Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2010. Известия вузов. ПНД. Саратов:, 2010. С. 28-32

10. Мисюрин А.Г., Пластун И.Л. Численный анализ нестационарности поведения модулированного лазерного пучка в усиливающей среде // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24: сборник

трудов XXIV Международной научной конференции. Киев: Национальный технический университет Украины, 2011. Т. 1. Секция 1. С. 74-76.

11. Пластун И.Л., Мисюрин А.Г., Оруджев А.А. Анализ динамики протяжённых лазерных пучков, модулированных по частоте, в условиях проявления резонансных нелинейных интерференционных эффектов // Материалы XV Международной зимней школы-семинара по электронике СВЧ и радиофизике. Саратов, 2012. С. 50-51.

12. Мисюрин А.Г., Пластун И.Л. Решение уравнений нелинейной оптики на основе технологии CUDA // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25: сборник трудов XXV Международной научной конференции. Волгоград, 2012, Т. 5. Секция 9. С. 86-88.

Патентные документы

13. Программа численного решения системы уравнений Максвелла-Блоха / Пластун И.Л., Мисюрин А.Г. Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010613449. (зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.05.2010).

Подписано в печать 10.12.12

Бум. офсет.

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,0

Заказ 215

Формат 60×84 1/16

Уч.-изд. л. 1,0

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Тел.: 24-95-70; 99-87-39, e-mail: izdat@sstu.ru

