

На правах рукописи

Потравкин Николай Николаевич

**Формирование и распространение неоднородно эллиптически
поляризованных импульсов в средах с кубической нелинейностью**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Международном лазерном центре Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Макаров Владимир Анатольевич,
Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник Карташов Ярослав Вячеславович,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт спектроскопии Российской академии наук

доктор физико-математических наук, профессор
Козлов Сергей Аркадьевич,
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования Санкт-Петербургский
национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской
академии наук

Защита состоится « » _____ 2015 года в 15 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д.501.001.31 при Московском государственном университете
имени М.В. Ломоносова» по адресу: 119991 Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, д. 1, стр. 62
«Корпус нелинейной оптики», аудитория имени С.А. Ахманова.

С текстом диссертации можно ознакомиться в Отделе диссертаций Научной библиотеки
МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский пр-т, д.27) и на сайте физического
факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

<http://www.phys.msu.ru/rus/research/disser/sovets-D501-001-31/>.

Автореферат разослан « » _____ 2015

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.501.001.31
кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. Развитие методов генерации и контроля коротких лазерных импульсов позволило сократить их длительность до нескольких периодов колебаний электрического поля. Специфику и эффективность взаимодействия этих импульсов с веществом часто определяет состояние их поляризации (например, в случае мультифотонной ионизации, генерации гармоник высокого порядка, в задачах когерентной спектроскопии и контроля состояния отдельных молекул и атомов). Наличие дополнительных степеней свободы по сравнению с линейно поляризованным излучением открывает возможности использования эллиптически поляризованных импульсов для передачи информации. Благодаря реализации сбалансированного влияния частотной дисперсии и кубической нелинейности среды происходит формирование устойчивых волновых пакетов, распространяющихся без существенного изменения своей формы на большие расстояния.

Теоретическое исследование самовоздействия коротких лазерных импульсов обычно проводится в приближении неизменности состояния их линейной поляризации. Это связано не только с тем, что в эксперименте линейно поляризованные импульсы с заданными характеристиками получить легче, но и со значительной трудностью описания распространения эллиптически поляризованных импульсов в нелинейных средах из-за как минимум двукратного увеличения числа нелинейных уравнений и недостатка информации о тензорных характеристиках вещества. Например, впечатляющие методы исследования систем уравнений в частных производных лишь в отдельных редких случаях позволяют найти аналитические решения двух связанных нелинейных уравнений Шредингера для огибающих ортогонально поляризованных компонент электрического поля, описывающих, в частности, распространение коротких световых импульсов в двулучепреломляющих волоконных световодах или в нелинейных оптически активных безынерционных средах во втором приближении теории дисперсии. Несомненно, более трудной задачей является анализ распространения эллиптически поляризованных коротких импульсов в средах с сильной нелокальностью нелинейного оптического отклика, когда становится невозможно ограничиться учетом только линейного по параметру пространственной дисперсии вклада в нелинейную поляризацию среды.

Поляризационные эффекты при самовоздействии коротких лазерных импульсов в средах с релаксационной кубической нелинейностью практически не изучены. Использование импульсов с разной эллиптической поляризацией позволяет получить существенно больше спектроскопической информации о нелинейной среде по сравнению с применением линейно или циркулярно поляризованного излучения. Анализ динамики распространения эллиптически поляризованного импульса также актуален с точки зрения развития нелинейной оптики микроструктурированных волокон, в полую сердцевину которых могут вводиться газы или оптически активные жидкости.

Прогресс последнего десятилетия в изготовлении метаматериалов позволил создать искусственно структурированные среды, демонстрирующие гигантскую линейную и нелинейную оптическую активность, проявляющуюся в существенном различии показателей преломления, а также коэффициентов отражения и пропускания циркулярно поляризованных импульсов с противоположным направлением вращения вектора напряженности электрического поля в широком диапазоне частот. Это позволяет разрабатывать компактные оптические устройства для получения привлекательного для различных приложений циркулярно поляризованного света, т.к. традиционные способы, основанные на использовании пластинки толщиной в четверть длины волны или холестерического жидкого кристалла с шагом спиральной структуры, мало отличающимся от длины распространяющегося излучения, становятся неприемлемыми из-за широкого спектра сверхкоротких лазерных импульсов. В связи с этим становится актуальным исследование особенностей взаимодействия эллиптически поляризованных импульсов с метаматериалами, основанное на численном решении системы уравнений Максвелла, представляющем достаточно сложную задачу из-за объема вычислений и трудности интерпретации найденных пространственно-временных зависимостей декартовых компонент электрического и магнитного полей. Ее возможное упрощение связано с переходом к одномерной однородной среде, характеризующейся нелокальными материальными уравнениями, записанными без применения широко используемого приближения малости параметра пространственной дисперсии.

Целью работы является:

1. Анализ механизмов формирования эллиптически поляризованных уединенных и кноидальных волн в изотропных гиротропных средах, обладающих частотной дисперсией и пространственной дисперсией нелинейно-оптического отклика и исследование возможности получения дополнительной спектроскопической информации на основе измерения их поляризационных характеристик.

2. Построение классической модели нелинейной среды, обладающей частотной дисперсией и нелокальностью нелинейного оптического отклика, позволяющей записать материальные уравнения без широко используемого требования малости параметра пространственной дисперсии и ее применение для описания распространения эллиптически поляризованных импульсов длительностью в несколько периодов колебаний электрического поля в таких средах.

3. Выявление особенностей взаимодействия сверхкоротких эллиптически поляризованных импульсов с нелинейными хиральными метаматериалами, состоящими из периодически расположенных в виде двумерной решетки трехмерных спиралей.

Научная новизна работы

1. Найдены новые частные аналитические решения неинтегрируемой системы из двух нелинейных уравнений Шредингера, описывающих, в частности, динамику распространения коротких световых импульсов в двулучепреломляющих волоконных световодах или нелинейных оптически активных средах, в предположении линейной связи между интенсивностями циркулярно поляризованных компонент распространяющейся волны. Определены области существования этих решений, среди которых два новых семейства эллиптически поляризованных кноидальных волн.

2. Впервые показано, что в случае сред с безынерционной кубической нелинейностью специальный выбор формы падающего импульса приводит к формированию эллиптически поляризованной уединенной волны и ее дальнейшему распространению на достаточно большие расстояния, даже если полуширина падающего на среду импульса меньше периода колебаний электрического поля.

3. Предложена модель нелинейной среды, обладающей частотной дисперсией и нелокальностью оптического отклика, позволившая впервые записать материальные уравнения без широко используемого требования

малости параметра пространственной дисперсии и исследовать динамику распространения в ней эллиптически поляризованных импульсов длительностью в несколько периодов колебаний электрического поля с помощью численного решения системы уравнений Максвелла.

4. Впервые установлено, что при падении лазерного импульса на метаматериал, состоящий из периодически расположенных в виде двухмерной решетки трехмерных спиралей, в нем могут возникать существенно различные режимы колебаний электрической и магнитной частей плотности энергии электромагнитного поля, обуславливающие эффект селективного отражения циркулярно поляризованных компонент падающего излучения.

5. Впервые показано, что с ростом интенсивности циркулярно поляризованного по правому (левому) кругу сверхкороткого импульса (длительностью в несколько периодов колебаний электрического поля), падающего на образец, состоящий из достаточного числа сделанных из нелинейного материала правозакрученных (левозакрученных) спиралей, происходит расширение в сторону меньших частот границы частотного интервала, внутри которого практически все падающее излучение отражается от среды. Поляризованный по левому (правому) кругу сверхкороткий циркулярно поляризованный импульс в этом случае легко проходит через среду.

Практическая ценность работы

1. Найденные аналитические частные решения неинтегрируемой системы из двух нелинейных уравнений Шредингера из-за универсальности последней представляют интерес при анализе достаточно широкого круга физических проблем, а также могут быть использованы для оценки точности численной схемы, применяемой при решении этой системы с произвольными начальными и граничными условиями.

2. Установленная зависимость скорости низкочастотного сдвига спектра уединенной волны от ее степени эллиптичности может быть использована для плавной перестройки частоты лазерного излучения, а также для получения спектроскопической информации о компонентах тензора локальной кубической восприимчивости, недоступной при измерениях с линейно поляризованными импульсами.

3. Результаты исследований влияния параметров структурной ячейки хирального метаматериала, состоящего из периодически расположенных в

виде двухмерной решетки трехмерных спиралей, на пропускание и отражение нормально падающего на образец эллиптически поляризованного света, позволяют построить и оптимизировать компактный циркулярный поляризатор, диапазон частот которого зависит от интенсивности падающего излучения.

4. Предложенная в диссертации модель кубического по полю отклика изотропной гиротропной среды и разработанная модификация метода конечных разностей во временной области (FDTD) может быть использована для численного моделирования взаимодействия эллиптически поляризованных импульсов произвольной формы и длительности с неоднородными оптически активными средами.

Защищаемые положения

1. Система уравнений для медленно меняющихся амплитуд циркулярно поляризованных компонент светового поля в изотропной среде с частотной дисперсией и пространственной дисперсией кубической нелинейности имеет частные аналитические решения в виде уединенных и кноидальных волн, у которых не только интенсивность, но и состояние поляризации меняется вдоль временного профиля.

2. Предложенная модель среды, обладающей частотной дисперсией и нелокальностью нелинейного оптического отклика, дает возможность записать материальные уравнения без широко используемого приближения малости параметра пространственной дисперсии и корректно описать в рамках метода конечных разностей во временной области (FDTD) распространение эллиптически поляризованных импульсов длительностью в несколько периодов колебаний электрического поля.

3. Выбор формы лазерного импульса, нормально падающего на изотропную среду с аномальной частотной дисперсией и безынерционной кубической нелинейностью, в виде солитонного решения системы нелинейных уравнений Шредингера обеспечивает формирование в процессе его дальнейшего распространения (описываемого с помощью метода конечных разностей во временной области) эллиптически поляризованной уединенной волны, даже если длительность падающего импульса меньше периода колебаний электрического поля.

4. Возрастание степени эллиптичности эллипса поляризации уединенной волны, распространяющейся в нелинейной среде с инерционным кубическим откликом, приводит к изменению скорости сдвига ее несущей частоты.

5. При падении эллиптически поляризованного лазерного импульса длительностью в несколько периодов колебаний электрического поля на метаматериал, состоящий из периодически расположенных в виде двухмерной решетки трехмерных диэлектрических спиралей, в нем возникают различные режимы колебаний электрической и магнитной частей плотности энергии электромагнитного поля, обуславливающие эффект селективного отражения циркулярно поляризованных компонент падающего излучения.

6. С ростом интенсивности поляризованного по правому (левому) кругу циркулярно поляризованного импульса, имеющего длительность в несколько периодов колебаний электрического поля и падающего на метаматериал, состоящий из периодически расположенных в виде двухмерной решетки трехмерных правозакрученных (левозакрученных) спиралей, обладающих безынерционным кубическим откликом, происходит расширение частотного интервала, внутри которого практически все падающее излучение отражается от среды, и сдвиг его нижней границы в сторону меньших частот. Импульс с противоположной поляризацией в этом случае легко проходит через среду.

Структура и объём диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. В первом параграфе каждой главы приводится краткий обзор литературы по рассматриваемой в ней проблеме и формулируются задачи исследования. Полный объем работы составляет 123 страницы. Список цитированной литературы содержит 208 библиографических ссылок.

Личный вклад автора

Работа выполнена под руководством профессора, доктора физико-математических наук В.А. Макарова, совместно с которым определялось направление исследований и проводилось обсуждение полученных результатов. Автору принадлежит нахождение методов решения поставленных задач, создание и адаптация использованных в диссертации компьютерных программ, получение и интерпретация результатов. Часть изложенных в § 1.2 результатов получена совместно с кандидатом физико-математических наук И.А. Пережогиним, который также принимал участие в обсуждении других результатов диссертации. Исследование распространения различных типов эллиптически поляризованных кноидальных волн (§ 1.4) проводилось при непосредственном руководстве доктора физико-математических наук, профессора В.В. Шувалова и кандидата физико-

математических наук В.М. Петниковой. В численном решении уравнений Максвелла, являющихся частью § 2.3, под руководством автора принимал участие студент физического факультета МГУ Г.А. Грязнов.

Апробация работы и публикации

Основные материалы диссертации докладывались на Международной конференции “Фундаментальные Проблемы Оптики” (2008, Санкт-Петербург), Международных конференциях по когерентной и нелинейной оптике (ICONO’2010, Казань; ICONO’2013, Москва), Международных конференциях по лазерной физике (LPHYS’2008, Трондхейм, Норвегия; LPHYS’2009, Барселона, Испания; LPHYS’2013, Прага, Чехия; LPHYS’2014, София, Болгария), Международной конференции по современным лазерным технологиям (ALT’12), Международной научной конференции «Оптика лазеров» (LO’2012, Санкт-Петербург), на Всероссийских конференциях по фотонике и информационной оптике (2013, Москва; 2014, Москва) и опубликованы в двадцати четырех работах, включая тринадцать статей в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК Российской Федерации.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели, научная новизна, практическая ценность и защищаемые положения.

В **первой главе** изложены полученные в рамках метода медленно меняющихся амплитуд результаты анализа распространения эллиптически поляризованных импульсов и кноидальных волн в изотропных средах с частотной дисперсией и пространственной дисперсией кубической нелинейности. В первом параграфе дан краткий обзор проведенных ранее исследований.

В § 1.2 рассмотрено самовоздействие однородно эллиптически поляризованных (в начальный момент времени) импульсов гауссовой формы с длительностью τ_0 и пиковой интенсивностью I_0 , спектр которых расположен вдали от характерных резонансов среды, обладающей кубической нелинейностью и пространственной дисперсией нелинейного оптического отклика, характеризующихся тензорами четвертого и пятого рангов, ненулевые компоненты которых соответственно пропорциональны константам $\sigma_{1,2}$ и ρ_1 .

Приведены результаты численного анализа системы нелинейных уравнений Шредингера (НУШ) для медленно меняющихся комплексных амплитуд $A_{\pm}(z,t) = A_x \pm iA_y$ циркулярно поляризованных компонент электрического поля. Найдены решения НУШ, описывающие формирование на расстояниях в несколько дисперсионных длин L_d эллиптически поляризованных уединенных волн, временные огибающие циркулярно поляризованных компонент которых очень близки к гиперболическим секансам (см. рис. 1). При этом степень эллиптичности их эллипсов поляризации $M(z,t) = (|A_+|^2 - |A_-|^2)/2I$ меняется вдоль временного профиля интенсивности $I(z,t) = (|A_+|^2 + |A_-|^2)/2$, а угол $\Psi(z,t) = 0,5 \text{ Arg}(A_+ A_-^*)$

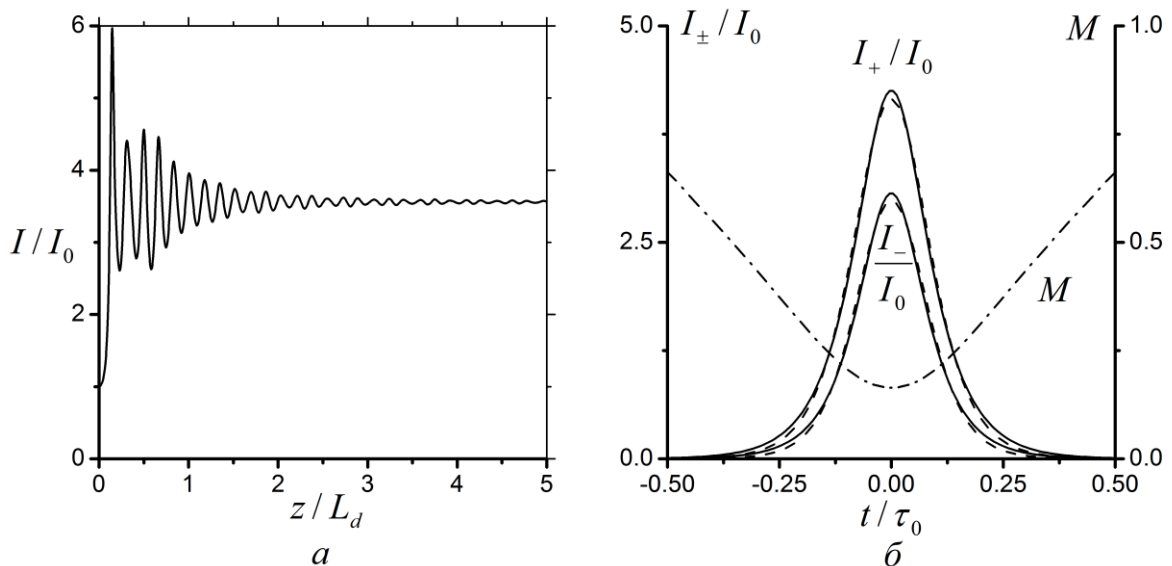


Рис. 1. Зависимость нормированной интенсивности в центре распространяющегося импульса от z/L_d в процессе формирования эллиптически поляризованной уединенной волны (а), зависимости $I_{\pm}/I_0 = |A_{\pm}|^2/I_0$ от t/τ_0 (пунктирные линии) в сформированной уединенной волне при $z = 5L_d$ (б), которые практически совпадают с аппроксимацией I_{\pm}/I_0 гиперболическими секансами (сплошные линии) и степени эллиптичности от t/τ_0 (штрих-пунктирная кривая) при $M(z=0,t) = 0.4$, $\sigma_1 L_d I_0 = 5$, $\sigma_2/\sigma_1 = 2$, $\rho_{0,1} = 0$

поворота их главных осей одинаков вдоль импульсов и линейно возрастает с ростом координаты распространения. Их поиск был связан с решением задачи на собственные значения полученной в диссертации системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка для $|A_{\pm}|$. С помощью теории возмущений определены границы изменений собственных значений, при которых происходит формирование эллиптически поляризованных уединенных волн.

Параграф 1.3 посвящен численному исследованию влияния длительности, пиковой интенсивности и поляризации падающего импульса на характер его распространения в обладающей дисперсией групповой скорости изотропной гиротропной среде с пространственной дисперсией кубической нелинейности, также имеющей различные времена релаксации T_{\pm} для зависящих от интенсивности добавок к показателям преломления правой и левой циркулярно поляризованных волн. Показано, что различие времен релаксации наиболее сильно проявляется при распространении импульса, степень эллиптичности эллипса поляризации которого на границе среды равна $-\rho_1/\sigma_2$. Максимальное отличие $M(z,t)$ в импульсе от $-\rho_1/\sigma_2$ пропорционально $|T_+ - T_-|$ и линейно возрастает с ростом z .

В § 1.4 определены условия существования ранее неизвестных частных решений системы НУШ, соответствующих распространяющимся эллиптически поляризованным кноидальным волнам в случае формирования в нелинейной среде волноводов единого профиля интенсивности для компонент $A_{\pm}(z,t)$. Модули циркулярно поляризованных компонент этих кноидальных волн выражаются через эллиптические функции Якоби, а в общем случае нелинейно зависящие от времени фазы линейно меняются с ростом z . При различных значениях параметров нелинейной среды найдены временные зависимости интенсивности и степени эллиптичности эллипса поляризации распространяющихся кноидальных волн. Установлено, что частоты $\omega_{\pm}(t) = d(\text{Arg}\{A_{\pm}\})/dt$ меняются согласованно с периодическим изменением $|A_{\pm}(z,t)|^2$, а характер изменения состояния поляризации определяется начальными условиями. Показана возможность возникновения аperiodических режимов изменения поляризации распространяющейся волны, внешне похожих на поляризационный хаос.

Основные результаты этой главы опубликованы в [1,2,5-9] и доложены на конференциях [1-7,10,11].

Вторая глава посвящена численному исследованию распространения эллиптически поляризованных импульсов длительностью в несколько периодов колебаний электрического поля в линейных и нелинейных изотропных гиротропных средах с частотной дисперсией и нелокальностью оптического отклика, материальные уравнения для которых записаны без широко используемого требования малости параметра пространственной дисперсии.

Параграф 2.1 содержит обзор ранее выполненных работ, посвященных формированию и распространению коротких эллиптически поляризованных импульсов и уединенных волн в изотропных гиротропных средах с частотной и пространственной дисперсией.

В § 2.2 предложена модель изотропной линейной среды с частотной дисперсией, позволившая записать связывающее индукцию и напряженность электрического поля материальное уравнение без широко используемого требования малости параметра пространственной дисперсии. Здесь же описана проведенная модификация метода конечных разностей во временной области (FDTD) со вспомогательным дифференциальным уравнением, в результате которой появилась возможность моделировать взаимодействие эллиптически поляризованных импульсов произвольной формы и длительности с оптически активными средами.

Продемонстрировано хорошее совпадение результатов численного моделирования с ранее известным решением задачи о распространении в среде длинного импульса, полученным в рамках метода медленно меняющихся амплитуд. Однако уже для падающих на среду линейно

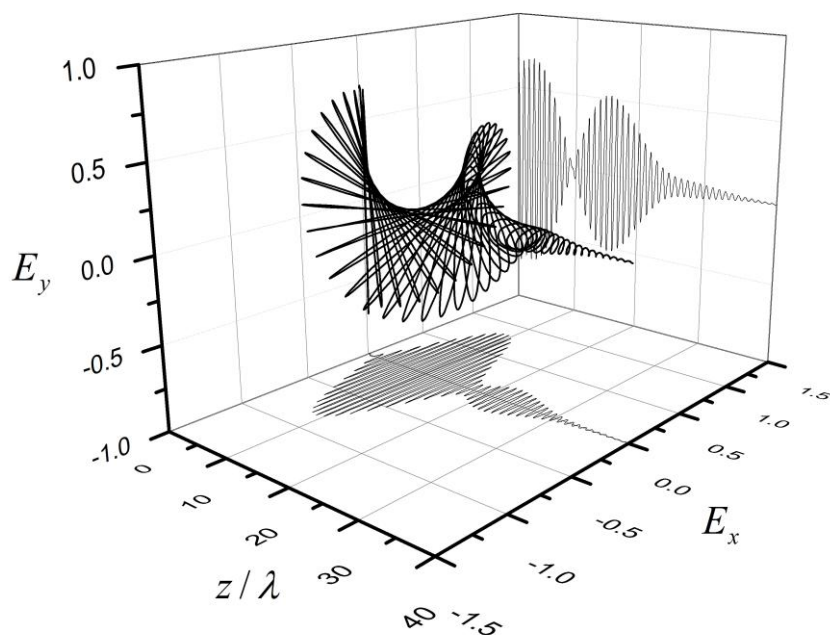


Рис. 2. Годограф вектора напряженности электрического поля в среде с сильной пространственной дисперсией линейного оптического отклика (масштаб нелокальности равен 0.2λ). Полуширина огибающей падающего линейно поляризованного в плоскости zy импульса гауссовой формы равна 20λ .

поляризованных импульсов длительностью порядка двадцати и менее длин волн оказывается невозможным описание происходящего в среде изменения

модуля и ориентации вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} с помощью привычного эллипса поляризации. Об этом изменении теперь можно судить только по виду годографа \mathbf{E} – кривой в пространстве переменных E_x, E_y, z , которую описывает конец вектора \mathbf{E} (см. рис. 2).

Далее приводятся результаты исследования взаимодействия состоящих из нескольких колебаний светового поля эллиптически поляризованных лазерных импульсов с линейной средой. Пройдя некоторое расстояние, импульс становится несимметричным. Его высокочастотные компоненты скапливаются на переднем фронте, где пространственная дисперсия изменяет направление колебаний вектора напряженности электрического поля значительно сильнее, чем на заднем фронте, где собираются низкочастотные гармоники. Для таких импульсов вид годографов плохо поддается классификации. В частности, распространение падающих на среду линейно поляризованных импульсов уже существенно отличается от подробно описанного в литературе явления линейной оптической активности, для которого характерен одинаковый (не зависящий от времени) пропорциональный координате распространения поворот плоскости поляризации. Зависимость угла поворота главной оси эллипса поляризации импульса в толще среды от времени имеет ярко выраженный нелинейный вид.

В § 2.3 предложено и обосновано выражение для кубической восприимчивости изотропной гиротропной среды:

$$\begin{aligned}
\chi_{ijkl}^{(3)}(t_1, t_2, t_3, z, z_1, z_2, z_3) = & a\delta(t_1)\delta(t_2)\delta(t_3)\delta(z_1)\delta(z_2)\delta(z_3)[\delta_{ij}\delta_{kl} + \delta_{ik}\delta_{jl} + \\
& + \delta_{il}\delta_{jk}] + \delta(t_1)\delta(t_2 - t_3)g_3(t_3)\delta(z - z_1)\delta(z_2 - z_3)[b_1\delta_{ij}\delta_{kl} + b_2(\delta_{ik}\delta_{jl} + \\
& + \delta_{il}\delta_{jk}) + \gamma_3(z - z_3)(\delta_{xi}\delta_{yj} - \delta_{yi}\delta_{xj})\delta_{kl}] \exp[-(z - z_3)^2 / d_3^2] / (\sqrt{\pi}d_3) + \\
& + \delta(t_2)\delta(t_1 - t_3)g_3(t_1)\delta(z - z_2)\delta(z_1 - z_3)[b_1\delta_{ik}\delta_{jl} + b_2(\delta_{ij}\delta_{kl} + \delta_{il}\delta_{jk}) + \\
& + \gamma_3(z - z_1)(\delta_{xi}\delta_{yk} - \delta_{yi}\delta_{xk})\delta_{jl}] \exp[-(z - z_1)^2 / d_3^2] / (\sqrt{\pi}d_3) + \\
& + \delta(t_3)\delta(t_1 - t_2)g_3(t_2)\delta(z - z_3)\delta(z_1 - z_2)[b_1\delta_{il}\delta_{jk} + b_2(\delta_{ij}\delta_{kl} + \delta_{ik}\delta_{jl}) + \\
& + \gamma_3(z - z_2)(\delta_{xi}\delta_{yl} - \delta_{yl}\delta_{xi})\delta_{jk}] \exp[-(z - z_2)^2 / d_3^2] / (\sqrt{\pi}d_3),
\end{aligned} \tag{1}$$

интегрально связывающее ее поляризацию в точке z в момент времени t с напряженностями $\mathbf{E}(z_1, t_1)$, $\mathbf{E}(z_2, t_2)$ и $\mathbf{E}(z_3, t_3)$. Отношения b_1/a и b_2/a в (1) определяют относительный вклад керровского и рамановского механизмов кубической нелинейности среды, а γ_3 и d_3 – ее пространственную

дисперсию. Индексы i, j, k и l принимают значения x и y , δ – дельта-функция, δ_{ij} – символ Кронекера.

В $g^{(3)}(t_{1,2,3}) = (\tau_1^2 + \tau_2^2)(\tau_1\tau_2^2)^{-1} \exp(-t_{1,2,3}/\tau_2) \sin(t_{1,2,3}/\tau_1)$ входят резонансная частота τ_1^{-1} и время релаксации комбинационно-активной моды τ_2 . Экспоненциальная зависимость в (1) обусловлена требованием быстрого стремления этой функции к нулю с ростом $|z - z_{1,2,3}|$. Далее изложен алгоритм, позволяющий использовать (1) в FDTD расчетах для моделирования взаимодействия эллиптически поляризованных импульсов с нелинейными оптически активными средами. Приводятся результаты его тестовой проверки: численно найденные зависимости $E_{x,y}(z,t)$ сравниваются с ранее известными аналитическими формулами для декартовых компонент распространяющегося в нелинейной среде электрического поля, полученными в результате решения системы связанных уравнений для медленно меняющихся амплитуд циркулярно поляризованных плоских волн в случае слабой пространственной дисперсии кубической нелинейности. Для длинных импульсов численные и аналитические результаты хорошо совпадают.

В конце параграфа изложены результаты исследования взаимодействия однородно эллиптически поляризованных лазерных импульсов ($M(0,t) = M_0$) длительностью менее десяти колебаний электрического поля с нелинейной средой. Результаты численных расчетов принципиально отличаются от предсказанных формулами для зависящих от интенсивности угла поворота и степени эллиптичности эллипса поляризации, полученными в рамках метода медленно меняющихся амплитуд для плоских волн. Как и в случае линейной среды степень эллиптичности эллипса поляризации и угол, задающий его ориентацию в пространстве, теперь теряют физический смысл, и следует говорить об изменениях модуля E и угла, который этот вектор образует с осью x . В зависимости от соотношения между M_0 и характеризующими среду константами в (1), возможны различные режимы распространения падающего импульса. При увеличении его пиковой интенсивности растет доля электрического поля, перекачанного в ортогональную компоненту. Годограф в этом случае становится похожим на слегка деформированную в различных направлениях спираль переменного радиуса, ось которой

параллельна оси z . Иногда в процессе распространения годограф сверхкороткого импульса может поменять направление спиральной закрученности (с правой на левую или наоборот), что отражает изменение направления вращения вектора напряженности электрического поля. Это хорошо видно на рис. 3, где в процессе распространения происходит разбиение импульса на две части с противоположным направлением вращения вектора \mathbf{E} .

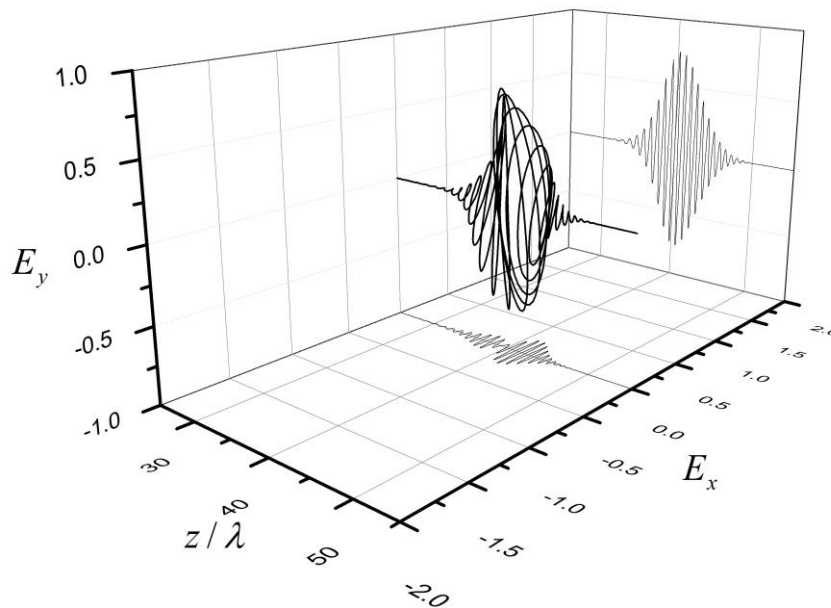


Рис. 3. Годограф напряженности электрического поля импульса с первоначальной полушириной в пять длин волн после прохождения сорока длин волн в среде с сильной пространственной дисперсией кубической нелинейности.

Годографы вектора напряженности электрического поля в изотропной нелинейной среде без пространственной дисперсии, соответствующие падающим импульсам с начальными степенями эллиптичности M_0 и $-M_0$ зеркально симметричны, т.к. оптические свойства среды одинаковы для право- и левополяризованного излучения. Нелокальность нелинейного оптического отклика приводит к разной скорости вращения «эффективного» эллипса поляризации таких импульсов, т.к. для одного из них в процессе распространения к повороту, связанному с самовращением эллипса поляризации, добавляется поворот, связанный с нелинейной оптической активностью, а для другого импульса эти эффекты частично компенсируют друг друга.

В § 2.4 модификация FDTD метода со вспомогательным дифференциальным уравнением применена для нахождения и исследования квазисолитонного режима распространения эллиптически поляризованного

сверхкороткого импульса, когда диапазон спектральных частот последнего расположен вдали от частот однофотонных и нерамановских многофотонных резонансов изотропной нелинейной среды, а пространственная дисперсия ее линейного и нелинейного оптического отклика незначительна. Предложенный подход позволяет также проанализировать обусловленный запаздывающей оптической нелинейностью сдвиг спектра распространяющегося импульса в низкочастотную область.

На основании численных расчетов показано, что выбор формы падающего на изотропную среду с аномальной частотной дисперсией и безынерционной кубической нелинейностью импульса в виде солитонного решения системы нелинейных уравнений Шредингера обеспечивает формирование в процессе его дальнейшего распространения (описываемого с помощью FDTD метода) эллиптически поляризованной уединенной волны. При этом в средах с безынерционной кубической нелинейностью вышеупомянутый выбор начальных условий приводит к формированию и дальнейшему распространению эллиптически поляризованной уединенной волны, даже если полуширина падающего на среду импульса меньше периода колебаний электрического поля.

Рис. 4 иллюстрирует типичную эволюцию нормированных декартовых компонент электрического поля формирующейся эллиптически поляризованной уединенной волны. Инерционность нелинейного оптического отклика вещества ограничивает возможность возникновения такого режима распространения длительностью падающего на среду эллиптически поляризованного импульса в несколько периодов колебаний электрического поля.

Установлено, что в зависимости от значений параметров, характеризующих инерционность нелинейного оптического отклика, происходит или увеличение, или уменьшение скорости сдвига несущей частоты распространяющейся эллиптически поляризованной уединенной волны по сравнению со сдвигом несущей частоты линейно поляризованной уединенной волны с такой же пиковой интенсивностью. С ростом пиковой интенсивности падающего импульса этот эффект усиливается. Показано, что для любой степени эллиптичности эллипса поляризации падающего импульса специального вида сдвиг его несущей частоты с хорошей степенью точности пропорционален длительности импульса в минус четвертой степени.

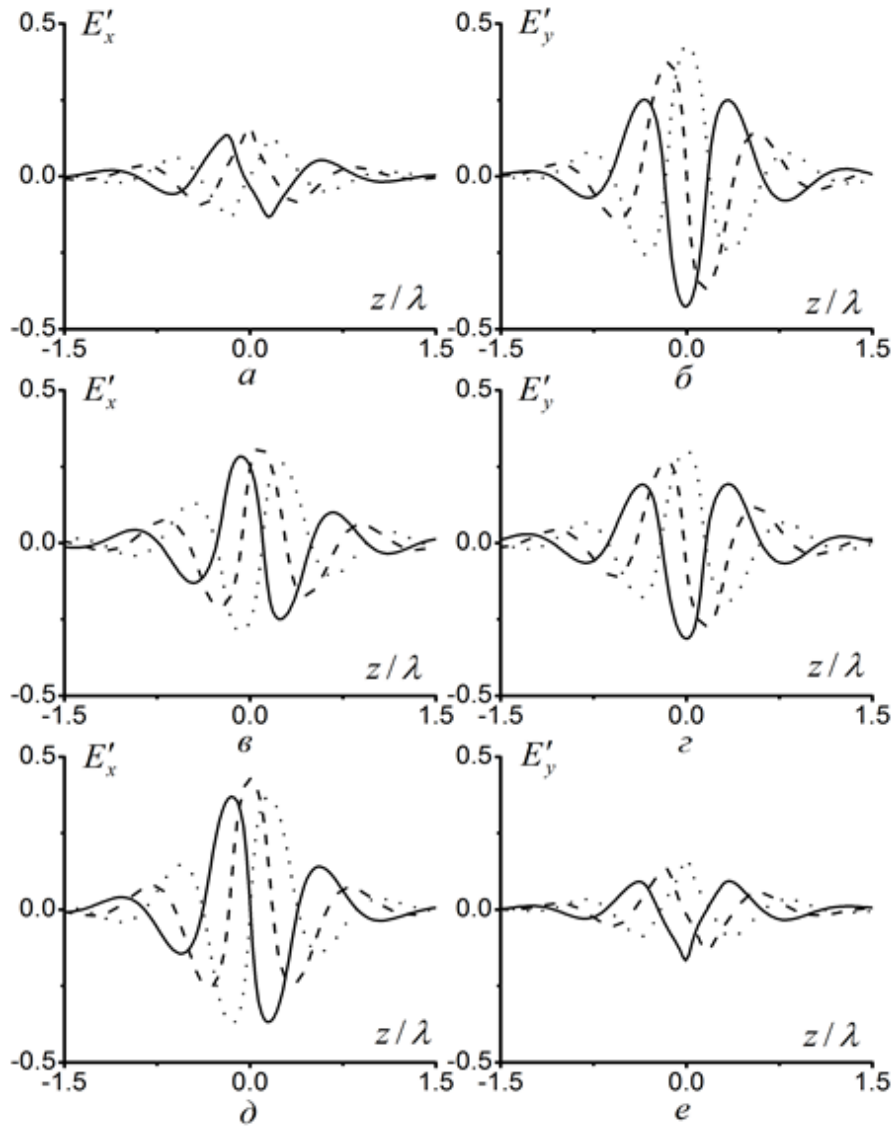


Рис. 4. Зависимости декартовых компонент вектора напряженности электрического поля в «бегущей» системе координат. Сплошные кривые соответствуют моментам времени t_A (a и б), t_B (в и г) t_B (д и e), пунктирные кривые – моментам времени $t_A + \Delta t_0$ (a и б), $t_B + \Delta t_0$ (в и г) $t_B + \Delta t_0$ (д и e), точки моментам времени $t_A + 2\Delta t_0$ (a и б), $t_B + 2\Delta t_0$ (в и г) $t_B + 2\Delta t_0$ (д и e). Здесь $t_B - t_A = t_B - t_B \approx 125\phi c \gg \Delta t_0 \approx 4.3\phi c$.

Основные результаты второй главы опубликованы в статьях [3,4,10,12] и доложены на конференциях [8,9].

В **третьей** главе обсуждаются особенности взаимодействия коротких эллиптически поляризованных импульсов с хиральными метаматериалами, состоящими из периодически расположенных в виде двумерной решетки трехмерных спиралей (см. рис. 5), содержащих несколько полных витков. Обзор существующих работ, посвященных этой тематике, содержится в § 3.1.

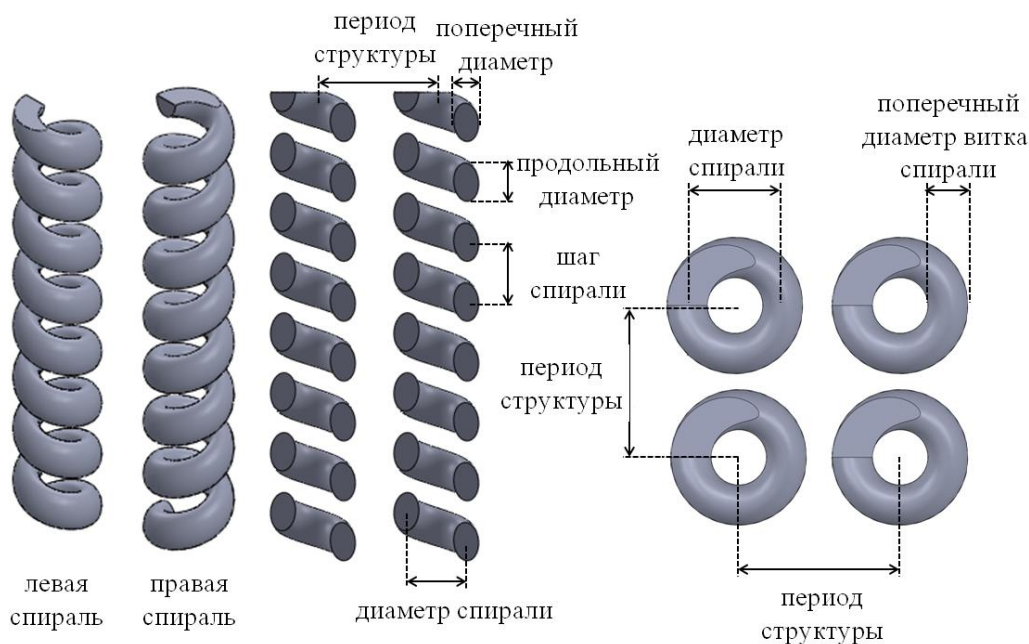


Рис. 5. Схематическое изображение структуры метаматериала

В § 3.2 проводится пространственная дискретизация уравнений Максвелла для трехмерных FDTD расчетов распространения электромагнитной волны в нелинейных метаматериалах, при которой декартовы компоненты векторов напряженностей электрического и магнитного полей вычисляются в центрах элементарных ячеек (схема Liu). Показано, что в отличие от более распространенного подхода, при котором компоненты векторов напряженности электрического и магнитного полей находятся на разнесенных в пространстве декартовых сетках, выбранная дискретизация уравнений Максвелла более эффективна и перспективна для задач нелинейной оптики, когда материальные уравнения не распадаются на независимые уравнения для декартовых компонент поля. Нами использовались несимметричные выражения для пространственных производных на совмещенной сетке, что дало возможность избавиться от осцилляций решений, появляющихся при использовании центральных разностных аппроксимаций на таких сетках. Увеличение порядка аппроксимации позволило преодолеть типичные для схем второго порядка аппроксимации недостатки, связанные с численной дисперсией и анизотропией схем на совмещенных сетках.

В § 3.3 диссертации приведены результаты исследования влияния параметров структурной ячейки (рис. 5) полимерного метаматериала на характер пропускания и отражения нормально падающих на образец эллиптически поляризованных импульсов. Установлено, что при падении

лазерных импульсов длительностью в десять и более периодов колебаний электрического поля в линейной среде возникают сложные режимы осцилляций электрической w_e и магнитной w_h частей плотности энергии электромагнитного поля, обуславливающие возникновение режима селективного отражения циркулярно поляризованных компонент падающего излучения.

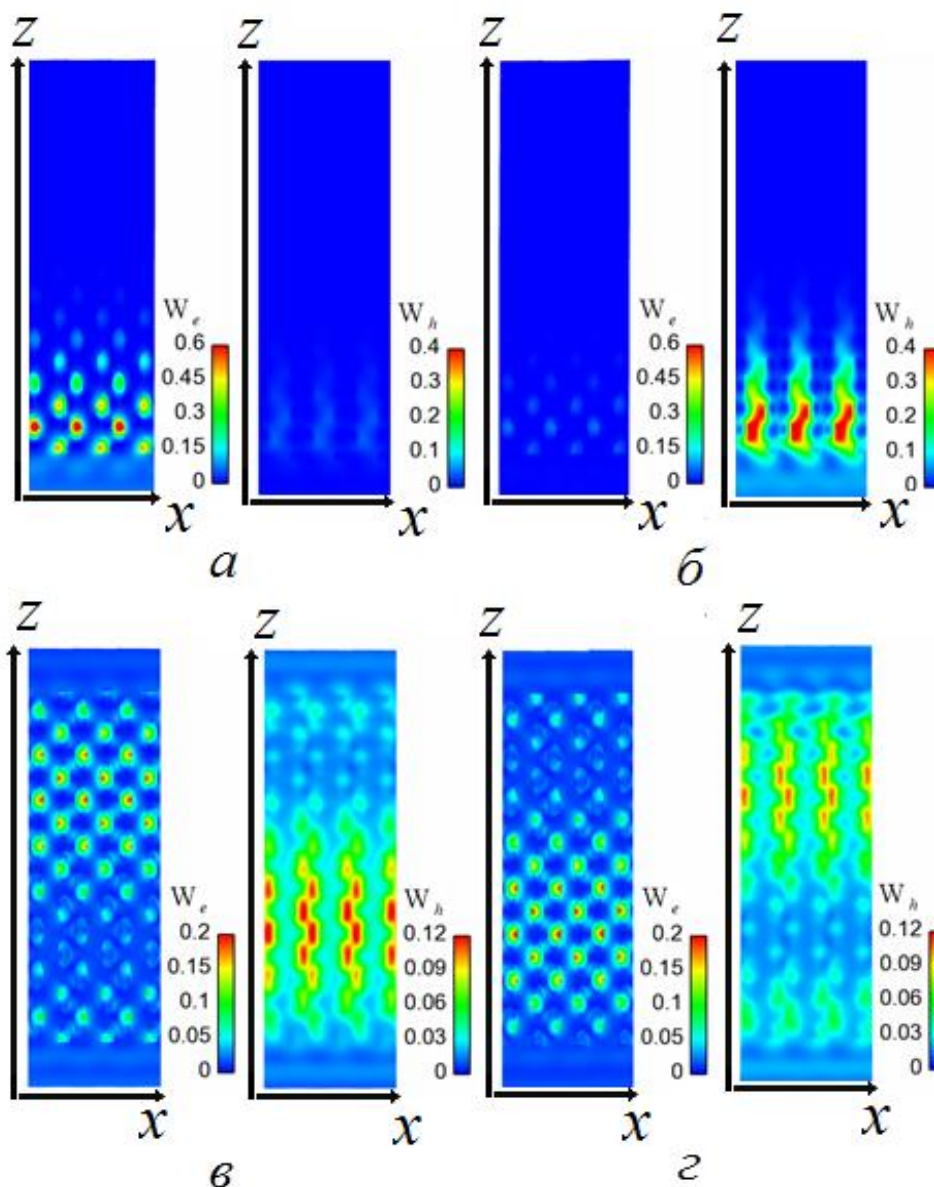


Рис. 6. Распределения w_e и w_h при прохождении длинных правополяризованных (*a* и *б*) и левополяризованных (*в* и *г*) импульсов через состоящий из правозакрученных спиралей метаматериал в моменты времени t_p (*a* и *в*) и $t_p + \pi/\omega$ (*б* и *г*).

При падении правополяризованного света на образец, состоящий из правозакрученных спиралей, существуют моменты времени t_p ($p = 1, 2, 3, \dots$), длительность между которыми равна периоду колебаний $2\pi/\omega$, когда

плотность электрической части энергии отлична от нуля только в материале спирали (рис. 6а), а плотность магнитной части энергии обращается в ноль во всей среде. При этом w_e экспоненциально убывает по мере проникновения поля в толщу образца (верхняя часть рисунка). Через половину периода во всей среде $w_e = 0$, а магнитная часть энергии электромагнитного поля сосредоточена в пространстве между витками спирали (рис. 6б) и также экспоненциально убывает по мере проникновения поля в образец. При падении на образец из правозакрученных спиралей левополяризованного излучения значения w_e и w_h нигде не обращаются в ноль, а за половину периода электрическая и магнитная части энергии перетекают из одного конца спирали в другой (рис. 6в и 6г). Магнитная часть энергии, в отличие от предыдущего случая, концентрируется теперь, в пространстве между соседними спиралями.

Если падающий импульс имеет длительность в несколько периодов колебаний электрического поля и правополяризован, то существует частотный интервал, в котором интенсивность импульса, прошедшего через состоящий из правозакрученных спиралей образец, составляет лишь несколько процентов от интенсивности падающего, а его поляризация близка к циркулярной с направлением вращения вектора напряженности электрического поля по левому кругу. С ростом числа шагов спирали ширина этого частотного интервала возрастает. Падающее левополяризованное излучение в этом диапазоне частот при прохождении через образец практически не меняет свою поляризацию. Небольшие изменения диэлектрической проницаемости спирали, периода трансляции структурного элемента, периода и диаметра винтовой линии, поперечного и продольного диаметров витка смещают центр области аномального пропускания и меняют ее ширину, не изменяя общей картины взаимодействия.

В конце параграфа полученные результаты обобщаются на случай, когда материал транслируемой структурной ячейки обладает безынерционной кубической нелинейностью. Обсуждается влияние интенсивности падающего эллиптически поляризованного импульса на поляризационные характеристики прошедшего излучения. Показано, что рост интенсивности поляризованного по правому (левому) кругу сверхкороткого циркулярно поляризованного импульса, падающего на образец, состоящий из сделанных из нелинейного материала правозакрученных (левозакрученных) спиралей,

приводит к расширению границы частотного интервала, внутри которого практически все падающее излучение отражается от среды.

Основные результаты третьей главы опубликованы в статьях [11,13].

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты

1. В рамках метода медленно меняющихся амплитуд найдены параметры однородно эллиптически поляризованного во времени гауссова импульса и нелинейной среды с аномальной частотной дисперсией и пространственной дисперсией кубической нелинейности при которых на расстоянии в несколько дисперсионных длин происходит образование уединенной волны, степень эллиптичности эллипса поляризации которой меняется вдоль временного профиля интенсивности, а угол поворота его главной оси одинаков вдоль импульса и линейно возрастает с ростом координаты распространения.

2. Найдены ранее неизвестные аналитические решения неинтегрируемой системы из двух нелинейных уравнений Шредингера, описывающие распространение в изотропной среде с локальной и нелокальной кубической нелинейностью и частотной дисперсией второго порядка эллиптически поляризованных кноидальных волн различных типов и возникновение аперiodических режимов изменения их поляризации, внешне напоминающих поляризационный «хаос».

3. Предложена модель обладающей частотной дисперсией и нелокальностью нелинейного оптического отклика среды, позволившая записать материальные уравнения без широко используемого требования малости параметра пространственной дисперсии, и проведена модификация метода конечных разностей во временной области (FDTD) со вспомогательным дифференциальным уравнением (ADE). С их помощью показано, что динамика самовоздействия эллиптически поляризованных импульсов длительностью в несколько периодов колебаний электрического поля существенно отличается от предсказанной формулами для зависящих от интенсивности угла поворота и степени эллиптичности эллипса поляризации. Состояние поляризации распространяющегося импульса немонотонно меняется на временах порядка периода колебаний электрического поля.

4. Модификация FDTD метода со вспомогательным дифференциальным уравнением и предложенная модель обладающей частотной дисперсией и

нелокальностью оптического отклика кубической среды использована для исследования распространения падающих на нее коротких эллиптически поляризованных импульсов. Показано, что выбор формы лазерного импульса в виде солитонного решения системы нелинейных уравнений Шредингера обеспечивает формирование в процессе его дальнейшего распространения в среде без пространственной дисперсии эллиптически поляризованной уединенной волны, даже если длительность падающего импульса меньше периода колебаний электрического поля. Найдены значения параметров, при которых инерционность нелинейного оптического отклика вещества контролируемым образом изменяет скорость сдвига несущей частоты эллиптически поляризованной уединенной волны по сравнению с аналогичной величиной линейно поляризованной уединенной волны, обладающей такой же пиковой интенсивностью.

5. Численно исследовано взаимодействие циркулярно поляризованных импульсов с хиральным метаматериалом, состоящим из периодически расположенных в виде двухмерной решетки трехмерных спиралей. Показано, что в такой среде возникают различные режимы колебаний электрической и магнитной частей плотности энергии электромагнитного поля, обеспечивающие селективное отражение циркулярно поляризованных компонент падающего излучения в некотором диапазоне частот, ширина которого увеличивается с ростом его пиковой интенсивности.

Статьи по теме диссертации

1. *Makarov V.A., Perezhogin I.A., Potravkin N.N.* Specific features of the self-action of elliptically polarized light pulses and the formation of vector solitons in an isotropic medium with the anomalous frequency dispersion and the spatial dispersion of cubic nonlinearity. // *Laser Phys.*, 2009, Vol. 19, № 2, P. 322–329.

2. *Макаров В.А., Пережогин И.А., Потравкин Н.Н.* Распространение эллиптически поляризованных лазерных импульсов в изотропной гиротропной среде с релаксационной кубической нелинейностью и аномальной частотной дисперсией. // *Опт. и спектр.*, 2010, Т. 109, № 5, С. 826-830.

3. *Макаров В.А., Пережогин И.А., Потравкин Н.Н.* Распространение короткого электромагнитного импульса в линейной среде с частотной и пространственной дисперсией — прямое интегрирование уравнений Максвелла методом конечных разностей. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. и астрон.*, 2012, №3, С. 71-74.

4. *Potravkin N.N., Perezhogin I.A., Makarov V.A.* Numerical solution of Maxwell equations by a finite-difference time-domain method in a medium with frequency and spatial dispersion. // *Phys. Rev. E.* 2012. Vol. 86, № 5, P. 056706(6).

5. Макаров В.А., Пережогин И.А., Петникова В.М., Потравкин Н.Н., Шувалов В.В. Эллиптически поляризованные кноидальные волны в среде с пространственной дисперсией кубической нелинейности. // Квант. электрон., 2012, Т. 42, № 2, С. 117-119.

6. Макаров В.А., Петникова В.М., Потравкин Н.Н., Шувалов В.В. Чирпированные эллиптически поляризованные кноидальные волны и поляризационный 'хаос' в изотропной среде с пространственной дисперсией кубической нелинейности. // Квант. электрон., 2012, Т. 42, № 12, С. 1118-1122

7. Makarov V.A., Petnikova V.M., Potravkin N.N., Shuvalov V.V. Particular periodic solutions to a nonintegrable system of Schrödinger nonlinear equations and their eigenvalues. // Physics of Wave Phenomena, 2013. Vol. 21, № 4. P. 264–269.

8. Makarov V.A., Petnikova V.M., Potravkin N.N., Shuvalov V.V. Chirped elliptically polarized waves in an isotropic gyrotropic nonlinear medium: approximate solution to the propagation problem. // Laser Phys. Lett. 2013. Vol. 10, № 7. P. 075404.

9. Макаров В.А., Петникова В.М., Потравкин Н.Н., Шувалов В.В. Приближенные решения неинтегрируемой задачи распространения эллиптически поляризованных волн в изотропной гиротропной нелинейной среде и периодические аналоги многосолитонных комплексов. // Квант. электрон., 2014, Т. 44, № 2, С. 130 – 134.

10. Gryaznov G.A., Makarov V.A., Perezhogin I.A., Potravkin N.N. Modeling of nonlinear optical activity in propagation of ultrashort elliptically polarized laser pulses. // Phys. Rev. E. 2014. Vol. 89, № 1, P. 013306(11).

11. Potravkin N.N., Cherepetskaya E.B., Perezhogin I.A., Makarov V.A. Ultrashort elliptically polarized laser pulse interaction with helical photonic metamaterial. // Opt. Mater. Express. 2014. Vol. 4, № 10. P. 2090-2101.

12. Makarov V.A., Perezhogin I.A., Potravkin N.N. Few-cycle solitary wave formation from elliptically polarized ultrashort laser pulse in a medium with frequency dispersion. // Optics Communications, 2015, Vol. 339, P 228-235.

13. Makarov V.A., Perezhogin I.A., Potravkin N.N. Interaction of Ultrashort Elliptically Polarized Laser Pulses with Nonlinear Helical Photonic Metamaterial // Physics of Wave Phenomena, 2015, Vol. 23, № 1, P. 1-7.

Тезисы докладов на конференциях по теме диссертации

1. Потравкин Н.Н., Макаров В.А., Пережогин И.А. Поляризационная структура векторных солитонов в изотропной среде с пространственной дисперсией кубической нелинейности. – В сб. V Международная Конференция “Фундаментальные Проблемы Оптики”, Санкт-Петербург, Россия, 2008, с. 13–14.

2. Makarov V.A., Perezhogin I.A., Potravkin N.N. Elliptically polarized solitons in isotropic medium with spatial dispersion of cubic nonlinearity. – In: Book of abstracts of 17th International Laser Physics Workshop, Trondheim, Norway, 2008, p. 277.

3. *Makarov V.A., Perezhogin I.A., Potravkin N.N.* Transformation of polarization of light pulses in an isotropic medium with chirality-sensitive relaxation time of cubic nonlinearity – In: Book of abstracts of 18th International Laser Physics Workshop, Barcelona, Spain, 2009. P. 316.

4. *Makarov V.A., Perezhogin I. A., Petnikova V. M., Potravkin N.N., Shuvalov V. V.* Cnoidal wave in media with local and nonlocal cubic nonlinearity as particular solution of nonintegrable problem – In: Book of abstracts of 19th International Conference on Advanced Laser Technologies, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria, 2011. P. 95.

5. *Makarov V.A., Petnikova V.M., Potravkin N.N., Shuvalov V.V.* Elliptically polarized chirped cnoidal waves in a medium with spatial dispersion of cubic nonlinearity – In: Book of abstracts of 15th International Conference “Laser Optics 2012”, St-Petersburg, Russia, 2012. P. R8–R22.

6. *Макаров В.А., Пережогин И.А., Петникова В.М., Потравкин Н.Н., Руденко К.В., Шувалов В.В.* Распространение чирпированных эллиптически поляризованных волн в изотропной гиротропной нелинейной среде – В сб: II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, 2013. P. 79–80.

7. *Makarov V.A., Petnikova V.M., Potravkin N.N., Shuvalov V.V.* Particular periodic and approximate solutions of a system of coupled nonlinear Schrodinger equations for elliptically polarized waves in a medium with local and non-local parts of cubic nonlinear optical response and second order frequency dispersion – In: Book of abstracts of 22th International Laser Physics Workshop, Prague, Czech Republic, 2013. P. N 5.2.1.

8. *Makarov V.A., Perezhogin I.A., Potravkin N.N., Grigoriev K.S, Gryaznov G.A.* Linear and nonlinear optical activity for the ultrashort light pulse: beyond the slowly varying envelope approximation – In: Book of abstracts of 22th International Laser Physics Workshop, Prague, Czech Republic, 2013. P. 5.1.2.

9. *Makarov V.A., Perezhogin I.A., Potravkin N.N.* Nonlinear optical activity for the ultrashort elliptically polarized pulse: numerical solution of Maxwell equations by finite-difference time-domain method – In: Technical digest of XXI International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO), Moscow, 2013. P. ITuE2.

10. *Makarov V.A., Petnikova V.M., Potravkin N.N., Shuvalov V.V.* Cnoidal waves and polarization “chaos” in a medium with nonlinear gyrotropy – In: Technical digest of XXI International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO), Moscow, 2013. P. IWP32.

11. *Макаров В.А., Петникова В.М., Потравкин Н.Н., Шувалов В.В.* Эллиптически поляризованные волны в изотропной гиротропной нелинейной среде: периодические аналоги многосолитонных комплексов – В сб: III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, 2014. P. 49.