МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

На правах рукописи
УДК 621.372; 621.373

Чупраков Дмитрий Арефьевич

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СОЛИТОНОВ В СРЕДАХ С КВАДРАТИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

(01.04.03 – радиофизика)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2004

Работа выполнена на кафедре радиофизики физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Научный руководитель:	Доктор физико-математических наук, профессор А. П. Сухоруков
Официальные оппоненты:	Доктор физико-математических наук, профессор А. С. Бирюков
	Кандидат физико-математических наук, доцент Б. И. Манцызов
Ведущая организация:	Институт математического моделирования РАН

Защита диссертации состоится «_____» ____________ 2004 года в 15.00 часов на заседании Специализированного Совета Д.501.001.67 в МГУ им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, ГСП, Ленинские Горы, МГУ, физический факультет, ауд. ______.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан «____» __________ 2003 г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета Д.501.001.67
кандидат физико-математических наук А. Ф. Королев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В семействе оптических солитонов особое место принадлежит параметрическим солитонам в средах с квадратичной нелинейностью. Их существование было теоретически предсказано в 1974 году [1], но эпоха их активных исследований наступила после первых экспериментов по захвату квадратичных пространственных солитонов в кристаллах КТР в 1995 г. [2]. Такие солитоны в вырожденном случае состоят из двух пучков на основной и удвоенной частотах. Они могут возбуждаться в режимах генерации второй гармоники и параметрического усиления. По сравнению с керровской средой параметрические солитоны обладают низким порогом, высокой устойчивостью в многомерном случае, способностью излучать избыточную энергию при взаимодействии и захвате пучков. Поэтому они обладают бóльшими возможностями для переключения пучков чисто оптическими методами. Разнообразные свойства параметрических солитонов изучаются теоретически и экспериментально в десятках лабораторий мира, в том числе на физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова.

Параметрически связанные волны обладают модуляционной неустойчивостью, с помощью которой можно возбуждать солитонные антенны – поперечные периодические структуры, или решетки. Меньший фон и большая контрастность наблюдаются в широких эллиптических пучках [3]. Нелинейная решетка постепенно разрушается под влиянием взаимофокусировки, дифракции и взаимодействия соседних субпучков. Поэтому необходимо определить область всех параметров пучка и среды, необходимых для генерации качественных параметрических решеток.

Взаимодействие солитонов, зависящее от соотношения амплитуд и фаз, используется для переключения пучков в виде их слияния, рассеяния и закручивания в спираль. При описании этих процессов весьма плодотворной оказалась модель эффективных частиц. В упрощенной модели двухцветный солитон представлялся как одна квазичастица [4,5]. Однако параметрический солитон состоит из двух компонент и в общем случае его надо описывать двумя связанными частицами, расстояние между которыми может меняться. Сближение солитонных пучков-частиц сопровождается излучением. Поперечному смещению и несоосности пучков в солитоне отвечают асимметричные моды, которые изучены в меньшей степени, чем симметричные моды [6].

Для решения перечисленных выше задач используются методы численного моделирования и ряд аналитических подходов с применением точных и асимптотических решений, вариационного метода, метода возмущений, метода моментов и т.д.

Цель работы.

Целью настоящей диссертационной работы является разработка аналитической теории и проведение численного моделирования синхронного параметрического взаимодействия волновых пучков первой и второй гармоник, когда дифракция компенсируется самофокусировкой на квадратичной нелинейности, и образуются пространственные структуры и солитоны. В диссертации рассматриваются три круга вопросов: формирование одномерных периодических нелинейных решеток, возбуждение асимметричных мод параметрического солитона, а также динамика взаимодействия и переключения солитонов. В соответствие с поставленной целью было намечено решение следующих практически важных задач:

- Определение областей формирования и устойчивости периодической квазиодномерной оптической решетки вследствие модуляционной неустойчивости эллиптических пучков первой и второй гармоник.

- Изучение динамики захвата несоосных пучков первой и второй гармоник в солитон, развитие теории асимметричных мод квадратичного солитона, оценка параметров переключения солитона в приближении малого искажения профиля.

- Построение теории взаимодействия параметрических солитонов как эффективных квазичастиц с учетом векторного рассинхронизма наклонных пучков и относительного смещения пучков разных частот.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Найдены области параметров (амплитуда пучка, пространственная частота поперечной модуляции, расстройка волновых векторов), при которых вследствие модуляционной неустойчивости эллиптических пучков образуется периодическая структура, существующая в ограниченной области квадратично-нелинейной среды.

- Разработана теория асимметричных мод низшего порядка на основе метода возмущения и модели связанных диэлектрических волноводов, имитирующих свойства солитона. Получено хорошее согласие спектров мод, рассчитанных по двум моделям.

- Для описания динамики взаимодействия и определения координат и угла наклона солитона после захвата несоосных пучков первой и второй гармоник предложена диссипативная модель эффективных квазичастиц.

- Впервые обнаружено частичное расщепление параметрического солитона при их сильных столкновениях. Построена последовательная модель квазичастиц для аналитического описания непланарного взаимодействия квадратичных солитонов с учетом векторной фазовой расстройки у наклонных пучков и относительного смещения пучков в солитоне.

Научная и практическая значимость работы.

- Поперечная модуляционная неустойчивость двумерного эллиптического пучка в среде с квадратичной нелинейностью может использоваться для формирования регулярной периодической структуры из близко расположенных пучков. Солитонную антенну можно использовать в многоканальных системах интегральной и волоконной оптики.

- Отклонение несоосных пучков основной частоты и второй гармоники при их захвате в солитон является одним из методов переключения. Анализ спектра мод позволяет определить изменение параметров солитона под влиянием того или иного возмущения его профиля.

- Модель связанных диэлектрических волноводов, копирующих свойства параметрического солитона, хорошо описывает возбуждение симметричных и асимметричных мод при малых возмущениях амплитудного и фазового профилей пучков.

- Модель солитонов в виде параметрически связанных квазичастиц с хорошей точностью описывает спиральное закручивание, рассеяние, и слияние пучков, а также разделение пучков двух гармоник внутри солитона. Эффекты взаимодействия могут применяться для чисто оптического переключения световых пучков.

Апробация работы.

Материалы диссертации докладывались на VI, VII и VIII Всероссийских школах-семинарах "Волновые явления в неоднородных средах" (Красновидово, 1998, 2000, 2002 гг.), VII и VIII Всероссийских школах-семинарах "Физика и применение микроволн" (Красновидово, 1999, 2001 гг.), V и VI Международных школах по хаотическим колебаниям и образованию структур «Хаос'98» (Саратов, 1998 г.) и «Хаос 2001» (Саратов, 2001 г.), Международной конференции студентов и аспирантов "Ломоносов - 99" (Москва, 1999 г.), Международной конференции «Нелинейные направленные волны и их применения» (Дижон, Франция, 1999 г.), Международной конференции «Перспективные лазерные технологии» (Потенца-Лече, Италия, 1999 г.), научной школе Института перспективных исследований НАТО "Фотоника управляемых солитонов" (Свиноустье, Польша, 2000 г.), IX и X международных конференций "Оптика лазеров" (Санкт-Петербург, 1998 и 2000 гг.), Международном конгрессе "Оптика - XXI Век" (Санкт-Петербург, 2000 г.), Международном оптическом конгрессе "Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт-Петербург, 2000 г.), II Международной конференции "Фундаментальные проблемы в физике" (Саратов, 2000 г.), II Международной конференции «Современные направления в вычислительной физике» (Дубна, 2000 г.), XVII Международной конференции по квантовой электронике и применениям лазеров (Москва, 2002 г.).

Материал диссертации докладывался и обсуждался на семинарах кафедры радиофизики физического факультета МГУ.

Публикации.

Основные результаты диссертации изложены в 26 опубликованных работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, приложения, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 169 наименований. Общий объем работы составляет 127 страниц, включающих 39 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обзор выбранных направлений исследований, обосновывается актуальность избранной темы, излагается общая постановка задач и описывается структура диссертации.

В **первой главе диссертации** рассматривается модуляционная неустойчивость эллиптических пучков в объемной квадратично-нелинейной среде и формирование периодической квазиодномерной решетки пространственных солитонов. Глава состоит из 4 параграфов.

В **первом параграфе** сначала приводится система нелинейных уравнений Шредингера (НУШ) для огибающих волновых пучков 1-ой и 2-ой гармоник A_j (j=1, 2), распространяющихся в квадратично-нелинейной среде, следующего вида:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z}+iD_1\Delta_\perp A_1+i\gamma A_1^* A_2=0, \quad \frac{\partial A_2}{\partial z}+iD_2\Delta_\perp A_2+i\Delta k A_2+i\gamma A_1^2=0 \tag{1}$$

где z - продольная координата; $\Delta_\perp$ - поперечный оператор Лапласа, $D_1=l/(4l_d)$, $D_2=(1/2)D_1$ – коэффициенты дифракции, l - характерный продольный масштаб, $l_d=k_1a_1{}^2/2$ – дифракционная длина пучка основного излучения, a_1 - его ширина; γ - коэффициент нелинейного взаимодействия, $\Delta k=k_2-2k_1$ - расстройка волновых векторов. Приведены инварианты данной системы уравнений и представлены методы численного моделирования.

Далее излагается теория модуляционной неустойчивости плоских волн первой и второй гармоник в квадратично-нелинейной среде. Представлена зависимость инкремента от пространственной частоты возмущения и амплитуды основной волны. С помощью этих данных выполнена оценка параметров среды и излучения, при которых образуется контрастная периодическая структура.

Во **втором параграфе** описывается схема скрещенных эллиптических пучков основной частоты, которая используется для генерации оптической решетки с заданной пространственной частотой. Слабый пучок создает затравочную амплитудно-фазовую решетку, причем ее период зависит от угла между падающими пучками. Излагается постановка задачи и особенности реализации численного моделирования.

В **третьем параграфе** численно исследуется динамика формирования оптической квазиодномерной решетки в среде с параметрами кристалла KTP и длиной $4l_d$ при разной частоте начальной модуляции пучка и разной амплитуде (рис. 1), где $l_d = k_1 a^2 / 2$ - дифракционная длина пучка, a - ширина эллиптического пучка вдоль малой оси. Для количественного анализа оптической структуры на выходе из нелинейной среды используется функция видности $V = (|A_{p1}|^2 + |A_{p2}|^2 - 2|A_d|^2) / (|A_{p1}|^2 + |A_{p2}|^2 + 2|A_d|^2)$, где A_{p1}, A_{p2}, A_d - значения амплитуды пучка первой гармоники в двух соседних максимумах и минимуме между ними соответственно. Измеренная для разных частот модуляции функция видности решетки V сравнивается с поведением инкремента модуляционной неустойчивости плоских волн G, рассчитанного по амплитуде пучков на разных длинах (рис. 2).

В **четвертом параграфе** определяется диапазон параметров (пространственных частот модуляции, амплитуд входного пучка и расстройки волновых векторов), при которых формируется регулярная периодическая решетка субпучков первой и второй гармоник. Границы области определяются по уровню видности, равному 1/2. Показано, что наблюдающееся постепенное искажение нелинейной решетки при распространении волн на дальние расстояния порядка $20l_d$, обусловлено неоднородностью исходного профиля пучка, дифракцией, взаимофокусировкой и нелинейными аберрациями.

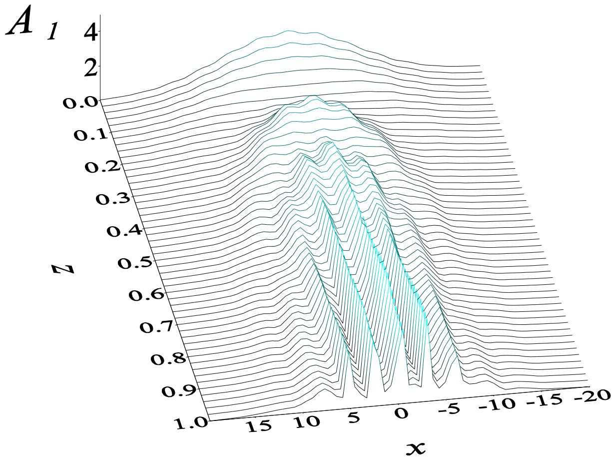

Рис. 1. Динамика прорастания периодической амплитудной решетки на основной частоте в эллиптическом пучке в квадратичной среде длиной $4l_d$.

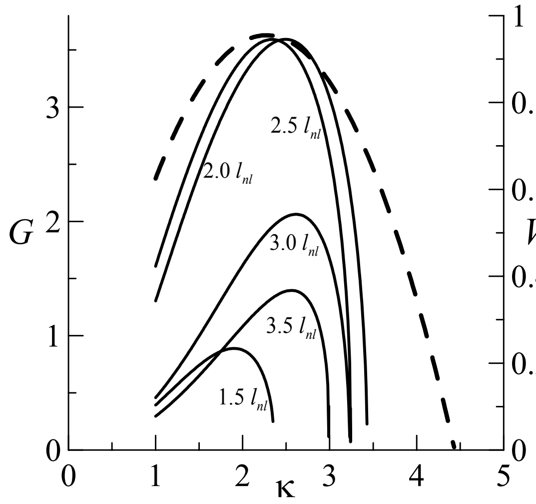

Рис. 2. Инкремент модуляционной неустойчивости G (сплошные линии), и видность параметрической решетки V (пунктирная линия) на длине $4l_d$ в зависимости от частоты поперечной модуляции κ. $l_{nl} \equiv \left[\gamma A_1(0,0,0)\right]^{-1}$.

Во **второй главе диссертации** изучается динамика захвата пучков первой и второй гармоник в пространственный солитон при наложении несимметричных амплитудно-фазовых возмущений. Асимметричные возмущения возникают, в частности, в несоосных пучках. Изменение положения и наклона захваченных пучков обусловлено возбуждением собственных асимметричных мод солитона. Для описания этих эффектов в главе разработаны модели пучков-квазичастиц и двухкомпонентного прямоугольного диэлектрического волновода. Глава состоит из 6 параграфов.

В **первом параграфе** в приближении стационарных профилей и плоского фазового фронта пучков строится консервативная модель эффективных квазичастиц, описывающая взаимные колебания «центров масс» несоосных пучков первой и второй гармоник. При этом «масса» пучка пропорциональна его мощности $m_j = D_1^{-1} P_j$, а коэффициент упругости $K_1^{(j)}$ выражается через интеграл перекрытия его огибающих.

Во **втором параграфе** для описания сильного затухания осцилляций «центров масс» пучков предлагается феноменологическая модель диссипативных эффективных частиц. Она строится на применении следующих уравнений к описанию динамики центров пучков первой и второй гармоник:

$$\ddot{x}_1 + \overline{\delta}_1 \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \kappa_1 \cdot (x_1 - x_2) = 0, \qquad \ddot{x}_2 + \overline{\delta}_2 \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \kappa_2 \cdot (x_2 - x_1) = 0. \quad (2)$$

Коэффициенты затухания $\overline{\delta}_j$ и упругого взаимодействия κ_j определяются численно и зависят от мощности солитона и фазовой расстройки в среде. Их значения найдены для широкой области фазовых расстроек и выбранной мощности солитона. Коэффициенты κ_j диссипативной модели сравниваются с расчетом коэффициентов упругости $\kappa_j = K_1^{(j)} / m_j$ в теории консервативных пучков-частиц. Приведены формулы для поперечного смещения и угла наклона захваченных пучков-квазичастиц, устанавливаемые после релаксации взаимных колебаний.

В третьем параграфе представлены результаты численного моделирования динамики взаимодействия несоосных пучков двух гармоник при рассогласовании амплитуд и фаз. Результаты расчетов со скрещенными и смещенными пучками сравниваются с данными, полученными по модели квазичастиц. Обсуждается влияние величины начального смещения на период пространственных осцилляций пучков, исследуется характер излучения такой системы, а также поведение захваченной мощности, гамильтониана и полного поперечного момента, захваченного пучками. Переключение направления распространения захваченного солитона осуществляется регулировкой амплитуды и относительной фазы смещенных пучков. При этом плавное изменение амплитуды первой гармоники приводит к постепенному переключению направления солитона. Напротив, сложное и немонотонное переключение возникает при варьировании относительной фазы $\Delta\Phi = \Phi_2 - 2\Phi_1$ смещенных пучков. Найдено, что вблизи значения $\Delta\Phi = 3\pi/2$ происходит резкое переключение между двумя солитонами, идущими в противоположных направлениях под большими углами.

В четвертом параграфе рассматривается модель двухкомпонентного прямоугольного диэлектрического волновода с ширинами и показателями преломления, эквивалентными соответствующим параметрам солитона.

Показано, что при согласованном изменении параметров диэлектрического волновода, имитирующем сжатие или уширение солитона, число мод остается фиксированным. Это наглядно объясняет отсутствие роста числа внутренних мод высшего порядка в солитоне, что также согласуется с известным характером распространения квадратичного солитона [6].

В пятом параграфе непосредственным решением системы уравнений для малых возмущений U_j амплитудно-фазового профиля пучков двух гармоник:

$$\frac{\partial U_1}{\partial z}+iD_1\frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2}-i\Gamma_1 U_1+i\gamma B_1 U_2+i\gamma B_2 U_1^*=0,\ \frac{\partial U_2}{\partial z}+iD_2\frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2}-i(\Gamma_2-\Delta k)U_2+i2\gamma B_1 U_1=0, \quad (3)$$

где $B_j(x)$ и Γ_j - огибающая и нелинейный сдвиг волнового числа, находятся собственные симметричные и асимметричные моды квадратичного солитона. Некоторые симметричные моды известны и хорошо изучены [6]. В настоящей работе особое внимание уделяется асимметричным решениям задачи (3), среди которых:

$$U_j^{(\Delta)}=\mu\frac{\partial B_j}{\partial x} \quad (4)$$

- трансляционная мода, приводящая к смещению солитона по поперечной координате на малую величину μ (см. рис. 3, слева), и

$$U_j^{(\theta)}=\mu\ [\ ik_j x B_j+z\frac{\partial B_j}{\partial x}\ ] \quad (5)$$

- угловая мода, характеризующая малый наклон плоского фазового фронта солитона на величину μ (см. рис. 3, справа). Приведенный набор симметричных и асимметричных мод квадратичного солитона хорошо согласуется с рассчитанным выше полным спектром собственных мод эквивалентного прямоугольного диэлектрического волновода.

Наконец, **в шестом параграфе** численно изучается распространение асимметричного возмущения в солитоне. При задании амплитудного искажения пучка на основной частоте в виде $U_1(x)=0.4\,x\,B_1(x)\exp(i\varphi_1)$, где $B_1(x)$ - огибающая пучка основной частоты, часть мощности излучается из волновода, а оставшаяся часть оказывается захваченной в солитоне. Это можно трактовать как возбуждение внутренних собственных мод в волноводе, образуемом солитоном. Причем, если амплитудное несимметричное возмущение ($\varphi_1 = 0$) возбуждает стационарную асимметричную моду, то возмущение фазы ($\varphi_1 = \pi/2$), напротив, возбуждает угловую моду, линейно растущую по амплитуде при распространении вдоль оси солитона (рис. 3, справа). Обе моды являются локализованными и не излучают. В конце параграфа выведены формулы для определения поперечных координат и угла наклона солитона. Показано, что полученные формулы сохраняют высокую точность до тех пор, пока амплитуда моды не становится сравнимой с амплитудой самого солитона.

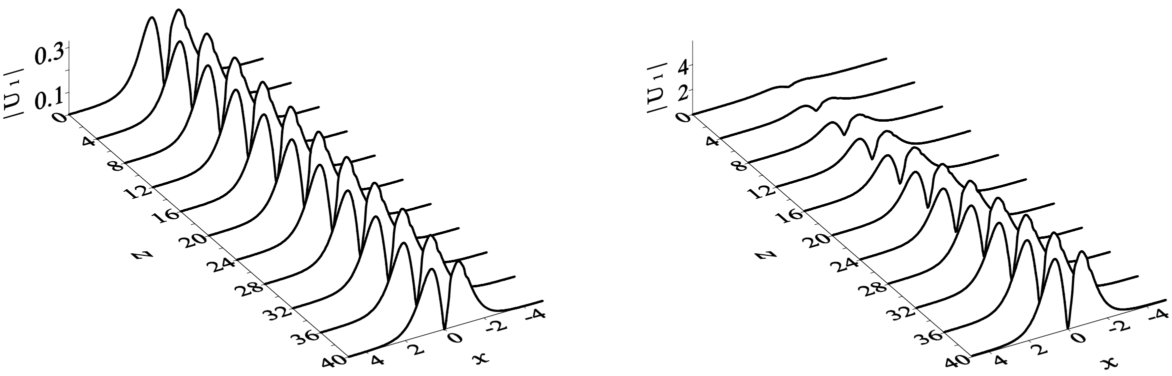

Рис. 3. Распространение (слева) трансляционной моды $U_j^{(\Delta)}$ и (справа) угловой моды $U_j^{(\theta)}$ в параметрическом солитоне на расстояние $z = 40\,l_d$.

В **третьей главе диссертации** изучаются планарные и непланарные взаимодействия двумерных пространственных квадратичных солитонов. В главе развит обобщенный подход к построению аналитической модели взаимодействия, основанный на анализе лагранжиана системы связанных уравнений для огибающих волновых пучков (1). Глава состоит из 4 параграфов.

В **первом параграфе** строится модель солитона как системы параметрически связанных квазичастиц для описания взаимодействия квадратичных солитонов. Амплитудные профили двух слабо перекрывающихся солитонов представляются в виде:

$$A_j = \sum_{m=1}^{2} B_{jm}\left(x - x_{jm}, y - y_{jm}\right) \exp\left[-i k_j \left(x - x_{jm}\right)\theta_{xjm} - i k_j \left(y - y_{jm}\right)\theta_{yjm} - i j q z + i j \Phi_m\right], \quad (6)$$

где B_{jm} - огибающая пучка j-ой гармоники m-го солитона, x_{jm} и y_{jm} - координаты центров пучков гармоник солитонов в плоскости поперечных координат, $\theta_{xjm} = d x_{jm}/dz$ и $\theta_{yjm} = d y_{jm}/dz$ - углы наклона пучков солитона к оси z в плоскостях XZ и YZ соответственно, q - нелинейный сдвиг волнового числа солитона, Φ_m - начальные фазы солитонов.

В работе рассмотрены симметричные движения солитонов относительно центра координат для $x_1 \equiv x_{j1} = -x_{j2}$, $y_1 \equiv y_{j1} = -y_{j2}$. После подстановки (6) в Лагранжиан системы уравнений (1) получены следующие уравнения движения для центров пучков солитонов:

$$m_j \frac{d^2 x_j}{dz^2} = (-1)^{2-j} K[x_2 - x_1] - \frac{\partial W}{\partial x_j}, \qquad m_j \frac{d^2 y_j}{dz^2} = (-1)^{2-j} K[y_2 - y_1] - \frac{\partial W}{\partial y_j} \quad (7)$$

где $m_j = 2D_1^{-1} P_j$ - эффективная масса пучка солитона; P_j - мощность пучка; $W = -4\gamma \iint \left(B_{11}^2 B_{22} \cos 2\phi + 2B_{11} B_{12} B_{21} \cos\phi\right) dx\, dy$ - потенциальная энергия взаимодействия солитонов, которая в отличие от предыдущих работ содержит поперечную фазовую расстройку $\varphi = k_1(x_1\theta_{x1} + x_2\theta_{x2} + y_1\theta_{y1} + y_2\theta_{y2}) + \Phi_2 - \Phi_1$, вызванную относительным наклоном пучков и начальным рассогласованием фаз, $K = -4\gamma \iint B_1^2(x,y) \frac{\partial^2 B_2}{\partial x^2} dx\, dy$ - коэффициент упругого взаимодействия пучков внутри каждого солитона.

Во **втором параграфе** аналитически описаны движения солитонов по спирали и возникающее при этом расщепление параметрически связанных пучков. Из выводов теории солитонов - квазичастиц следует, что движение квадратичных солитонов по спирали является неустойчивым, что обусловлено наличием локального максимума эффективной потенциальной энергии в точке равновесного значения диаметра спирали. Из уравнений движения (7) получены параметры равновесного спирального вращения солитонов, а именно, угол наклона солитонов как функция расстояния между их центрами:

$$\theta_s(d) = \sqrt{\frac{d}{m_1 + m_2}\,\frac{\partial W(d,\theta)}{\partial d}}\,, \tag{8}$$

период спирали и сила взаимного притяжения в зависимости от расстояния между солитонами, оценка относительного смещения центров пучков в солитоне дается формулой:

$$\Delta r = \frac{m_2 - m_1}{K}\frac{\theta^2}{d}\,. \tag{9}$$

В **третьем параграфе** представлены результаты численного моделирования двойной и тройной солитонной спирали в квадратично-нелинейной среде. На рис. 4 показано вращение поперечных сечений двух параметрических солитонов по мере их распространения. Видно, что при повороте солитонной пары на угол $\pi/2$ расстояние между солитонами сохраняется. На больших пройденных расстояниях обнаружена неустойчивость движения по спирали, предсказанная теорией квазичастиц. Параметры тройной спирали (угол и диаметр) могут быть оценены из параметров двойной спирали с помощью принципа суперпозиции. Теоретическая оценка отличается от результата численного эксперимента лишь на 5%.

В четвертом параграфе обсуждаются результаты наблюдения относительного смещения пучков в солитоне при сильном взаимодействии. При детальном изучении взаимодействия параметрических солитонов на близких расстояниях впервые обнаружено, что центры пучков первой и второй гармоник слабо смещаются друг относительно друга. В модели квазичастиц параметрический солитон представляет собой систему из двух пучков-частиц с потенциалом упругого взаимодействия $U = \frac{K}{2}(x_2 - x_1)^2 + \frac{K}{2}(y_2 - y_1)^2$. Когда сила взаимодействия солитонов становится сравнимой с силой, удерживающей оба пучка вместе, пучки неодинаково смещаются. Этот эффект наблюдался при слиянии, закручивании солитонов в спираль и рассеянии противофазных солитонов (рис. 5), где смещение способно достигать 1/3 ширины пучка. Построена зависимость величины смещения пучков от расстояния между центрами солитонов при столкновениях.

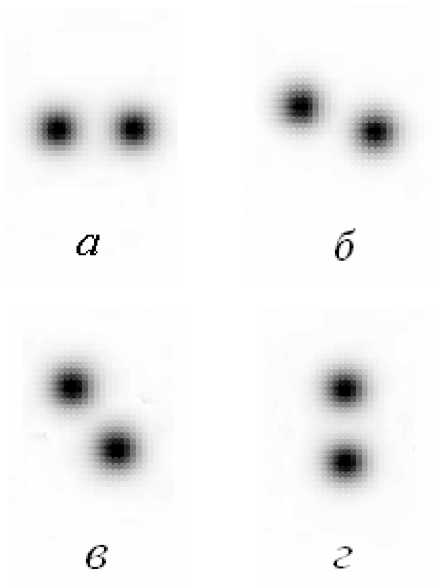

Рис. 4. Последовательные положения поперечных сечений двух солитонов в процессе закручивания в спираль на расстояниях $z = 0$ (*а*), $8\ l_d$ (*б*), $24\ l_d$ (*в*), $40\ l_d$ (*г*).

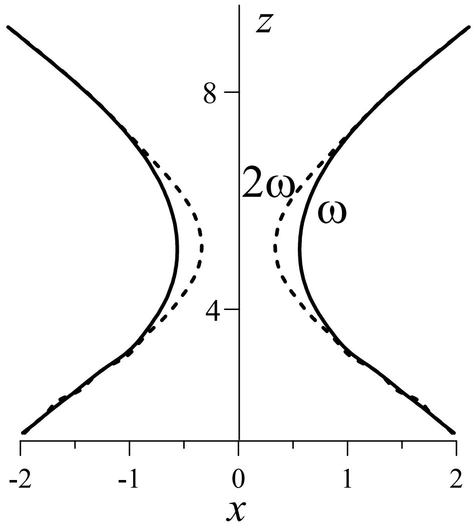

Рис. 5. Траектории центров пучков первой (сплошная) и второй (пунктирная линия) гармоник при рассеянии противофазных солитонов под углом $k_1 a_1 \theta = 1.25$.

В **приложении** описана разностная схема для численного решения уравнений распространения пучков первой и второй гармоник и методика численного моделирования, используемая в работе.

В **заключении** изложены основные выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Определены области формирования квазиодномерной оптической решетки с заданной пространственной частотой из эллиптических пучков. Показано, что эта область соответствует модуляционной неустойчивости плоских волн.
2. Прослежена динамика разрушения периодической решетки, вызванного неоднородностью исходного амплитудного профиля, дифракцией и взаимофокусировкой пучков. Рассчитаны расстояния, на которых функция видности решетки уменьшается в два раза.
3. С помощью предложенной диссипативной модели квазичастиц описываются траектории движения несоосных пучков первой и второй гармоник, определяются положение и наклон захваченных пучков. Численно

получены зависимости направления распространения солитона от разности фаз и амплитуд пучков, демонстрирующие дополнительные возможности чисто-оптического переключения.

4. Найдены асимметричные моды низшего порядка солитона, характеризующие поперечное смещение и наклон оси. Спектры симметричных и асимметричных мод квадратичного солитона согласуются со спектрами собственных мод эквивалентного двухкомпонентного прямоугольного диэлектрического волновода.

5. Разработана обобщенная теория взаимодействия пространственных квадратичных солитонов как эффективных квазичастиц, в которой впервые учитываются поперечная фазовая расстройка, вызванная наклоном пучков, а также относительное разъединение пучков разных частот. Выведены динамические уравнения трехмерного движения центров солитонов с потенциалом взаимодействия в виде интеграла перекрытия огибающих пучков.

6. Исследовано движение солитонов по спирали, найдены параметры спиральных траекторий, выявлена неустойчивость такого движения. Впервые отмечено и изучено расщепление параметрических солитонов при их сильном спиральном закручивании, слиянии и рассеянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Н. Карамзин, А.П. Сухоруков «Нелинейное взаимодействие дифрагирующих световых пучков в среде с квадратичной нелинейностью; взаимофокусировка пучков и ограничение эффективности оптических преобразователей частоты» // Письма в ЖЭТФ. Т. 20. с. 734-739 (1974).
2. W.E. Torruellas, Z. Wang, D.J. Hagan, E.W. Van Stryland, G.I. Stegeman, L. Torner, C.R. Menyuk «Observation of Two-Dimensional Spatial Solitary Waves in a Quadratic Medium» // Phys. Rev. Lett. V. 64. pp. 5036-5039 (1995).
3. R.A. Fuerst, D.M. Baboiu, B.L. Lawrence, W.E. Torruellas, G.I. Stegeman, S. Trillo, S. Wabnitz «Spatial Modulational Instability and Multisolitonlike Generation in a Quadratically Nonlinear Optical Medium» // Phys. Rev. Lett. V. 78. pp. 2756-2759 (1997).
4. A.V. Buryak, V.V. Steblina «Soliton collisions in bulk quadratic media: comprehensive analytical and numerical study» // J. Opt. Soc. Am. B. V. 16. pp. 245-255 (1999).

5. C. Simos, V. Couderc, A. Barthelemy, A.V. Buryak «Phase-dependent interactions between three-wave spatial solitons in bulk quadratic media» // J. Opt. Soc. Am. B. V. 20. pp. 2133-2141 (2003).
6. N.N. Rosanov, P.I. Krepostnov, V.O. Popov «Damping of persistent oscillations of quadratic optical solitons» // Chaos. V. 13 (791). pp. 791-799 (2003).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. С. Лу, А.П. Сухоруков, Д.А. Чупраков «Спиральное вращение пространственных солитонов в квадратично-нелинейной среде» // Изв. РАН Сер. Физ. Т. 62. № 12. с. 2319-2326 (1998).
2. D.A. Chuprakov, X. Lu, and A.P. Sukhorukov «Shifted beam interaction for quadratic soliton control» // In: A.D. Boardman, A.P. Sukhorukov (eds.), Soliton-driven Photonics. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London. pp. 347-350 (2001).
3. Д.А. Чупраков, А.П. Сухоруков «Динамика захвата несогласованных пучков первой и второй гармоник в квадратичный солитон» // Изв. РАН Сер. Физ. Т. 65. с. 1730-1734 (2001).
4. А.П. Сухоруков, Д.А. Чупраков «Симметричные и асимметричные моды пространственного квадратичного солитона» // Изв. РАН. Сер. Физ. Т. 66. с. 1798-1802 (2002).
5. D.A. Chuprakov, A.A. Kalinovich, A.P. Sukhorukov, I.G. Zakharova «Effective Numerical Methods for Simulating (2+1) D Three Wave Mixing» // J. Comp. Methods. Sc. Eng. V. 2. № 1s-2s. pp. 51-56 (2002).
6. А.П. Сухоруков, Д.А. Чупраков «Генерация квазиодномерной оптической решетки в квадратично-нелинейной среде скрещенными пучками основной частоты» // http://jre.cplire.ru. Журнал Радиоэлектроники. № 11 (2003).
7. Лу С., Сухоруков А.П., Чупраков Д.А. «Спиральное вращение пространственных солитонов в квадратично-нелинейной среде» // Труды VI Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн». Красновидово. Изд. Физфак МГУ. с. 28-30 (май 1998).
8. X. Lu, A.P. Sukhorukov, D.A. Chuprakov «Non-planar interactions of spatial quadratic solitons» // Proceedings of 5-th Int. school on chaotic oscillation and pattern formation «CHAOS'98». Saratov, Russia. P. 40 (October, 6-10 1998).
9. Д.А. Чупраков «Формирование и взаимодействие пространственных квадратичных солитонов на каскадной нелинейности» // Сборник тезисов Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-99». Секция «Физика». (1999).

10. А.П. Сухоруков, С. Лу, А.А. Калинович, А.К. Сухорукова, Д.А. Чупраков «Новые эффекты при возбуждении и взаимодействии пространственных квадратичных солитонов» // VII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн». Красновидово. Изд. Физфак МГУ. Т. 1. С. 37 (24-30 мая 1999).
11. С. Лу, А.П. Сухоруков, Д.А. Чупраков «Закручивание в спираль и рассеяние солитонов: теория частиц и эффект относительного смещения параметрически связанных пучков» // VII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн». Красновидово. Изд. Физфак МГУ. Т. 1. с. 38-40 (24-30 мая 1999).
12. С. Лу, А.П. Сухоруков, Д.А. Чупраков «Формирование пространственных квадратичных солитонов в параметрическом усилителе» // Труды VII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн». Красновидово. Изд. Физфак МГУ. Т. 1. с. 40-43 (24-30 мая 1999).
13. Anatoly P. Sukhorukov, Dmitry A. Chuprakov and Xin Lu «Quadratic soliton interactions in a bulk medium» // Proceedings of «Nonlinear Guided Waves and Their Applications». Dijon, France. pp. 97-99 (September, 1-3 1999).
14. A.P. Sukhorukov, X. Lu, D.A. Chuprakov «All-optical switching by interaction of spatial quadratic solitons» // Proceedings of the International Conference «Advanced Laser Technologies. ALT-99». Potenza-Lecce, Italy. (September, 20-24 1999).
15. С. Лу, А.П. Сухоруков, Д.А. Чупраков «Генерация пространственного квадратичного солитона из смещённых пучков основной частоты и второй гармоники» // Труды VII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах». Красновидово. Изд. Физфак МГУ. Т. 1. с. 70-72 (22-27 мая 2000).
16. Anatoly P. Sukhorukov, Dmitry A. Chuprakov, and Xin Lu «Quadratic soliton self-trapping for mis-aligned fundamental and harmonic beams» // Proceedings of X International Conference on Laser Optics. S-Petersburg, Russia. P. 65 (June, 26-30 2000).
17. Chuprakov D.A., Sukhorukov A.P., Zakharova I.G. «Modeling of optical soliton trapping in quadratic nonlinear medium» // Proc. of II Int. Conf. «Modern Trends In Computational Physics». Dubna, Russia. P. 54 (July, 24-29 2000).
18. A.P. Sukhorukov, I.G. Zakharova, O.A. Egorov, E.G. Pavlova, A.G. Pimenov, D.A. Chuprakov, G.G. Shapovalov «Quadratic spatial solitons: Problem of generation, stability and interactions» // Proc. of II Int. Conf. «The Fundamental Problems in Physics». Saratov, Russia. P. 179 (October, 9-14 2000).
19. A.P. Sukhorukov, I.G. Zakharova, O.A. Egorov, Yu.N. Karamzin, X. Lu, E.G. Pavlova, A.G. Pimenov, A.K. Sukhorukova, D.A. Chuprakov «Fundamental problems of parametric spatial solitons physics» // Proc. of Int. Congress «OPTICS - XXI CENTURY». S-Petersburg, Russia. P. 13 (October, 16-20 2000).

20. D.A. Chuprakov, A.P. Sukhorukov «All-optical switching on the base of quadratic soliton trapping» // Proc. of 2000 Annual Meeting OSA. ILS-XVI. Providence, USA. ThN4 (October 2000).
21. Сухоруков А.П., Захарова И.Г., Егоров О.А., Карамзин Ю.Н., Лу С., Павлова Е.Г., Пименов А.В., Сухорукова А.К., Чупраков Д.А. «Фундаментальные проблемы физики параметрических пространственных солитонов» // Труды Международного оптического конгресса «Фундаментальные проблемы оптики». Санкт-Петербург. С. 129 (17-19 октября 2000).
22. А.П. Сухоруков, Д.А. Чупраков «Динамика захвата несогласованных пучков первой и второй гармоник в квадратично-нелинейной среде» // Труды VIII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн». Звенигород. Изд. Физфак МГУ. Т. 1. с. 80-81 (26-30 мая 2001).
23. D.A. Chuprakov, A.P. Sukhorukov «Growing asymmetric modes and switching of quadratic solitons» // Proc. of 6-th Int. School on Chaotic Oscillations and Pattern Formation. Saratov, Russia. P. 22 (October, 2-7 2001).
24. Д.А. Чупраков «Захват несогласованных пучков первой и второй гармоник в квадратичный солитон» // Сборник трудов 2-ой Международной конференции молодых учёных и специалистов «Оптика 2001». С. 72 (2001).
25. А.П. Сухоруков, Д.А. Чупраков // Труды VIII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах». Красновидово. Т. 1. с. 25-26 (2002).
26. D.A. Chuprakov, A.P. Sukhorukov // Technical Digest of International Quantum Electronics Conference on Lasers, Applications, and Technologies. Moscow, Russia. P. 62 (June, 23 2002).