

РГБ ОД

25 АПР 2000

На правах рукописи

ДЕСЯТНИКОВ Антон Сергеевич

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МНОГОМЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ В
СРЕДАХ С НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ ТРЕТЬЕГО И ПЯТОГО ПОРЯДКОВ

Специальность 01.04.21 - лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

втор:

Москва
2000

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела Московского государственного инженерно-физического института (технического университета)

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук,
профессор Майминтов А.И.

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук,
профессор Алексеев А.И.
кандидат физ.-мат. наук,
доцент Манцызов Б.И.

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт лазерной физики
Научного центра "Государственный оптический институт имени С. И. Вавилова", г. Санкт-Петербург

Защита состоится "19" 04 2000 г. в 14 часов на заседании Диссертационного совета К.053.03.08 в Московском государственном инженерно-физическом институте по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан "17" 03 2000 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета К.053.03.08

кандидат физ.-мат. наук

Корнилов С.

ВЗУЗ.7, 03

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Одной из целей современной оптики является построение полностью оптических приборов, в которых свет может быть использован для управления светом. В последнее время значительно возрастает интерес к оптическим эффектам в объемной нелинейной среде, возникающим при взаимодействии уединенных волн. Этот интерес стимулирован, с одной стороны, успешными экспериментами, в которых получены устойчивые локализованные световые структуры, или многомерные оптические солитоны, а с другой стороны появлением новых материалов, являющихся перспективными для построения полностью оптических переключателей. Наряду с этим исследованию взаимодействия пространственных солитонов (световых пучков в состоянии самокаплирования) в бимодальной системе, а так же изучение устойчивости и взаимодействия пространственно-временных солитонов (световых пульс), к началу работы над диссертацией представляло собой сравнительно новую задачу.

Важным направлением в теории взаимодействия уединенных оптических волн является исследование связанных состояний световых солитонов. Новым эффектом в этой области является эффект пространственного вращения пучков по мере распространения в нелинейной среде, получивший в литературе название "*спираль*". Эффект наблюдался экспериментально и исследовался теоретически. Однако, в известной литературе, теоретически не изучалось взаимодействие пространственно разделенных пучков, возникающее благодаря эффекту фазовой кросс-модуляции, и образование связанного состояния с вращением пучков в бимодальной системе. Не были обоснованы теоретически некоторые экспериментальные факты, например тот факт, что спираль, образуемая пучками в состоянии захвата, имеет эллиптическую форму в поперечном сечении.

Применение традиционных материалов с нелинейностью третьего порядка для реализации взаимодействия уединенных волн является неэффективным из-за неустойчивости многомерных оптических солитонов в такой среде. Прогресс в этой области достигается благодаря использованию фоторефрактивных материалов, либо материалов с квадратичной или насыщающейся нелинейностью. Новые возможности предоставляют активно изучаемые в настоящее время органические кристаллы, в частности, так называемый кристалл PTS (P-toluene sulfonate), проявляющий фокусирующую керровскую и эфокусирующую нелинейность пятого порядка. В такой среде были мало

изучены особенности образования и взаимодействия оптических солитонов, что обусловило постановку задач в диссертационной работе.

Ранее не изучались связанные состояния многомерных оптических солитонов в среде с нелинейностью третьего и пятого порядков. Недавно обнаружено в численном эксперименте, что в такой среде пучки с кольцевым распределением поля, или вихри, проявляют устойчивость при поперечных взаимодействиях. Устойчивость вихрей позволила предположить существование и устойчивость нового физического объекта - световой пули с кольцевым распределением поля в поперечном сечении, так называемого "*спи-солитона*". Свойства и особенности взаимодействия таких объектов ранее не изучались. Зависимость взаимодействия соосных спи-солитонов от взаимной ориентации спиновых моментов, исследованная в диссертации, имеет перспективу применения для оптической обработки информации и приложения в других областях физики, например теории Бозе - Эйнштейн - конденсации.

Цели диссертационной работы

Настоящая работа посвящена развитию теории взаимодействия многомерных оптических солитонов и имеет своей целью:

- исследование образования связанных состояний и пространственных структур солитонами размерности $(2+1)$: оптическими пучками и вихрями;
- изучение динамики взаимодействия нелинейных волн в бимодальной системе и определение условий, необходимых для устойчивости связанных состояний;
- исследование свойств и структуры пространственно-временных оптических солитонов в среде с нелинейностью третьего и пятого порядков включая световые пули с кольцевым распределением поля (спи-солитоны);
- изучение поперечного взаимодействия световых пуль и особенности взаимодействия спи-солитонов.

Научная новизна

Впервые теоретически исследована система пространственно-разделенных световых пучков, взаимодействующих из-за кросс-модуляции показателя преломления нелинейной среды. Показана возможность образования пучками в состоянии взаимного захвата устойчивой пространственной структуры, подобной двойной спирали (спираллинг). Найдены основные режимы распространения пучков в связанном состоянии в керровской среде и определена область параметров, соответствующая взаимному захвату.

Впервые изучается световая пучка с кольцевым поперечным распределением поля – спин-солитон. Определены пороговая энергия образования, границы существования и устойчивости спин-солитонного решения нелинейного волнового уравнения. Показана зависимость когерентного взаимодействия соосных спин-солитонов от взаимной ориентации спинов, найдены новые связанные состояния.

Научная и практическая ценность

Проведенное исследование динамики связанного состояния пространственно-разделенных пучков позволяет детально проанализировать эффект образования пучками спиралеподобной структуры в керровской среде. Исследованные эффекты взаимного захвата и взаимного каналирования пучков являются новым методом управления светом с помощью света и представляют интерес для построения полностью оптических переключателей в объемной среде.

Полученные выражения для орбитального момента двух световых пучков показывают возможность использовать эффект спираллинга световых пучков для сверхбыстрого переключения.

Общезначимый интерес представляют вихри, локализованные в объемной среде: спин-солитоны. Взаимодействие соосных спин-солитонов качественно отличается в двух случаях: когда спиновые моменты параллельны либо антипараллельны. Предлагается использование этого эффекта в качестве нового принципа оптической обработки информации.

Основные защищаемые положения

1. Установлено, что некопланарно направленные световые пучки, взаимодействующие посредством эффекта фазовой кросс-модуляции, могут образовать пространственную структуру, подобную двойной спирали. Параметры спирали изменяются периодически, но в целом структура является квазиупорядоченной.

2. Показано, что для достаточно удаленных многомерных оптических солитонов в бимодальной системе можно пренебречь кросс-модуляцией пятого порядка, и взаимодействие имеет характер притяжения. Связанные состояния в бимодальной системе являются устойчивыми.

3. Найдено, что в среде с нелинейностью третьего и пятого порядков возможно образование устойчивых световых пучков основной моды, если энергия пучка превышает пороговую величину. Взаимодействие световых пучков может приводить к взаимному захвату, при этом временная задержка в следовании импульсов определяет параметры образующейся структуры.

4. Установлено, что пространственно-временные солитоны с кольцевым распределением поля могут быть устойчивыми в среде с нелинейностью третьего и пятого порядков. Пороговая энергия образования спин-солитона превышает аналогичную величину для солитона без спина приблизительно в четыре раза, но границы устойчивости и существования мало зависят от спина.

5. Показано, что когерентное взаимодействие соосных спин-солитонов определяется взаимной ориентацией спиновых моментов. Солитоны с противоположно направленными спинами взаимодействуют аналогично полям с ортогональными круговыми поляризациями. Если солитоны имеют одинаковые спины, взаимодействие зависит от разности фаз, и все точки покоя системы являются неустойчивыми.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на Международной конференции молодых ученых и специалистов "Оптика-99" (С.-Петербург, 1999); на VII Международных Чтениях по Квантовой Оптике (Казань, 1999); на Научных сессиях МИФИ-99 (Москва, 1999) и МИФИ-2000 (Москва, 2000).

Материалы диссертации опубликованы в 8 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 127 страниц текста, включая 27 рисунков и список литературы из 15 наименований.

чивость к поперечным возмущениям. Изучение потенциала взаимодействия вихря с пучком основной моды показало, что положение устойчивой точки покоя системы, то есть минимума потенциала, зависит от отношения радиусов солитонов и качественно отличается в случаях, когда ширина вихря меньше (больше) ширины пучка. Обсуждается влияние кросс-модуляции пятого порядка, проявляемое при сильном перекрытии солитонов.

Исследованы пространственно-временные солитоны в среде с нелинейностью третьего и пятого порядка, определены основные характеристики световой пули: пороговая энергия образования пули, область существования и устойчивости. Изучается потенциал взаимодействия двух световых пуль, приводится аналитическое выражение для асимптоты. Для некомпланарно направленных солитонов эффективный потенциал взаимодействия должен быть дополнен центробежной энергией $E_{cf} = (M^2/2m)R^{-2}$, где M это орбитальный угловой момент солитонной пары, m - эффективная масса солитонов. Сохранение углового момента показано как следствие инвариантности квазиоптического волнового уравнения к преобразованию поворота в поперечной плоскости. Получено выражение для орбитального момента двух световых пуль. При заданных направлениях падения пуль, величина и направление момента определяется временной задержкой в следовании импульсов. Предлагается использовать этот параметр для организации сверхбыстрого переключения в объемной среде.

Последняя глава посвящена рассмотрению трехмерные спин-солитоны в диспергирующей среде с нелинейностью третьего и пятого порядков. Здесь представлены результаты исследования пространственно-временных светлых солитонов с кольцевым распределением интенсивности (спин-солитон) в оптической среде с нелинейным откликом третьего и пятого порядков. Применен вариационный метод с использованием двух различных пробных функций. Сравнение численных результатов позволило получить приближенное решение и основные характеристики спин-солитона, при этом решение определяется величиной спина и не зависит от его направления. Найдено, что пороговая энергия образования спин-солитона превышает соответствующую величину для световой пули без спина в несколько раз. Определены границы существования и устойчивости спин-солитона, показана слабая зависимость этих величин от спина. Обсуждаются возможности экспериментального наблюдения спин-солитонов.

Изучается когерентное взаимодействие соосных спин-солитонов в рамках одномодовой системы. Вычисление эффективного потенциала взаимодействия показало значительное отличие двух случаев: случая одинаковых спиновых моментов и случая антипараллельных спинов. При взаимодействии световых пуль с противоположно направленными спинами потенциал не зависит от разности фаз солитонов и совпадает с потенциалом взаимодействия волн с

круговыми ортогональными поляризациями. Если спины параллельны, потенциал взаимодействия является функцией расстояния (временной задержки) между солитонами R и разности фаз ϕ . Параметрическая зависимость потенциала от энергии отдельного солитона приводит к тому, что число и характер равновесных точек определяется энергией взаимодействующих солитонов. Показано, что связанное состояние существует только в случае антипараллельных спинов. Обсуждаются перспективы применения эффекта.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для изучения взаимодействия двух пучков света в керровской среде применен вариационный метод. Найдено аналитическое решение вариационных уравнений для случая одинаковых пучков. Показано сохранение орбитального момента солитонной пары, приводящее к образованию пространственной структуры, подобной двойной спирали. Получено выражение для орбитального момента двух пучков.
2. Изучено влияние взаимодействия пучков на баланс дифракция – самофокусировка. Показано, что взаимодействие может значительно изменять характер распространения отдельного пучка, а в связанном состоянии происходит взаимная стабилизация (канализование) пучков.
3. Численно найдены основные режимы орбитального состояния пучков в бимодальной системе: режим с конечным числом оборотов пучков; пространственная спираль; слияние и коллапс пучков. Определена область мощностей пучков, в которой возможен взаимный захват.
4. Получены аналитические выражения для эффективного потенциала взаимодействия пространственных солитонов, показывающие взаимное притяжение и наличие устойчивых связанных состояний. Исследованы особенности взаимодействия пучка основной моды с вихрем – пучком кольцевым распределением поля.
5. Численно найдено однопараметрическое семейство пространственных временных солитонных решений квазиоптического уравнения для среды нелинейностью третьего и пятого порядков. Определены пороговая мощность образования световой пули, границы существования и устойчивости.
6. Получены выражения для эффективного потенциала взаимодействия орбитального момента световых пульс. Показано, что при заданных направлениях падения световых пульс параметром, определяющим возникающую при взаимном захвате структуру, является временная задержка. Предлагается использовать эту закономерность для сверхбыстрого переклочения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, ее научное и практическое значение, сформулирована цель работы и основные положения, выносимые на защиту, дано краткое содержание диссертации.

В первой главе приведен литературный обзор результатов исследований взаимодействий оптических солитонов. Значительное внимание уделено взаимодействию импульсов в нелинейном волокне как традиционной задаче нелинейной оптики, рассмотрены векторные солитоны. Рассмотрены эффекты нелинейной рефракции и нелинейного самосжатия импульсов, обсуждается эквивалентность их описания и пространственно-временная аналогия. Приведен обзор работ, посвященных взаимодействию пространственных солитонов – световых пучков и вихрей. Анализируются известные теоретические и экспериментальные работы, в которых изучался спираллинг оптических пучков. Обсуждается концепция световой пули: нелинейной волны, локализованной в объемной среде, и перспективы использования таких объектов.

Взаимодействие пространственно-разделенных световых пучков в керровской среде исследуется во второй главе. Явление фазовой кросс-модуляции приводит к взаимодействию между волнами, так как показатель преломления для одной волны зависит от интенсивности другой волны, распространяющейся совместно с первой. При этом потенциал взаимодействия определяется интегралом перекрытия двух пучков, и взаимодействие проявляет характер притяжения. В общем случае взаимодействие приводит к взаимному искривлению пучков. Если падающие на границу нелинейной среды пучки лежат в одной плоскости (копланарны), происходит "центральное столкновение" пространственных солитонов, при этом траектории центров пучков остаются в одной плоскости. При нецентральном столкновении, когда падающие пучки некопланарны, при определенных условиях происходит взаимный захват с образованием связанного состояния. Связанное состояние характеризуется вращением пучков по мере распространения вглубь нелинейной среды. Скорость такого вращения изменяется периодически, поэтому параметры образуемой пучками спиралеподобной структуры (шаг и диаметр) также изменяются периодически. Для случая равных мощностей пучков найдено аналитическое решение системы вариационных уравнений. Численное решение уравнений для радиусов пучков, расстояния между их центрами и угла вращения показало, что если мощности пучков меньше критической мощности самофокусировки, можно выбрать параметры пучков, когда дифракционное распыливание является более медленным процессом по сравнению с формированием спирали. Если мощность хотя бы одного пучка превышает критическую, решения ограничены коллиансом. Найден класс реше-

ний, содержащий конечное число осцилляций, и как следствие, конечное число оборотов пучков на конечных расстояниях.

Нужно отметить, что пространственная структура, образуемая вращающимися пучками, имеет более сложную форму, чем спираль (См. Рис. 1). Так как отношение угла новорога $\Delta\psi$ к периоду осцилляций не является рациональной частью от 2π , спираль не является строго периодической и по мере распространения происходит деформация кручения спирали. Можно показать, что $\Delta\psi \approx \pi$, и величина $\Delta\psi$ ($\Delta\psi < \pi$ или $\Delta\psi > \pi$) определяет направление кручения (левый винт либо правый винт).

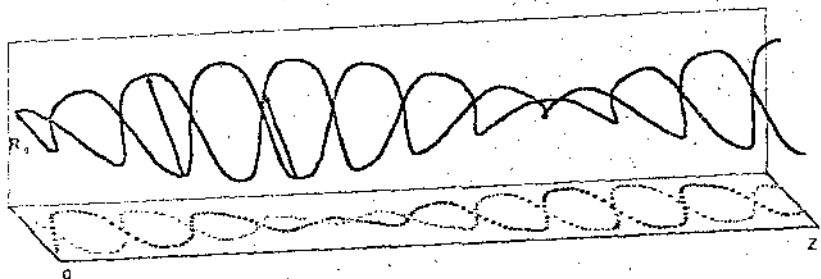


Рис. 1 Траектории центров пучков в состоянии взаимного захвата и их проекция на продольную плоскость.

Далее, в третьей главе, рассматривается потенциал взаимодействия оптических пучков в "приближении эффективной частицы" в рамках бимодальной модели, описываемой системой нелинейных уравнений Шредингера с учетом эффектов само- и кросс-модуляции пятого порядка. Получены аналитические выражения для асимптот потенциалов взаимодействия, которые определяются интегралом перекрытия пространственных солитонов. В отличие от известных результатов для одномодовых систем, потенциал не зависит от разности фаз взаимодействующих волн, и связанные состояния в бимодальной системе являются устойчивыми. Учет кросс-модуляции пятого порядка приводит к малой поправке для достаточно удаленных пучков.

Известно, что в среде с нелинейностью третьего и пятого порядков пучки с кольцевым распределением поля, так называемые вихри, проявляют устой

7. С применением вариационного метода и численного метода пристрелки получены приближенные стационарные решения, представляющие собой пространственно-временные световые пучки с кольцевым распределением поля: спин-солитоны. Показано наличие неустойчивых и метастабильных решений. Определены пороговые характеристики спин-солитонов.
8. Изучено взаимодействие соосных спин-солитонов в рамках одномодовой системы. Обнаружена качественная зависимость характера взаимодействия от взаимной ориентации спинов. Потенциал взаимодействия зависит (не зависит) от разности фаз взаимодействующих волн, когда спины солитонов параллельны (антипараллельны).
9. При взаимодействии одинаковых соосных спин-солитонов потенциал параметрически зависит от энергии отдельного солитона, поэтому число и характер точек покоя системы определяются энергией световой пучки.

ПУБЛИКАЦИИ

1. А.С.Десятников, А.И.Маймистов, Взаимодействие двух пространственно-разделенных пучков света в нелинейной керровской среде, ЖЭТФ, т. 113, вып. 6, стр. 2011-2021, (1998).
2. А.С.Десятников, Пространственное вращение двух пучков света в керровской среде, *Физическое образование в вузах*, 5, 67 (1999).
3. A.Maimistov, B.Malomed, A.Desyatnikov, A potential of incoherent attraction between multidimensional solitons, *Phys. Lett. A* 254, 179 (1999).
4. А.С.Десятников, Пространственное вращение световых пучков в керровской среде. – В кн.: Сборник научных трудов Научной сессии МИФИ-99, Москва, 1999, т.3, стр. 213-215.
5. А.С.Десятников, А.И.Маймистов, Взаимодействие и устойчивость многомерных световых солитонов в нелинейной среде. – В кн.: Тезисы докладов Международной конференции молодых ученых и специалистов "Оптика-99", стр. 74, Санкт-Петербург, 1999.
6. A. Desyatnikov, A. Maimistov, Spiraling of two- dimensional beams and three- dimensional light bullets in nonlinear media. – In: VIII International Readings in Coherent and Quantum Optics, Proc. SPIE, Vol. 4061, 2000.
7. А.С.Десятников, Устойчивость световых пучков в среде с нелинейностями третьего и пятого порядков. – В кн.: Сборник научных трудов Научной сессии МИФИ-2000, Москва, 2000, т.4, стр. 223-224.
8. A. Desyatnikov, A. Maimistov, B. Malomed, Three- dimensional spinning solitons in dispersive media with the cubic- quintic nonlinearity, *Phys. Rev. E*, March 2000.

Подписано в печать 3.03.2000 Заказ 204 Тираж 100 экз

Типография МИФИ, Каширское шоссе, 31