

На правах рукописи



Ассельборн Сергей Александрович

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ СПЕКТРОМ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ
И ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ**

Специальность 01.04.05 — "Оптика"

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Челябинск
2007



Работа выполнена в вузовско-академической лаборатории нелинейной оптики Института электрофизики УрО РАН и Южно-Уральского государственного университета

Научный руководитель – доктор физико-математических наук
Кундикова Наталья Дмитриевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Шандаров Станислав Михайлович,
кандидат технических наук
Иванов Максим Геннадьевич.

Ведущая организация – Самарский филиал Физического института им.
П.Н. Лебедева РАН, г. Самара.

Защита состоится 16 октября 2007 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета Д.004.024.01 при Институте электрофизики УрО РАН по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института электрофизики УрО РАН.

Автореферат разослан " 14 " сентября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Н. Н. Сюткин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На протяжении более сорока лет квантовая электроника успешно открывает и применяет новые механизмы усиления и генерации когерентных световых пучков. Новые механизмы приводят к созданию более гибких и удобных в управлении оптических квантовых генераторов. Наряду с традиционными лазерами, основанными на процессах вынужденного излучения в активных средах, были созданы оптические генераторы, основанные на различного рода нелинейных эффектах. Благодаря этому в современных лазерах появилась возможность управления частотой, мощностью, пространственным распределением и другими параметрами генерируемого излучения¹, а также возможность генерировать пучки с обращенным волновым фронтом и пучки, несущие сложную информацию².

Часто возникает необходимость управления параметрами уже сгенерированного излучения. Для решения данной задачи широко используются нелинейно-оптические эффекты, такие как вынужденное комбинационное рассеяние, самофокусировка, самодифракция, генерация гармоник, нелинейное сложение и вычитание частот и др.³.

В связи с развитием интегральной оптики актуальным является поиск и реализация новых способов управления пространственным спектром лазерного излучения, отличающихся дистанционностью и автоматизацией, что включает в себя изменение формы пучка, изменение расходимости, деление пучка, изменение его модового состава, изменение траектории распространения излучения и т. п.

В фоторефрактивных нелинейных средах можно управлять параметрами лазерного излучения используя внешние воздействия на среду, такие как внешнее электрическое поле, температура, фоновая засветка и т. п.^{4, 5}. При распростране-

¹Звелто, О Принципы лазеров / О. Звелто – М: Мир, 1990.

²Одулов, С.Г Лазеры на динамических решетках / С.Г. Одулов, М.С. Соскин, А.И. Хижняк – М: Наука, 1990

³Дмитриев, В.Г Прикладная нелинейная оптика / В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов – М: Физматлит, 2004

⁴Петров М.П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М.П. Петров, С.И. Степанов – С.Петербург Наука, 1992

⁵Кившарь, Ю.С Оптические солитоны / Ю.С. Кившарь, Г.П. Агравал – М: Физматлит, 2005.

нии лазерного излучения в оптически неоднородных средах можно управлять его характеристиками изменением поляризации данного излучения⁶.

Цель настоящей работы. экспериментальная реализация и исследование новых методов управления пространственным спектром лазерного излучения в фоторефрактивных и оптически неоднородных средах. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи

1. Исследование возможности управления расходимостью когерентного излучения в фоторефрактивных средах во внешнем знакопеременном электрическом поле

2. Исследование возможности использования поляризации для управления пространственным спектром лазерного излучения в оптически неоднородных средах

Научная новизна. Экспериментально показано, что степень самовоздействия лазерного пучка в фоторефрактивном кристалле $Ba_2NaNb_5O_{15}$ линейно зависит от амплитуды внешнего знакопеременного поля.

Экспериментально определены условия, при которых в фоторефрактивном кристалле во внешнем знакопеременном поле формируется одномерный яркий экранированный солитон, экспериментально продемонстрировано его формирование.

Доказана принципиальная возможность управления пространственным спектром лазерного излучения в фоторефрактивных средах во внешнем знакопеременном электрическом поле.

Экспериментально показано влияние неоднородности оптического эффекта Магнуса на степень пространственного разделения лазерного пучка в оптическом многомодовом волокне

Экспериментально показано, что эллиптичность состояния поляризации лазерного пучка однозначно определяет соотношение интенсивностей его пространственно разделенных компонент

Доказана принципиальная возможность управления пространственным спектром лазерного излучения в оптически неоднородных средах.

⁶Dooghin, A.V Optical Magnus effect / A.V. Dooghin, N.D. Kundikova, V.S. Liberman, B.Ya. Zel'dovich // Phys. Rev. – 1992. – Т 45 – С. 8204

Основные положения, выносимые на защиту. При распространении промодулированного по интенсивности светового пучка в фоторефрактивном кристалле $Ba_2NaNb_5O_{15}$ с приложенным к нему знакопеременным электрическим синусоидальным полем степень самофокусировки линейно зависит от амплитуды приложенного поля.

Возможность формирования экранированного одномерного пространственно-го солитона в фоторефрактивном кристалле в знакопеременном внешнем поле при прочих равных условиях определяется амплитудой внешнего поля.

Расходимость когерентного излучения можно управлять в фоторефрактивных кристаллах в переменном внешнем поле амплитудой этого поля.

На степень пространственного разделения лазерного пучка в оптическом многомодовом волокне влияет неоднородность оптического эффекта Магнуса.

Соотношение интенсивностей компонент пространственно разделенного лазерного пучка однозначно определяется эллиптичностью его состояния поляризации.

В оптически неоднородных средах можно управлять пространственным спектром когерентного излучения, изменяя его состояние поляризации.

Практическая ценность. Изменение формы пучка благодаря управлению его дифракционной расходимостью в фоторефрактивных средах позволяет создавать индуцированные волноводы с управляемой структурой, управляемые устройства сопряжения оптических линий связи, переключатели и коммутационные устройства, устройства динамической фильтрации сигнала, устройства оптической памяти и т. п.

Пространственное разделение лазерного пучка на две компоненты с ортогональными поляризационными состояниями позволит создать новый тип анализаторов поляризации лазерного излучения в реальном времени, которые широко используются в датчиках физических величин.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на III Международной конференции молодых ученых и специалистов "Оптика-2003", г. Санкт-Петербург; на XII Международной научной конференции "Ломоносов-2005". г. Москва; на 20 конгрессе Международной комиссии по оптике ICO-20,

Китай-2005; на конференциях молодых ученых ИЭФ УрО РАН, Екатеринбург, 2003, 2004, 2005; а также обсуждались на семинарах ЮУрГУ.

Публикации По теме диссертации опубликовано шесть работ. Список публикаций [1-6] приведен в конце автореферата

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 104 наименования цитируемой литературы. Полный объем диссертации — 135 страниц, включая 24 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту и кратко изложено содержание работы

В главе 1 выполнен обзор литературы, который показывает принципиальную возможность управления пространственным спектром лазерного излучения наведением оптической неоднородности в фоторефрактивных средах.

Приведен краткий обзор процессов, протекающих в фоторефрактивных средах при формировании поля пространственного заряда. Рассмотрена зонная модель переноса заряда, в рамках которой предполагается существование в запрещенной зоне фоторефрактивного кристалла одного донорного уровня, частично скомпенсированного за счет отдачи электронов на акцепторный уровень. В процессе разделения заряда принимают участие только донорные уровни. На основе решения материальных уравнений с использованием приближения малого контраста интерференционной картины получено основное уравнение, описывающее процесс разделения заряда при записи фоторефрактивных решеток. Подробно описаны два основных механизма формирования поля пространственного заряда: диффузионный и дрейфовый, а так же механизмы изменения оптических свойств среды вследствие возникновения неоднородного электрического поля внутри кристалла. Показана суть основных подходов, используемых для описания дифракции света на объемной фазовой решетке в оптически изотропной прозрачной среде.

Выполнен обзор работ, посвященных взаимодействию плоских световых волн в фоторефрактивных кристаллах. Для двухволнового взаимодействия света в фоторефрактивных кристаллах рассмотрены механизмы изменения оптических свойств среды формирующимися в кристалле зарядовыми решетками. При описании двухволнового взаимодействия в пропускающей геометрии приведены соотношения, определяющие экспоненциальный коэффициент двухлучкового усиления на фоторефрактивной решетке и позволяющие определить его из экспериментальных данных. При описании двухволнового взаимодействия в отражательной геометрии отмечены особенности отражательных голографических решеток в фоторефрактивных кристаллах, важные для практического применения в оптических устройствах различного назначения. Описана физическая суть механизма "синхронного детектирования" при невырожденном двухволновом взаимодействии в переменном электрическом поле. Из выражения для стационарной амплитуды поля пространственного заряда для данного механизма сделан вывод об основных его преимуществах.

Рассмотрен эффект самовоздействия оптических пучков в нелинейных средах. Раскрыто понятие пространственного солитона. Дано качественное объяснение эффекта самофокусировки и причины образования солитона в Керровских средах. Отмечено прикладное значение данного эффекта и подчеркнуты его основные недостатки в сравнении с самовоздействием в фоторефрактивных кристаллах.

Рассмотрены основные типы фоторефрактивных пространственных солитонов. Выполнен обзор работ, посвященных самофокусировке и самозахвату в фоторефрактивных кристаллах в постоянном внешнем поле. Указаны важные для практического применения особенности таких солитонов.

Выполнен краткий теоретический обзор механизма формирования пространственного экранированного солитона в фоторефрактивных кристаллах в знакопеременном внешнем поле в форме меандра. Указаны основные преимущества в использовании переменного поля вместо постоянного. Отмечена принципиальная возможность экспериментальной реализации механизма управления дифракционной расходимостью пучка в фоторефрактивном кристалле в переменном внешнем поле, и исследования условий, необходимых для формирования солитона.

В главе 2 Приведены результаты экспериментального исследования самовоздействия лазерного излучения в фоторефрактивном кристалле в знакопеременном внешнем поле

Описана схема экспериментальной установки для исследования самовоздействия лазерного пучка в фоторефрактивном кристалле ниобата бария натрия ($Ba_2NaNb_5O_{15}$) в знакопеременном синусоидальном внешнем поле

Приведены результаты экспериментального исследования эффекта самофокусировки когерентного светового пучка, распространяющегося в фоторефрактивном кристалле $Ba_2NaNb_5O_{15}$ во внешнем знакопеременном электрическом поле. Отмечены условия, при которых возникает самофокусировка и самодефокусировка пучка. Показано, что при прочих равных условиях в фоторефрактивном кристалле зависимость степени самофокусировки лазерного пучка от амплитуды внешнего переменного поля близка к линейной, эффект самофокусировки повышается с увеличением значения амплитуды поля. Экспериментально доказано слабое влияние фоновой освещенности на эффект самовоздействия лазерного пучка, в случае, если их интенсивности отличаются больше чем на два порядка. Определено значение амплитуды внешнего поля, при котором в данных условиях наблюдается одномерный пространственный экранированный солитон. Отмечено качественное соответствие результатам теоретических оценок, сделанных в работе⁷.

В главе 3 выполнен обзор литературы, который показывает принципиальную возможность управления пространственным спектром лазерного излучения в средах с оптической неоднородностью.

Описаны геометрические законы распространения света в оптических волокнах со ступенчатым профилем показателя преломления

Дан обзор публикаций по взаимовлиянию траектории и поляризации при распространении света в изотропных средах. Рассмотрен оптический аналог эффекта Магнуса, заключающийся в повороте спекл-картины света, прошедшего через оптическое волокно, при смене знака циркулярной поляризации. Выполнен краткий обзор публикаций, указывающих на неоднородность данного эффекта - вели-

⁷Фролова, М.Н. Самовоздействие светового пучка в фоторефрактивном кристалле с приложенным знакопеременным электрическим полем при синхронной модуляции интенсивности / М.Н. Фролова, С.М. Шандаров, М.В. Бородин // Квантовая электроника. – 2002 – Т. 32 – С. 1

чина эффекта зависит от угла введения света в волокно. Отмечена возможность использования данного эффекта для реализации пространственного разделения лазерного пучка и управления компонентами разделенного пучка изменением его поляризации

Указана необходимость использования обращения волнового фронта для реализации разделения оптического пучка в волноводе. Описаны основные принципы обращения волнового фронта при четырехволновом взаимодействии. Отмечена возможность использования фоторефрактивных сред для создания зеркала, обращающего волновой фронт.

Показано, что благодаря пространственному разделению лазерного излучения в оптически неоднородной среде возможна реализация принципиально нового метода определения эллиптичности состояния поляризации излучения

В главе 4 Приведены результаты экспериментальных исследований по пространственному разделению эллиптически поляризованного лазерного излучения на ортогонально циркулярно поляризованные компоненты

Описано экспериментальное исследование двухволнового смещения в фоторефрактивном кристалле ниобата бария-натрия. Дано описание схемы экспериментальной установки. Исследовано три механизма записи решетки в кристалле: диффузионный, дрейфовый в переменном поле, механизм "синхронного детектирования". Получены экспериментальные зависимости дифракционной эффективности решеток, записанных тремя механизмами, от их пространственных частот q . Установлено, что для механизма "синхронного детектирования" эта зависимость является слабой. Для диффузионного и дрейфового механизма дифракционная эффективность растет с ростом q . Таким образом показано, что наиболее эффективным механизмом в случае малых q является механизм "синхронного детектирования". При больших значениях q дифракционные эффективности решеток, записанных механизмами "синхронного детектирования" и дрейфовым совпадают

Проведен анализ полученных результатов с точки зрения выбора наиболее удобного и эффективного механизма для реализации обращателя волнового фронта по принципу четырехволнового смещения. Показано, что для обращения волнового фронта спекл-картины оптического многомодового волокна оптимальным

является диффузионный механизм в переменном внешнем поле. Описана схема экспериментальной установки и методика проведения эксперимента по реализации обращения волнового фронта спекл-картины многомодового оптического волновода. Выполнено обращение волнового фронта излучения, прошедшего через многомодовое оптическое волокно.

Показано, что если на входе в многомодовое оптическое волокно обращенная волна имеет произвольное эллиптическое состояние поляризации, то на выходе из волокна благодаря оптическому эффекту Магнуса происходит пространственное разделение лазерного излучения на две волны с ортогональными циркулярными состояниями поляризации, то есть пространственное разделение потока фотонов по их спине.

Показано, что неоднородность оптического эффекта Магнуса однозначно определяет степень разделения компонент оптического излучения. Описано исследование неоднородности оптического эффекта Магнуса, проведенное с использованием обращателя волнового фронта. Замечено, что предлагаемый подход существенно облегчает процесс обработки данных и, таким образом, повышает точность результатов экспериментального исследования оптического эффекта Магнуса. Представлена экспериментальная зависимость угла поворота φ спекл-картины от угла падения узкого светового пучка на торец волокна θ , определяющая неоднородность оптического эффекта Магнуса. Показано качественное соответствие результатов эксперимента с теоретическими оценками, полученными в работе⁸.

Выполнена экспериментальная реализация принципиально нового метода определения эллиптичности состояния поляризации лазерного излучения, в котором используется пространственное разделение этого излучения в оптически неоднородной среде. Эллиптичность состояния поляризации определяется из отношения интенсивностей разделенных пучков. Показано, что методика имеет следующие преимущества по сравнению с традиционной фотометрической: измерение эллиптичности происходит в реальном времени, измерение малых эллиптичностей имеет более высокую точность

⁸Lieberman, V.S. Spin-orbit polarisation effects in isotropic multimode fibres / V.S. Lieberman, B.Ya. Zel'dovich // Pure Appl. Opt. – 1993 – Т. 2 – С. 367.

Более высокая точность для малых эллиптичностей объясняется тем, что в данном случае при измерении регистрируются и затем сравниваются ортогонально циркулярно поляризованные излучения близкие по значениям интенсивностей. Это сильно понижает влияние шума измерительного прибора (фотоприемника) на результаты измерений.

Предложена схема возможного варианта оптического прибора для измерения эллиптичности состояния поляризации в реальном времени с использованием данной методики. Прибор состоит из двух элементов — многомодового оптического волокна и прикрепленного к его торцу фоточувствительного материала. В данном материале при изготовлении прибора однократно записывается и закрепляется амплитудная интерферограмма прошедшего через волокно лазерного излучения и попутной с ним плоской волны. Для определения эллиптичности состояния поляризации лазерного излучения голограмма, записанная в фоточувствительном материале, освещается данным излучением в определенном направлении. При дифракции этой волны на записанной решетке ее состояние поляризации сохраняется. Продифрагировавшая волна является обращенной к сигнальной волне, которая использовалась для записи голограммы в процессе создания прибора. На выходе из волокна эта волна будет представлять собой два разделенных пучка с ортогональными циркулярными состояниями поляризациями. Направив каждый из пучков на свой фотоприемник можно определить отношение их интенсивностей. Из данного отношения можно определить эллиптичность состояния поляризации исследуемой волны.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Экспериментально показано, что на пространственный спектр лазерного излучения, промодулированного по интенсивности, при его распространении в фоторефрактивном кристалле во внешнем знакопеременном поле основное влияние оказывает величина амплитуды внешнего электрического поля и интенсивность фоновой засветки.

2. Экспериментально продемонстрировано формирование экранированного одномерного пространственного солитона в фоторефрактивном кристалле в знакопеременном внешнем поле.

Вышеперечисленные результаты доказывают принципиальную возможность управления пространственным спектром лазерного излучения в фоторефрактивных средах во внешнем знакопеременном поле.

1 Разработана и экспериментально продемонстрирована методика, позволяющая выполнить пространственное разделение лазерного излучения на две волны с ортогональными циркулярными состояниями поляризации, то есть пространственное разделение потока фотонов по их спину.

2 Экспериментально показано влияние неоднородности оптического эффекта Магнуса на степень пространственного разделения лазерного пучка.

3 Доказано влияние поляризации лазерного излучения на пространственный спектр разделенного пучка.

4 Разработана и экспериментально реализована методика определения эллиптичности состояния поляризации когерентного света на основе оптического эффекта Магнуса при использовании обращения волнового фронта. Показано, что данная методика является наиболее эффективной при определении эллиптичности поляризации слабо эллиптически поляризованного излучения.

5 Предложена схема возможного прибора для измерения эллиптичности поляризации лазерного излучения.

Вышеперечисленные результаты доказывают принципиальную возможность управления пространственным спектром лазерного излучения в оптически неоднородных средах

РАБОТЫ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ассельборн, С.А. Новый метод исследования оптического эффекта Магнуса / С.А. Ассельборн, М.В. Большаков, Н.Д. Кундикова, И.И. Наумова // Известия Челябинского научного центра УрО РАН – 2003 – № 3 – С. 1

2. Ассельборн, С.А. Обращение волнового фронта — метод исследования оптического эффекта Магнуса / С.А. Ассельборн, М.В. Большаков, Н.Д. Кундикова, И.И. Наумова // сборник трудов третьей международной конференции молодых ученых и специалистов "Оптика – 2003". – СПб : Изд-во СПбГУ ИТМО, 2003. – С. 116.

3. Ассельборн, С.А. Новый метод определения эллиптичности состояния поляризации света / С.А. Ассельборн, И.В. Новиков // сборник трудов 12-й международной научной конференции "Ломоносов – 2005" – М Изд-во Физ фак МГУ, 2005. – Т. 1. – С. 157.

4. Asselborn, S A A method of measurement of polarized light ellipticity only / S.A. Asselborn, N.D. Kundikova // 20th Congress of the International Commission for Optics: Challenging Optics in science and Technology – Proseeding SPIE 6024, [0101-08], 2005. – С. 1.

5. Ассельборн, С.А. Формирование пространственного экранированного фоторефрактивного солитона в знакопеременном электрическом поле / С.А. Ассельборн, Н.Д. Кундикова, И.И. Наумова // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. – 2007. – № 2. – С. 18

6. Ассельборн, С.А. Экспериментальное исследование самовоздействия светового пучка в фоторефрактивном кристалле во внешнем знакопеременном электрическом поле / С.А. Ассельборн, Н.Д. Кундикова, И.И. Наумова // Письма в ЖТФ – 2007. – №. 24. – С. 75. ♡

Ассельборн Сергей Александрович

УПРАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ СПЕКТРОМ ЛАЗЕРНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ И ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ
СРЕДАХ

Специальность 01.04.05 – "Оптика"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 09.08.2007. Формат 60 × 84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 0,70. Уч.-изд. л. 0,78. Тираж 100 экз. Заказ 315/348

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск.
пр. им. В.И. Ленина, 76.