

АЛЕКСЕЕВ Владимир Николаевич

ФОРМИРОВАНИЕ И НАВЕДЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ С ПОМОЩЬЮ
ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО - ВРЕМЕННЫХ
МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА

Специальность 05.27.03 – Квантовая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Сосновый Бор

2009

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем (НИИКИ ОЭП, г. Сосновый Бор Ленинградской обл.)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В.В. Данилов
доктор технических наук, профессор В.Ю. Храмов
доктор технических наук, профессор Г.Н. Мальцев

Ведущая организация: ИЛФИ ВНИИЭФ, г. Саров

Защита состоится «19» «мая» 2009 г. в 15³⁰ на заседании диссертационного совета Д212.227.01 при Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики (техническом университете) по адресу: 190031, г. Санкт-Петербург, пер. Гривцова, 14, ауд.314. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан «18» апреля 2009 г.

Ваши отзывы и замечания (в двух экземплярах) по автореферату просим высылать по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, секретарю диссертационного совета Д212.227.01.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.227.01

В.М. Красавцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Импульсные лазеры высокой мощности нашли многочисленные применения в различных областях науки и техники. Одним из основных применений является использование их для исследований в области взаимодействия излучения с веществом, в частности в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) при длительностях импульса $0.1 \dots 3 \cdot 10^{-9}$ с. Лазеры сочетают большую мощность излучения и его высокую направленность. Это позволяет при фокусировке лазерного излучения на мишень получать большие концентрации энергии и огромные скорости тепловыделения в малых объемах вещества. На возможность получения высокотемпературной плазмы при взаимодействии сфокусированного излучения с веществом впервые было указано Н.Г. Басовым и О.Н. Крохиным¹. Развитие этой идеи в течение последующего времени стимулировали теоретические и экспериментальные исследования в области создания мощных лазерных систем вплоть до наших дней. При проведении исследований экспериментаторам пришлось столкнуться с линейными и нелинейными эффектами, которые ограничивают мощность лазерных систем, в первую очередь лазеров на неодимовом стекле, характеристики которых наиболее полно отвечают всем требованиям, необходимым для проведения работ по ЛТС. Это и разрушения покрытий оптических элементов в пиках интенсивности модуляций пучка, возникающие в основном из-за дифракции излучения на входной диафрагме и других апертурах лазера. Это и нелинейный эффект мелкомасштабной самофокусировки излучения, приводящий к появлению ореола вокруг основного пучка, в который перекачивается большая доля энергии основного пучка, а внутри оптических элементов лазера появляются нитевидные повреждения. На неустойчивость плоской электромагнитной волны при распространении в нелинейной среде и ее распад на мелкие фрагменты и их самофокусировку впервые указали В.И.Беспалов и В.И.Таланов².

В целом ряде лабораторий в мире разрабатывались и исследовались методы подавления этих нежелательных явлений, такие как аподизация пучка для подавления дифракции Френеля, ретрансляция действительного изображения аподизирующей диафрагмы в усилительном канале для получения пучков с высоким коэффициентом заполнения. Нерегулярные возмущения пучка, вызванные дефектами оптических элементов, было предложено подавлять с помощью пространственной фильтрации пучка. Повышение энергии и мощности лазерного излучения потребовало разработки выходных каскадов лазеров имеющих большую световую апертуру, в частности дисковых усилителей (ДУ).

1.Басов Н.Г., Крохин О.Н. Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора. ЖЭТФ, 1964, 46, с.171-175.

2. Беспалов В.И., Таланов В.И. О нитевидной структуре пучков света в нелинейных жидкостях. "Пис. в ЖЭТФ", 3, 1966, с.471-476.

Исследования показали, что отличающиеся оптические схемы лазеров, различия в используемых усилительных каскадах и длительностях импульсов не позволяют в полной мере использовать результаты, полученные на других лазерных установках при проектировании новой установки. Действительно, для различных длительностей и марок стекол по-разному на ограничения яркости канала сказывается насыщение усиления. Коэффициенты передачи наиболее усиливаемых пространственных частот могут иметь большие отличия, что является определяющим при выборе полосы пропускания пространственных фильтров. Поэтому необходима предварительная экспериментальная отработка лазерного канала.

За последние годы расширились области применения лазеров. Они требуют не только высокоэнергетических пучков наносекундного диапазона длительностей импульсов с расходимостью близкой к дифракционной, но и точного наведения пучков на объекты. Актуальными становятся такие задачи как передача энергии с помощью лазерного пучка на большие расстояния, дальняя лазерная локация и связь, обеспечение энергией ракетных и электро-реактивных двигателей, воздействие на удаленные объекты (например, “космический мусор”) с помощью возникающей плазмы. Точное и быстрое перенацеливание лазерного пучка весьма актуально в технологических процессах обработки изделий в промышленности, при лазерной маркировке изделий, в различных военных применениях.

В настоящее время прослеживается тенденция к развитию информационных лазерных систем с активной подсветкой пространства в области объекта, при расходимости лазерного излучения близкой к дифракционной, так как для подсветки или получения изображения объекта не требуется посылки мощного излучения для подсветки всего поля зрения приемной системы. Такие системы могут быть использованы как для получения координат объектов и траекторий их движения, так и для получения лазерных изображений объектов. Причем чем меньше угловой размер объекта и чем выше угловая скорость его движения, тем все более точные и быстродействующие системы управления лазерным пучком необходимо использовать.

Существует большое количество устройств управления лазерным пучком в пространстве. Это оптико-механические устройства, в основу которых положены механические перемещения в пространстве преломляющих и отражающих элементов, дефлекторы на основе электрооптических и магнитооптических эффектов в твердых и жидких средах, магнитострикционные дефлекторы, дефлекторы на основе обратного пьезоэффекта и взаимодействия световых и акустических волн и т.д. В настоящее время наиболее проработаны конструкции устройств на основе механических перемещений оптических элементов в пространстве. Они еще не исчерпали своих возможностей, но имеют ряд недостатков, связанных как с недостаточной точностью механических приводов, так и с их инерционностью. Недостатки существующих дефлекторов заставляют искать новые возможности управления лазерным пучком.

Перспективным способом управления пучком в пространстве может стать сравнительно недавно появившийся метод внутрирезонаторного управления диаграммой направленности лазерного излучения с помощью пространственно-временных модуляторов света (ПВМС). Традиционные методы осуществляют наведение лазерного пучка вне лазерного резонатора. При внутрирезонаторном управлении сам резонатор лазера с помощью ПВМС формирует направление излучения на объект. Достоинством метода является отсутствие подвижных оптико-механических элементов. Быстрота наведения зависит только от быстродействия ПВМС.

Впервые использование ПВМС в сопряженном лазерном резонаторе³ предложено и реализовано в работе Myers R.A и Pole R.V.⁴. ПВМС на основе электрооптического кристалла KDP управлялся с помощью электронного пучка. В работах Владимирова Ф.Л. с сотр. и Корнева А.Ф. с сотр.^{5,6} впервые использовался в сопряженном резонаторе светоправляемый ПВМС. В работах Данилова В.В. с сотр.⁷⁻⁸ исследовалась возможность использования ЖК модуляторов в лазерах среднего ИК-диапазона. На макете модулятора получено сканирование излучения CO₂ лазера с мощностью 0.1 Вт при частоте 100 Гц. В нашей работе [22] в лазере использован ПВМС типа PROM. Недостатками первого⁴ ПВМС является сложная система управления электронным пучком и необходимость сложной системы охлаждения кристалла. Жидкокристаллические модуляторы и ПВМС типа PROM имеют невысокую лучевую прочность (~ 0.1 Дж/см²). Их быстродействие ограничено временами, превышающими несколько сотен микросекунд. В связи с вышесказанным, представленные в рамках настоящей работы результаты исследований в области формирования мощных лазерных пучков, результаты исследований по минимизации угловой расходимости мощных лазеров и разработка нового внутрирезонаторного ПВМС, несомненно, являются актуальными.

Цель диссертационной работы.

Целью работы является разработка и исследование методов увеличения мощности лазерных пучков, уменьшения их угловой расходимости до близкой к дифракционной и средств их точного наведения с помощью внутрирезонаторных ПВМС.

3. Pole R.V. Conjugate - concentric laser resonator. J. Opt. Soc. Amer., **55**, 254-260 (1965).

4 Myers R.A., Pole R.V. The electron beam scanlaser. Theoretical and operational studies. IBM J. Res. Develop., **11**, 502-510 (1967).

5. Владимирова Ф.Л., Грознов М.Н., Еременко А.С. и др. Преобразование оптических сигналов в лазере с внутрирезонаторным жидкокристаллическим пространственным модулятором света. Квант. электроника, **12**, 2071 – 2076 (1985).

6. Корнев А.Ф., Покровский В.П. Сомс Л.Н. и др. Лазерные системы с внутренним сканированием. //Оптический журнал. -1994 - №1. - с. 10-25.

7. Данилов В.В., Данилов О.Б., Жуковская Л.Д., Мак А.А.и др. Жидкокристаллический модулятор на 10.6 мкм. Квант. электроника, **12**, 1985, с. 1690 – 1694.

8. Адоменас П.В., Данилов В.В., Желваков А.П. и др. Внутрирезонаторное управление лазерным излучением с помощью модулятора на основе микрокапсулированных ЖК. ОМП, 1991, №1, с.13-15.

9. Багров И.В., Грязнов М.В., Данилов В.В. и др. ЖК модуляторы как лазернооптические элементы для среднего ИК-диапазона. Опт. и спектр., 1999, **87**, №5, с. 853-864.

Для достижения поставленной цели основное внимание в работе сконцентрировано на решении следующих задач:

- разработка схем лазеров на неодимовом стекле с оптической ретрансляцией действительного изображения входной апертуры в усилительном канале, периодической пространственной фильтрацией излучения и проведение экспериментальных исследований эффектов, ограничивающих мощность пучка;
- разработка дисковых усилителей с апертурой до 15 см, исследование методов повышения их эффективности;
- разработка лазерной системы на неодимовом стекле с обращением волнового фронта излучения (ОВФ), основанного на эффектах вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ) в нелинейных средах, проведение экспериментальных исследований по минимизации расходимости пучка;
- разработка лазерной системы на неодимовом стекле, диаграммой направленности которой управляет внутрирезонаторный ПВМС;
- разработка методики исследования точности управления пучком, экспериментальное исследование точности управления;
- анализ возможных схем построения лазерных систем с внутрирезонаторным управлением диаграммы направленности излучения;
- разработка внутрирезонаторного электроуправляемого ПВМС на основе электрооптической керамики цирконата титаната свинца, легированного лантаном (ЦТСЛ);
- разработка оптических схем резонаторов для реализации лазеров с электроуправляемыми ПВМС;
- экспериментальная реализация лазеров на алюмоиттриевом гранате с внутрирезонаторным электроуправляемым ПВМС;
- разработка схем и исследование лазерных систем с внутрирезонаторным управлением диаграммы направленности;
- разработка и расчет оптической схемы и энергетических характеристик лазера на неодимовом стекле с энергией пучка 600-700 Дж в импульсе, направлением излучения которого управляет разработанный ПВМС;
- проведение предварительных исследований и реализация внутрирезонаторного управления диаграммой направленности лазера на парах меди и нецепного электроразрядного DF лазера.

Методология работы

Для повышения яркости излучения лазерных систем используется техника передачи изображения входной апертуры или выходного зрачка задающего генератора в усилительном тракте и периодическая пространственная фильтрация излучения, выходные ДУ. Расчет оп-

тических систем производится методами матричной оптики. В качестве основного метода уменьшения угловой расходимости лазерных систем используется ОВФ излучения в нелинейных средах.

Управление диаграммой направленности пучка осуществляется с помощью светоправляемого или электроуправляемого пространственного модулятора света. Исследование точности наведения лазерного излучения осуществляется подсветкой дальнопольными распределениями реперного и силового пучков сетки на фотокатоде электронно-оптического преобразователя в кадровом режиме работы. Оптические схемы с поляризационными, электрооптическими, фазовыми элементами предварительно численно моделируются с помощью матриц Джонса.

Энергетические расчеты лазерных систем проводятся с учетом насыщения усиления при использовании экспериментально полученных данных по величинам потоков насыщения.

Измерение пространственных, временных и поляризационных характеристик лазерного излучения производится по стандартным общепринятым методикам. Юстировка лазерных систем производится на рабочей длине волны с помощью оптических приборов.

Научная новизна

1. Экспериментально исследованы методы формирования мощного лазерного пучка в многокаскадных усилителях на неодимовом стекле. В несколько раз повышена мощность излучения за счет подавления мелкомасштабной самофокусировки (МС). Обнаружено, что МС вызывает сильную деполяризацию лазерного пучка. Показано, что при последующем усилении пучка после пространственного фильтра (ПФ) самофокусировка возникает на пространственной частоте пропускания ПФ. Экспериментально показано, что мощность пучка, сформированного жесткой диафрагмой установленной перед ПФ с широкой полосой пропускания не ниже, чем в схеме с использованием аподизирующей апертуры.

2. Разработаны дисковые усилители с апертурой до 15 см с эффективной поперечной системой накачки с коэффициентом усиления 0.05 см^{-1} . С помощью разработанных поглощающих покрытий решена задача подавления паразитной генерации в активных элементах ДУ, ограничивающая коэффициент усиления на уровне $\sim 0.03 \text{ см}^{-1}$. Измерением коэффициентов усиления слабого сигнала впервые экспериментально показано, что выбором формы импульса тока в лампах накачки можно на 15... 25% увеличить уровень запасенной энергии в активной среде лазера. На выходе мощной лазерной системы, в оптическую схему которой заложены ретрансляция входной апертуры, периодическая пространственная фильтрация и выходные ДУ получен выходной пучок мощностью до 300 ГВт без заметных потерь вследствие МС при $\tau_{\text{и}} \approx 8 \cdot 10^{-10} \text{ с}$.

3. На выходе многокаскадной лазерной системы на неодимовом стекле с ретрансляцией изображения входной диафрагмы в усилительные каскады и на ВРМБ-зеркало, периодической ПФ излучения и выходного ДУ с помощью ОВФ излучения в нелинейных средах впервые получен лазерный пучок с энергией до 410 Дж при длительности импульса 25 нс с расходимостью пучка близкой к дифракционной. Половина энергии пучка сосредоточена в дифракционном угловом растворе $4 \cdot 10^{-5}$ радиан.

4. Обнаружено, что при ОВФ сканирующего в пространстве пучка в дальнопольной картине распределения интенсивности обращенного пучка возникают пространственные разрывы, в то время как временной ход отраженного излучения непрерывен во времени.

5. Впервые проведены эксперименты по внутрирезонаторному управлению диаграммой направленности пучка мощного лазера на неодимовом стекле. Разработана методика исследования точности наведения. Экспериментально показано, что ошибка наведения не превышает 0,3 от величины дифракционной расходимости пучка. Экспериментально установлено, что двукратное ОВФ пучка с диаметром 100 мм не может изменить его направление на величину, превышающую 0,1 от его дифракционной расходимости.

6. Разработан внутрирезонаторный электроуправляемый ПВМС на основе электрооптической керамики ЦТСЛ, работающий в широком спектральном диапазоне длин волн, с временем электрооптического отклика почти на два порядка меньшим и с лучевой прочностью на два порядка большей, чем у используемых на практике пространственных модуляторов.

7. Разработана оптическая схема лазерного резонатора для реализации двухкоординатного сканирования излучения. Впервые показана возможность адресации излучения с помощью разработанного ПВМС в любую заданную точку поля зрения в течение 3 - 4 мкс. Предложен и экспериментально исследован сопряженный резонатор, одна из линз которого цилиндрическая.

8. С помощью разработанных модуляторов впервые реализовано внутрирезонаторное управление диаграммой направленности лазера на парах меди (длины волн генерации 0.5106 мкм и 0.5782 мкм) и химического нецепного электроразрядного DF-лазера (длины волны генерации 3.5 ... 4.1 мкм).

Основные результаты работы, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований в области формирования мощных лазерных пучков, в несколько раз повысившие мощность излучения и позволившие создать высокоэнергетические многокаскадные лазерные системы на неодимовом стекле. Результаты экспериментального исследования обнаруженной деполяризации лазерного пучка при разви-

тии МС излучения. Разработка ДУ с высокой эффективностью системы накачки. Экспериментальная демонстрация повышения эффективности лазерных усилителей за счет использования импульса накачки с нарастающей во времени интенсивностью и крутым срезом. Результаты экспериментального определения потоков насыщения в неодимовом стекле, позволяющие проводить энергетический расчет лазерных систем.

2. Результаты экспериментального исследования ОВФ сканирующего в пространстве пучка, позволившие установить, что в случае быстрой развертки пучка до возникновения новой гиперзвуковой голограммы в каустике пучка отражение излучения ВРМБ-зеркалом происходит в первоначальном направлении, после появления новой гиперзвуковой голограммы отражение происходит в двух направлениях, постепенно увеличиваясь в новом направлении.

3. Методика и результаты исследования точности управления диаграммой направленности пучка мощной лазерной системы с ОВФ излучения с помощью ПВМС при расходимости выходного пучка близкой к дифракционной, показавшие, что ошибка его наведения не превышает 0.3 от его дифракционной расходимости.

4. Быстродействующие внутрирезонаторные пространственные модуляторы света на основе электрооптической керамики ЦТСЛ с двухсторонними заглубленными в материал подложки электродами, обладающие высокой лучевой прочностью (до 11 Дж/см^2 для длительности импульса $\approx 30 \text{ нс}$), временем электрооптического отклика $\sim 1 \text{ мкс}$, с частотой переключения несколько кГц (в пакетном режиме работы до 100 кГц), прозрачные в спектральном диапазоне 0.5...6 мкм.

5. Оптическая схема резонатора с внутрирезонаторным двухкоординатным сканированием и результаты исследования характеристик его излучения, показавшие возможность адресации излучения в любую заданную точку поля зрения системы в течение 3 - 4 мкс и возможность формирования пакета импульсов в разных направлениях с частотой следования импульсов в пакете до 100 кГц. Оптическая схема сопряженного лазерного резонатора с лучевой разгрузкой и увеличенным съемом запасенной в активной среде энергии. Оптические схемы резонаторов с двухкоординатным управлением диаграммы направленности и установкой пластин модуляторов у одного зеркала резонатора.

6. Реализация резонаторов лазера на парах меди и DF- лазера, показавшая, что при использовании ПВМС на основе ЦТСЛ керамики возможно внутрирезонаторное управление диаграммой направленности пучка для лазеров с длинами волн излучения в диапазоне от 0.5 до 4.1 мкм.

Практическая значимость

Использование результатов исследования методов формирования мощных лазерных пучков позволило разработать лазерные системы с рекордными по совокупности парамет-

ров (мощность и угловая расходимость пучка) характеристиками. Это шестиканальная лазерная установка “Прогресс”, для проведения исследований в области ЛТС с суммарной мощностью пучков до 1,2 ТВт ($\tau \approx 2 \cdot 10^{-10}$ с), лазерная система с ОВФ с энергией пучка около 400 Дж ($\tau \approx 25$ нс), больше половины которой сосредоточено в угловом растворе, равном дифракционному углу для пучка с диаметром 100 мм, лазерная система с энергией до 800 Дж для проведения исследований по ВРМБ компрессии импульса для задач ЛТС. Результаты исследований позволяют рассчитывать как усилительные каскады лазеров, так и энергетические характеристики многокаскадных усилителей.

Результаты исследований ОВФ сканирующего в пространстве пучка могут быть использованы как для оценки скорости затухания гиперзвука в новых нелинейных средах, так и для формирования дальнопольных распределений пучка вытянутых на несколько дифракционных углов в заданном направлении.

Экспериментально показана возможность точного и быстрого наведения мощного лазерного пучка с помощью внутрирезонаторного ПВМС в заданную точку пространства в поле зрения лазерной системы. Это позволит решить задачу передачи энергии с помощью лазерного пучка на большие расстояния, на летательные аппараты на реактивной и электрореактивной тяге, обеспечить дальнюю космическую связь и локацию удаленных объектов.

Использование результатов работы позволит создать лазерные локаторы, обладающие качественно новыми характеристиками, такими, как возможность одновременного сопровождения нескольких объектов, находящихся в поле зрения, устранения влияния колебаний носителя на точность адресации излучения, включения пикселя модулятора, положение которого соответствует координате упреждения. ПВМС локатора может быть оптически и через компьютер сопряжен с ПВМС высокоэнергетического лазера для оказания воздействия на объекты с помощью возникающей плазмы.

Внутрирезонаторное управление лучом позволило создать уникальный лазерный маркер изделий промышленности, который может дистанционно маркировать движущиеся на конвейере изделия, причем на каждом следующем изделии надпись может быть другой.

Задающий генератор мощной лазерной системы с внутрирезонаторным управлением диаграммы направленности излучения позволяет точно направлять лазерный пучок в заданную точку пространства и удерживать его на объекте. Причем во всех этих случаях могут отсутствовать подвижные оптико-механические элементы для наведения пучка.

Апробация работы и публикации

Результат работы докладывались на отечественных и международных конференциях: “Оптика лазеров” (Ленинград, 1979 г, 1981 г, 1983 г, 1989 г, 1993 г); Всесоюзной конференции “Теоретическая и прикладная оптика” (Ленинград, 1986 г); Всесоюзном совещании по нерезонансному взаимодействию оптического излучения с веществом (Ленинград 1981,

Вильнюс 1984 г); International Conference TFC'91 (Riga, 1991); Seventh European Meeting on Ferroelectricity (Dijon, France, 1991); CLEO/Europe'98 (Glasgow, Great Britain, September 13 - 18); XXVI European Conf. on Laser Interaction with Matter ("ECLIM 2000", Prague, 2000); 3 International Conference "Advanced optical materials and devices" (Riga, Latvia, 2002); Совещании "Кремний – 2004" (Иркутск, 5 - 9 июля 2004); VI Всероссийской конференции "Проблемы создания лазерных систем" (г. Радужный 1-3 октября 2008 г). По материалам работы проведены семинары в ПИЯФ РАН (г. Гатчина) и НИТИ (г. Сосновый Бор). По результатам диссертации опубликовано 69 работ, в том числе 35 статей и 7 авторских свидетельств на изобретения СССР и патентов РФ. Диссертационная работа проводилась в рамках тематик НИР, выполняемых в НИИКИ ОЭП по заказам МОП СССР, Российского агентства по атомной энергии, МО РФ, Министерства промышленности и энергетики РФ.

Реализованы следующие научные результаты, полученные в диссертационной работе:

- результаты исследований в области формирования мощных лазерных пучков и минимизации их угловой расходимости использованы при создании в НИИКИ ОЭП шестиканальной лазерной установки "Прогресс" для решения задач ЛТС, при создании лазерного адаптивного стенда "ЛАС", проекте №108 МНТЦ;

- техническая документация на ДУ, результаты исследования ДУ и оптимизации схем мощных лазеров с оконечными ДУ внедрены в РФЯЦ-ВНИИТФ;

- схема лазера с сопряженным резонатором и цилиндрическим объективом защищена патентом РФ и использована при создании в НИИКИ ОЭП лазерного маркера движущихся изделий;

- схемотехника формирования расходимости излучения близкой к дифракционной в ЗГ с сопряженным резонатором и разработанные ПВМС с системой управления внедрены в ИЛФИ РФЯЦ ВНИИЭФ.

Личный вклад автора

Участие автора в получении научных результатов заключалось как в постановке большинства экспериментов, так и в личном участии в экспериментах, обработке и интерпретации их результатов. Автор разработал большинство оптических схем лазеров и лазерных систем, предложил методику исследования точности наведения. Лично провел эксперименты по исследованию возможности использования ЦТСЛ внутри резонатора. Инициировал разработку технологии изготовления ПВМС на основе ЦТСЛ в НИИКИ ОЭП. Проанализировал возможности установки пластин ПВМС у одного из зеркал резонатора. Показал важность согласования размера пикселя ПВМС с диаметром внутрирезонаторной диафрагмы для получения угловой расходимости пучка близкой к дифракционной. Большинство публикаций статей, патентов и докладов на конференциях подготовлены автором работы.

На разных этапах исследований в работе принимали творческое участие сотрудники института: Чернов В.Н., Дмитриев Д.И., Жилин А.Н., Решетников В.И., Сиразетдинов В.С., Григорьев К.В., Котылев В.Н., Либер В.И., Ловчий И.Л.; сотрудники НИИ ФТТ Латвийского Университета: Э. Клотиньш и Ю. Котлерис; сотрудник НИИЭФА Фомин В.М. Автор благодарен сотрудникам ИЛФ Маку А.А. и Сомсу Л.Н. за помощь в постановке отдельных исследований, Н.Н. Розанову и его коллегам за создание программ расчета ДУ и коэффициентов передачи пространственных частот возмущений в канале. Автор благодарен директору НИИ ФТТ А. Штернбергу за предоставление образцов ЦТСЛ различного состава. Автор благодарен А.Д. Старикову и Н.И. Павлову за постоянный интерес к работе и ее поддержку.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и приложений, содержит 260 страниц машинописного текста, включает 129 рисунков, 8 таблиц, 191 ссылку на литературу. Во введении рассматривается актуальность, цель, и задачи диссертационной работы, научная новизна результатов, приводятся положения, вынесенные на защиту, практическая ценность полученных результатов, апробация работы и публикации, личный вклад автора. Кратко описывается содержание работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** рассмотрены результаты исследований в области формирования высокоэнергетических лазерных пучков. Рассмотрены методы уменьшения расходимости лазерных пучков, особенности схемного построения лазеров с внутрирезонаторным управлением диаграммы направленности. В начале главы приведен краткий обзор своих работ и работ других авторов, посвященных разработке и исследованию методов повышения мощности лазерных пучков и разработке ДУ.

В **разделе 1.1** рассмотрены причины ограничения энергии и ухудшения расходимости световых пучков в лазерных системах на неодимовом стекле.

Отмечается, что аподизация пучка эффективно подавляет дифракцию Френеля, но в реальных лазерных усилителях при числах Френеля $N=15...30$ не позволяет получить пучки с высоким коэффициентом заполнения γ , от которого напрямую зависит энергия пучка. Экспериментально продемонстрирована возможность почти двукратного (до 50 Дж при длительности импульса 10^{-9} с) увеличения энергии лазерного пучка при установке после предварительного усилителя аподизирующей диафрагмы с высоким коэффициентом заполнения пучка ($\gamma \approx 0.8$) и ретрансляции плоскости её действительного изображения в наиболее нагруженные каскады ($\varnothing 45 \times 630$ мм) усилителя с помощью оптического ретранслятора [1]. Применение такой схмотехники приводит к тому, что при приближении к плоскости изо-

бражения диафрагмы дифракционные возмущения в пучке уменьшаются по амплитуде и полностью исчезают в плоскости изображения, что минимизирует отношение пиковой плотности энергии в пучке к средней плотности.

Использование вакуумных пространственных фильтров (ВПФ) [2] позволяет согласовывать апертуры усилительных каскадов, транслировать в канале плоскость изображения входной апертуры, в сильной степени предотвращает самовозбуждение усилителя, подавляет мелкомасштабные шумы, возникающие из-за наличия мелких дефектов в каскадах усиления. Показано, что использование ВПФ, который устраняет высокочастотный шум в пучке с энергией менее 5% от полной энергии, приводит к увеличению энергии пучка при последующем усилении почти в 3 раза, а МС возникает на граничной частоте пропускания ВПФ (рисунок 1).

Предложено вместо аподизирующей диафрагмы использовать жесткую диафрагму при установке за ней пространственного фильтра с широкой полосой пропускания [3,4]. Показано, что использование этих методов при коротком импульсе подавляет МС излучения и вызванную МС деполяризацию пучка [5].

Дальнейшее увеличение энергии пучка возможно только при использовании широкоапертурных выходных каскадов, из которых наиболее предпочтительны ДУ [6-8], обладающие высокой равномерностью усиления в поперечном сечении и малой величиной термооптических искажений [12].

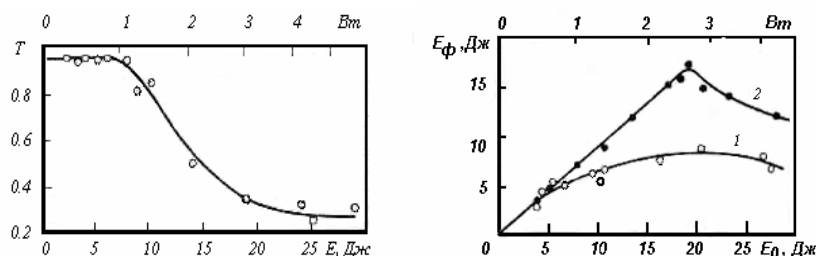


Рисунок 1. Зависимость пропускания T ВПФ от энергии E входного пучка и зависимость $E\phi(E_0)$ для $\phi = 0,75$ мрад на выходе последующего усилителя от входной энергии E_0 в отсутствие (1) и при наличии (2) диафрагмы в фильтре. Сверху отложены значения интеграла распада пучка B для усилительного канала до ВПФ и для каскада Ø60 мм после фильтра. Граничная частота пропускания ВПФ $K_{cp} \approx 37 \text{ см}^{-1}$. Длительность лазерного импульса $1 \cdot 10^{-9}$ с.

Приведены результаты исследования многокаскадной лазерной системы с периодической пространственной фильтрацией и выходным ДУ [17], схема которой показана на рисунке 2. Впервые фильтровался пучок с энергией около 70 Дж. При длительности импульса 0,8 нс получен пучок диаметром 70 мм с энергией до 235 Дж (290 ГВт), 80% которой заключено в угловом растворе 0,75 мрад.

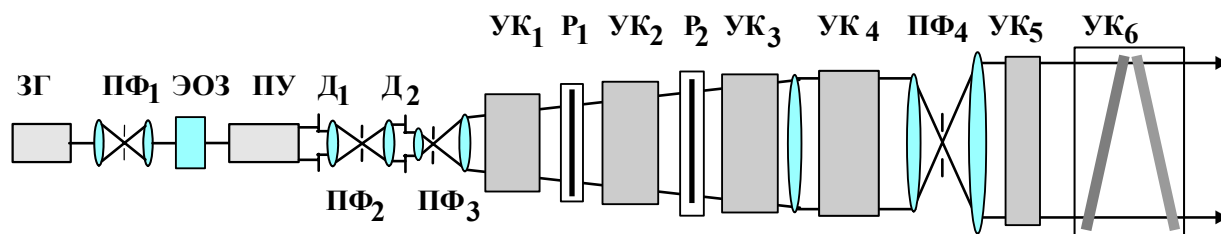


Рисунок 2 Схема установки. Апертуры усилительных каскадов УК₁-УК₆ равны Ø20, 30, 45, 45, 75 и 90 мм соответственно

На рисунке 3 приведены фотографии пучков в ближнем поле и дальней зоне на выходе лазера.

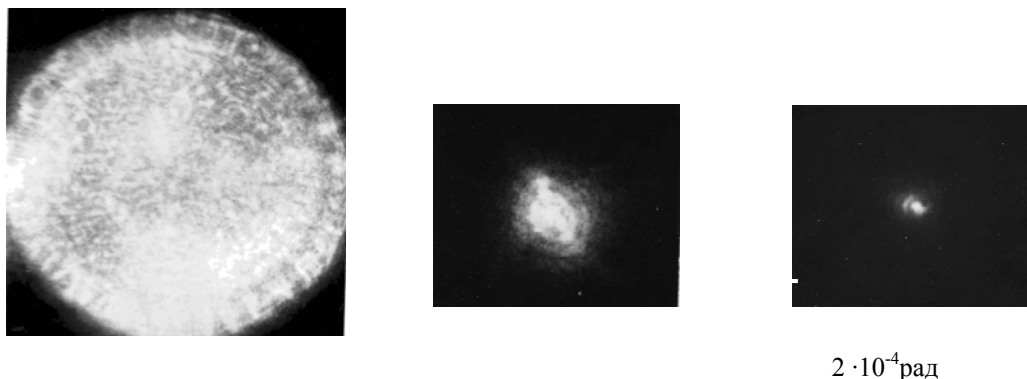


Рисунок 3. Ближнепольная фотография пучка Ø70 мм с энергией $E_0 = 80$ Дж (мощностью 100 ГВт), его распределение и распределение пучка 3Г в дальней зоне прошедшего через всю систему (около 70 оптических поверхностей) при ненакачанном усилителе. В ближнем поле пучка заметен нелинейный рост пространственных выбросов интенсивности.

Приводятся результаты исследования обнаруженной сильной деполяризации пучка при возникновении МС. На рисунке 4 показан рост деполяризации пучка (2) в пассивном активном элементе, который установлен за ВПФ. Предложено использовать увеличение степени деполяризации пучка в качестве метода контроля возникновения МС.

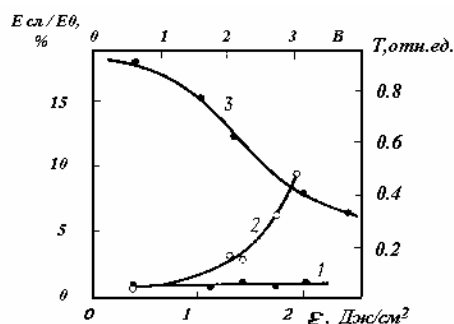


Рисунок 4. Зависимость степени деполяризации (отношения энергий деполяризованной компоненты к полной энергии пучка) на входе (1) и выходе (2) пассивного стержня из стекла ГЛС1, установленного за ВПФ и пропускание T ВПФ (3) от плотности энергии ϵ выходного пучка и интеграла расхода пучка B .

Далее в **разделе 1** приведены экспериментальные результаты исследований характеристик и результаты численного моделирования разработанного ДУ Ø15 см [10]. ДУ Ø15 см при наличии поглощающего покрытия [11] на дисках из фосфатного неодимового стекла для предотвращения паразитной генерации обеспечивает экспериментально измеренный коэффициент усиления $k = 0.05 \text{ см}^{-1}$. Показано, что выбранная система поперечной накачки ДУ Ø15 см является наиболее эффективной. Рассматриваются результаты численного трехмер-

ного моделирования энергетических характеристик ДУ с помощью программы расчета, основанной на методе Монте-Карло и детально описанной в [9]. Программа показала хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных и позволила провести ряд численных экспериментов, прямое выполнение которых было бы дорогим и сложным. В частности, было учтено влияние полосы поглощения неодима 0,35 мкм в фосфатном стекле ГЛС21 на эффективность ДУ, обычно отсекаемой фильтром ультрафиолетовой составляющей спектра ламп или маскируемой церием, вводимым в стекло. Показано, что при номинальных плотностях накачки k может возрасти почти в 1.5 раза, а при малых накачках выигрыш не превышает 20%. Внутренняя полость ДУ должна быть заполнена сухим азотом, чтобы исключить искажения волнового фронта пучка в воздухе, вызванных поглощением в нем коротковолновой составляющей спектра излучения ламп накачки [12].

Экспериментально показано, что значительный резерв увеличения запасенной в ДУ энергии заключен в использовании для его накачки импульсов излучения с нарастающей во времени интенсивностью и крутым срезом [13]. В случае использования такого импульса можно либо увеличить абсолютную величину k на 15 % (стекло ГЛС21) или 25% (ГЛС1) [13] по сравнению с максимально достижимой при обычной колоколообразной форме импульса, либо при той же величине k на 30 - 40 % снизить плотность энергии накачки.

Для определения эффективности съема энергии с ДУ Ø15 см при однократном усилении лазерного импульса проведены результаты расчетов, в которых определялись предельная выходная мощность и КПД ДУ при длительности лазерного импульса $\tau_{\text{и}} = 0,1 - 20$ нс в условиях ограничения мощности эффектом МС и разрушением поверхностей оптических элементов на выходе ДУ. Расчет производился для двух вариантов. В первом определялись предельные характеристики изолированного ДУ Ø15 см, когда не конкретизировалось лазерное устройство, с помощью которого пучок подавался на вход ДУ. Во втором варианте рассчитывались характеристики четырехкаскадного усилителя, в котором ДУ использовался в качестве оконечного каскада. Насыщение усиления учитывалось с помощью уравнения Франца-Нодвика, причем плотность энергии насыщения 4,5 Дж/см² для стекла ГЛС21 во всем рассматриваемом диапазоне $\tau_{\text{и}}$ была взята из измерений, выполненных для импульсов длительностью 1 и 25 нс вплоть до плотности энергии 8 Дж/см² [14,15]. Ограничение съема энергии из-за МС пучка в стекле учитывалось с помощью интеграла распада B , который в расчетах не должен был превышать критического значения ~ 3 (B -ограничение) [4]. Ограничение, связанное с разрушением поверхностей элементов (E -ограничение), учитывалось с помощью данных о порогах разрушения. Данные о порогах разрушения брались из работы [16]. При проведении расчетов использованы характеристики усилителей и данные по пропусканию ВПФ из работы [17].

Показано, что изолированный ДУ Ø15 см обеспечивает мощность выходного пучка в субнаносекундном импульсе 2,5 ТВт, которая ограничена величиной B -интеграла вплоть до $\tau_n = 0,5$ нс. Ограничение энергии выходного пучка на уровне $\sim 1,4$ кДж при $\tau_n = 1$ нс связано с разрушением поверхностей элементов на выходе усилителя при использовании предусилителя аналогичного использованному в работе [17]. При увеличении длительности импульса до 5...10 нс и соответствующей оптимизации схемы многокаскадный усилитель с окончательным ДУ Ø15 см может обеспечить КПД $\sim 0,5$ % и энергию ~ 3 кДж.

В заключение раздела отмечается, что в настоящее время для увеличения энергии и КПД лазеров для ЛТС используются относительно небольшой предварительный усилитель и многопроходные схемы для выходных дисковых усилителей, выполненных в модульном исполнении¹⁰.

В разделе 1.2 рассматриваются методы минимизации угловой расходимости лазерных систем. Излучение ЗГ может быть сформировано таким образом, что его расходимость будет практически ограничена дифракционным пределом. По мере распространения пучка в усилителе его расходимость ухудшается как вследствие неидеальной обработки оптических элементов, так и из-за термооптических искажений, вызванных накачкой усилительных каскадов. Радикальным способом повышения направленности лазерных пучков является метод ОВФ излучения в нелинейных средах¹¹.

Использование ОВФ и описанных выше методов формирования мощных пучков, а также применение в качестве ВРМБ–зеркала схемы “генератор-усилитель” [20], позволило получить на выходе лазера на неодимовом стекле с окончательными ДУ пучок с высокой мощностью и малой расходимостью излучения близкой к дифракционной (более половины энергии пучка из 450 Дж заключено в угловом растворе, равном диаметру центрального максимума Эйри-распределения для пучка 85 мм).

Важная роль зоны перед каустикой ВРМБ-зеркала показана в работе, посвященной исследованию ОВФ сканирующего (с помощью электрооптического дефлектора) в пространстве пучка [21]. Одной из целей работы было исследование возможности увеличения падающей на ВРМБ–зеркало энергии за счет снижения плотности энергии в каустике во избежание развития пробоя и других конкурирующих процессов на качество ОВФ. Исследовалось ОВФ сканирующего пучка при различных скоростях развертки в нескольких средах (CCl_4 , SiCl_4 , стекло ГЛС-6).

10. Воронич И.Н., Галахов В.И., Гаранин С.Г. и др., Измерение коэффициента усиления в дисковом усилительном каскаде с активными элементами из неодимового фосфатного стекла, Квантовая электроника, **33**, 2003, с.485-488.

11. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985, 240 с.

Линейно поляризованный пучок ЗГ на фосфатном неодимовом стекле проходил через усилитель и разворачивался с постоянной скоростью с помощью дефлектора на танталате лития с квадрупольными электродами примерно на 8 дифракционных углов (ϕ) с различными скоростями: 0,2 ϕ /нс (быстрая развертка) и 0,07 ϕ /нс (медленная развертка). Было обнаружено, что при быстрой развертке и использовании CCl_4 в качестве ВРМБ - активной среды, дальняя зона отраженного пучка разбивается на ряд фрагментов, т. е. на развертке есть области, где нарушается ОВФ. С ростом энергии падающего пучка от 50 до 200 мДж появляется сначала одно пятно, потом два и т. д. При медленном сканировании наблюдается гладкая непрерывная развертка во всем диапазоне энергий.

Так как для CCl_4 время затухания гиперзвука $\tau \approx 1$ нс, то ОВФ сканирующего пучка реализуется тогда, когда время t его поворота на дифракционный угол лежит в интервале от 5τ до 15τ , т. е. при выполнении условия стационарности. Для стекла ГЛС6 и на медленных развертках $t \approx 3\tau$ ($\tau \approx 5$ нс) это условие не выполняется. В дальней зоне отраженного пучка видны провалы, картина похожа на ту, которая наблюдалась на быстрых развертках для CCl_4 .

С увеличением скорости сканирования качество ОВФ еще более ухудшается. В качестве активной среды на быстрой развертке SiCl_4 ведет себя существенно хуже, чем CCl_4 . При медленном сканировании развертка отраженного пучка напоминает по характеру быструю развертку на CCl_4 , только провалы интенсивности не такие глубокие. Картина медленной развертки для SiCl_4 выглядит существенно лучше, чем для стекла. Это позволяет сделать вывод о том, что для SiCl_4 время затухания гиперзвука лежит в диапазоне $\tau = 1 \dots 5$ нс.

Коэффициенты отражения ВРМБ - зеркал на основе используемых сред имеют меньшую величину, чем для пучков, имеющих стационарный волновой фронт. Сравнение временных форм падающего и отраженного импульсов показывает, что они достаточно хорошо повторяют друг друга за исключением мелких модуляций в отраженном импульсе. Характерных провалов, регистрируемых в дальней зоне отраженного пучка при быстрой развертке, на временной форме импульса нет.

Для детального выяснения такого необычного характера отражения сканирующего пучка была проведена регистрация дальней зоны отраженного пучка на скоростном фоторегистраторе "Агат". На рисунке 5 представлена характерная фотография экрана фоторегистратора, когда развертка отраженного пучка разбивалась на ряд фрагментов. Сканирование осуществлялось в режиме быстрой развертки, в качестве среды использовался четыреххлористый кремний. Видно, что излучение как бы "перескакивает" с одного направления на другое без прерывания отражения во времени, причем существуют моменты времени, когда отражение идет сразу в двух направлениях. При этом эффектив-

ность отражения в предыдущем к этому моменту времени направлении уменьшается, а в последующем - увеличивается.

Непрерывность этого рассеяния во времени обусловлена тем, что падающий и отраженный пучки проходят практически по одному и тому же объему в предфокальной области во все время сканирования. Возникающая в предфокальной области гиперзвуковая голограмма (отражающая в определенном направлении в какой-то момент времени) из-за инерционности процесса сохраняется некоторое время после исчезновения затравочного для ее образования излучения из фокальной области. До образования новой голограммы, соответствующей новому ОВФ – направлению, она может поддерживать рассеяние в направлениях, не соответствующих обратному для данного момента времени направлению падающей волны, но лежащих в плоскости развертки. Такой характер отражения и был зарегистрирован с помощью фоторегистратора. Используя это явление можно оперативно оценивать время затухания гиперзвука τ для ВРМБ активных сред.

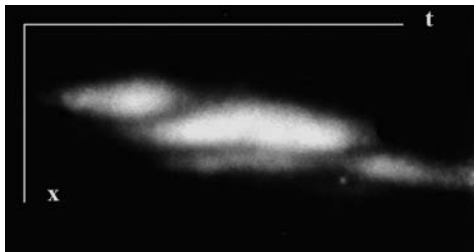


Рисунок 5. Временная развертка дальней зоны сканирующего пучка, отраженного от ВРМБ-зеркала на экране электронно-оптической камеры “Агат”. Сканирование пучка идет по вертикали (ось x), временная развертка камеры идет по горизонтали (ось t).

В разделе 1.3 рассматриваются особенности лазерных систем с внутриврезонаторными пространственными модуляторами света.

Отмечается, что для увеличения поля зрения системы требуется установка усилительных каскадов и элементов развязки в плоскости выходного зрачка ЗГ. Для этого требуется установка ретрансляторов между всеми каскадами усиления, по крайней мере, между каскадами, имеющими небольшой световой диаметр. Направление излучения в ЗГ и усилителях зависит от включенного пикселя ПВМС. Запасенная в активном элементе ЗГ энергия используется только частично, и ее доля зависит от угла поля зрения системы, размера пикселя ПВМС, длины и диаметра активного элемента. С точки зрения КПД лазеров, целесообразно использование лазерных систем с полем зрения ЗГ, не превышающим нескольких угловых градусов.

Изменение направления излучения ЗГ в пространстве осуществляется с помощью выходного внерезонаторного объектива 8 (рисунок 6). Угловое поле сканирования φ равно (для углов несколько градусов) $\varphi = T / F$, где T - размер активной зоны ПВМС, F - фокусное расстояние внерезонаторного объектива. Оси всех пучков пересекаются в переднем фокусе внерезонаторного объектива, где расположено действительное изображение внутриврезонаторной диафрагмы.

Пиксель ПВМС установленный в фокусе линзы 3 является угловым селектором излучения. Правильный выбор размера диафрагмы 4 в центре резонатора и фокуса линзы 3 позволяет получить расходимость излучения ЗГ близкую к дифракционной. Определяющим в выборе f линзы и размера диафрагмы 4 является размер пикселя ПВМС.

Угловая расходимость выходного пучка ЗГ зависит от его диаметра D_F на выходном объективе. В свою очередь D_F зависит от размера пикселя модулятора d и фокуса объектива F .

Отмечается, что лазерные системы с внутрирезонаторным сканированием можно строить как системы с прямым усилением, когда излучение ЗГ усиливается в усилителе с последовательно возрастающими апертурами, так и с ОВФ излучения, когда излучение ЗГ вводится через выходные каскады.

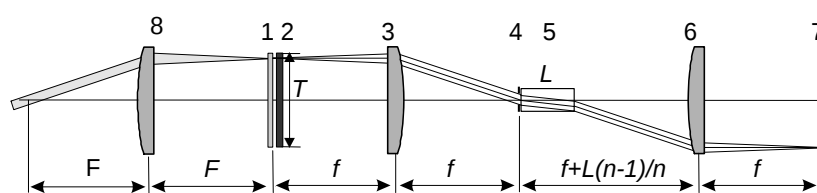


Рисунок 6. Схема сопряженного резонатора и преобразование положения включенного пикселя ПВМС в угловое отклонение выходного пучка внerezонаторным объективом: здесь 1, 7 – плоские зеркала резонатора; 2 – ПВМС; 3, 6 – софокусно установленные линзы резонатора; 4 – внутрирезонаторная диафрагма в центре резонатора; 5 – активный элемент; 8 – внerezонаторный объектив. Зеркала резонатора располагаются в сопряженных оптических плоскостях.

Выбор D_F и F определяется поставленной задачей, например, согласованием апертуры пучка с предварительным усилителем (ПУ) линейного усилителя или с выходным усилителем мощной системы с ОВФ излучения. Мощные широкоапертурные лазерные системы, предназначенные для наведения лазерного излучения на удаленные объекты обычно имеют небольшое поле обзора (несколько десятков пикселей) и расходимость пучка близкую к дифракционной. В этих системах вследствие редуцирования диаметра пучка в выходных каскадах при сканировании пучка используется почти весь объем активной среды, а углы “качания” пучка составляют величину несколько угловых минут. Необходимы увеличенные световые апертуры промежуточных линзовых элементов. Все рассмотренные выше методы формирования лазерного пучка можно использовать и в лазерных системах с внутрирезонаторным сканированием.

Глава 2 посвящена исследованию точности управления излучением мощной лазерной системы с ОВФ с помощью внутрирезонаторного ПВМС [22].

В **разделе 2.1** рассмотрены факторы, которые могут влиять на точность управления. При проведении экспериментов в лабораторных условиях существует только угловая ошибка, связанная с неточным обращением волнового фронта пучка и угловая ошибка, вызванная

задержкой срабатывания ПВМС. Последняя ошибка может привести к уменьшению точности из-за механических колебаний элементов лазерной системы (в основном поворотных зеркал), вызванных воздействием сильноточного импульса накачки лазерных каскадов на несущую конструкцию.

В разделе 2.2 рассмотрена лазерная система с ОВФ излучения. Светоуправляемый ПВМС типа PROM (английская аббревиатура “Pockels readout optical modulator”) на основе фоторефрактивного кристалла силиката висмута с устройством электронного управления был впервые использован в качестве внутрирезонаторного элемента для управления диаграммой направленности лазера. В ЗГ использовался активный элемент из АИГ:Nd³⁺. Для лучшего согласования с максимумом длины волны усилителя в части экспериментов использовался активный элемент из ИЛФ:Nd³⁺ ($\lambda = 1.053$ мкм). Для управления работой ПВМС использовалось моноимпульсное излучение второй гармоники неодимового лазера. Задержка появления моноимпульсной генерации ЗГ относительно момента прихода управляющего светового импульса составляла 600 мкс. Длительность импульса генерации лазера равнялась 50 нс. Выходная энергия ЗГ с активным элементом из АИГ:Nd³⁺ не превышала 10...30 мкДж, а с активным элементом из ИЛФ:Nd³⁺ - 150...300 мкДж, причем в последнем случае часто наблюдались повреждения модулятора излучением.

Представлены результаты исследования модуляционной характеристики PROM при управлении излучением второй гармоники и цикл его работы. Показано, что полная модуляция достигается для длины волны 0.53 мкм при плотности сигнала ~ 1.3 мДж/см².

На рисунке 7 приведена упрощенная схема экспериментальной установки для исследования точности управления пучком лазера. Излучение второй гармоники (2 ω) неодимового лазера проходило через диафрагму Д1, установленную в фокусе длиннофокусной линзы Л1 ($f=32.8$ м). Отразившись от клина, пройдя поляризатор П и отразившись от зеркала З1, излучение фокусировалось сферическим зеркалом на ПВМС ЗГ. Возникающий импульс генерации ЗГ распространялся в обратном направлении: отразившись от поляризатора П и пройдя схему изоляции, он попадал в предусилитель (ПУ) с ВРМБ - зеркалом. Обращенное излучение, прошедшее через поляризатор П, поступало на вход двухпроходного усилителя с ОВФ, перед которым был установлен вентиль Фарадея и кварцевая 45⁰ пластинка для поворота на 90° азимута поляризации выходного излучения и вывода его путем отражения от поляризатора П в направлении источника реперного излучения и схемы регистрации. Малая часть энергии пучка с выхода усилителя, отраженная от клина К1 и ослабленная зеркалом З2, поступала в схему регистрации, где направление пучка сравнивалось с направлением реперного излучения, которое попадало сюда, отразившись от ВРМБ-зеркала 1 реперного излучения (в части экспериментов использовалось излучение пучка 2 ω , отраженное от зеркально-линзового объектива типа “кошачий глаз”). Оба пучка подсвечивали реперную сетку, распо-

[illegible]

Геометрическое увеличение ВПФ и их расположение были выбраны так, чтобы обеспечить в усилительных каскадах максимальные числа Френеля. Диаметр выходного пучка был доведен до 100 мм.

Невысокая лучевая прочность PROM ограничивает выходную энергию ЗГ на уровне нескольких десятков микроджоулей. Для эффективного же съема запасенной в двухпроходном усилителе энергии и обеспечения высокого качества ОВФ на его вход необходимо подавать энергию несколько сотен микроджоулей [20]. Разработанные схемы ЗГ с лучевой разгрузкой ПБМС для увеличения выходной энергии [24,25] оказались неудобными для стыковки с усилителем. Вследствие этого потребовался ПУ слабого сигнала ЗГ с дополнительным ВРМБ - зеркалом для сохранения высокого качества волнового фронта усиливаемого пучка.

21

дефлектор, 45^0 – пластинка, ретрансляторы для передачи плоскости входного зрачка. Ослабление излучения на последних проходах достигалось за счет малой (4.5%) величины отражения пучка от поляризатора как R_p – компоненты. В связи с тем, что в схеме (рисунок 7) используется двукратное ОВФ излучения, перед проведением экспериментов по исследованию точности управления пучком следовало убедиться, что оно не внесет дополнительных ошибок.

В разделе 2.3 приведены результаты исследований точности воспроизведения направления пучка при двукратном ОВФ. Практически во всех экспериментах с ОВФ его качество определяется по доле энергии обращенной волны, идущей в угловой растров исходной волны, или по распределению интенсивности излучения в дальнем поле. Данные методы не дают информации о том, насколько точно совпадают максимумы дальнопольных распределений реперного и обращенного пучка. При проведении экспериментов использовалась методика регистрации пучков описанная выше. Диаметр пучка равнялся 100 мм. Двухкадровый режим работы ЭОП обеспечивался подачей через разрядник с лазерным поджигом на разворачивающие пластины прямоугольного электрического импульса с длительностью 400 нс, так, чтобы его передний фронт поступал на пластины после прохождения реперного светового импульса. Таким образом, на экране ЭОП в одной вспышке наблюдалось два изображения сетки, подсвеченной реперным и обращенным пучками. По смещению пучков относительно сетки можно судить о точности воспроизведения направления реперного пучка ОВФ - волной. Результаты денситометрической обработки фотопленок с изображениями дальнопольных распределений пучков, полученных в серии экспериментов, показали, что с погрешностью до $3 \cdot 10^{-6}$ рад направление ОВФ - пучка совпадает с направлением реперного пучка при расхождении пучков $2.6 \cdot 10^{-5}$ рад. Предложенная методика позволяет регистрировать неполную компенсацию искажений в системах с ОВФ, в том числе уход направления пучка при наличии самовоздействия излучения, распространяющегося в нелинейной среде.

Результаты экспериментов по измерению точности управления пучка приведены в **разделе 2.4**. На рисунке 7 справа приведены характерные фотографии дальнопольных распределений реперного и обращенного пучков, полученные в экспериментах по управлению диаграммой направленности лазера с помощью внутрирезонаторного ПВМС. Энергия выходного пучка достигала 150 Дж и ограничивалась лучевой прочностью элементов схемы изоляции и ПУ. Обработка фотографий пучков выявила несовпадение максимумов распределений плотности энергии не превышающее величины 0.3 от дифракционной расходимости. Оно может быть вызвано влиянием механических колебаний оптических элементов между моментами записи управляющего излучения и появлением импульса излучения ЗГ.

Третья глава посвящена разработке внутрирезонаторных ПВМС на основе электрооптической керамики. На момент постановки работы, описанной в предыдущей главе, в ла-

зерной технике использовались только ПБМС типа PROM и светууправляемые ПБМС на основе жидких кристаллов. Их недостатки, указанные ранее, заставили искать возможность разработки более совершенных ПБМС. В качестве материала для электроуправляемых ПБМС наше внимание привлекла электрооптическая керамика ЦТСЛ (PLZT).

В разделе 3.1 приведены основные свойства электрооптической керамики ЦТСЛ. Отмечается, что PLZT был первым не монокристаллическим материалом, в котором был зарегистрирован сильный электрооптический эффект. Композиция PLZT обычно представляется системой обозначений $x / (1 - y) / y$, которая обозначает количества La/Zr/Ti, данные в процентах моли (то есть дробь моли, умноженную на 100). Например, система обозначений 8/65/35 представляет PLZT с химическим составом $(\text{Pb}_{0.92}\text{La}_{0.08})(\text{Zr}_{0.65}\text{Ti}_{0.35})_{0.98}\text{O}_3$. Свойства ЦТСЛ сильно зависят от состава.

В разделе 3.2 приведены результаты исследования электрооптических свойств образцов PLZT с различной концентрацией лантана 9...9.75/65/35 с целью выбора оптимального для ПБМС. Величина напряжения $U_{\lambda/4}$ измерялась путем регистрации максимума прошедшего через поляризатор излучения после его двукратного прохождения через образец после отражения от установленного сзади зеркала. Напряжения $U_{\lambda/2}$ измерялись при установке образцов между скрещенными поляризаторами по максимуму прошедшего излучения. Для повышения точности измерений в статических режимах использовалась модуляция пучка с помощью вращающегося диска с отверстиями. Измерения проводились на длине волны 0.6328 мкм. При измерении величины статического напряжения на электроды модулятора подавалось постоянное напряжение. При измерении импульсных характеристик использовался электронный ключ, позволяющий подавать на образцы импульсы с амплитудой до 3 кВ.

Анализируя полученные экспериментальные результаты можно констатировать следующее. Величина статического $U_{\lambda/4}$ уменьшается с уменьшением содержания лантана и увеличением толщины образца. Отношение импульсного напряжения к статическому напряжению увеличивается с уменьшением содержания лантана от 1,3 до 1,8 ($\tau_n = 400$ мкс). Импульсное $U_{\lambda/4}$ для образца керамики состава 9.75/65/35 ($U_{\lambda/4\text{имп}} = 1600$ В) практически сравнивается с $U_{\lambda/4}$ образца состава 9.0/65/35 ($U_{\lambda/4\text{имп}} = 1520$ В). Величина оптического контраста образцов с уменьшенным содержанием лантана заметно меньше, чем у образцов состава 9.75/65/35. При ступенчатом уменьшении величины приложенного напряжения для образцов с меньшим содержанием лантана наблюдается заметный гистерезис в зависимости пропускания образцов, установленных между скрещенными поляризаторами, от величины приложенного напряжения, который, впрочем, не влияет на работу в импульсном режиме. Ввиду большей доли нерегулярной части электрооптического отклика [37] керамики состава 9/65/35 при работе в импульсном режиме, плоская вершина в импульсе пропускания дости-

гаются только к концу электрического импульса с длительностью 400 мкс, а для меньших длительностей это приводит к необходимости дополнительного увеличения амплитуды импульса. Все вышеперечисленные факторы позволили выбрать для изготовления ПВМС мелкозернистую параэлектрическую керамику состава 9.75/65/35. По результатам экспериментов определены электрооптические коэффициенты образцов.

В разделе 3.3 приведены результаты исследования порогов разрушения и морфологии разрушений полированных образцов керамики ЦТСЛ состава 9.75/65/35 при размерах пятна воздействия ~ 1.6 мм по уровню $1/e$ для лазерного импульса $\tau \approx 35$ нс с длиной волны 1.054 мкм по методикам, отработанным в [16,26,27]. На выходе лазерного усилителя на стекле излучался лазерный пучок с равномерным пространственным профилем диаметром 3 см и энергией до 10 Дж. Диафрагма вырезала из пучка центральную наиболее равномерную часть диаметром 1.2 см. Излучение фокусировалось линзой на испытываемый отполированный образец керамики. Часть пучка отражалась от клинового делителя до образца, проходила через фокальную диафрагму и попадала на измеритель энергии. Изображение фокальной плоскости пучка с диафрагмой регистрировалась ПЗС - матрицей цифровой телекамеры VVS 522. Разрушения образца регистрировались второй камерой, установленной на микроскоп. Регистрировалось распределение плотности энергии, и сопоставлялись этим плотностям полученные картины разрушения. Регистрация поверхностей образца до воздействия и после него позволяла установить связь дефектов с появляющимися разрушениями. Положение места воздействия пучка на образец было заранее известно. Полученная гистограмма показывает, что порог разрушения равен 11 ± 1 Дж/см².

В разделе 3.4 приведены конструктивные особенности разработанных образцов внутрирезонаторных электроуправляемых ПВМС на основе ЦТСЛ 9.75/65/35, работающих на квадратичном электрооптическом эффекте, и результаты расчета электрических полей с помощью компьютерной программы ELCUT¹². Программа моделирует двумерные поля методом конечных элементов. Программа ELCUT применяется для анализа линейных электростатических полей в плоской и осесимметричной постановках. На рисунке 8 показано распределение электрического поля в поперечном сечении линеек ПВМС канального типа и с двухсторонними заглубленными в подложку электродами. Сплошные линии на рисунках – линии одинакового потенциала, штриховые линии – векторы напряженности электрического поля.

12. ПК “TOP” (СПб). <http://elcut.ru>

Оттенки серого показывают зоны с одинаковой напряженностью электрического поля. Направление распространения модулируемого светового излучения показано стрелкой.

Проведенные расчеты полей позволяют определить пропускание модулятора в каждой точке поперечного сечения и оптимизировать их геометрию

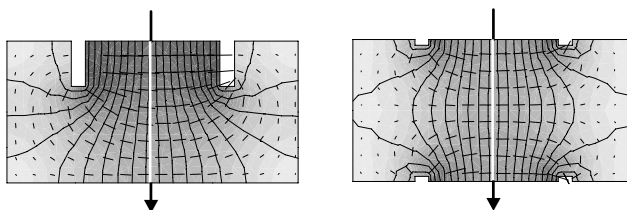
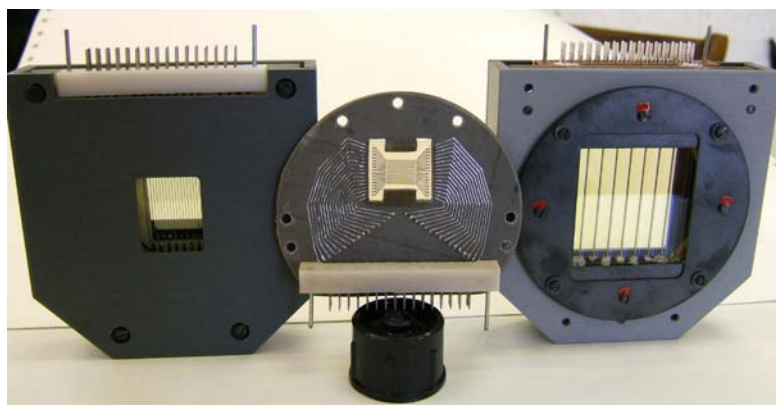


Рисунок 8

В разделе приводятся экспериментально полученные профили пропускания пикселем модулятора излучения для различных напряженностей поля. На рисунке 9 приведена фотография некоторых ПВМС, разработанных и изготовленных в НИИКИ ОЭП в результате проведенных исследований.

Рисунок 9. Образцы ПВМС с шагом между электродами 1 мм (16 пикселей), 0.25 мм (32 пикселя), и 5 мм (8 пикселей).



В разделе 3.5 рассмотрены схемы управления работой ПВМС, разработанные в работах [28-30]. Электрическим эквивалентом элемента (пикселя) ПВМС является емкость. Включить данный элемент ПВМС - означает подать на его электроды разность потенциалов, все остальные электроды должны находиться под одинаковым потенциалом: до включенного пикселя под напряжением источника питания, после - заземлены. Известны два типа электронных ключей: 1) двойной ключ, содержащий заряжающий и разряжающий транзисторы для управления одним пикселем. При его использовании требуется деление каждого пикселя управляющим электродом на две части. Преимуществом двойного ключа является независимость работы коммутируемых пикселей, недостатком увеличение дифракционных потерь и сложность формирования нулевой моды лазера; 2) последовательное соединение зарядного и разрядного ключей, при котором отдельные пиксели заряжаются через свои транзисторы. В таком соединении ключей устранена необходимость в дополнительном электроде, но переключение пикселей влечет за собой переключение всех транзисторов. Нами используется второй вариант электронных ключей.

Раздел 3.6 посвящен результатам экспериментального исследования оптического контраста модуляторов. Образцы ЦТСЛ имеют малую величину остаточного двулучепреломления и пропускание ими излучения в видимом или ближнем ИК-диапазоне при установке между скрещенными поляризаторами составляет $\sim 5000:1$. Контраст модуляторов могут уменьшать несколько факторов: неточная установка величины управляющего напряжения; неоднородность электрического поля между электродами; наведенное двулучепреломление из-за превышения режимов эксплуатации; возникновение пьезоэффекта при коротком управляющем импульсном воздействии, который приводит к появлению пропускания излучения соседними пикселями.

В статическом режиме при скрещенных поляризаторах оптический контраст превышает величину 2000:1 и более чем на порядок превышает контраст, достигаемый при параллельной установке поляризаторов. Этот факт легко объясняется наличием неточностей в геометрии модуляторов (разброс ширины электродов, величины заглубления и т.д.), что приводит к разбросу $U_{\lambda/2}$ для различных зон одной линейки и различных линеек модулятора. Оптический контраст модулятора при засветке широким пучком с большим угловым раствором ($20-30^\circ$) и при фокусировке излучения на один элемент в малом угле изменяется менее чем в два раза. Показано, что в динамическом режиме контраст соседних пикселей уменьшается в 3-5 раз.

Глава 4 посвящена разработке и исследованию лазера на АИГ: Nd^{3+} . В **разделе 4.1** рассмотрена оптическая схема сопряженного резонатора для двухкоординатного сканирования пучка [28-30]. Принцип работы анализируется с помощью матриц Джонса. ПВМС выполнен в виде двух разнесенных в пространстве одномерных электроуправляемых пластин (рисунок 10) с ортогонально ориентированными электродами и под 45° к азимуту наибольшего пропускания поляризатора. Пластины установлены в сопряженные оптические плоскости вблизи зеркал резонатора и, вследствие изображающих свойств резонатора, образуют двумерную "матрицу". Схема лазера приведена на рисунке 10, на врезке рисунка показан ход внеосевой моды резонатора. Генерация осуществляется на пересечении включенных линеек пластин ПВМС.

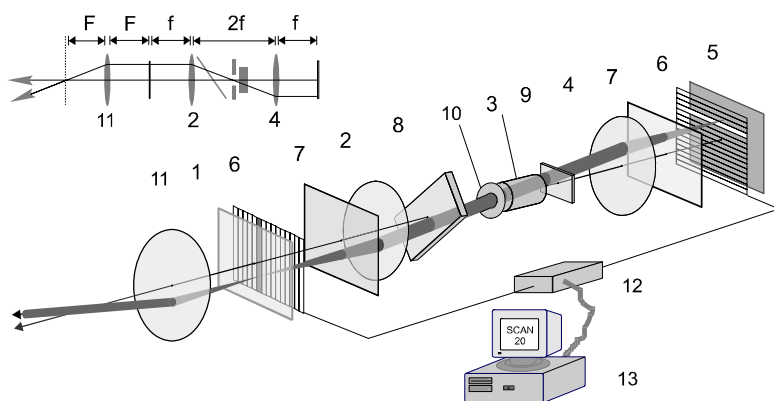


Рисунок 10. Схема лазера с внутрирезонаторным сканированием излучения: 1,5 - зеркала резонатора; 2,4 - линзы резонатора; 3- активный элемент; 6 - пластины ПВМС; 7 - кварцевые фазовые пластинки; 8 - поляризатор; 9 - пассивный затвор; 10 - диафрагма; 11 - внерезонаторная линза; 12 - устройство управления работой ПВМС; 13 - компьютер.

При отсутствии разности потенциалов между электродами пластин, генерация лазера блокируется системой “поляризатор - пластина $\lambda/4$ - зеркало резонатора”.

В разделе 4.2 приведены результаты исследований характеристик излучения лазера в импульсном, импульсно-периодическом и пакетно-импульсном режимах работы. Последний режим интересен тем, что позволяет получить лазерное изображение объектов при локации. При работе в импульсном режиме работы достигнута генерация излучения по всему рабочему полю ПВМС. Энергия генерации 10 ... 600 мкДж, она регулируется величиной накачки и величиной напряжения, подаваемой на модулятор. При увеличении выходной энергии до величин, превышающих 0.8 мДж, наблюдается появление разрушений электроуправляемой пластины модулятора, которая установлена вблизи 100% зеркала.

Длительность импульса генерации - 50 нс при использовании модулятора добротности на основе кристалла LiF в резонаторе. При отсутствии дополнительного затвора лазер генерирует импульсы с длительностью 150 - 250 нс (электрооптическим затвором в этом случае является сам ПВМС). Получена генерация излучения в любом выбранном направлении, заданном пикселем ПВМС, с частотой повторения 10 Гц.

Приведены результаты исследования генерации “пакетов” импульсов излучения лазера в разных направлениях, заданных программой сканирования. Этот режим интересен тем, что позволяет получить на выходе усилителя пакет моноимпульсов с энергией сопоставимой с энергией свободной генерации. Для накачки активного элемента в этой серии экспериментов использовался импульс накачки с длительностью 1 мс. Эксперименты показали, что не представляет особой сложности получить “пакет” из 20 - 30 импульсов генерации, следующих с частотой 50 - 100 кГц в одном из выбранных направлений.

Более сложной оказалась задача получения “пакета” импульсов, сканирующих пространство в различных направлениях. Неодинаковые амплитуды импульсов генерации в данном режиме работы связаны не только с различием порога генерации в поле сканирования, с разбросом значений $U_{\lambda/4}$ для различных линеек ПВМС, но также и с величиной энергии генерации предыдущих импульсов в “пакете”. Генерируемые моды сопряженного резонатора частично занимают один и тот же объем активной среды, и на величину амплитуды импульса в “пакете” сказывается не только энергия предыдущего импульса, но и его направление. Показано, что использование для накачки лазера импульса тока сформированного рядом искусственной длинной линии и введение отрицательной обратной связи (раздел 4.3) по амплитуде импульсов в реальном времени позволяет получить “пакеты” из 50-100 импульсов излучения в заданных направлениях. Для реализации отрицательной обратной связи в резонатор устанавливался электрооптический затвор на кристалле танталата лития и дополнительный поляризатор с ортогонально ориентированным азимутом наибольшего пропускания. Сигнал обратной связи снимался с коаксиального фотозлемента ФЭК47.

В разделе 4.4 приведены результаты исследования характеристик излучения лазера с непрерывной ламповой накачкой. При непрерывной накачке готовность лазера с электроуправляемым ПВМС к адресации излучения к произвольному пикселю не превышает 3 - 4 мкс в любой заданный момент времени. Кроме того, при работе в таком режиме значительно проще управлять величиной энергии импульсов излучения, что приводит к увеличению надежности работы лазера и ПВМС. Были проведены исследования по реализации однокоординатного сканирования излучения твердотельного лазера с непрерывной накачкой. Проведению этой работы способствовала разработка ПВМС с двухсторонними заглубленными в материал подложки электродами, обладающими малыми потерями излучения по сравнению с ПВМС, имеющими электроды канального типа. В отличие от импульсной накачки, в режиме непрерывной ламповой накачки в активном элементе возникает короткофокусная тепловая линза, наличие которой необходимо учитывать при расчете параметров сопряженного резонатора. Параметры резонаторов рассчитывались методами матричной оптики. Было реализовано однокоординатное сканирование излучения лазера на АИГ:Nd³⁺ с непрерывной накачкой с помощью внутрирезонаторного ПВМС на основе ЦТСЛ с размером пикселя 450 мкм. При длительности импульса генерации 150 - 200 нс достигнута энергия импульсов генерации до 500 мкДж. Получены “пакеты” импульсов излучения лазера при частоте следования импульсов в пакете от 1 до 10 кГц и при частотах следования “пакетов” импульсов до 200 Гц (рисунок 11).

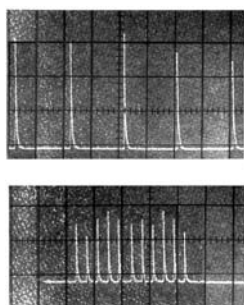


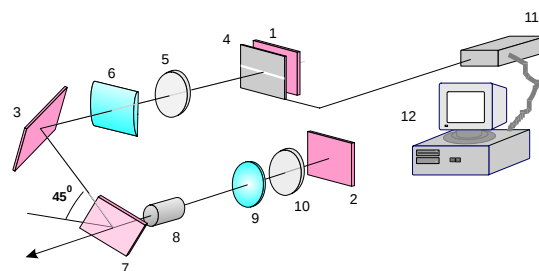
Рисунок 11. Осциллограммы импульсов излучения лазера с непрерывной накачкой, следующих в различных направлениях: частота 1 кГц - (верхнее фото) и 5 кГц [30].

В разделе 4.5 приведена оптическая схема лазерного резонатора с лучевой разгрузкой ПВМС. Схема лазера приведена на рисунке 12. В сопряженном резонаторе лазера используется одна линза сферическая, вторая цилиндрическая [32]. Такая схема лазера позволяет увеличить энергию выходного импульса при однокоординатном сканировании излучения за счет увеличения работающей зоны пикселя ПВМС вдоль электродов и дополнительной лучевой разгрузки ПВМС с помощью поляризатора 7 и четвертьволновой пластинки. Четвертьволновая пластина 10 за сферическим зеркалом развернута так, что только малая часть излучения отражается от поляризатора для создания обратной связи в резонаторе. Большая часть излучения выводится из резонатора через поляризатор 7. Благодаря этим двум факторам выходная энергия лазера увеличилась почти в 20 раз и составляет 10 мДж при длительности

импульса 200 нс. В разделе рассмотрены характеристики разработанного лазерного маркера [33] на основе схемы рисунка 12, приведены образцы маркировки различных материалов.

В разделе 4.6 приведены результаты исследования характеристик лазера с внутриврезонаторным сканированием, активный элемент которого накачивается линейками лазерных диодов с импульсной световой мощностью 600 Вт. Экспериментально показано, что при частоте следования свыше 250...300 Гц на работу лазера начинает влиять тепловая линза и деполяризация излучения. Установлен параболический вид теплового поля в активном элементе, для расчета резонатора можно использовать матрицу Джонса, полученную в работе [34]. При использовании схемы рисунка 12 получена энергия сканирующих моноимпульсов до 3 мДж.

Рисунок 12. Схема лазерного резонатора с лучевой разгрузкой: 1, 2, 3 - 100% зеркала резонатора; 4 - пластина ПВМС; 5,10 - кварцевые фазовые пластинки; 6 - цилиндрический объектив; 7- поляризатор; 8- активный элемент; 9 - сферический объектив; 11- устройство управления работой ПВМС; 12- компьютер



Получены также “пакеты” импульсов в различных направлениях (по 3 в каждом импульсе накачки длительностью 250 мкс).



Рисунок 13. Фото сканирования лазера на второй гармонике (слева), слабая компонента и полный пучок излучения гелий – неоновый лазер при частоте следования импульсов 300 Гц (справа)

Глава 5 посвящена исследованию лазерных систем с внутриврезонаторным наведением излучения на АИГ:Nd³⁺ в том числе с ОВФ излучения (**раздел 5.1**). Задача актуальна для разработки лазерных локаторов на основе внутриврезонаторного сканирования. Рассмотрены алгоритмы работы и преимущества лазерных локаторов [36] с внутриврезонаторным наведением излучения, приведена схема локатора космического базирования и алгоритмы его работы (**раздел 5.2**). Предложена схема и рассчитаны энергетические и габаритные характеристики мощного лазера на неодимовом стекле с энергией в импульсе 600 - 700 Дж с внутриврезонаторным управлением пучка (**раздел 5.3**). Вычисления основаны на характеристиках разработанной элементной базы, полученных экспериментальных результатах и опыте построения аналогичных систем. Показано, что благодаря использованию разработанного ПВМС не требуется сложного предварительного усилителя и достаточно легко обеспечивается изоляция. Рассмотрены особенности формирования пространственного профиля пучка в лазерных системах с внутриврезонаторным наведением.

В разделе 5.4 приведены результаты исследований, направленных на создание лазерного резонатора с двухкоординатным управлением диаграммой направленности, позволяющие установить обе пластины модулятора у одного из зеркал резонатора и осуществить режим лучевой разгрузки модуляторов света. Разработана оптическая схема резонатора, которая условно названа схемой с дополнительной ретрансляцией плоскости изображения ПВМС. Разработанная схема позволяет использовать пиксели ПВМС любого малого размера. Для ПВМС с пикселем большого размера, с которым в резонаторе необходимо использовать длиннофокусные линзы, предложена схема с установкой 90° кварцевой пластины между ортогонально ориентированными пластинами ПВМС. Показано, что в этом случае пластины ПВМС должны быть установлены между параллельно ориентированными поляризаторами. Экспериментально продемонстрирована работоспособность резонаторов.

Глава 6 посвящена исследованию характеристик излучения лазеров на других активных средах с внутрирезонаторным управлением диаграммы направленности. Рассмотрены (раздел 6.1) резонаторы и особенности работы лазера на парах меди (ЛПМ) [38, 39]. Лазер на парах меди излучает на двух недалеко расположенных резонансных линиях на метастабильные уровни с длинами волн 510,6 нм (зеленая линия) и 578,2 нм (желтая линия). Инверсная населенность возникает при коротких электрических разрядах с длительностью порядка десятков наносекунд. Частота следования импульсов 10-20 кГц, их длительность составляет величину ~ 10 нс. Время жизни инверсной населенности мало и составляет несколько сотен наносекунд. Мода резонатора формируется за малое количество проходов излучением резонатора. Получена управляемая генерация ЛПМ на уровне мощностей излучения 0.2- 0.5 Вт. Экспериментально продемонстрирована возможность спектральной и поляризационной импульсной кодировки излучения ЛПМ.

Рассмотрены результаты (раздел 6.2) исследований характеристик излучения нецепного химического электроразрядного DF лазера (диапазон длин волн генерации 3.5 - 4.1 мкм), направленных на выяснение возможностей внутрирезонаторного управления его диаграммой направленности. Приводятся результаты исследований по созданию элементной базы резонатора лазера. Описаны результаты исследования характеристик излучения лазера при управлении диаграммой направленности по одной и двум координатам [40, 41], результаты исследования усиления излучения лазера на части активной среды.

На рисунке 14 приведена схема резонатора лазера с двухкоординатным сканированием, а на рисунке 15 - осциллограмма импульса генерации лазера.

Отмечается, что при исходной энергии плоского короткого резонатора 50 мДж, при однокоординатном сканировании получены импульсы с энергией 16-18 мДж с возможностью увеличения энергии до 30 – 35 мДж при просветлении поверхностей ПВМС. При двухкоординатном сканировании получена энергия импульсов 6-8 мДж, ограниченная луче-

вой прочностью зеркал и модуляторов. Показана возможность увеличения энергии импульсов при усилении их на части активной среды до 20-23 мДж.

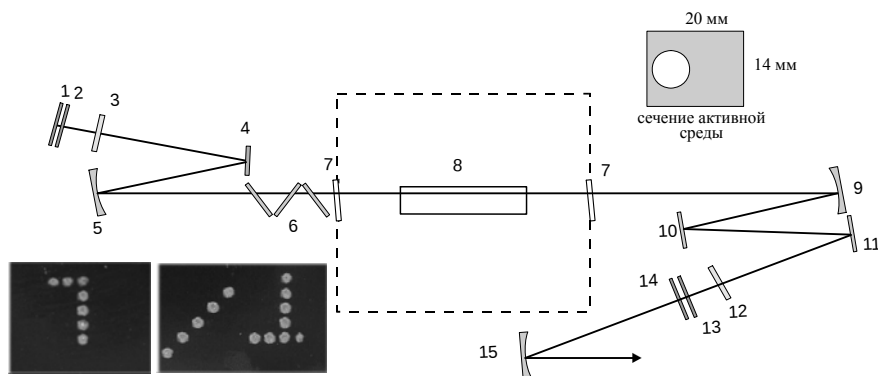


Рисунок 14. Схема сопряженного резонатора DF - лазера: 1 - многослойное диэлектрическое "глухое" зеркало резонатора $R = 98\%$; 2, 13 – пластины ПВМС; 3, 12 – четвертьволновые пластинки из кристалла сапфира; 4 – плоское поворотное зеркало; 5, 9 – сферические 100% зеркала резонатора с фокусом 750 мм; 6 – пластины ЦТСЛ под углом Брюстера; 7 – окна разрядной камеры из флюорита; 8 – разрядный промежуток 14×20 мм с активной средой; 10, 11 - поворотные плоские зеркала; 14 - выходное зеркало резонатора (плоскопараллельная пластинка из ЦТСЛ); 15 – сферическое внerezонаторное зеркало с фокусом 1200 мм. На врезках показаны отпечатки пучков на черной фотобумаге при сканировании пучка по горизонтали и вертикали, а также по диагонали.

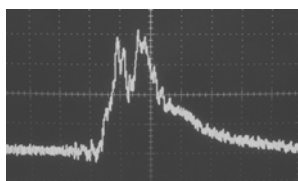


Рисунок 15. Форма импульса излучения DF лазера с временным разрешением $7 \cdot 10^{-9}$ с. Развертка 100 нс / см.

В **заключении** подводятся основные итоги работы. В приложении 1 рассмотрена краткая история открытия сегнетоэлектриков, в приложении 2 приведен обзор свойств прозрачной сегнетокерамики как для объемного материала, так и для тонких пленок ЦТСЛ. В приложении 3 рассмотрены особенности юстировки сопряженного резонатора.

Результаты работы, на основе которых сформулированы защищаемые положения

1. Проведены исследования в области формирования мощных лазерных пучков. В результате использования оптической ретрансляции изображения входной апертуры с высоким коэффициентом заполнения в усилительном канале, периодической пространственной фильтрации и выходных каскадов усиления с большой апертурой в несколько раз повышена яркость излучения лазерной многокаскадной установки на неодимовом стекле. Получен лазерный пучок мощностью до 300 ГВт при длительности импульса $8 \cdot 10^{-10}$ с. Обнаружен эффект сильной деполяризации излучения при возникновении МС. Разработаны ДУ с апертурой до 15 см с эффективностью системы накачки. Впервые экспериментально показано, что выбором формы импульса тока в лампах накачки можно на 15... 25% увеличить уровень запасенной энергии в активной среде лазера. С помощью разработанных покрытий решена за-

дача подавления паразитной генерации в активных элементах ДУ, ограничивающая их коэффициент усиления на уровне $\sim 0.03 \text{ см}^{-1}$. Показано, что ДУ с апертурой 15 см способен обеспечить энергию выходного пучка до 3 кДж при импульсе 5-10 нс или мощность пучка до 2.4 ТВт при импульсе короче 0.5 нс. Показано, что использование экспериментально исследованных методов формирования мощных лазерных пучков, таких как ретрансляция входной апертуры в лазерном канале и использование предложенной системы “жесткая диафрагма–пространственный фильтр”, позволяют получить высокоинтенсивные пучки при малых длительностях импульсов за счет подавления мелкомасштабной и крупномасштабной самофокусировки излучения. В лазерных системах с большей длительностью импульса они минимизируют отношение пиковой плотности энергии к средней, уменьшают шумовые выбросы интенсивности, что защищает элементы лазерного канала от разрушений.

2. В результате экспериментальных исследований ОВФ сканирующего в пространстве пучка в различных нелинейных средах установлено, что при высоких скоростях развертки волнового фронта пучка в нелинейной среде в дальней зоне отраженного излучения возникают пространственные разрывы, в то время как во времени отражение происходит непрерывно. Показано, что до возникновения новой гиперзвуковой голограммы в каустике пучка отражение излучения ВРМБ - зеркалом происходит в первоначальном направлении, после появления новой голограммы в каустике отражение происходит в двух направлениях, постепенно увеличиваясь в новом направлении.

3. Использование исследованных методов формирования лазерных пучков в многокаскадной лазерной системе на неодимовом стекле с ОВФ позволило получить лазерный пучок с энергией 410 Дж, половина которой сосредоточена в угловом растворе равном дифракционному для диаметра пучка 100 мм при длительности импульса $25 \cdot 10^{-9}$ секунд. Экспериментально показано, что с помощью внутрирезонаторного ПВМС, пучок лазерной системы может быть наведен на объект с точностью до 3 десятых долей угла дифракционной расходимости. Разработанная методика измерений точности наведения позволяет не только измерить воспроизведение направления реперного излучения с точностью не хуже 0.1 от дифракционного для диаметра пучка 100 мм, но и зарегистрировать уход направления пучка при наличии самовоздействия излучения, распространяющегося в нелинейной среде.

4. Экспериментально исследованы электрооптические свойства образцов керамики ЦТСЛ с различным содержанием лантана. Для изготовления ПВМС выбран состав 9.75/65/35, имеющий минимальное время электрооптического отклика $\sim 1 \text{ мкс}$, при практическом отсутствии гистерезиса. Исследована лучевая прочность ЦТСЛ 9.75/ 65 /35 при пятнах облучения 0.3 и 1.6 мм по уровню $1/e$. Полученная величина лучевой прочности 11 Дж/см^2 для импульса $\sim 30 \text{ нс}$ на 2 порядка превышает лучевую прочность других используемых на практике ПВМС. На основе ЦТСЛ разработаны электроуправляемые ПВМС с за-

глубленными в материал подложки двухсторонними электродами, высокой равномерностью распределения электрического поля между электродами и с контрастом, превышающим 1000:1.

5. Разработана оптическая схема резонатора лазера с внутрирезонаторным двухкоординатным сканированием излучения, учитывающая специфику разработанных ПВМС в виде двух разнесенных пластин с линейными электродами. Проведены исследования характеристик его генерации в различных режимах работы, показавшие возможность адресации излучения в любую заданную точку поля зрения в течение 3 - 4 мкс и возможность формирования “пакета” импульсов в разных направлениях с частотой следования импульсов до 100 кГц. Предложена оптическая схема сопряженного лазерного резонатора с лучевой разгрузкой и увеличенным съемом запасенной в активной среде энергии. В сопряженном резонаторе лазера используется одна линза сферическая, вторая цилиндрическая. Для круглого активного элемента энергия на выходе достигает 10 мДж при длительности импульса 200 нс. На основе данной схемы лазера реализован лазерный маркер изделий промышленности. Разработана оптическая и габаритная схема лазера на неодимовом стекле с энергией импульса 600...700 Дж с ОВФ излучения, диаграммой направленности которого управляет разработанный ПВМС, рассчитаны энергетические характеристики лазерной системы.

6. Впервые получена генерация в заданных внутрирезонаторным ПВМС направлениях лазера на парах меди (ЛПМ). Экспериментально продемонстрирована возможность пространственно-временной и спектральной кодировки излучения ЛПМ. Проведены серии экспериментов с DF -лазером (установка в резонатор углового селектора, поляризатора, удлинение резонатора), показавшие принципиальную возможность внутрирезонаторного управления его излучением. Разработаны и исследованы ключевые элементы сопряженного лазерного резонатора, в частности, поляризаторы и четвертьволновая развязка для диапазона спектра 3.5...4 мкм. Показана возможность использования стопы из трех пластин, с высоким показателем преломления в качестве поляризатора в лазерном резонаторе. Экспериментально подтверждена высокая поляризующая способность такого поляризатора. Впервые реализовано одно - и двух - координатное управление диаграммой направленности химического нецепного DF лазера.

Таким образом, совокупность полученных в данной работе результатов по формированию лазерных пучков, уменьшению их угловой расходимости и точному наведению с помощью быстродействующих ПВМС может быть квалифицирована как решение важной научно-технической, народно-хозяйственной и оборонной задачи, связанной с передачей энергии с помощью лазерного пучка на большие расстояния, дальней локацией и связью, маркировкой и точной обработкой изделий промышленности.

Основные результаты работы опубликованы в статьях:

1. *Алексеев В.Н., Стариков А.Д., Чернов В.Н.* Оптимизация пространственного профиля мощного светового пучка в усилительном тракте лазерной установки на неодимовом стекле. Квант. электроника, т. 6, №11, 1979, с. 2374-2381.
2. *Алексеев В.Н., Стариков А.Д., Чернов В.Н., Чарухчев А.В.* Повышение яркости излучения мощного лазера на фосфатном стекле с Nd^{3+} путем пространственной фильтрации пучка в усилительном тракте. Квант. электроника, т. 6, № 8, 1979, с.1666-1671.
3. *Алексеев В.Н., Стариков А.Д., Чернов В.Н.* Изобретение "Лазерный усилитель" Авторское свидетельство СССР №795374.
4. *Алексеев В.Н., Стариков А.Д., Чернов В.Н.* Формирование пространственного профиля пучка в лазерном усилителе с помощью системы жесткая диафрагма - пространственный фильтр. Квант. электроника, т. 7, №9, 1980, с. 1906-1913.
5. *Алексеев В.Н., Стариков А.Д., Чернов В.Н.* Деполяризация выходного пучка усилителя на неодимовом стекле при мелкомасштабной самофокусировке излучения. Квант. электроника, т. 10, №5, 1983, с. 857- 859.
6. *Алексеев В. Н., Мак А. А., Пивинский Е. Г., Седов Б. М., Стариков А. Д., Цветков А. Д.* Высокоэффективные дисковые усилители на неодимовом стекле. Квант. электроника, т. 3, №1, 1976, с. 226 - 227.
7. *Алексеев В. Н., Мак А. А., Пивинский Е. Г., Седов Б. М., Стариков А. Д., Цветков А. Д.* Оконечные дисковые усилительные каскады. Квант. электроника, т. 5, №11, 1978, с. 2369 -2376.
8. *Алексеев В.Н., Любимов В.В., Пивинский Е.Г., Цветков А. Д.* Исследование возможности повышения эффективности дисковых усилителей. Квант. электроника, т.6, №7, 1979, с.1570-1572.
9. *Алексеев В. Н., Бордачев Е. Г., Головин С. В. и др.* Расчет и экспериментальное исследование энергетических характеристик дисковых усилителей на неодимовом стекле. Квант. электроника, т. 7, №9, 1980, с. 1906 -1913.
10. *Алексеев В.Н., Головин С. В., Костометов Г. П. и др.* Исследование возможностей повышения мощности и эффективности лазерных усилителей на неодимовом стекле с оконечными дисковыми каскадами. Квант. электроника, т. 12, №2, 1985, с. 325-330.
11. *Алексеев В. Н., Волынкин В.М., Толстой М.Н.* "Поглощающее покрытие дисковых активных элементов". Авторское свидетельство СССР № 268270. Приор. от 10.04. 1987 г.
12. *Алексеев В.Н., Горохов А.А., Довгер Л.С., Седов Б.М., Стариков А.Д.* Оптические искажения светового пучка в дисковом усилителе с большой апертурой. Квант. электроника, т. 5, №1, 1978, с. 168-170.
13. *Алексеев В. Н., Бордачев Е. Г., Вицинский С. А., Кулаков В. И. , Рыбин В. Н. Стариков А. Д.* О влиянии формы импульса излучения накачки на уровень запасенной энергии в усилителях на неодимовом стекле. Квант. электроника, т. 5, № 10, 1978, с. 2291-2293.
14. *Алексеев В. Н., Жилин А. Н., Чернов В. Н.* Экспериментальное исследование насыщения импульса длительностью 1 нс в силикатном и фосфатном стеклах. Квант. электроника, т. 7, №9, 1980, с. 1906-1913.
15. *Алексеев В. Н., Дмитриев Д.И., Жилин А. Н., Чернов В. Н.* Насыщения усиления в фосфатном неодимовом стекле. Квант. электроника, т. 12, №1, 1985, с.159-161.
16. *Алексеев В.Н., Свечников М.Б., Чернов В.Н.* Разрушение многослойных диэлектрических покрытий лазерным импульсом наносекундной длительности. Квант. электроника, т. 12, №4, 1985, с. 729-737.
17. *Алексеев В.Н., Бордачев Е.Г., Кузьмина Н.В., Жилин А.Н., Розанов Н.Н., Смирнов В.А., Стариков А.Д., Чернов В.Н.* Ограничение яркости выходного пучка лазерного усилителя с пространственными фильтрами и оконечными дисковыми усилительными каскадами. Известия АН СССР, Сер. физ., т. 45, №3, 1981, с. 659-662.
18. *Алексеев В.Н., Бордачев Е.Г., Бородин В. Г., Горохов А. А. и др.* Шестиканальная лазерная установка «Прогресс» на фосфатном неодимовом стекле. Известия АН СССР, сер. Физическая. т.48, № 8, 1984, с. 1477-1484.
19. *Алексеев В.Н., Дмитриев Д. И., Розанов Н.Н., Чернов В.Н., Смирнов В.А., Стариков А.Д.* Усиление фазосопреженных плоских волн в стекле при мелкомасштабной самофокусировке. Квант. электроника, т.10, №5, 1983, с. 1010-1012.
20. *Алексеев В.Н., Голубев В.В., Дмитриев Д.И. и др.* Исследование ОВФ в лазерном усилителе

- на фосфатном стекле с выходной апертурой 12 см. Квант. электроника, т. 14, №4, 1987, с. 722- 728.
21. *Алексеев В.Н., Дмитриев Д.И., Решетников В.И.* ОВФ сканирующего пучка. Квант. электроника, т. 18, № 1, 1991, с. 111-113.
 22. *Алексеев В.Н., Дмитриев Д.И., Жилин А.Н., Решетников В.И., Стариков А.Д.* Точность управления диаграммой направленности лазера на неодимовом стекле с ОВФ излучения при использовании пространственно-временного модулятора света. Квант. электроника, т. 21, №8, 1994, с. 753-758 .
 23. *Алексеев В.Н., Дмитриев Д.И., Решетников В.И.* “Фильтр пространственных частот”. Авторское свидетельство СССР № 316884. Приоритет от 03.1989.
 24. *Алексеев В.Н., Дмитриев Д.И., Решетников В.И.* Изобретение "Сканирующий лазер". Авторское свидетельство СССР № 321307. Приоритет от 08. 1989 г.
 25. *Алексеев В.Н., Дмитриев Д.И., Решетников В.И.* Изобретение "Лазер с управляемой диаграммой направленности излучения". Авторское свидетельство № 320785. Приоритет от 24.07. 1989 г.
 26. *Sirazetdinov V.S., Alekseev V.N., Dmitriev D.I., Charukhchev A.V., Chernov V.N., Kotilev V.N., Liber V.I., Rukavishnikov N.N.* Express method of estimating laser-induced surface damage threshold for optical components. *Laser and Particle Beams*, v. 20, 2002, 133-137.
 27. *Алексеев В.Н., Бессараб А. В., Гаранин С. Г. и др.* Исследование лучевой прочности поверхности экспериментального лазерного стекла. *Оптический журнал*, т. 69, №1, 2002 стр. 11-15.
 28. *Alekseev V., Liber V., Starikov A., Anspoks A., Auzins E., Klotins E., and Kotleris J.* High-efficiency angular deflection of the laser beam/PLZT intracavity array. *Ferroelectrics*, v. 131, №1-4, 1992, p. 301-306.
 29. *Алексеев В.Н., Либер В.И., Стариков А.Д.* “Сканирующий лазер”. Патент РФ № 2040090, 1995.
 30. *Алексеев В.Н. , Котылев В.Н. , Либер В.И.* Исследование характеристик излучения АИГ: Nd -лазера с внутрирезонаторным пространственно-временным модулятором света на основе электрооптической керамики ЦТСЛ. Квант. электроника, т. 27, №3, 1999, с. 233-238.
 31. *Алексеев В.Н., Либер В.И.* “Сканирующий лазер”. Патент РФ № 2142664, 1998.
 32. *Alekseev V. Kotilev V.N. Liber V.I.* YAG: Nd scanning laser with intracavity PLZT -based spatio-temporal light modulator. // *Proc. SPIE vol. 5123, "Advansed optical devices"*, 2003, p. 22-24.
 33. *Алексеев В.Н.* Лазерный маркер упаковок с радиоактивными веществами. Экологические вести №6 . Специальный выпуск работ стипендиатов именных научных стипендий Губернатора Ленинградской области за 2002-2004 г. “Экологическая безопасность хранения радиоактивных отходов”.
 34. *Алексеев В.Н., Горохов А. А.* Энергетические и поляризационные характеристики ОКГ на неодимовом стекле при использовании плоского и неустойчивого резонаторов. Квант. электроника, т. 2, № 4, 1975, с. 733-737.
 35. *Алексеев В.Н., Никитин Н.В., Чарухчев А.В., Чернов В.Н.* О юстировке многокаскадных лазерных усилителей. ОМП, № 11, 1983, с. 46-48.
 36. *Алексеев В.Н.* Лазерный локатор на основе внутрирезонаторного сканирования излучения. *Оптический журнал*, т. 68, №4, 2001, с. 43-47.
 37. *Klotins E., Alekseev V. N.* Ferroelectric Electrooptic Ceramics: Physics and Applications. *Materials Science*, v.8, №2, 2002, p. 141-155.
 38. *Alekseev V.N., Blinov S.V., Vitsinskii S.A., Divin V.D., Isakov V.K., Kotylev V.N., Liber V.I. and. Lovchii I.L.* Cu-vapor laser with intracavity radiation scanning by STLM based on PLZT ceramics. *Journal of Russian Laser Research*, v. 17, 1996, p. 418-421.
 39. *Алексеев В.Н., Вицинский С.А., Дивин В.Д., Ловчий И.Л.* “Сканирующий лазер”. Патент РФ № 2082264, 1996.
 40. *Алексеев В.Н. , Котылев В.Н. , Либер В.И., Фомин В.М.* Исследование внутрирезонаторного сканирования излучения электроразрядного DF-лазера. *Оптический Журнал*, т. 72, №4, 2005, с. 15-19.
 41. *Алексеев В.Н. , Котылев В.Н. , Либер В.И.* Двухкоординатное управление диаграммой направленности химического нецепного электроразрядного DF-лазера с помощью пространственно-временных модуляторов света, Квант. электроника, т.38, №7, 2008, с.670-672.

