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

На правах рукописи

УДК 621.373.826

Сенатский Юрий Всеволодович

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В ТВЕРДОТЕЛЬНОМ ЛАЗЕРЕ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО НАГРЕВУ ПЛАЗМЫ

Специальность 01.04.21 - лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Москва - 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

Официальные	член-корреспондент РАН, доктор физико-
оппоненты:	математических наук Гаранин Сергей Григорьевич
	(РФЯЦ - ВНИИЭФ, г. Саров)
	член-корреспондент РАН, доктор физико- математических наук, профессор Хазанов Ефим Аркадьевич (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)
	доктор физико-математических наук, профессор Яшин Владимир Евгеньевич (АО ГОИ им. С.И. Вавилова, г. Санкт-Петербург)
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва

Защита состоится 23 мая 2016 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева и на сайте ФИАН http:// <u>www.lebedev</u>.ru.

Автореферат разослан «___» ____ 2016 года

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03 доктор физико-математических наук, профессор

Казарян Мишик Айразатович

1. Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Твердотельные лазеры занимают в настоящее время лидирующие позиции как по достигнутому уровню энергии и мощности излучения, так и по применениям в научных исследованиях и практических приложениях: от технологических непрерывного действия до импульсных лазеров с петаваттной лазеров мощностью и энергией свыше 1МДж для исследования свойств вещества в экстремальных состояниях и экспериментов по лазерному термоядерному востребованных (ЛTC) [1*-3*]. Одними ИЗ наиболее синтезу среди твердотельных лазеров являются лазеры на неодимовом стекле (длина волны излучения $\lambda \approx 1$ мкм) [4*], а самой масштабной областью применения этих лазеров стали установки для экспериментов по ЛТС [1*, 2*]. Идея использования лазера для получения плазмы с термоядерными параметрами была высказана впервые Н.Г. Басовым в докладе на заседании Президиума АН СССР в 1961г. На возможность нагрева малых объемов плотной дейтериевой плазмы ДО термоядерных температур при воздействии мощных лазерных импульсов наносекундной длительности было указано Н.Г. Басовым и О.Н. Крохиным в работе [5*]. которая стимулировала разработку мощных лазеров И многочисленные экспериментальные и теоретические исследования лазерной плазмы. Ряд начальных этапов программы экспериментальных исследований по ЛТС был выполнен в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) под руководством Н.Г. Басова. Были созданы генераторы и усилители наносекундных (нс) импульсов на рубине и неодимовом стекле [6*,7*,1,2,4,6], получена впервые лазерная плазма при воздействии нс импульсов неодимового лазера на твердотельную мишень из *LiH* в вакуумной камере [3] и зарегистрированы нейтроны из лазерной плазмы при фокусировке на мишень (пс) импульсов [8-11]. Созданы LiD пикосекундных многоканальные неодимовые лазерные установки «Кальмар» с энергией 300Дж и «Дельфин» с энергией до 2,5кДж в 2нс импульсах и проведены эксперименты по сжатию и нагреву сферических мишеней с генерацией до 10⁷ нейтронов [8*-10*].

Лазеры на неодимовом стекле с накачкой импульсными лампами, работающие в режиме редких, однократных вспышек, в настоящее время являются основным экспериментальным средством в исследованиях по ЛТС. На неодимовой лазерной установке «NIF» (США) осуществлен эксперимент по нагреву мишеней с выходом термоядерных реакций на уровне ≈1% от энергии лазера [1*]. В перспективе программа работ по ЛТС может привести к созданию управляемого лазером термоядерного реактора. Лазер-драйвер реактора должен работать в импульсно-периодическом режиме; в качестве источников накачки рассматриваются полупроводниковые диоды, обеспечивающие КПД лазера $\approx 10\%$, а в качестве активной среды - кристаллы и керамика, активированные иттербием и ряд других лазерных материалов [11*-13*].

Разработка принципов построения и оптических схем твердотельных лазеров для ЛТС, их элементной базы опирается во многом на результаты исследований физических процессов в оптической среде мощного лазера и методов формирования лазерных пучков. Многие исследования в этом направлении: разработка методов генерации наносекундных (10⁻⁷-10⁻⁹с) и пикосекундных $(10^{-10} - 10^{-12} c)$ импульсов в рубиновых и неодимовых лазерах; исследования распространения этих импульсов в усилителях, дифракции и самофокусировки пучка в оптическом тракте лазерной установки, разрушений в среде лазера и других процессов, ограничивающих мощность и яркость излучения; разработка методов подавления самофокусировки, профилирования лазерных пучков, методов многоканального усиления, транспортировки лазерных пучков к мишени, развязки лазера от мишени были выполнены в ФИАН. Автор принимал участие в исследованиях и разработках, связанных с созданием лазерных установок на неодимовом стекле для экспериментов по нагреву плазмы, проводившихся в лаборатории квантовой радиофизики (КРФ) в 1960-70-х гг., а затем в Отделении КРФ ФИАН. В последнее время автор принимал также участие в исследованиях новых лазерных материалов на основе кристаллов и керамики, перспективных для применения в лазере-драйвере для ЛТС, в разработке методов формирования инверсии и модового состава излучения в лазерах на керамике Nd: YAG и Yb: YAG с селективной (полупроводниковой, лазерной) накачкой. Эти работы проводились в ФИАН и в Институте лазерной науки (г. Токио, Япония). Результаты исследований автора в указанных направлениях систематизированы в представленной диссертации.

Цель работы

Целью работы было исследование процессов, протекающих в среде мощного твердотельного лазера, разработка методов генерации и усиления нс и пс импульсов, формирования лазерных пучков с высокой мощностью и яркостью излучения, создание первых лазеров для экспериментов по нагреву плазмы. В соответствии с этой целью решались следующие задачи:

1. Разработка методов генерации импульсов с длительностью 10⁻⁷-10⁻¹¹ с в лазерах на неодимовом стекле и кристалле *YAG:Nd*.

2. Создание лазеров-усилителей нс и пс импульсов на неодимовом стекле, анализ процессов в усилителе при формировании и сбросе инверсии.

3. Исследование разрушений в активных элементах, самофокусировки лазерного пучка и других процессов ограничения мощности и яркости излучения в оптическом тракте лазерной установки на неодимовом стекле.

4. Разработка методов подавления самофокусировки и дифракционных возмущений на профиле пучка как факторов, ограничивающих мощность и яркость излучения в лазере.

5. Создание первых неодимовых лазерных установок с нс и пс импульсами с энергией 10-100Дж и расходимостью излучения 10⁻³-10⁻⁴рад для экспериментов по нагреву плазмы; разработка методов формирования и транспортировки к мишени лазерных пучков, оптической развязки лазера от мишени.

6. Исследование характеристик активных сред на кристаллах и керамике, перспективных для применения в лазерах для ЛТС; разработка методов формирования инверсии и модового состава излучения в лазерах на кристаллах и керамике с селективной накачкой.

Научная новизна работы

В работе были получены следующие новые научные результаты:

1. Впервые в СССР созданы лазеры на неодимовом стекле с модуляцией добротности (20-50нс импульсы, энергия 1Дж, длина волны $\lambda \approx 1,06$ мкм); для обострения (≈ 1 нс) переднего фронта импульсов применен оптический затвор из тонкой алюминиевой пленки на лавсане, испаряемой лазерным излучением; предложен механизм просветления *Al* пленки при переходе металл-диэлектрик.

2. Впервые в мире создана лазерная система на неодимовом стекле в составе генератора с модуляцией добротности и усилителя 20-50нс импульсов с энергией 10-60Дж и мощностью свыше 10⁹Вт.

3. Впервые зарегистрировано формирование в активной среде усилителя на неодимовом стекле «гигантских» нс импульсов суперлюминесценции.

4. В генераторах и усилителях нс и пс импульсов на неодимовом стекле обнаружена и исследована самофокусировка лазерного пучка в оптической среде самого лазера; при плотности мощности излучения ≈10¹⁰Bт/см² обнаружена самофокусировка лазерного пучка в воздухе.

5. Обнаружено и исследовано влияние выбросов интенсивности на профиле лазерного пучка при его дифракции на диафрагмах и локальных неоднородностях в лазерной установке на возникновение самофокусировки лазерного пучка и разрушений в оптических элементах.

6. При распространении пучка с интенсивностью 10⁹-10¹⁰Вт/см² в структуре дисков из неодимового стекла впервые наблюдались разрушения в дисках, обусловленные нелинейным эффектом формирования «горячих» изображений от локальных неоднородностей в среде (объяснение эффекта дано в Ливерморской лаборатории, США).

7. При воздействии нс импульсов неодимового лазера на твердотельную мишень из LiH в вакуумной камере впервые наблюдалась лазерная плазма, излучавшая в линиях ионизированного Li, а при фокусировке пс импульсов на мишень LiD зарегистрированы нейтроны из лазерной плазмы; впервые получен протяженный (\approx 4м) оптический пробой в воздухе - «длинная лазерная искра».

8. Предложено облучение мишеней излучением лазера, преобразованным в высшую гармонику, и группами (кластерами) лазерных пучков.

9. Проведены измерения нелинейного показателя преломления *n*₂ в новых лазерных материалах из оксидной керамики *YAG*, *Y*₂*O*₃, *Sr*₂*O*₃, *Lu*₂*O*₃.

10. Предложены метод профилирования инверсии и селекции мод Лагерра-Гаусса в лазере при размещении активной среды в зоне дифракции пучка накачки и метод селекции мод Лагерра-Гаусса с помощью линзы со сферической аберрацией в резонаторе.

Практическая значимость результатов работы

Полученная информация о физических процессах, протекающих в оптической среде мощных твердотельных лазеров, предложенные методы формирования световых пучков использовались при создании лазерных систем.

1. Лазер на неодимовом стекле с модуляцией добротности резонатора электрооптическим затвором нашел применение в качестве задающего генератора в лазерных установках.

2. Обнаружение самофокусировки лазерного пучка в оптической среде самой лазерной установки стимулировало исследования этого явления и разработку методов подавления самофокусировки в лазерных системах.

3. Обнаружение влияния дифракционных выбросов на профиле лазерного пучка на развитие самофокусировки и разрушений в среде лазера стимулировало разработку методов сглаживания профиля пучка «мягкими» диафрагмами.

4. Первые эксперименты по нагреву плазмы неодимовыми лазерами способствовали развитию работ по лазерам для ЛТС в СССР и за рубежом.

5. Предложенный метод облучения мишеней излучением высшей гармоники лазера-драйвера применяется в лазерных установках в исследовательских центрах, работающих по программе ЛТС.

6. Метод облучения мишеней кластерами (группами) лазерных пучков применяется в лазерных установках для экспериментов по ЛТС.

7. Метод «дифракционной» накачки использовался для получения генерации в лазерах на модах Лагерра-Гаусса.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальная демонстрация первой лазерной системы на неодимовом стекле в составе генератора с модуляцией добротности и усилителя 20-50нс импульсов (длина волны излучения $\lambda \approx 1,06$ мкм) с энергией до 60Дж и мощностью свыше 10^9 Вт показала перспективность разработки неодимовых лазеров для нагрева плазмы.

2. Анализ динамики сброса инверсии при усилении нс импульсов в неодимовом стекле с учетом штарковской структуры, неоднородного уширения уровней лазерного перехода ${}^{4}F_{3/2} - {}^{4}I_{11/2}$ ($\lambda \approx 1,06$ мкм) и безызлучательной релаксации ионов Nd^{3+} по штарковским компонентам уровней позволил объяснить результаты экспериментов по усилению нс импульсов различной длительности и спектрального состава.

3. Обнаружение и исследование самофокусировки пучка и сопутствующих нелинейных явлений в оптической среде лазера на неодимовом стекле позволили установить, что мелкомасштабная самофокусировка лазерного пучка является основным механизмом ограничения мощности и яркости излучения в неодимовых лазерных установках при распространении наносекундных (10⁻⁸-10⁻⁹с) и пикосекундных (10⁻⁹-10⁻¹²с) импульсов.

4. Выбросы интенсивности на профиле лазерного пучка при его дифракции на диафрагмах и локальных неоднородностях в среде лазерной установки способствуют самофокусировке пучка и возникновению разрушений в оптических элементах.

5. Самофокусировка лазерного излучения может быть ограничена при секционировании среды лазера (стержней из неодимового стекла) на фрагменты (диски), применением расходящихся пучков, а также «мягких» диафрагм, подавляющих формирование дифракционных выбросов в пучках.

6. Воздействие на мишень излучением на высших гармониках лазерадрайвера обеспечивает оптическую развязку лазера от мишени, увеличивает контраст рабочих импульсов и поглощение излучения в лазерной плазме.

7. Формирование на выходе многоканальной лазерной установки составных пучков (кластеров) позволяет оптимизировать систему транспортировки и фокусировки лазерного излучения на мишень.

8. На неодимовых лазерных установках с нс и пс импульсами, созданных при участии автора, впервые была получена лазерная плазма при фокусировке импульсов излучения на твердотельную мишень в вакуумной камере и зарегистрированы нейтроны из лазерной плазмы.

9. Предложенные методы селекции поперечных мод позволили получить в лазерах на керамике *Nd:YAG*, *Yb:YAG* с селективной накачкой генерацию на скалярных и векторных модах Лагерра-Гаусса низших и высших порядков.

Личный вклад автора, достоверность результатов

Автор участвовал в создании лазерных установок на неодимовом стекле с нс и пс импульсами и в экспериментах по получению лазерной плазмы, работая в лаборатории КРФ, затем в Отделении КРФ ФИАН под руководством Н.Г. Басова в коллективах, возглавляемых (на разных этапах) В.С. Зуевым, Π.Γ. Крюковым, Г.В. Склизковым. Экспериментальные исследования по лазеру на неодимовом стекле, лазерам на кристаллах и керамике, результаты которых включены в диссертацию, выполнены автором, либо под его руководством и при его непосредственном участии. Методы формирования лазерных пучков в генераторах и усилителях, рассмотренные в диссертации, идеи расчетных работ предложены автором. Представленные автором экспериментальные данные, наблюдавшиеся закономерности и новые эффекты получили адекватное теоретическое описание, результаты расчетных работ соответствуют Положения, сформулированные в эксперименту. диссертации, получили признание, публикации автора хорошо известны и неоднократно цитировались. Автор лично представлял доклады по результатам исследований, включенных в диссертацию, на национальных и международных конференциях, выступал на семинарах в ФИАН и в ряде научных центров страны и за рубежом: в ИОФ РАН, ИПФ РАН, ИК РАН, в Институте лазерной науки (г. Токио, Япония), где в лаборатории К.Уеда проводились эксперименты с лазерами на керамике.

Апробация работы и публикации по теме диссертации

Результаты работы автора докладывались на более чем 50 национальных и международных конференциях: International Quantum Electronics Conference, Miami, Fla., USA, 1968; IEEE Conference on Laser Engineering and Applications, Washington, D.C., USA, 1969; Международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Бухарест, Румыния, 1969; Международной конференции «Лазеры и их применения», Дрезден, ГДР (1970,1985); Всесоюзных совещаниях по физике воздействия оптического излучения на конденсированные среды, Ленинград (1969, 1972, 1974); Всесоюзных и международных конференциях «Оптика лазеров» (III-1981, V-1987, VI-1990 - Ленинград; VII-1993, VIII-1995, XI-2003, XII-2006, XIII-2008, XIV-2010 - Санкт-Петербург); Всесоюзной конференции "Радиационные дефекты в твердых телах", Ашхабад, 1977; Всесоюзной научно-технической конференции "Высокоскоростная фотография, фотоника И метрология быстропротекающих процессов", Москва, 1987; Всесоюзном симпозиуме по оптическим и спектральным свойствам стекол, Ленинград, 1989; Всесоюзных конференциях по нелинейной оптике (V-Кишинев, 1970; VI - Минск, 1972; VII- Ташкент, 1974); Всесоюзных и Международных конференциях по когерентной и нелинейной оптике и применению лазеров (VIII - Тбилиси, 1976; Х -Киев, 1980; XIII - Минск, 1987; LAT-2002, Москва; ICONO/LAT-2005, Санкт-Петербург; ICONO/LAT-2013, Москва); V International Laser Physics Workshop, 1996; European Conferences on Laser Interaction with Matter (XIII - Лейпциг, ГДР, 1979; XVII-Рим, Италия, 1985; XVIII - Прага, Чехословакия, 1987; XXII - Париж, Франция, 1993; XXIV-Мадрид, Испания, 1996); IAEA Technical Committee Meetings on Drivers for Inertial Confinement Fusion (Osaka, Japan 1991; Paris, France, 1994); Conferences on Lasers and Electro-Optics and International Quantum Electronics Conferences (CLEO: Phoenix, USA, 1982; Baltimore, USA (1997, 2001); IQEC/CLEO-Europe, Munich, Germany (2005, 2009); IQEC/CLEO - Pacific Rim, Tokyo, Japan, 2005; Sydney, Australia, 2011); International conference "Solid-State Lasers for Application Inertial to Confinement Fusion". Monterey, USA, 1995; Международных симпозиумах по лазерной керамике, Бильбао, Испания, 2005; Нижний Новгород, РФ, 2012 и на ряде других конференций по лазерам в РФ, США, Японии.

Основные результаты диссертации опубликованы в 73 работах, из них 61 в рецензируемых отечественных и международных журналах и изданиях, включенных в список ВАК и систему цитирования Web of Science, 6 авторских свидетельств. Список основных публикаций автора по теме диссертации приводится в хронологическом порядке в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка публикаций автора и списка литературы из 430 наименований. Объем диссертации: 301стр., включая 118 рисунков, 6 таблиц. Используется сквозная нумерация ссылок и рисунков; обзор литературных источников проводится по главам параллельно с изложением исследований автора.

2. Краткое содержание диссертационной работы

Во <u>введении</u> дан краткий исторический очерк развития работ по лазерам для экспериментов по лазерному термоядерному синтезу, обоснована актуальность темы диссертации, цель работы и задачи исследований. Сформулированы защищаемые положения, научная новизна работы и ее практическая ценность. Представлено краткое содержание глав диссертации.

В первой главе в параграфе 1.1 рассматриваются свойства неодимового стекла - активной среды, которая используется в большинстве лазерных установок для экспериментов по ЛТС. Приводятся по литературным данным сведения 0 спектрально-люминесцентных, оптических, теплофизических, механических характеристиках ряда отечественных и зарубежных силикатных и фосфатных неодимовых стекол. Рассматривается штарковская структура рабочего лазерного перехода между уровнями ${}^{4}F_{3/2} - {}^{4}I_{11/2}$ иона Nd^{3+} с длиной волны *λ*≈1,06мкм, представлены сведения по неоднородному уширению (НУ) линии люминесценции (ЛЛ) в стеклах, см. [4*,32-34]. Приводится иллюстрация профиля ЛЛ рабочего перехода в силикатном стекле ED-2, полученная при численном моделировании с учетом НУ и штарковской структуры уровней [33]. Рассматриваются процессы безызлучательной релаксации возбуждения по уровням ионов Nd³⁺, которые оказывают влияние на энергетику лазерной системы и кинетику излучения [31-34]. Существенным для неодимового лазера является вопрос о накоплении и релаксации частиц на нижнем уровне рабочего перехода ⁴*I*_{11/2}. Приводится краткий обзор экспериментов по определению времени релаксации τ_{21} ионов Nd^{3+} в стеклах с уровня ${}^{4}I_{11/2}$ на основной ${}^{4}I_{9/2}$ уровень (для большинства матриц τ_{21} <1нс) [14*,34,35].

В параграфе 1.2 описываются первые эксперименты по генерации и усилению нс импульсов в лазере на неодимовом стекле. На рис.1а представлена схема лазера на стержне Ø9х120мм из силикатного стекла КГСС-7 с модуляцией добротности вращающейся призмой. Импульсы генерации (рис.1б) с длительностью 40-50нс и энергией ≈1Дж направлялись в усилитель на трех



Рис.1. Схема лазера с модуляцией добротности (а): ПР–вращающаяся призма; С–стержень Ø9x120мм; З–выходное зеркало; П₁,П₂–пластинки; ВК–калориметр; Ф1,Ф2–фотоумножители; КЗ–кабель задержки; С1-14–осциллограф; (б, в): осциллограммы импульсов генератора (б) и после усиления (в). Схема генератора и усилителя на стержнях Ø30х600мм (С) с развязкой (пунктир) из *Al* пленки (г); (д, е): импульсы генератора (д) и на выходе усилителя (е) [1,4,12].

стержнях Ø12, 15 и 25мм длиной по 120мм. На выходе усилителя энергия импульсов (рис.1в) достигала 8Дж, а мощность -100МВт [1]. Это был первый в мире эксперимент по усилению нс импульсов в неодимовом стекле. Активные элементы из стекла превосходили по объему и оптическому качеству кристаллы рубина, что открывало перспективу увеличения энергии и мощности излучения в неодимовых лазерах и применения их для ЛТС. Нами был создан генератор на стержне Ø30х600мм из стекла КГСС-7 с вращающейся призмой Ø30мм, рис.1г [4,12,73]. Импульс генератора (≈80нс, ≈10Дж, рис.1д) направлялся в усилитель на 2-х стержнях Ø30х600мм, рис.1г. Для развязки генератора от усилителя и обострения переднего фронта усиливаемого импульса был применен единственно доступный нам в то время (1965 г.) оптический затвор из тонкой алюминиевой пленки на лавсановой ленте (пленка майлар), (≈0,05мкм) испаряемой излучением при плотности энергии ≈0,4Дж/см². На выходе лазерной системы с затвором на пленке майлар были получены ≈50нс импульсы с энергией 60Дж и мощностью свыше 1ГВт, рис.1е [4,12,73].

С помощью созданных лазеров были проведены первые эксперименты по получению плазмы (температура $\approx 20 \text{eV}$) на твердотельной мишени из *LiH*, рис.2 [3]. Сопоставление экспериментов по фокусировке излучения на твердотельную мишень в вакууме и в газовую среду показало большую эффективность вложения энергии лазера в твердотельную мишень, а не в газ, где развитие пробоя препятствует концентрации энергии в малом объеме [3].



Рис.2. Спектрограмма свечения плазмы с линиями ионизированного *Li* при облучении поверхности мишени из *LiH* в вакуумной камере импульсами лазера на неодимовом стекле (40 нс, 6Дж) и реперный спектр железа (внизу) [3,12].



Рис.3. Фотография «длинной лазерной искры» - области оптического пробоя длиной ≈4м в воздухе при фокусировке ≈50 нс импульса неодимового лазера с мощностью ≈1ГВт. Часть изображений «искр» размыта из-за недостаточной глубины резкости при фотосъемке (павильон лаборатории КРФ ФИАН, 1965г.) [4,12,73].

Яркой демонстрацией образования протяженной области пробоя при фокусировке излучения в газ явилась так называемая «длинная лазерная искра», рис.3. Впервые это явление наблюдалось нами в оптическом зале павильона лаборатории КРФ ФИАН при фокусировке в воздух импульсов неодимового лазера (рис.1г) с мощностью ≈1ГВт [4,12,73]. Исследованию «длинной искры» была посвящена работа [15*].

Анализ условий взаимодействия излучения с веществом в первых экспериментах по лазерному нагреву позволил сформулировать перечень требований к параметрам импульса лазера, излучение которого фокусируется на мишень [14]. Перечень включал требования к энергии ($\approx 10^2$ Дж), длительности импульса ($10^{-8}-10^{-9}$ с) и расходимости излучения ($10^{-3}-10^{-4}$ рад), которые обеспечивали высокую скорость выделения энергии в малом объеме вещества на площадке Ø100–200мкм поверхности мишени при интенсивности $10^{13}-10^{14}$ Вт/см². Перечень содержал также требование высокого контраста лазерного импульса [14]. Смысл этого требования состоял в том, чтобы сохранить нужное исходное качество мишени к моменту прихода рабочего импульса. Высокий контраст подразумевал формирование импульса с крутым (≈ 1 нс) передним фронтом. Существенным было также ослабление (на уровне $\leq 10^{-4}$ от энергии рабочего импульса) фона усиленного спонтанного излучения или паразитной генерации, которые могли возникать в среде лазера при накачке и испарять материал мишени еще до прихода рабочего импульса.

<u>Вторая глава</u> посвящена методам формирования (для последующего усиления) импульсов наносекундной, субнаносекундной (10^{-9} - 10^{-10} с) и пикосекундной длительности в задающих генераторах на неодимовом стекле и кристалле *YAG:Nd*. Результаты первых экспериментов по генерации и усилению нс импульсов (гл.1) показали, что для получения высоких значений энергии и мощности в лазерном импульсе короткой длительности следует разделить функции генератора и усилителя. Короткий импульс с высоким контрастом целесообразно сформировать в генераторе с активным элементом небольших размеров (≈ 10 см³) и направить его в усилитель с большим поперечным сечением, энергией и высокой направленностью излучения.

В параграфе 2.1 рассматривается генератор на неодимовом стекле с электрооптическим затвором Керра, излучавший 20нс импульсы с энергией ≈1Дж [2]. Особенностью лазера с модуляцией добротности является наличие у

импульса пологого переднего фронта, связанного с развитием генерации в резонаторе от уровня спонтанного шума. Методы срезания переднего фронта, повышения контраста, вырезания короткого фрагмента импульса генератора внешним электрооптическим затвором [7*,12,20] и просветляющимися затворами на основе красителя или *Al* пленки [7,12,73] рассмотрены в параграфе 2.1. Получено обострение переднего фронта импульса генератора при облучении $\approx 0,05$ мкм *Al* пленки (скачок пропускания пленки от $\approx 0,1\%$ до $\approx 50\%$ за ≈ 1 нс), предложен механизм просветления затвора при переходе металл-диэлектрик в расширяющемся слое *Al* [12,73]. Генераторы с электрооптическим затвором и системами формирования 1-10 нс импульсов с контрастом 10^3 - 10^4 применялись в неодимовых лазерных установках лаборатории КРФ и Отделения КРФ ФИАН.

Параграф 2.2 посвящен лазеру на неодимовом стекле с самосинхронизацией мод, в исследовании которого автор принимал участие [9-12]. В этом лазере с просветляющимся красителем формировался цуг ультракоротких (≤20пс) импульсов (УКИ). Исследованиям флуктуационного по своей природе механизма формирования УКИ из шумовых импульсов спонтанного излучения лазерной среды посвящен цикл работ, выполненных в ФИАН, см.[16*]. В стержнях из неодимового стекла, работавших в генераторах пс импульсов, были обнаружены нитевидные повреждения - свидетельство самофокусировки лазерного пучка [10]. Для генератора характерна самофокусировка пучка в

целом, которая протекает при мощностях $P \ge P_{\kappa p}$, где $P_{\kappa p} \approx \frac{\lambda^2 c}{8\pi^2 n_2}$ - критическая

мощность (для неодимовых стекол $P_{\kappa p} \approx 2.10^6 \text{Br}$) [4*,17*,25,68]. Динамика самофокусировки пучка и формирования «бегущим фокусом» нитевидных повреждений в твердотельной среде исследовалась в [18*,19*]. Исследования самофокусировки в лазере УКИ на неодимовом стекле, связанного с нею уширения спектра, нелинейных потерь излучения и деградации временной структуры пс импульсов [16*,17*,20*,12,25,68] описаны в параграфе 2.2. Для уменьшения нелинейных потерь плотность энергии в резонаторе поддерживалась на уровне $\leq 10^{-3} \text{Дж/см}^2$. Для применения лазера УКИ в качестве задающего генератора в лазерной установке на его выходе устанавливался затвор Керра, вырезавший из цуга один или несколько пс импульсов [9-12].

В генераторах УКИ с просветляющимся красителем помимо низкой воспроизводимости временной структуры излучения, связанной с ее флуктуационной природой, есть также свойственный лазерам с пассивным затвором недостаток: разброс (≈10⁻⁵с) момента испускания импульсов. Для

создания источника коротких импульсов со стабильными характеристиками исследовались лазеры с активной модуляцией потерь в резонаторе, которые рассмотрены в параграфе 2.3 [22-24,38]. Был разработан лазер на неодимовом стекле с периодической модуляцией добротности (ПМД) резонатора затвором Поккельса, управлявшимся импульсами четвертьволнового напряжения $V_{\lambda/4}$. Лазер излучал 0,5-1нс импульсы с точной (≈10⁻⁹с) привязкой цуга к моменту включения затвора [23]. В этом генераторе, также как и в лазере УКИ с обнаружена самофокусировка пучка, красителем, была установлено ее негативное влияние на временной профиль импульсов [24]. Метод ПМД был применен в *Nd: YAG* лазере (рис.4), где получена генерация 0,5-0,6нс импульсов (энергия 1мДж, контраст ≈10³, ширина спектра 0,2см⁻¹)[38]. Этот лазер с усилителем на стержнях из кристалла *Nd: YAG* и неодимового стекла применялся в исследованиях нелинейных процессов в среде лазера, см. гл.4.



Рис.4. Схема *Nd: YAG* лазера с периодической модуляцией добротности (a):1,2- зеркала резонатора длиной *L*; 3,5-линзы; 4- диафрагма; 6-стержень *Nd: YAG* Ø6x75мм; 7,8 - затвор Поккельса; 9-зарядное устройство; 10,11-разрядник с внешним поджигом; осциллограмма (б) и эскизы (в, г) электрических импульсов $V_{\lambda/4}$ и функции пропускания затвора $\eta(t)$ с периодом 2L/c; (д)-осциллограмма цуга импульсов; (е) временной профиль одиночного импульса в записи на скоростном фоторегистраторе «Агат- СФ-3».

В третьей главе представлен материал, посвященный усилителям нс и пс импульсов на неодимовом стекле. В параграфе 3.1 приводятся основные характеристики режима нелинейного усиления импульсов в среде с инверсией, рассматриваются усилители, использовавшиеся в экспериментах. В 1960-70-е гг. обсуждались различные конфигурации активных элементов усилителя на неодимовом стекле (стержни, плиты, диски) и схемы усиления в параллельных и расходящихся пучках [21*-23*,12,13,17]. Представлены результаты расчета эволюции временного профиля и плотности энергии нс импульсов при усилении в неодимовом стекле для параллельного и расходящихся пучков [17]. При сопоставлении активных элементов и схем усиления перспективность дисков для создания лазерного канала на неодимовом стекле с апертурой Ø15-20см и выходной энергией свыше 1кДж не вызывала сомнений [21*,17,19]. Однако, установки на дисках требовало больших затрат на разработку создание лазерных модулей и помещения с высоким классом защиты от пыли. В установках лаборатории КРФ и Отделения КРФ ФИАН в 1960-90-х гг. основным видом активных элементов стали стержни из неодимового стекла. Такой выбор был обеспечен возможностью комплектации установок стержнями и осветителями с импульсными лампами промышленного изготовления [22*].

Одновременно с решением основной задачи усилителя - увеличением энергии импульса задающего генератора в лазерной установке должны приниматься меры ПО формированию рабочего пучка С высокой направленностью излучения и высоким контрастом. В этой связи значение приобретали исследования состояния оптической среды усилителя, по которой распространялся пучок: диагностика профиля инверсии, оптических искажений среды, возникавших при накачке, а также паразитных процессов, которые могли опустошать инверсию в усилителе. Этим исследованиям посвящено большое число публикаций, см.[4*]. В параграфе 3.2 обсуждаются эксперименты по регистрации оптических искажений в активных элементах и усиленного спонтанного излучения в усилителе, в которых автор принимал участие. Был поставлен модельный эксперимент по наблюдению суперлюминесценции в усилителе на 2-х стержнях из неодимового стекла Ø10х620мм с общим коэффициентом усиления $\approx 10^4$ [5]. В этой системе помимо обычного 100-200мкс импульса суперлюминесценции нами впервые наблюдался «гигантский» 9-12нс импульс суперлюминесценции с расходимостью $\approx 1^0$ и плотностью мощности ≈0,5ГВт/см², который высвечивал запасенную в активной среде энергию [5]. Обсуждаются применявшиеся методы снижения суперлюминесценции и

паразитной генерации в многокаскадных усилителях [12]. При исследовании термооптических искажений в стержнях было установлено, что наведенное ламповой накачкой в неодимовом стекле двойное лучепреломление вызывает деполяризацию лазерного излучения и, как следствие, искажения профиля лазерного пучка. В генераторе с поляризатором в резонаторе наведенное двойное лучепреломление в стержне Ø20х260мм способствовало возбуждению генерации на модах Эрмита-Гаусса высших порядков с крестообразным общим распределением интенсивности в пучке [12]. Искажения (в виде креста) профиля пучка с исходной линейной поляризацией из-за наведенного в стержнях Ø20-45х680мм двойного лучепреломления наблюдались и в наших первых усилителях, где «анализатором» поляризации излучения являлись срезанные под углом Брюстера торцы стержней [6,10,12]. Эти искажения удалось устранить, применяя стержни с торцами, срезанными под малым (3-5⁰) углом к оси [20,26].

Экспериментальным исследованиям усиления нс и пс импульсов в параграф 3.3. При усилении 20нс импульсов неодимовом стекле посвящен генератора с ячейкой Керра [2] в 4-х стержнях Ø15х120-150мм из стекла КГСС-7 на выходе усилителя были получены импульсы с мощностью ≈0,5ГВт [4]. энергии И дальнейшее увеличение мощности излучения Поскольку ограничивалось разрушениями среды [2,4], в усилителе были применены стержни Ø30мм из силикатного стекла КГСС-5. Был проведен эксперимент по наблюдению эволюции временного профиля 30нс импульсов при усилении в стержнях Ø30х620мм в режиме насыщения (плотность энергии насыщения $\approx 7 \text{Дж/см}^2$) [6,12]. На выходе усилителя наблюдался эффект перемещения максимума импульса к его началу за счет усиления пологого переднего фронта импульса. При срезании пологого фронта дополнительным затвором Керра наблюдалось сокращение длительности усиленного импульса [6,12]. Впервые эти эффекты были зарегистрированы при усилении нс импульсов в лазере на рубине [7*]. В параграфе 3.3 рассматривается устройство многокаскадного усилителя на стержнях, на выходе которого были получены 5нс импульсы с энергией до 100Дж и мощностью ≈20ГВт [6,12]. Было установлено, что при достигнутой интенсивности излучения вместе с обострением переднего фронта и сокращением длительности импульсов за счет нелинейного усиления возникают также искажения формы импульсов (провалы на профиле), обусловленные оптическим пробоем на торцах стержней усилителя [6,12]. Для пс импульсов было обнаружено ограничение роста интенсивности лазерного пучка при усилении на уровне ≤1Дж/см², меньшем плотности энергии

насыщения в неодимовом стекле [9-12]. Это ограничение было связано с возникновением самофокусировки лазерного пучка в среде усилителя и сопутствующих ей нелинейных потерь излучения (см. гл. 4). На выходе 5-каскадного усилителя на стержнях Ø20-45х680мм были получены ≈20пс импульсы с мощностью 10¹¹-10¹²Вт [9-12].

Развитие работ по созданию лазеров на неодимовом стекле ДЛЯ экспериментов по ЛТС в 1970-80-х гг. (см.[10*]) привлекло внимание к задаче построения детальной физической картины процессов, протекающих в активной среде этих лазеров при усилении коротких импульсов. Исследованиям динамики сброса инверсии и усиления нс импульсов в неодимовом стекле с учетом штарковской структуры и неоднородного уширения (НУ) линии люминесценции (ЛЛ) рабочего перехода, а также процессов безызлучательной релаксации энергии возбуждения ионов Nd³⁺ в среде, влияющих на кинетику излучения и эффективность работы усилителя, посвящен параграф 3.4. Целью работы было с помощью численных расчетов на примере модельной активной среды с варьируемыми параметрами проиллюстрировать общие для неодимовых стекол процессы взаимодействия нс импульсов со средой и дать интерпретацию экспериментальным результатам по усилению нс импульсов в силикатных и фосфатных стеклах. В параграфе 3.4 приводятся иллюстрации эффекта «прожигания» контура НУ ЛЛ излучением различного спектрального состава, сопоставляются эффективность сброса инверсии при усилении нс импульсов различной длительности, экспериментальные И расчетные зависимости плотности энергии в импульсе на выходе усилителя от плотности энергии на входе [32-34,36,37]. Одним из вопросов, по которому велась дискуссия, был вопрос о влиянии времени жизни (τ_{21}) ионов Nd^{3+} на нижнем уровне ${}^{4}I_{11/2}$ рабочего перехода ${}^{4}F_{3/2}$ - ${}^{4}I_{11/2}$ на усиление. Мы обратили внимание, что на населенность, возникающую на штарковских компонентах (ШК) уровня ${}^{4}I_{11/2}$ при лазерном переходе, влияет не только безызлучательная релаксация с этого уровня на основной, ⁴*I*_{9/2}, но и процессы «расселения» частиц по ШК самого уровня ${}^{4}I_{11/2}$ при установлении теплового равновесия ($\tau_t < 10^{-11}$ c) [32]. Эти процессы, протекающие за пс времена ($\tau_t << \tau_{21}$), восстанавливают усиление и «открывают» лазерный переход с ШК уровня ${}^{4}F_{3/2}$ на ШК уровня ${}^{4}I_{11/2}$ еще до начала их «разгрузки» за счет релаксации частиц на основной уровень, ⁴I_{9/2}. Включение в расчетную модель механизма термализации частиц по ШК позволило дать интерпретацию результатам эксперимента [24*]. где наблюдалась практически одинаковая эффективность усиления в неодимовом

стекле как 50нс, так и 1нс импульсов, рис.5. Фактически, совместное действие процессов установления теплового равновесия на ШК рабочих уровней и релаксации с уровня ${}^{4}I_{11/2}$ на основной ($\tau_{21} \le 1$ нс) определяют характер усиления нс импульсов в неодимовых стеклах. В параграфе 3.4 сделан вывод: накопление частиц на нижнем рабочем уровне в неодимовых стеклах не препятствует эффективному съему инверсии и усилению импульсов в неодимовых лазерных установках для ЛТС, работающих с импульсами с длительностью ≥ 1 нс.



Рис.5. Расчетные (а) и экспериментальные [24*] (б) зависимости ε_{gbix} (ε_{gx}) при усилении нс импульсов в стержне длиной 25см из стекла ED-2; 1- τ_u =50нс; 2- τ_u =9 нс; 3- τ_u =1нс [32-34].

<u>В четвертой главе</u> рассматриваются результаты исследования процессов ограничения энергии, мощности и яркости лазерного пучка при его взаимодействии с оптической средой самой неодимовой лазерной установки (стеклом активных элементов и другими материалами). Энергия, мощность и высокая угловая направленность лазерного излучения могут ограничиваться эффектами нелинейного взаимодействия излучения со средой. В перечень механизмов ограничения входят поверхностные и объемные разрушения в активной среде и в элементах оптики, самовоздействие лазерных пучков, включающее эффекты самофокусировки пучка и фазовой самомодуляции с уширением спектра излучения, вынужденное рассеяние в оптической среде лазера и ряд других эффектов. Помимо нелинейного взаимодействия излучения соказаться

и такой (линейный по полю) процесс, как дифракция пучка на апертурных диафрагмах и неоднородностях среды в лазерной установке [16,18].

В параграфе 4.1 рассматриваются объемные и поверхностные разрушения в активных элементах из неодимового стекла, работавших в усилителях нс и пс импульсов. Разрушения в неодимовом стекле, содержавшем микровключения платины, наблюдались нами впервые в стержнях усилителя 20нс импульсов при плотности энергии 4-5Дж/см² [2,4]. Приведены фотографии разрушений на торцах и в объеме стержней, работавших в установках с нс и пс импульсами, и значения интенсивности, при которых возникали повреждения [12]. Основное внимание в параграфе уделяется самофокусировке лазерного пучка в оптической среде самой лазерной установки, обнаруженной по нитевидным разрушениям в стержнях усилителя и рассеянию излучения под углами до 10⁻² рад за пределы основного пучка [10]. Возникновение в усилителе за одну вспышку лазера многочисленных нитевидных повреждений, заполнявших большую часть поперечного сечения пучка в среде, анализ структуры разрушений в объеме и на торцах стержней и сопоставление их с теорией [25*] позволили определить наблюдавшиеся явления как мелкомасштабную самофокусировку (ММС) пучка в среде лазерной установки [18]. ММС является следствием неустойчивости пучка относительно возмущений малого размера на его профиле, нарастающих в нелинейной среде, и протекает при мощностях *P>>P_{кр}* [25*]. В типичных для усилителя нс и пс импульсов на неодимовом стекле условиях $P=(10^3-10^4)P_{\kappa D}$, размер наиболее увлекаемых ММС возмущений составляет (при интенсивности $5-10\Gamma BT/cm^2$) 0,1-0,5MM, а характерная длина ИХ нарастания $l_{MMC} < 10$ cm [4*,20*,25,68]. Представлены иллюстрации отпечатков лазерного пучка с ореолом рассеянного излучения на выходе усилителя, временные профили лазерных импульсов с провалами интенсивности, разрушения на торцах стержней и другие свидетельства проявления ММС, приводится иллюстрация уширения спектра (свыше 600 Å) на выходе усилителя за пределы полосы [12,18,20,20*,25,68]. Наши исследования И усиления эксперименты на неодимовых лазерных установках в отечественных и зарубежных лабораториях показали, что для импульсов с длительностями 10⁻⁸-10⁻¹¹ с, характерных для установок ЛТС, именно ММС является основным механизмом ограничения мощности и яркости излучения в усилителе при интенсивностях $I=10^9-10^{10}$ BT/см² [4*,20*,18,25,68]. При распространении пучка, сформированного в усилителе пс импульсов ($I \approx 10^{10} \text{Br/cm}^2$), по трассе длиной ≈ 25 м была обнаружена также самофокусировка лазерного излучения в воздухе [10]. При описании ММС в

реальной лазерной установке, где интенсивность пучка I(z) меняется вдоль оптического тракта длиной L и меняются свойства самой оптической среды (стекло, кристаллы, жидкостные затворы), характеристикой нелинейности в установке является величина «интеграла распада» [4*,20*, 25,68]

$$B = \frac{8\pi^2}{c\lambda} \int_0^L \frac{n_2}{n_0} I(z) dz.$$

Подсчет величины *B* дает представление об интенсивности протекания нелинейных процессов. Относительно безопасными для прохождения мощного лазерного пучка по усилителю являются значения $B\approx 2$ [4*,20*,25,68].

В параграфе 4.2 рассматриваются особенности картины дифракции пучка при распространении в лазерной установке на неодимовом стекле. Значительная часть оптического тракта усилителей первых наших лазерных установок оказывалась в ближней зоне (зоне Френеля) дифракции лазерного пучка на краях стержней и на круглых диафрагмах, использовавшихся в то время в установках. В работах [16,18] было обнаружено, что выбросы интенсивности на профиле пучка при его дифракции на диафрагмах могут быть причиной разрушений в среде лазера. Аналогичные наблюдения были сделаны в работе [26*]. Анализ картины распространения пучка в лазерной установке при его дифракции и самофокусировке проведен в [26*,18]. Выбросы на периферии пучка при дифракции на диафрагмах Ø10-40мм в наших установках способствовали кольцевым разрушениям на торцах стержней, а «дифракционная фокусировка» излучения - разрушениям на оси, рис.6 [18]. Точечная структура кольцевых разрушений - результат совместного действия дифракции и ММС. Поперечные размеры некоторых дифракционных выбросов от диафрагм попадали в зону увлекаемых ММС пространственных масштабов (≤1мм), что приводило к их росту и формированию кольцевых структур, состоявших из нитевидных треков в объеме и точечных разрушений на торцах стержней, рис.6а [18]. Практически неустранимым источником возмущений профиля пучка являются локальные неоднородности в среде лазера (пузырьки, включения в стекле). Возникающая при дифракции пучка на таких неоднородностях модуляция интенсивности на его профиле служит источником возмущений, увлекаемых ММС [18]. В результате образуются мелкие (Ø1-2мм) кольцевые разрушения с квазипериодической азимутальной структурой (рис.6б) - результат распада участков пучка при ММС на ячейки с пространственным масштабом в 200-400мкм, содержащие каждая по нескольку Р_{кр} [25*]. Подобная картина

распада на периодические структуры наблюдалась при ММС пучка рубинового лазера Ø2мм с мощностью $\approx 10^6$ Вт в жидкой нелинейной среде (*CS*₂) в [27*].



Рис.6. Разрушения на торцах стержней из неодимового стекла Ø45х680мм (а) и Ø30х680мм (б) из усилителя пс импульсов (интенсивность 10⁹-10¹⁰Вт/см²). Разрушения в виде колец (а) и на оси стержней (а, б) возникали при дифракции лазерного пучка на круглых диафрагмах. Точечная структура разрушений - результат увлечения ММС возмущений на профиле пучка при его дифракции на диафрагмах и малых включениях в стекле. Квазипериодическая структура мелких колец (б)-свидетельство расслоения пучка при ММС на фрагменты [18].

усилителей пучков большого Для создания сечения В качестве альтернативы стержням были предложены активные элементы в виде дисков из неодимового стекла [21*]. Представляло интерес выяснить, как будет распространяться мощный лазерный пучок в системе дисков. В параграфе 4.3 рассматриваются результаты проведенного нами в 1974г. эксперимента, в котором пучок (1,5нс импульсы, *I*=10⁹-10¹⁰Вт/см²) с выхода неодимовой лазерной установки направлялся на группу из 18 дисков Ø50х30мм из стекла ЛГС-247-2 (без накачки), расположенных последовательно друг за другом под углом Брюстера по трассе пучка [19]. Характерные проявления ММС нитевидные повреждения в объеме и точечные разрушения на торцах были обнаружены в большинстве дисков, а на выходе группы основной лазерный рассеянным излучением. Примечательным было пучок сопровождался чередование количества повреждений в группе дисков через один диск. Было понятно, что такая локализация повреждений - следствие фокусировки излучения отдельными дисками [19], однако, детальное объяснение этих наблюдений долгое время отсутствовало. Обнаруженный нами эффект [19] не

остался без внимания исследователей из Ливерморской лаборатории (США), которая сделала ставку на применение дисков в мощных лазерах для ЛТС. повреждений, как выяснилось, было Чередование следствием эффекта формирования «горячих» изображений от локальных неоднородностей в среде [28*]. В результате интерференции основного лазерного пучка с излучением, рассеянным неоднородностями, в нелинейной среде (в дисках) возникают динамические голограммы (линзы Френеля). Эти голограммы фокусируют излучение по трассе распространения пучка и образуют «горячие» изображения неоднородностей, которые инициируют разрушения в дисках [28*]. Действие этого механизма в группе периодически расположенных дисков в эксперименте [19] приводило за несколько лазерных вспышек к накоплению разрушений в дисках, где формировались «горячие» изображения. Изображения тех возникших неоднородностей переносились далее по трассе динамическими линзами в соседних дисках с образованием новых разрушений. Так, помимо ММС, в оптической среде усилителя на неодимовом стекле был обнаружен нелинейный эффект формирования «горячих» изображений, который нужно учитывать при проектировании мощного лазера [29*].

Самофокусировка пучка в лазерной установке на неодимовом стекле для 10⁻⁹-10⁻¹²с является импульсов основным процессом, ограничивающим интенсивность излучения [4*,20*,25,68]. Пороги возникновения ряда других нелинейных процессов, как например, вынужденных рассеяний, оптического пробоя в среде лазера для таких коротких импульсов часто оказываются выше, самофокусировки и непосредственно чем пороги при распространении лазерного пучка в оптическом тракте установки не наблюдаются. Ряд нелинейных эффектов: уширение спектра лазерного излучения, вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), а также возникновение скачка поглощения излучения в среде наблюдались нами для 0,5нс импульсов в канале ММС лазерного пучка в неодимовом стекле [35,39-41] и описаны в параграфе 4.4. Эксперименты проводились на установке в составе генератора с ПМД на кристалле Nd: YAG [38] и усилителя на стержнях из Nd: YAG и неодимового стекла. Пучок Ø2мм с выхода усилителя (0,5нс импульс с энергией ≈0,5Дж, λ≈1,064мкм) направлялся в образцы силикатных и фосфатных стекол [35]. При 10^9 - 10^{10} BT/cm² (накачки) BO всех интенсивности излучения образцах наблюдалась ММС с образованием нитевидных разрушений, рассеянием и уширением спектра излучения до 2000см⁻¹. В 7см образце стекла КНФС при плотности мощности ≥3 ГВт/см² была зарегистрирована (впервые в лазерном

стекле) линия ВКР накачки, $\lambda \approx 1,217$ мкм [41]. Стоксов сдвиг ≈ 1180 см⁻¹ соответствовал фононному пику валентных колебаний фосфатных тетраэдров *PO*₄-группы, эффективность конверсии в ВКР составляла 5-10%. На рис.7 приводится запись на фоторегистраторе импульсов накачки на входе (а), а также прошедших образец импульсов накачки и импульсов рассеяния (б, в). На профиле импульса накачки, прошедшего образец, возникали провалы из-за ММС, глубина модуляции импульса достигала 30-80% и приводила к его разбиению на "субимпульсы" (б, в). Наблюдались 1-2 импульса ВКР по 80-120пс на переднем фронте накачки и более слабые-на заднем (б). Временное положение импульсов ВКР совпадало с максимумами "субимпульсов" накачки (б), а не с провалами из-за ММС, которые соответствовали выбросам рассеянного излучения с длиной волны $\lambda \approx 1,064$ мкм (в) [41].



Рис.7. Запись на фоторегистраторе импульсов накачки на входе (а) и выходе образца из стекла КНФС (б, в,1); импульсов ВКР, $\lambda \approx 1,217$ мкм (б, 2), и рассеяния, $\lambda \approx 1,064$ мкм (в, 3) [41].

На той же установке при плотностях мощности излучения 3-5ГВт/см² в образцах фосфатных и силикатных стекол был обнаружен скачок поглощения (на длинах волн $\lambda_1 \approx 0,66$ мкм и $\lambda_2 \approx 1,06$ мкм) с уровня ${}^4I_{11/2}$ ионов неодима, возникавший при прохождении через образцы 0,5нс импульса накачки [35,39,40]. Динамика поглощения исследовалась фоторегистратором при просвечивании канала взаимодействия пучка накачки со средой зондирующими 10-150нс импульсами с энергией ≈ 1 мДж. Поглощение на переходах вверх ${}^4I_{11/2} - {}^2G_{7/2}$; ${}^4G_{5/2}$ с $\lambda_1 \approx 0,66$ мкм и ${}^4I_{11/2} - {}^4F_{3/2}$ с $\lambda_2 \approx 1,06$ мкм было обусловлено быстрым (за время $\leq 0,5$ нс) заселением уровня ${}^4I_{11/2}$ при выделении энергии в канале ММС пучка накачки. Поглощение на λ_1 достигало 0,15см⁻¹ в фосфатных и 0,03см⁻¹ в силикатных стеклах; в стекле КНФС на λ_2 наблюдалось поглощение 0,05см⁻¹.

5-35нс [35,39,40]. Сопоставление этих данных с временем жизни ионов Nd³⁺ в стеклах на уровне ${}^{4}I_{11/2}$, τ_{21} <1нс [14*] показывает, что полученные в нашем эксперименте значения τ_p следует связывать не с τ_{21} , а с процессами релаксации среды в канале ММС, протекавшими по окончании импульса накачки за время $>10^{-8}$ c. Зарегистрированные эффекты ВКР и наведенного поглощения дополнили физическую картину взаимодействия мощных коротких (<0,5нс) импульсов излучения с оптической средой неодимовой лазерной установки и могут использоваться для диагностики состояния среды. В то же время, поскольку эти эффекты наблюдались только в канале ММС, нет оснований рассматривать ИХ В качестве механизмов нелинейных потерь для коллимированного лазерного пучка, распространяющегося в установке. Для лазерных импульсов с длительностями 10⁻⁸-10⁻⁷с вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна и оптический пробой в стеклах могут выступать как механизмы ограничения энергии и мощности в лазерной установке [30*].

<u>В пятой главе</u> обсуждаются методы формирования пучков в усилителе и на выходе лазерной установки на неодимовом стекле для экспериментов по нагреву плазмы. Рассмотрение схем современных мощных твердотельных лазеров, установок для ЛТС и применяемых в них методов формирования временных, пространственных, спектральных характеристик излучения, систем транспортировки и фокусировки излучения на мишень [1*-4*] потребовало бы отдельного обзора, который выходит за рамки настоящей работы. В гл.5 рассматриваются лазерные установки лаборатории и Отделения КРФ ФИАН для экспериментов по нагреву плазмы, в создании которых автор принимал участие, и некоторые предложенные нами методы формирования лазерных пучков.

Параграф 5.1 посвящен рассмотрению важного для оптического тракта мощного твердотельного лазера вопроса 0 методах подавления самофокусировки пучка. Радикальным средством было бы использование материала с малой величиной нелинейного показателя преломления n₂, однако, пределы варьирования n₂ в лазерных стеклах невелики [4*]. Эксперименты по излучения с линейной И круговой поляризацией усилению показали возможность повышения яркости для пучков с круговой поляризацией [4*]. Было известно, что увеличение длины самофокусировки пучка в среде L_{d} возможно при увеличении угла его расходимости β [31*]

$$L_{\phi} \approx ka_0^2 / (\sqrt{P / P_{\kappa p} - 1} - ka_0\beta),$$

25

где *Р*-мощность, *Р_{кр}*-критическая мощность, *k*-волновой вектор, *a*₀-радиус пучка. Для подавления самофокусировки в лазерных установках нами было предложено использовать в усилителе расходящиеся пучки [13,14,17]. Этот метод применялся в неодимовых лазерных установках [32*,33*,16,20,25]. Подавление самофокусировки пучка в целом при увеличении его угла раствора ($\beta \approx 3.10^{-3}$ рад) в усилителе получено в [33*]. Возможность ограничения ММС в лазере при увеличении β рассматривалась в [19,34*]. Однако, для небольших углов $\beta \le 10^{-2}$ рад, возможных для применения в неодимовых лазерных установках, при усилении нс и пс импульсов от обычных одномодовых генераторов отмечалось небольшое ослабление ММС [32*,16,20,25]. Подавление ММС получено в усилителе на стержнях длиной по 680мм из неодимового стекла при усилении расходящихся пучков от многомодового генератора с ограниченной когерентностью (2нс импульсы, плотность энергии до 10Дж/см², $\beta \le 10^{-2}$ рад) [35*]. Применение пространственных фильтров-ретрансляторов, излучения с ограниченной когерентностью, усиление «чирпированных» импульсов и некоторые другие методы подавления самофокусировки в лазере рассматриваются кратко по литературе в параграфе 5.1 [4*,10*,20*, 35*,36*,68].

В работе [19] нами было отмечено, что разделение сплошной лазерной среды (стержня из неодимового стекла) на фрагменты (диски) с воздушными промежутками (линейной средой) должно ограничить рост возмущений и ослабить ММС. Для проверки этого положения производилась регистрация потерь на рассеяние в группе дисков и в стержне эквивалентной длины из стекла ЛГС-247-2 (без накачки) при распространении через них пучков излучения, полученных при разделении пучка с выхода неодимовой лазерной установки на 2 части примерно равной интенсивности, рис.8. Плотность мощности в каналах со стержнем и дисками изменялась в диапазоне 10⁹-10¹⁰Вт/см². Зависимости отношения энергий *К* на выходе каналов (в пределах угла $\approx 10^{-3}$ рад) от плотности энергии на входе є показали опережающий рост потерь на рассеяние в стержне и большую устойчивость дисков к ММС, рис.8а, б [19]. Преимущество дисков (в том числе с неэквидистантным расположением) перед стержнями подтвердило моделирование эксперимента [19], проведенное в [29]. Спектр численное пространственных частот, увлекаемых ММС, для группы дисков уже, чем для стержня и сдвинут в область низких частот. В эксперименте рис.8 набор дисков не усиливал часть пространственно-шумового спектра сигнала, поступавшего на вход схемы, что и позволило уменьшить потери от ММС.



Рис.8. Регистрация потерь лазерного пучка на рассеяние в группе дисков и в стержне из неодимового стекла ЛГС-247-2:1-неодимовый лазер; 2,8- линзы коллиматора; 3-поляризатор; 4-диафрагма; 5-пластинка; 6-клин; 7-призма; 9-диски Ø50х30мм;10-стержень Ø45х630мм; 11- линза, $f\approx1$ м; 12-фильтры; 13-диафрагма Ø2,5мм; 14-калориметры. Зависимости отношения энергий на выходе каналов со стержнем и дисками K от плотности энергии ε на входе: (a,1) - в отсутствие образцов; (a,2) - стержень в одном канале; (б) -18 дисков в одном канале [19].

Только несколько из всех предлагавшихся устройств и схем подавления самофокусировки используются на практике и определяют во многом архитектуру оптического тракта и элементную базу современной мощной лазерной установки на неодимовом стекле для экспериментов по ЛТС[1*,2*]. Такими устройствами являются пространственные фильтры-ретрансляторы и, собственно, сами модули усилителя на основе дисков из неодимового стекла. С пространственных помощью фильтров можно секционировать лазерную установку на участки с допустимым уровнем интеграла распада В≤2. Применение пространственных фильтров позволяет почти на порядок повысить яркость излучения с интенсивностью 1-5ГВт/см² при усилении нс импульсов [4*]. Применение дисков вместо стержней позволяет при росте сечения пучка интенсивность и ММС и при этом увеличить полную энергию ограничить излучения на выходе лазерного канала. Модули на дисках и пространственные фильтры – основные компоненты усилителей мощных неодимовых лазеров, обеспечивающие их работу в условиях подавления ММС [1*,2*].

Еще одним элементом оптического тракта, который используется в лазерных установках и способствует подавлению самофокусировки и

разрушений в среде, является «мягкая» диафрагма. Как пояснялось, в результате дифракции на краях обычных («жестких») апертур на профиле пучка возникают выбросы интенсивности, которые могут вызывать разрушения и служить «затравками» для развития ММС в усилителе. Для предотвращения опасных выбросов было предложено производить формирование профиля лазерного пучка диафрагмами с изрезанным или сглаженным краем пропускания -«мягкими» диафрагмами [26*,19,21]. Методы создания диафрагм со сглаженным профилей краем И формирования с их помощью лазерных пучков рассматриваются в параграфе 5.2. Мягкие диафрагмы (аподизаторы) для лазерных установок должны удовлетворять требованиям высокого оптического качества, прочности, контраста [68]. Общий коэффициент пропускания (фактор заполнения) апертуры со сглаженным краем должен оставаться достаточно высоким (≈70%), этому требованию удовлетворяет «супергауссовый» профиль апертуры [68]. Один из первых методов создания стойких к лазерному излучению мягких диафрагм (в пластинах из диэлектрика с помощью проникающей радиации) был предложен в нашей работе [21], где при уоблучении в образцах из стекла были сформированы мягкие диафрагмы Ø20мм излучения видимого диапазона. Радиационно окрашенные для мягкие на основе пластинок из кристалла CaF₂:Pr с поглощением на диафрагмы λ≈1,06мкм и диаметрами до 50мм были разработаны в [37*]. Эти диафрагмы использовались для формирования пучков в неодимовых лазерах [68]. Совместно с ВНИИЭФ (г. Саров) нами были разработаны для йодного и неодимового лазеров несколько видов мягких диафрагм Ø10-100мм: кюветы с профилированным поглощающим слоем, стеклянные пластины, содержавшие малоразмерные рассеивающие излучение центры, кювета с рассеивающими частицами [51-57]. В параграфе 5.2 приводятся профили пропускания изготовленных мягких диафрагм и профили сформированных ими пучков по распространения. Представлены также результаты численного трассе моделирования мягких диафрагм на основе двумерных структур рассеивателей и иллюстрации профилей пучков, прошедших такие аподизаторы [58].

В параграфе 5.3 рассматриваются одноканальные лазерные установки на неодимовом стекле для экспериментов по нагреву плазмы, которые были созданы при участии автора в период 1967-1972 гг. в павильоне лаборатории КРФ ФИАН [6,9-12,16]. Надо сказать, что в этих первых наших установках такие средства подавления самофокусировки и формирования пучков как вакуумные пространственные фильтры и мягкие диафрагмы отсутствовали. В каскадах

последовательного усиления в качестве активных элементов использовались стержни Ø10-45х680мм с торцами под углом Брюстера. Тем не менее, применяя в усилителе систему коллиматоров, жестких диафрагм, просветляющихся затворов, элементы развязки лазера от мишени, коллектив, работавший на установках, получил лазерные пучки с рекордными в то время значениями мощности $(10^{11}-10^{12}\text{BT})$ и яркости ($\approx 10^{18}\text{BT/cm}^2 \cdot \text{стер}$) излучения [9-12]. Были проведены первые эксперименты по регистрации нейтронов из лазерной плазмы, образованной пс импульсами [8,11,69]. На рис.9 представлена фотография выходных каскадов лазерной установки с пс импульсами, а также небольшой стеклянной мишенной камеры в оптическом зале павильона лаборатории квантовой радиофизики (1968 год) [69].



Рис.9. Фотография выходных каскадов лазерной установки на неодимовом стекле с пс импульсами в оптическом зале павильона лаборатории квантовой радиофизики ФИАН (а); упрощенная схема эксперимента по регистрации нейтронов (б) [69].

В экспериментах по нагреву плазмы лазер оптически связан с мишенью, на которую фокусируется излучение. Из-за обратной связи мишень-лазер еще до прихода на мишень основного импульса может возникнуть самовозбуждение усилителя. Возникающая паразитная генерация разрушает мишень, обедняет инверсию в усилителе, снижает контраст рабочего импульса. С проблемой изоляции мишени от лазера и защиты самого лазера от отраженного мишенью излучения мы столкнулись в экспериментах с различными мишенями [6,8,11,12,30]. Долей процента рассеянного или отраженного мишенью в апертуру лазера излучения на рабочей длине волны достаточно для того, чтобы после прохода излучения через усилитель в обратном направлении вызвать повреждения оптических элементов во входных каскадах или в генераторе. В параграфе 5.3 кратко рассмотрены применявшиеся методы изоляции лазера от мишени: электрооптические затворы, кюветы с красителем, вентиль Фарадея, испаряемая *Al* пленка [8,11,12,14,43].

Радикальным средством устранения обратной связи мишень-лазер оказалось предложенное нами в 1970 г. решение: использовать для воздействия на мишень излучение лазера, преобразованное с высоким КПД В коротковолновую гармонику [12]. Излучение гармоники можно отделить от излучения на основной длине волны с помощью фильтров, зеркал с селективным отражением, используя дисперсию показателя преломления, рис. 10. Отраженное от мишени излучение гармоники не усиливается в активной среде лазера.



Рис.10. Схема оптической развязки при фокусировке излучения выходного каскада неодимового лазера на мишень путем преобразования в кристалле *KDP* излучения на частоте ω во 2-ю гармонику (2ω) с разделением пучков после преломления на клине [12].

Применение на выходе лазера нелинейного преобразователя позволяло увеличить контраст рабочего импульса. Переход к высшим гармоникам открывал также перспективу эффективного ввода энергии лазера в плотную плазму: с ростом частоты граница отражения излучения сдвигается вглубь плазмы, в слои с большей концентрацией электронов, возрастает коэффициент плазмой [12,14]. Небольшая поглощения излучения экспериментальная программа по облучению мишеней из LiD, полиэтилена $(CD_2)_n$ и других материалов 2-ой гармоникой неодимового лазера была реализована при участии автора в павильоне лаборатории КРФ [15,16]. В параграфе 5.3 рассматривается неодимовый лазер с преобразованием во 2-ю гармонику на кристалле КDP: 1нс импульс, энергия ≈10Дж, *λ*≈0,53мкм, расходимость излучения ≈10⁻⁴рад, КПД преобразования $\approx 50\%$; контраст импульса после *KDP* возрос с $\approx 10^3$ до $\approx 10^6$ [16]. При переходе с длины волны 1,06мкм на 0,53мкм отражение лазерного излучения плазмой уменьшилось с 50% до 5-7%, отраженный импульс в лазере

не усиливался, повреждений мишени фоновым излучением не наблюдалось [15,16]. Эксперименты с гармоникой показали эффективность предложенного метода. Облучение мишеней 2-ой и 3-ей гармониками неодимового и йодного лазеров применяется в установках для экспериментов по ЛТС [1*,2*].

Демонстрация нагрева и сжатия сферических мишеней с нейтронным выходом при их облучении на 9-канальной неодимовой лазерной установке «Кальмар» в Отделении КРФ ФИАН [8*,9*], перспектива масштабирования эксперимента и достижения полезного выхода термоядерных реакций при взаимодействии излучения со сферическими мишенями [38*,39*] определили направление развития неодимовых лазеров для ЛТС как многоканальных установок. Многоканальное усиление явилось радикальным решением вопроса увеличения поперечного сечения усилителя и общей энергии на выходе лазера до 10кДж уровня и выше. Для создания в ОКРФ ФИАН неодимового лазера с проектируемой энергией ≈10кДж был выбран вариант многоканального усилителя на основе промышленных лазерных модулей ГОС-1001 производства ЛОМО на стержнях Ø45х680мм из стекла ГЛС-1 [10*,26,27,42]. Для размещения установки в корпусе ОКРФ ФИАН был построен оптический зал и конденсаторный накопитель с запасаемой энергией 10МДж [10*]. На этапе разработки проекта установки остро стоял вопрос об организации схемы сведения и фокусировки на сферическую мишень почти двух сотен пучков Ø40-45мм. В параграфе 5.4 рассматривается предложенное нами решение вопроса: объединение мелких (Ø40-45мм) пучков на выходе усилителя с помощью вспомогательной оптики в кластеры - группы из нескольких коллинеарных пучков с увеличенным общим диаметром [20]. Такую группу пучков можно транспортировать к вакуумной камере и фокусировать на мишень как единый составной пучок, используя оптику с увеличенной апертурой. Предложенная схема формирования кластера пучков была проверена экспериментально в оптическом зале корпуса ОКРФ ФИАН на макете 9-канального усилителя на модулях ГОС-1001, на вход которого поступал пучок Ø40-45мм (2нс импульсы) от одноканальной лазерной установки на неодимовом стекле [20]. Измерения распределения энергии излучения с выхода одноканальной установки показали, что в угле 2.10⁻⁴ рад содержалось до 70% от полной энергии (40Дж) импульса, что соответствовало яркости $\approx 4.10^{16}$ Bt/см² стер. При снижении накачки и уровня термооптических искажений в стержнях усилителя удавалось ~70% от полной энергии (10Дж) сконцентрировать в пучке с углом 7.10⁻⁵ рад [20].

Схема двухкаскадного 9-канального усилителя на основе стержней Ø45x680мм представлена на рис.11. Пучок Ø40-45мм с выхода одноканального усилителя делился на три части, усиливался, затем каждый из 3-х пучков вновь делился на 3 части и снова усиливался. Деление и повороты пучков производились диэлектрическими зеркалами и призмами полного внутреннего отражения, для синхронизации импульсов отдельных каналов использовались оптические задержки переменной длины. Пучки с выхода модуля объединялись на компактном зеркале из 9 элементов в составной пучок квадратного сечения $\approx 135x135$ мм², состоявший из 9 пучков Ø40-45мм с общей энергией ≈ 150 Дж. После юстировки многоэлементного зеркала удалось получить составной пучок (кластер) с углом расходимости 2-3x10⁻⁴ рад [20].



Рис.11. Схема 9-канального усилителя с формированием составного лазерного пучка: 1стержни Ø45х680мм из стекла ГЛС-1 в осветителях ГОС-1001; 2, 3-призмы полного внутреннего отражения для поворотов пучков на 90° и 180° соответственно; 4 – зеркальный делитель пучка в отношении 1:2; 5 –зеркальный делитель 1:1; 6 - 9-призменное зеркало[20].

Схема формирования кластеров пучков была использована в лазерной установке на неодимовом стекле «Дельфин» [10*,26,27,42]. В усилительных каскадах установки «Дельфин» с делителями пучков на основе цилиндрической оптики и призм формировалось 108 пучков Ø40мм, которые объединялись на выходе установки в 6 кластеров Ø280мм (по 18 пучков в кластере) с общей энергией до 2,5кДж в 2нс импульсе при расходимости излучения в отдельном кластере 3·10⁻⁴рад [10*,42]. На базе усилителей установки «Дельфин» с 32

помощью зеркальных делителей была осуществлена также схема формирования 36 пучков: по 6 пучков Ø40мм в 6 кластерах Ø150мм с общей энергией до 1кДж в 3нс импульсе [45]. Обзор экспериментов по нагреву плазмы на установке «Дельфин» представлен в [10*,27,42]. Рассматривались планы развития установки на основе стержней Ø110мм и усилителей типа «активное зеркало» [42,44], обсуждалась концепция мощного лазера «гибридного» типа на основе сочетания твердотельной и газовой активных сред [44-46] и ряд других предложений, которые при отсутствии финансирования не были реализованы.

В шестой главе обсуждаются эксперименты с лазерными материалами на основе кристаллов и керамики, которые в перспективе могут найти применение в лазере-драйвере для ЛТС импульсно-периодического режима работы с полупроводниковой накачкой. Проблемой, затрудняющей применение в таком драйвере лазерных стекол, является их низкая (по сравнению с кристаллами) теплопроводность. Поиск кристаллических сред и систем накачки для лазера с частотой повторения импульсов ≈10Гц и энергией до 10МДж, который мог бы драйвером термоядерного реактора, стал одним из направлений стать исследований по твердотельным лазерам еще в 1980-е годы [40*,28,44,49,50]. Прорыв в этом направлении произошел после изобретения технологии производства лазерной керамики на основе кристаллов, активированных редкоземельными ионами, из которой можно изготавливать активные элементы больших размеров [11*-13*]. Создание лазерных модулей на кристаллах или полупроводниковой накачкой было керамике С 3a пределом наших возможностей. Ряд экспериментов по изучению свойств лазерных сред на кристаллах и керамике, по методам формирования профилей инверсии и селекции поперечных мод в этих лазерах был выполнен нами в ФИАН (в кооперации с ИОФ РАН, ИК РАН, ФИАЭ) и во время командировок в Институт лазерной науки (ИЛН) Университета электро-коммуникаций, г. Токио, Япония. Проведены эксперименты по формированию в лазерах малой мощности на керамике Nd: YAG, Yb: YAG пучков на скалярных LG_{pm} (p-радиальный, mазимутальный индексы) и векторных (с аксиально-симметричной поляризацией) модах Лагерра-Гаусса [64,65,67,70-72]. Справочная информация по скалярным и векторным модам Лагерра-Гаусса, которые соответствуют решениям волнового уравнения в скалярной или векторной форме, и о возможностях применения лазерных пучков на модах Лагерра-Гаусса представлена в гл.6 [41*,42*,71,72].

В параграфе 6.1 приводятся (по литературе) критерии отбора активной среды для лазера-драйвера по спектрально-люминесцентным, оптическим, теплофизическим, прочностным характеристикам материалов. Представлена краткая информация о работах в ИЛН по лазерной керамике. Совместно с ИЛН были проведены измерения нелинейного показателя преломления n₂ в оксидной керамике YAG, Y2O3, Sr2O3, Lu2O3, показавшие преимущество Yb:YAG (меньшее значение n_2) для применения в мощных лазерах [63]. Результатом проведенных в ряде лазерных центров исследований новых материалов стал выбор в качестве среды. перспективной для мощного импульсно-периодического лазера. кристаллов и керамики с ионами Yb^{3+} , в частности, Yb:YAG [11*-13*,43*]. Возможность применения Yb: YAG в таком лазере обсуждалась в [49,50,63], были проведены модельные эксперименты по накачке пластинок кристалла Yb: YAG лазерным излучением [59,62]. В параграфе 6.1 приводится структура лазерного перехода вблизи *λ*≈1,03мкм и оптико-физические характеристики кристалла и керамики Yb: YAG - материала, активно используемого в настоящее время (в том числе при криогенных температурах) в лазерных установках [11*-13*, 43*].

селективной накачке возникают При новые возможности по формированию профилей инверсии и дискриминации мод в резонаторах лазеров. В параграфе 6.2 рассматривается предложенный нами метод профилирования инверсии в активном элементе лазера при его размещении в зоне дифракции Френеля пучка накачки на круглой диафрагме [61,64,65]. Распределения интенсивности, возникавшие по направлению z при дифракции на диафрагме Ø2a пучка накачки от лазера на кристалле Nd: YAG ($\lambda \approx 0.53$ мкм, ≈10нс, 10-40мДж, 1Гц), использовались для профилирования инверсии в стержнях Ø6-8х10-90мм из Nd: YAG керамики (концентрация Nd³⁺ 0,6%; 4%), рис.12. В резонаторе (L ≤ 25см) с плоским и сферическим зеркалами лазера на керамике была получена генерация на скалярных модах Лагерра-Гаусса вида LG_{0m} в режиме импульсного включения усиления [64,65]. Кольцевые профили инверсии (число Френеля $N=a^2/\lambda z\approx 2$) препятствовали возбуждению гауссовой моды LG_{00} радиуса w_0 и поддерживали генерацию (50-1000нс импульсы, 0,1-0,5мДж, $\lambda \approx 1,064$ мкм) на модах LG_{0m} в широком диапазоне значений индекса *m* (при p=0), рис.13. Обычно, в резонаторе одновременно возбуждаются моды LG_{0+m} и LG_{0-m}, у которых волновой фронт закручен по часовой стрелке или против нее [71]. Эти моды интерферируют и формируют результирующий кольцевой профиль в виде 2*m* лепестков, который приписывается вырожденной моде LG_{0m} . Именно такие моды LG_{0m} регистрировались ПЗС камерой, рис.13.

Моды LG_{0m} (*m*=1-5) наблюдались в полуконфокальном резонаторе ($L\approx 25$ см) с зеркалом радиуса *r*=50см при изменениях диаметра кольца накачки. Моды LG_{0m} высших порядков (*m*=6-50) получены в полусферическом резонаторе ($L\leq 25$ см) у границы его области стабильности при перемещении зеркала с *r*=25см.



Рис.12. Схема накачки образцов керамики Nd:YAG (5) в резонаторе с зеркалами $R\approx 100\%$ (3) и $R\approx 98\%$ (4) в зоне дифракции Френеля пучка от лазера на кристалле Nd:YAG (1); обозначения: (2)-диафрагма; (6)-пластинки; (7,8)-фотоэлемент и калориметры. (Внизу) Фотографии с экрана ПЗС-камеры (9) и профили пучка накачки после диафрагмы Ø2a=1-3мм для чисел Френеля N=1,2,4 ($N=a^2/\lambda z$), z=40-110см-координата по направлению пучка накачки [65].

С приближением к границе стабильности радиусы мод $W_{0m} \sim w_0 \cdot m^{1/2}$ уменьшались, и лучшее перекрытие с профилем инверсии получали моды с нарастающими индексами *m*, [65]. Ряд мод LG_{0m} высших порядков, наблюдался впервые. При переходе к модам высших порядков диаметр пучков возрастал до 3мм, а расходимость излучения - до 0,15рад. Отмечено, что предложенный метод «дифракционной» накачки может быть реализован с помощью дифракционной оптики, например, фазовых масок [65,71]. В параграфе 6.2

кратко обсуждаются также предложения по выравниванию инверсии при селективной накачке: использование температурного градиента, градиента концентрации и состава активатора в лазерной среде [47-50,60].



Рис.13. Пучки лазера на *Nd:YAG* керамике на модах LG_{0m} в полусферическом резонаторе (*r*=25см, $L \le 25$ см, 2a=1,9мм, *z*=83см) для *m*=6 (a), *m*=8 (b), *m*=16 (c), *m*=27 (d) [65].

Параграф 6.3 посвящен экспериментам по формированию пучков на модах Лагерра-Гаусса в лазере непрерывного режима на керамике *Yb*: *YAG* с обычным (колоколообразным) профилем накачки от диода InGaAs (мощность $\leq 2BT$), рис.14 [67,70-72]. Активный элемент - плоскопараллельная пластинка (9х11мм²) толщиной 1,1 или 1,5мм из *Yb:YAG* керамики (9,8% концентрация Yb^{3+}) закреплялся на медном фланце с отверстиями Ø4мм. На одной поверхности пластинки было покрытие с отражением $R \approx 100\%$ на $\lambda \approx 1,03$ мкм и просветлением для накачки (*λ*≈0,94мкм), другая поверхность просветлялась. Резонатор *Yb:YAG* лазера был образован зеркалом на пластинке из керамики и плоским выходным зеркалом, *R*=95-98%. На оси резонатора устанавливалась линза со сферической аберрацией, при перемещении которой осуществлялась селекция скалярных и векторных мод Лагерра-Гаусса. Сферическая аберрация в лазерных системах выступает обычно как негативный фактор, который приводит к ухудшению характеристик пучков. Нами было обнаружено, что даже короткофокусная линза с большой сферической аберрацией может использоваться в лазере для селекции мод Лагерра-Гаусса [67]. В серии экспериментов линзы из стекла Ø2,5см с фокусом f=2,5см; 3,5см; 10см и другие вводились в резонатор Yb: YAG лазера. Для селекции векторных мод в резонатор дополнительно вводилась пластинка из одноосного кристалла, рис.14. Профили лазерных пучков регистрировались ПЗС камерой. В резонаторах с линзами *f*=5см;10см и короткой базой (*L*<40см) преобладала многомодовая генерация. Генерация на одиночных модах наблюдалась с линзами f=2,5см и 3,5см при L>40см. В отличие от лазера на

Nd: YAG керамике с кольцевой накачкой (рис.12) при накачке колоколообразным профилем Ø100мкм в *Yb: YAG* лазере с линзой *f*=2,5см при *L*=127см возбуждались скалярные моды Лагерра-Гаусса LG_{pm} с индексами $m,p \ge 0$ с мощностью 1-30мВт [67,70-72].



Рис.14. Схема лазера на керамике *Yb:YAG* с линзой в резонаторе (накачка от диода, LD). Для селекции мод Лагерра-Гаусса с аксиально-симметричной поляризацией в резонатор дополнительно вводилась пластинка из одноосного кристалла *YVO*₄ или α-*BBO c*-среза [70].

Для расположения линзы относительно 100% зеркала *d*≈*f*_{ax} (*f*_{ax}-фокус в параксиальной области) наблюдалась генерация на моде LG₀₀. При небольших (<0,5мм) сдвигах линзы к зеркалу - на модах LG_{01} , LG_{10} , LG_{11} и других LG_{pm} модах низших порядков (*p,m*≤5) в пучках Ø2-4мм, рис.15а. Были получены также «гибридные» моды типа LG_{pm}^{*} (LG_{01}^{*} , LG_{11}^{*} и др.), каждая из которых является суперпозицией 2-х вырожденных LG_{pm} мод, развернутых на 90⁰ друг к другу [67,71]. При дальнейшем перемещении линзы к 100% зеркалу на 1-2мм с увеличением накачки возбуждались LG_{pm}* и LG_{pm} моды высших порядков с индексами m=6-28, p=5-10, а также моды LG_{p0} при p=5-12, рис.15б,в; расходимость пучков Ø5-13мм достигала 5х10⁻³рад [67,70-72]. Идентичность изображений пучков в ближней и дальней зоне свидетельствовала, что пучки представляют собой моды Лагерра-Гаусса. Механизм селекции мод при в резонаторе с плоскими зеркалами линзы со сферической перемещении аберрацией, фокусирующей излучение вдоль отрезка на оси, можно представить следующим образом. Для *d*≈*f*_{ax} в резонаторе существовала обратная связь в параксиальной области и генерация на моде LG₀₀. При смещении линзы к 100% зеркалу мода *LG*₀₀ подавлялась, но благодаря сферической аберрации включалась обратная связь для излучения, распространявшегося под углом к оси через кольцевые зоны на поверхности линзы. Так могли возбуждаться моды LG_{pm} высших порядков. В резонаторе с линзой при сдвиге ее к зеркалу радиусы LG_{pm} мод $W_{pm}=w_0(2p + m + 1)^{1/2}$ на зеркале убывают [41*]. При каждом сдвиге линзы к 100% зеркалу область перекрытия доминировавшей прежде моды с профилем инверсии в пластинке *Yb:YAG* сокращалась. Большее перекрытие и преимущество в усилении получала мода LG_{pm} с возросшими индексами. При сдвигах линзы от положения $d\approx f_{ax}$ к зеркалу преимущество получали сначала моды LG_{01} , LG_{01} *, LG_{10} , LG_{11} , LG_{11} *, а затем и другие моды с нарастающими индексами p и m. Эти моды становились доминирующими и, сменяя друг друга, выходили в генерацию. Так была получена генерация на многих скалярных LG_{pm} модах с индексами (в различных комбинациях) p=0-12, m=0-28, многие моды высших порядков наблюдались впервые [67,70-72].



Рис.15. Пучки генерации *Yb:YAG* лазера с линзой $f_{ax}=2,5$ см, L=127см на LG_{pm} модах с центральным минимумом (а,б) и максимумом (в) в ближней зоне: (а) p=2, m=3; (б) p=7, m=17; (в) p=11, m=0; профили мод (б, в) частично за полем зрения (6,4х4,8мм²) ПЗС камеры [71,72].

Для возбуждения векторных мод Лагерра-Гаусса в резонатор Yb: YAG лазера с линзой вводилась плоскопараллельная пластинка из одноосного кристалла с-среза (рис.14) с двойным лучепреломлением для излучения с радиальной и азимутальной поляризациями (РП, АП). Подобная пластинка применялась для селекции АП моды ТЕ01 в лазере на рубине [44*] и нами в *Nd: YVO*₄ лазере - для получения РП многомодовой генерации [66]. В *Yb: YAG* лазере 10мм пластинка из кристалла *YVO*₄ или α-*BBO* располагалась в 1-4см от активного элемента, использовались линзы с фокусом f от 3,5см до 20см. Замена «положительного» кристалла YVO_4 на «отрицательный» α -BBO давала возможность формировать кольцевые пучки на модах и с РП, и с АП вида TM_{0n} и *TE*_{0n}, где *n*-число колец [70-72]. На рис.16 приводятся изображения пучков, полученных с кристаллами YVO₄, *α-ВВО* и линзами с *f*=10см (а) и *f*=3,5см (б). Для анализа состояния поляризации пучков перед ПЗС камерой устанавливался поляризатор-анализатор на вращающейся оправе. Направление пропускания анализатора в каждой группе изображений на рис.16 помечено стрелками

(изображения слева - без анализатора). Ориентация пятен в пучках, прошедших через анализатор, относительно его направления пропускания позволяет определить поляризацию излучения: РП (б) и АП (а). Идентичность изображений в ближней и дальней зоне и анализ поляризации свидетельствовали о том, что пучки представляют собой векторные моды TM_{03} (б) и TE_{01} (а).



Рис.16. Изображения пучков *Yb:YAG* лазера (L=114см) с кристаллами *YVO*₄ (а) и α -*BBO* (б): мода TE_{01} (а) в ближней зоне, f=10см; мода TM_{03} в дальней зоне, f=3,5см (б). Направление пропускания анализатора поляризации перед ПЗС камерой указано стрелками [71,72].

Механизм селекции векторных мод подобен (с учетом двойного лучепреломления) механизму селекции скалярных мод. В резонаторе с кристаллической пластинкой возникают 2 области стабильности: для излучения с РП и с АП. Например, в резонаторе с YVO_4 при смещении линзы с f=10см к 100% зеркалу и переходе границы области стабильности для РП излучения потери для моды TM_{01} нарастали, и в резонаторе «выживала» только мода TE_{01} с АП, рис.16а. В лазере на Yb:YAG керамике с линзой f=10см были получены пучки Ø2-4мм на модах TM_{01} и TE_{01} с мощностью до 60мВт, с расходимостью 0,5-1·10⁻³рад и контрастом по поляризации 50-100. Моды с числом колец 2-10 были получены в резонаторе с пластинками YVO_4 и α -BBO при перемещениях линзы f=3,5см со значительной сферической аберрацией. Расходимость мод высших порядков – до $3\cdot10^{-3}$ рад, мощность-до 5мВт [70-72].

Пучки на модах Лагерра-Гаусса благодаря своим специфическим характеристикам находят много применений. Интерес к скалярным модам обусловлен наличием у них орбитального углового момента [45*]. Векторные моды интересны особенностями распределения поля: при фокусировке пучков возможно увеличить (по сравнению с излучением линейной поляризации) концентрацию энергии в фокальном объеме; для РП излучения в области фокуса возникает продольная компонента электрического поля световой волны [42*]. Лазеры малой мощности на модах Лагерра-Гаусса используются для манипулирования частицами, захвата их в ловушки, в микроскопии высокого разрешения. Создание мощных лазеров на модах Лагерра-Гаусса предоставляет возможности для их применений в лазерной технологии, исследованиях взаимодействия излучения с веществом, для ускорения частиц, см.[42*,71,72].

В <u>заключении</u> подведены общие итоги и сформулированы основные результаты работы. Представленные в диссертации результаты экспериментов по генерации и усилению нс импульсов в неодимовых лазерах, исследований дифракции и самофокусировки лазерного излучения в усилителе, предложенные методы формирования пучков в оптическом тракте и на выходе лазерной установки – в числе работ, вошедших в направление исследований по мощным твердотельным лазерам для экспериментов по нагреву плазмы.

3. Основные результаты работы

1. Генерация и усиление импульсов наносекундной и пикосекундной длительности в лазерах на неодимовом стекле:

- впервые в СССР созданы лазеры на неодимовом стекле с модуляцией добротности (20-50нс импульсы, $\lambda \approx 1,06$ мкм, энергия ≈ 1 Дж); для обострения (≈ 1 нс) переднего фронта импульсов применен оптический затвор из тонкой алюминиевой пленки на лавсане, испаряемой лазерным излучением; предложен механизм просветления *Al* пленки при переходе металл-диэлектрик;

- впервые в мире создана лазерная система на неодимовом стекле в составе генератора с модуляцией добротности и усилителя 20-50нс импульсов с энергией 10-60Дж и мощностью свыше 10⁹Вт; зарегистрированы эффекты перемещения вершины и сокращения длительности нс импульсов при усилении в неодимовом стекле в режиме насыщения;

- анализ динамики сброса инверсии при усилении нс импульсов в неодимовом стекле с учетом штарковской структуры и неоднородного уширения уровней лазерного перехода ${}^{4}F_{3/2}-{}^{4}I_{11/2}$ показал, что быстрая тепловая релаксация ионов Nd^{3+} по штарковским компонентам перехода ($\tau_{t} < 10^{-11}$ с), как и их релаксация на основной уровень ${}^{4}I_{9/2}$ ($\tau_{21} \le 10^{-9}$ с), способствует эффективному съему инверсии и усилению нс импульсов ($\tau_{u} \ge 1$ нс) в неодимовых лазерах;

- в генераторах субнаносекундных и пикосекундных импульсов на неодимовом стекле обнаружена самофокусировка пучка и ее влияние на деградацию параметров лазерного излучения; в Nd: *YAG* лазере с периодической модуляцией добротности получены $\approx 0,5$ нс импульсы с энергией ≈ 1 мДж; при усилении пс импульсов достигнута мощность излучения 10^{11} - 10^{12} Вт.

2. Обнаружение и исследование нелинейных явлений, ограничивающих мощность и яркость излучения лазерной установки на неодимовом стекле:

-обнаружены разрушения на микровключениях в неодимовом стекле при усилении 20нс импульсов с плотностью энергии 4-5Дж/см²;

- обнаружены и исследованы мелкомасштабная самофокусировка (ММС) лазерного пучка с интенсивностью 10^9 - 10^{10} BT/см² в усилителях нс и пс импульсов на неодимовом стекле и явления, сопровождающие ММС: разрушения в среде лазера, уширение спектра, рассеяние, поглощение лазерного излучения, искажения пространственных и временных характеристик лазерных импульсов; установлено, что ММС - основной механизм ограничения мощности и яркости излучения в неодимовых лазерах для импульсов 10^{-9} – 10^{-12} с;

- в структуре дисков из неодимового стекла при распространении лазерного пучка с интенсивностью 10⁹-10¹⁰Вт/см² обнаружены разрушения, связанные с эффектом «горячих» изображений от локальных неоднородностей в среде (объяснение эффекта - Ливерморская лаборатория, США);

- на выходе неодимового лазера с пс импульсами при плотностях мощности $\approx 10^{10}$ Bt/см² обнаружена самофокусировка лазерного пучка в воздухе.

3. Обнаружение и исследование разрушений в усилителе нс и пс импульсов на неодимовом стекле из-за выбросов интенсивности на профиле пучка при его дифракции на диафрагмах И локальных лазерного неоднородностях в оптическом тракте установки. При дифракции на краях диафрагм выбросы достигают (для круглых апертур) значений 4*I* (*I*-средняя по пучку интенсивность) и могут вызывать разрушения оптических элементов. Выбросы способствуют ММС пучка и возникновению в среде лазера разрушений, в том числе с характерной квазипериодической структурой в результате расслоения пучка на отдельные самофокусирующиеся фрагменты.

4. Разработка методов формирования пучков в оптическом тракте и на выходе лазерной установки для экспериментов по нагреву плазмы:

- методов подавления самофокусировки секционированием среды лазера (стержней из неодимового стекла) на фрагменты (диски), применением в лазере

расходящихся пучков, а также «мягких» диафрагм, подавляющих формирование дифракционных выбросов в пучках;

- метода нагрева мишени излучением высшей гармоники лазера-драйвера: для оптической развязки системы лазер–мишень, увеличения контраста лазерного импульса и эффективности вложения энергии лазера в мишень;

- метода формирования на выходе многоканальной лазерной установки кластеров пучков, позволяющего оптимизировать систему транспортировки лазерного излучения на мишень.

5. Неодимовые лазерные установки лаборатории КРФ и Отделения КРФ ФИАН для нагрева плазмы, в создании которых автор принимал участие:

- неодимовые лазеры с 40-50нс импульсами с мощностью 10⁸-10⁹Вт для первых экспериментов по получению лазерной плазмы;

- одноканальная неодимовая лазерная установка с ≈20пс импульсами с мощностью 10¹¹-10¹²Вт (расходимость 10⁻³-10⁻⁴ рад), на которой проведены первые эксперименты по регистрации нейтронов из лазерной плазмы;

- одноканальная установка с преобразованием во 2-ю гармонику (≈1нс импульс, 10Дж, расходимость ≈10⁻⁴рад, *λ*≈0,53мкм), показавшая эффективность применения излучения на длине волны гармоники для нагрева плазмы, увеличения контраста лазерного импульса и развязки системы лазер-мишень;

- 9-канальная установка с кластером 9 пучков Ø40мм с общим диаметром ≈150мм, энергией ≈150Дж в 2нс импульсе при расходимости 2-3х10⁻⁴рад;

- 108 - канальная лазерная установка «Дельфин» для экспериментов по нагреву и сжатию сферических мишеней с формированием 6 кластеров пучков Ø280мм (по 18 пучков Ø40мм) с общей энергией до 2,5кДж в 2нс импульсах.

6. Разработка методов формирования профиля инверсии и модового состава излучения в лазерах на основе кристаллов и керамики:

- при сопоставлении характеристик твердотельных лазерных материалов, активированных ионами Nd^{3+} и Yb^{3+} , кристалл и керамика Yb:YAG определены в качестве среды, перспективной к применению в лазерах для нагрева плазмы;

- разработаны метод профилирования инверсии и селекции мод Лагерра– Гаусса в лазере при размещении активного элемента в зоне дифракции пучка накачки и метод селекции мод Лагерра–Гаусса с помощью внутрирезонаторной линзы со сферической аберрацией;

- с помощью разработанных методов в лазерах на керамике *Nd:YAG*, *Yb:YAG* с полупроводниковой или лазерной накачкой получена генерация на скалярных и векторных модах Лагерра–Гаусса низших и высших порядков.

Список цитированной литературы

1*. Moses E. I. The National Ignition Facility and the promise of inertial fusion energy // Fusion Sci. Tech. 2011. Vol. 60. P. 11.

Hurricane O.A., Callahan D.A., Casey D.T. et al. Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion // 2014. Nature. Vol.506. P. 343.

2*. Гаранин С.Г. Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии // УФН. 2011. Т.181. С. 434.

3*. Коржиманов А.В., Гоносков А.А., Хазанов Е.А., Сергеев А.М. Горизонты петаваттных лазерных комплексов // УФН. 2011. Т.181. С. 9.

Danson C., Hillier D., Hopps N., and Neely D. Petawatt class lasers worldwide // High Power Laser Science and Engineering. 2015. Vol. 3. e3.

4*. Мак А.А., Сомс Л.Н., Фромзель В.А., Яшин В.Е. Лазеры на неодимовом стекле / Москва: Наука. 1990.

5*. Басов Н.Г., Крохин О.Н. Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора // ЖЭТФ. 1964. Т. 46. С. 171.

6*. Басов Н.Г., Амбарцумян Р.В., Зуев В.С., Крюков П.Г., Стойлов Ю.Ю. Оптический квантовый генератор с импульсным включением добротности // ЖЭТФ.1964. Т.47. С.1595.

7*. Амбарцумян Р.В., Басов Н.Г., Зуев В.С., Крюков П.Г., Летохов В.С. Распространение импульса света в нелинейно усиливающей и поглощающей среде // Письма в ЖЭТФ.1966.Т.4.С.19.

8*. Басов Н.Г., Крохин О.Н., Склизков Г.В., Федотов С.И., Шиканов А.С.
Мощная лазерная установка и исследование эффективности высокотемпературного нагрева плазмы // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. С. 203.

9*. Басов Н.Г., Иванов Ю.С., Крохин О.Н., Михайлов Ю.А., Склизков Г.В., Федотов С.И. Генерация нейтронов при сферическом облучении мишени мощным лазерным излучением // Письма в ЖЭТФ.1972.Т. 15. С. 589.

43

10*. Басов Н.Г., Михайлов Ю.А., Склизков Г.В., Федотов С.И. Лазерные термоядерные установки / М: ВИНИТИ. Итоги науки и техники. Серия радиотехника. Т.25. 1984.

11*. Kawanaka J., Miyanaga N. et al. New concept for laser fusion energy driver by using cryogenically-cooled *Yb:YAG* ceramics // J. of Physics: Conf. Ser. 2008.Vol.112. P. 032058.

12*. Ueda K., Bisson J-F., Yagi H., Takaichi K., Shirakawa A., Yanagitani T., and Kaminskii A. Scalable Ceramic Lasers // Laser Physics. 2005. Vol.15. P. 927.

13*. Sanghera J. et al. Ceramic Laser Materials // Materials. 2012. Vol. 5. P. 258.

14*. Bibeau C., Payne S., and Powell H. Direct measurements of the terminal laser level lifetime in neodymium-doped crystals and glasses // Journal of the Optical Society of America B.1995. Vol. 12. P. 1981.

15*. Басов Н.Г., Бойко В.А., Крохин О.Н., Склизков Г.В. Образование длинной лазерной искры в воздухе под действием слабо сфокусированного излучения лазера // Доклады АН СССР.1967. Т. 173. С. 538.

16*. Крюков П.Г. Лазеры ультракоротких импульсов // Квантовая электроника. 2001.Т. 31. С. 95.

17*. Коробкин В.В., Малютин А.А., Прохоров А.М. Фазовая самомодуляция и самофокусировка излучения неодимового лазера при самосинхронизации мод // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 12. С. 216.

18*. Зверев Г.М., Малдутис Э.К., Пашков В.А. О развитии нитей самофокусировки в твердых диэлектриках // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 9. С. 108.

19*. Дышко А.Л., Луговой В.Н., Прохоров А.М. Многофокусная структура светового пучка в нелинейной среде // ЖЭТФ. 1971. Т. 61. С. 2305.

20*. Чекалин С.В., Кандидов В.П. От самофокусировки световых пучков – к филаментации лазерных импульсов // УФН. 2013.Т.183. С. 133.

21*. Swain J.E., Kidder R.E., Pettipiece K. et al. Large-Aperture Glass Disk Laser System // Journal of Applied Physics.1969. Vol. 40. P. 3973.

22*. Белостоцкий Б.Р., Любавский Ю.В., Овчинников В.М. Основы лазерной техники. Твердотельные ОКГ/ Москва: Советское радио.1972.

23*. Бродов М.Е., Дегтярева В.П., Иванов А.В., Ивашкин П.И., Коробкин В.В., Пашинин П.П., Прохоров А.М., Серов Р.В. Исследование характеристик трехпроходного усилителя на плите из неодимового стекла // Квантовая электроника.1982. Т. 9. С.121.

24*. Martin W., and Milam D. Gain saturation in *Nd*: doped laser materials // IEEE Journal of Quantum Electronics.1982. Vol.QE-18. P. 1155.

25*. Беспалов В.И., Таланов В.И. О нитевидной структуре пучков света в нелинейных жидкостях // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. З. С. 471.

26*. Campilo A.J., Pearson J.E., Shapiro S.L., Terrel N.J. Fresnel diffraction effects in the design of high-power laser systems // Appl. Phys. Lett. 1973. Vol. 23. P. 85.

27*. Campillo A.J., Shapiro S.L., and Suydam B.R. Periodic breakup of optical beams due to self-focusing // Appl. Phys. Lett. 1973. Vol. 23. P. 628.

28*. Hunt J.T., Manes K.R., and Renard P.A. Hot images from obscurations // Applied Optics. 1993. Vol.32. P. 5973.

29*. Bel'kov S.A., Garanin S.G., Epatko I.V., Serov R.V., and Voronich I.N. Formation of nonlinear holographic images in powerful laser systems // Applied Optics.2012. Vol. 51. P. 5921.

30*. Ешметьева Е.В., Королев В.И., Меснянкин Е.П., Серебряков В.А., Шашакин В.В., Яшин В.Е. О предельных энергетических параметрах излучения в лазерных системах на неодимовом стекле // Квантовая электроника.1992.Т.19. С. 837.

31*.Wagner W., Haus H., Marburger J. Large-scale self-trapping of optical beams in the paraxial ray approximation // Phys.Rev. 1968. Vol.175. P. 256.

32*. Ванюков М.П., Крыжановский В.И., Сизов В.Н., Стариков А.Д. Многоканальная лазерная система на неодимовом стекле с пикосекундной длительностью импульса излучения // Опт.- мех. пром. 1972. Вып.12.С.31.

33*. Жерихин А.И., Матвеец Ю.А., Чекалин С.В. Ограничение яркости вследствие самофокусировки при усилении ультракороткого импульса в неодимовом стекле и в иттрий-алюминиевом гранате // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. С. 1585.

34*. Пятахин М.В., Сучков А.Ф. Подавление мелкомасштабной самофокусировки в расходящихся пучках // Кв. электроника. 1988. Т. 15. С. 164. 35*. Fedotov S.I., Feoktistov L.P., Osipov M.V. et al. Laser for ICF with a controllable function of mutual coherence of radiation // Journal of Russian laser research. 2004. T.25. C. 79.

36*. Strickland D., Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses // Optics Communications.1985. Vol. 56. P. 219.

37*. Красюк И.К., Лукишова С.Г., Марголин Д.М., Пашинин П.П., Прохоров А.М., Терехов В.Д. Мягкие диафрагмы на основе наведенного поглощения // Письма в ЖЭТФ.1976.Т. 2. С. 577.

38*. Афанасьев Ю.В., Басов Н.Г., Волосевич П.П., Гамалий Е.Г., Крохин О.Н. и др. Лазерное инициирование термоядерной реакции в неоднородных сферических мишенях // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 21. С. 150.

39*. Nuckolls J., Wood L., Thiessen A. and Zimmerman G. Laser Compression of Matter to Super-High Densities: Thermonuclear (CTR) Applications // Nature. 1972. Vol. 239. P. 139.

40*. Эммет Дж., Крупке У., Тренхольм Дж. Будущее мощных твердотельных лазерных систем // Квантовая электроника.1983. Т. 10. С. 5.

41*. Koechner W. Solid-State Laser Engineering (6-th ed.) / Berlin: Springer. 2006.

42*. Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications // Advances in Optics and Photonics. 2009. Vol. 1. P. 1.

43*. Перевезенцев Е.А., Мухин И.Б., Кузнецов И.И., Палашов О.В., Хазанов Е.А. Криогенный дисковый *Yb:YAG*-лазер с энергией 120мДж при частоте повторения 500Гц // Квантовая электроника. 2013. Т.43. С. 207.

44*. Pohl D. Operation of a Ruby Laser in the Purely Transverse Electric Mode TE_{01} //Appl. Phys. Lett. 1972. Vol. 20. P. 266.

45*. Allen L., Beijersbergen M., Spreeuw R., Woerdman J. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes // Phys. Rev. A. 1992.Vol. 45. P. 818.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

1. Басов Н.Г., Зуев В.С., Сенатский Ю.В. Оптический квантовый генератор с модуляцией добротности на неодимовом стекле // ЖЭТФ.1965. Т. 48. С.1562.

2. Басов Н.Г., Зуев В.С., Сенатский Ю.В. Оптический квантовый генератор на неодимовом стекле с импульсным включением добротности // Письма в ЖЭТФ.1965. Т. 2. С. 57.

3. Амбарцумян Р.В., Басов Н.Г., Бойко В.А., Зуев В.С., Крохин О.Н., Крюков П.Г., Сенатский Ю.В., Стойлов Ю.Ю. Нагрев вещества при фокусировке излучения оптического квантового генератора // ЖЭТФ.1965. Т. 48. С. 1583.

4. Басов Н.Г., Амбарцумян Р.В., Борович Б.Л., Зуев В.С., Крюков П.Г., Летохов В.С., Морозов В.М., Ораевский А.Н., Сенатский Ю.В., Стойлов Ю.Ю., Щеглов В.А. Отчет о НИР по теме «1Б» / Москва. Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР. 1966.

5. Зуев В.С., Летохов В.С., Сенатский Ю.В. Гигантские импульсы сверхлюминесценции // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 4. С. 182.

 Басов Н.Г., Зуев В.С., Крюков П.Г., Летохов В.С., Сенатский Ю.В., Чекалин
 С.В. Генерация и усиление мощных импульсов света на неодимовом стекле // ЖЭТФ.1968. Т. 54. С. 767.

7. Варга П., Крюков П.Г., Купришов В.Ф., Сенатский Ю.В. Генерация инфракрасного излучения с помощью полиметинового красителя, применяемого в лазере на неодимовом стекле // Письма в ЖЭТФ. 1968. Vol. 8. Р. 501; Оптика и спектроскопия.1969.Т. 26.С. 1006.

8. Басов Н.Г., Захаров С.Д., Крюков П.Г., Сенатский Ю.В., Чекалин С.В. Эксперименты по наблюдению нейтронов при фокусировке мощного лазерного излучения на поверхность дейтерида лития // Препринт ФИАН № 63.1968; Письма в ЖЭТФ.1968. Т.8. С. 26.

9. Basov N.G., Kriukov P.G., Letokhov V.S., and Senatskii Yu.V. Generation and Amplification of Ultrashort Optical Pulses // IEEE Journal of Quantum Electronics.1968. Vol. QE-4. P. 606.

10. Басов Н.Г., Крюков П.Г., Сенатский Ю.В., Чекалин С.В. Получение мощных ультракоротких импульсов света на неодимовом стекле // Препринт ФИАН № 91.1969; ЖЭТФ.1969. Т. 57. С. 1175.

11. Басов Н.Г., Захаров С.Д., Крохин О.Н., Крюков П.Г., Сенатский Ю.В. Применение мощных лазеров для получения термоядерной плазмы // Труды Международной конференции «Laser und ihre Anwendungen» Dresden,10-17.6.1970. Teil 1, Seite 1-56. Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin Zentralinstitut für Optik und Spektroskopie.1970.

12. Сенатский Ю.В. Создание и исследование мощного лазера на неодимовом стекле для высокотемпературного нагрева плазмы: дис.... канд. физ.- мат. наук. Москва. 1970.

13. Сенатский Ю.В. Активные элементы для мощной лазерной установки на неодимовом стекле // Сборник "Квантовая электроника" под ред. акад. Н.Г. Басова. 1971. Вып. 5. С.109.

14. Крюков П.Г., Сенатский Ю.В. Мощные лазеры для высокотемпературного нагрева плазмы // Препринт ФИАН №51.1971.

15. Басов Н.Г., Зарицкий А.Р., Захаров С.Д., Крохин О.Н., Крюков П.Г., Матвеец Ю.А., Сенатский Ю.В., Федосимов А.И. Получение мощных световых импульсов на длинах волн 1,06 и 0,53мкм и их применение для нагрева плазмы. 1.Экспериментальные исследования процессов отражения излучения при лазерном нагреве плазмы на двух длинах волн // Сборник "Квантовая электроника" под ред. акад. Н.Г. Басова.1972. Вып. 5. С. 63.

48

 Басов Н.Г., Зарицкий А.Р., Захаров С.Д., Крюков П.Г., Матвеец Ю.А., Сенатский Ю.В., Федосимов А.И., Чекалин С.В. Получение мощных световых импульсов на длинах волн 1,06 и 0,53мкм и их применение для нагрева плазмы.
 Лазер на неодимовом стекле с преобразованием излучения во вторую гармонику для экспериментов по нагреву плазмы // Сборник "Квантовая электроника" под ред. акад. Н.Г. Басова.1972. Вып. 6. С.50.

17. Баранова Н.Б., Сенатский Ю.В., Тюрин Е.Л., Щеглов В.А. Возможность создания мощного лазера при усилении расходящихся световых пучков в активных средах в виде раструбов // Сборник "Квантовая электроника" под ред. акад. Н.Г. Басова.1973. Вып. 5. С.57.

18. Быковский Н.Е., Баранова Н.Б., Зельдович Б.Я., Сенатский Ю.В. Дифракция и самофокусировка излучения в усилителе мощных световых импульсов. 1. Развитие дифракции и самофокусировки излучения в усилителе мощных световых импульсов // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. С.2435.

19. Быковский Н.Е., Баранова Н.Б., Зельдович Б.Я., Сенатский Ю.В. Дифракция и самофокусировка излучения в усилителе мощных световых импульсов. 2. Подавление вредного влияния дифракции и самофокусировки на лазерный пучок // Квантовая электроника. 1974.Т.1. С.2450.

20. Басов Н.Г., Крюков П.Г., Матвеец Ю.А., Сенатский Ю.В., Федосимов А.И. Формирование мощных наносекундных импульсов в лазерной установке на неодимовом стекле // Квантовая электроника. 1974. Т.1. С.1428.

21. Беляев В.Н., Быковский Н.Е., Сенатский Ю.В., Соболев Б.В. Формирование проникающей радиацией поглощающих слоев в оптической среде неодимового лазера // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. С. 2286.

22. Быковский Н.Е., Захаров С.М., Плетнев Н.В., Сенатский Ю.В., Федотов С.И. Импульсное включение добротности в лазере на неодимовом стекле с нелинейным поглотителем. Краткие сообщения по физике. 1976. Вып.6. С.34.

23. Быковский Н.Е., Плетнев Н.В., Сенатский Ю.В. Генератор субнаносекундных импульсов на неодимовом стекле с периодической модуляцией добротности // Квантовая электроника.1977. Т. 4. С. 1301.

24. Берковский А.Г., Быковский Н.Е., Губанов Ю.И., Гусев И.В., Плетнев Н.В., Сенатский Ю.В., Склизков Г.В., Сущенко А.Н., Тарасов Р.П. Исследование генератора субнаносекундных импульсов на неодимовом стекле с помощью скоростной осциллографии // ПТЭ.1979. Вып.3. С.178.

25. Baranova N.B., Bykovsky N.E., Tchekalin S.V., Senatsky Yu.V. Nonlinear processes in the optical medium of a high-power neodymium laser // Journal of Soviet laser research.1980.Vol.1. P. 53.

26. Basov N.G., Bykovskii N.E., Danilov A.E., Kalashnikov M.P., Krokhin O.N., Kruglov B.V., Mikhailov Yu.A., Osetrov V.P., Pletnev N.V., Rode A.V., Senatsky Yu.V., Sklizkov G.V., Fedotov S.I., Fedorov A.N. The "DELFIN" high-power laser facility for heating spherical thermonuclear targets // Journal of Soviet laser research. 1980. Vol. 1. P. 1.

27. Basov N.G., Galichy A.A., Danilov A.E., Kalashnikov M.P., Mikhailov Yu.A., Rode A.V., Senatsky Yu.V., Sklizkov G.V., Fedotov S.I. Plasma heating by radiation of amplifying module of a laser system "DELFIN" / Laser Interaction and related phenomena. 1981. Vol.5. P.25. Plenum Publishing Corporation. Edited by H. Schwarz, H. Hora, M. Lubin, and B. Yaakobi.

28. Басов Н.Г., Быковский Н.Е., Иванов В.В., Козловский В.И., Насибов А.С., Склизков Г.В., Сенатский Ю.В. Об импульсной селективной накачке активных элементов мощного неодимового лазера // Краткие сообщения по физике. 1982. Вып. 8. С.54.

29. Бабиченко С.М., Быковский Н.Е., Сенатский Ю.В. Возможность уменьшения нелинейных потерь при мелкомасштабной самофокусировке в кусочно-непрерывной среде // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. С. 161.

30. Быковский Н.Е., Иванов В.В., Лисунов В.В., Сенатский Ю.В., Склизков Г.В. Вращение плоскости поляризации лазерного пучка при отражении от прозрачной сферической оболочки // Оптика и спектроскопия. 1983. Т. 54. С.897. 31.Быковский Н.Е., Иванов В.В., Сенатский Ю.В. Особенности кинетики генерации неодимового лазера при импульсной селективной накачке // Квантовая электроника. 1985. Т.12. С. 422.

32. Иванов В.В., Сенатский Ю.В., Склизков Г.В. Влияние безызлучательной релаксации на уровнях лазерного перехода ионов *Nd*³⁺ в стекле на усиление мощных наносекундных импульсов // Квантовая электроника. 1986. Т.13. С.647.

33. Иванов В.В., Сенатский Ю.В., Склизков Г.В. Численное моделирование динамики сброса инверсии и усиления наносекундных импульсов в неодимовом стекле // Квантовая электроника. 1987. Т.14. С.306.

34. Ivanov V.V., Senatskiy Yu.V., Sklizkov G. V. Influence of active medium nonradiative transitions on lasing and gain kinetics in a neodymium laser. / In the book: The "Delfin" Laser-Thermonuclear Complex: Operational Complex and Future Directions. Ed. G. V. Sklizkov. Nova Science Pub. Inc. 1988. P.167.

35. Быковский Н.Е., Иванов В.В., Сенатский Ю.В., Склизков Г.В. Исследование динамики населенности уровня ${}^{4}I_{11/2}$ ионов Nd^{3+} в стеклах по поглощению на длинах волн 0,66 и 1,06 мкм // Квантовая электроника.1988. Т. 15. С. 1240.

36. Ivanov V.V., Sklizkov G.V., Senatsky Yu.V. Dynamics of inversion dumping when nanosecond pulses are amplified in the active medium of a neodymium laser // Journal of Soviet laser research. 1989. Vol. 10. P. 384.

37. Иванов В.В., Сенатский Ю.В., Склизков Г.В. О предельном съеме инверсии в неодимовых лазерах при усилении наносекундных импульсов // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. С. 1719.

38. Быковский Н.Е., Денус С., Дубик А., Иванов В.В., Марчак Я., Овсик Я., Петровский Я., Сенатский Ю.В., Склизков Г.В. Формирование субнаносекундных импульсов для мощной лазерной установки на неодимовом стекле // Краткие сообщения по физике.1987.Т. 11. С. 52.

39. Иванов В.В., Сенатский Ю.В., Склизков Г.В. Поглощение в неодимовых стеклах при прохождении мощного лазерного импульса // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 45. С. 410.

40. Ivanov V.V., Senatsky Yu.V., Sklizkov G.V. Absorption in neodymium glasses under powerful laser pulse propagation // Physics Letters A. 1987. Vol. 124. P. 381.

41. Иванов В.В., Сенатский Ю.В., Склизков Г.В. Вынужденное комбинационное рассеяние в лазерном стекле // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. С. 80.

42. Basov N.G., Allin A.P., Bykovskiy N.E. et al. The "Delfin" Laser-Thermonuclear Complex: Operational Complex and Future Directions / In the book: The "Delfin" Laser-Thermonuclear Complex: Operational Complex and Future Directions. Ed.

G. V. Sklizkov. Nova Science Pub. Inc. 1988. P.1.

43. Bykovskiy N.E., Denus S., Dubik A., Ovsik Ya., Lisunov V.V., Senatskiy Yu.V., Fedotov S.I. Application of Faraday rotator to suppression of target-reflected radiation in the optical path of a laser installation. / In the book: The "Delfin" Laser-Thermonuclear Complex: Operational Complex and Future Directions. Ed. G. V. Sklizkov, Ed. Nova Science Pub. Inc. 1988. P. 159.

44. Basov N.G., Feoktistov L.P., Senatsky Yu.V. Laser driver for inertial confinement fusion // Proc. of the IAEA TCM on Drivers for ICF, April.15-19, 1991. Osaka, Japan. P.13.

45. Basov N.G., Feoktistov L.P., Senatsky Yu.V. Conceptual designs for a solid-state laser system // Proc. of the IAEA TCM on Drivers for ICF, April.15-19, 1991. Osaka, Japan. P. 177.

46. Малиновский Г.Я., Михеев Л.Д., Сенатский Ю.В., Черемискин В.И. Перспективы усиления второй гармоники *Nd* - лазера в волне инверсии на *XeF(C-A)* переходе до уровня 10⁵Дж // Известия Российской академии наук. Сер. физ.1994. Т. 58. С. 68.

47. Бурцев А.В., Крупенников А.А., Сенатский Ю.В. Способ формирования распределения инверсии в активном элементе твердотельного лазера // Патент РФ № 2086058 с приоритетом от 29.07.1994.

48. Burtsev A.V., Krupennikov A.A., Senatsky Yu.V. Smoothing of the inversion profile in *Nd*- and *Yb*-doped solid-state laser elements // Proc. SPIE. 1995. Vol. 2633. P. 668.

49. Бурцев А.В., Дурманов С.Т., Рудницкий Ю.П., Сенатский Ю.В., Смирнов Г.В., Феоктистов Л.П. Иттербиевый лазер с накачкой газоразрядными лампами для импульсно-периодического режима работы // Известия Российской академии наук. Сер. физ. 1996. Т. 60. С.201.

50. Senatsky Yu.V., Burtsev A.V. Stored energy formation in selectively pumped active media for a solid-state laser driver // Laser Physics. 1997. Vol. 7. P. 208.

51. Зубарев И.Г., Пятахин М.В., Сенатский Ю.В. Способ формирования мягкой диафрагмы / Патент РФ № 2140695 с приоритетом от 24.04.1998.

52. Сенатский Ю.В., Виноградский Л.М., Зубарев И.Г. и др. Мягкая диафрагма для лазеров / Патент РФ № 2157034 с приоритетом от 26.11.1998.

53. Vinogradsky L.M., Sobolev S.K., Zubarev I.G., Pyatakhin M.V., Senatsky Yu.V., Mizin V.M., Ueda K. Development of the nonlinear optical element for light beam apodization and large-aperture laser amplifier decoupling // Proc. SPIE. 1998.Vol.3343. P. 344; Proc. SPIE. 1998.Vol. 3683. P.186.

54. Сенатский Ю.В. Мягкая диафрагма для лазеров / Патент РФ № 2163386 с приоритетом от 19.03.1999.

55.Vinogradsky L.M., Kargin V.A., Sobolev S.K., Zubarev I.G., Pyatakhin M.V., Senatsky Yu.V., Shelobolin A.V., Mizin V.M., Ueda K. Soft diaphragms for apodization of powerful laser beams // Proc. SPIE. 2000. Vol. 3889. P. 849.

56. Vinogradsky L.M., Kargin V.A., Krotov V.A., Sobolev S.K., Jidkov N.V., Mizin V.M., Pyatakhin M.V., Senatsky Yu.V., Shelobolin A.V., Zubarev I.G. Decoupling nonlinear optical elements for powerful iodine laser//Proc.SPIE. 2001.Vol.4353. P. 92.
57. Сенатский Ю.В., Быковский Н.Е., Виноградский Л.М. и др. Аподизаторы для

получения одномодовой генерации в лазерах // Известия Российской академии наук. Сер. физ. 2002. Т. 66. С.919.

58. Pyatakhin M.V., Senatsky Yu.V. Formation of the intensity distribution in laser beams due to diffraction on structures of small-size optical inhomogeneities // Journal of Russian laser research. 2002. Vol. 23. P. 332.

59. Bykovsky N.E., Ivanov D.V., Mikhailov S.I., Petrukhin A.R., Senatsky Yu.V., Zubarev I.G. Transformation of the ytterbium laser spectrum at pulsed selective pumping // Proc. SPIE. 2000. Vol. 3889. P. 661.

60. Сенатский Ю.В., Уеда К. Активный элемент твердотельного лазера // Патент РФ №2226732 с приоритетом от 21.06.2002.

61. Сенатский Ю.В., Быковский Н.Е., Пятахин М.В., Сато Й., Ширакава А., Уеда К. Способ формирования распределения инверсии в активном элементе лазера / Патент РФ №2239920 с приоритетом от 02.04. 2003.

62. Басиев Т.Т., Быковский Н.Е., Конюшкин В.А., Сенатский Ю.В. Применение лазера на центрах окраски в кристалле *LiF* для накачки активной среды *YAG:Yb* // Квантовая электроника. 2004. Т.34. С. 1138.

63. Senatsky Yu., Shirakawa A., Sato Y., Hagiwara J., Lu J., Ueda K., Yagi H., Yanagitani T. Nonlinear refractive index of ceramic laser media and perspective of their usage in a high-power laser-driver // Laser Physics Letters. 2004. Vol. 3. P. 500.

64. Bisson J-F., Shirakawa A., Sato Y., Senatsky Yu., and Ueda K. Near-Field Diffractive Optical Pumping of a Laser Medium // Optical Review. 2004. Vol. 11. P. 353.

65. Bisson J.-F., Senatsky Yu., and Ueda K. Generation of Laguerre-Gaussian modes in *Nd: YAG* laser using diffractive optical pumping // Laser Physics Letters. 2005. Vol. 2. P. 327.

66. Bisson J.-F., Li J., Senatsky Yu., and Ueda K. Radially polarized ring and arc beams of a neodymium laser with an intra-cavity axicon // Optics Express.2006. Vol. 14. P. 3304.

67. Senatsky Yu., Bisson J.-F., Shelobolin A., Shirakawa A., and Ueda K. Circular Modes Selection in *Yb:YAG* Laser Using an Intracavity Lens with Spherical Aberration // Laser Physics. 2009. Vol. 19. P. 911.

68. Lukishova S.G., Senatsky Yu.V., Bykovsky N.E., Scheulin A.S. Beam Shaping and Suppression of Self-Focusing in High-Peak-Power *Nd*: Glass Laser Systems // in "Self-focusing: Past and Present. Fundamentals and Prospects" Springer Series: Topics in Applied Physics. 2009. Vol. 114. P. 191.

69. Захаров С.Д., Крюков П.Г., Сенатский Ю.В., Чекалин С.В. Первые эксперименты по наблюдению нейтронов из лазерной плазмы / «Как это было... воспоминания создателей отечественной лазерной техники», часть З. С. 41. М: Лазерная ассоциация. 2011.

70. Thirugnanasambandam M., Senatsky Yu., and Ueda K. High-order mode selection in *Yb:YAG* ceramic laser // Proc. of the International Quantum Electronics Conf. (IQEC) and Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim, Sydney, Australia, 28 Aug.-1 Sept. 2011. P.546.

71. Senatsky Yu., Bisson J-F., Li J., Shirakawa A., Thirugnanasambandam M., Ueda
K. Laguerre–Gaussian Modes Selection in Diode-Pumped Solid-State Lasers //
Optical Review. 2012. Vol.19. P.201.

72. Senatsky Yu., Bisson J-F., Li J., Shirakawa A., Thirugnanasambandam M., Ueda
K. Experiments on Laguerre-Gaussian modes selection in ceramic lasers // Phys.
Status Solidi (C). 2013. Vol. 10. P. 974.

73. Зуев В.С., Сенатский Ю.В. О работе оптического затвора на основе тонкой металлической пленки // Краткие сообщения по физике. 2015. Вып.4. С.16.

Быковский Н.Е., Першин С.М., Самохин А.А., Сенатский Ю.В. Скачок пропускания тонкого слоя алюминия при лазерной абляции // Квантовая электроника. 2016. Т.46. С. 128.