

## *Отзыв*

официального оппонента на диссертацию Сенатского Юрия Всеволодовича

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

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 - лазерная физика

Одним из самых масштабных направлений развития твердотельных лазеров в настоящее время являются лазерные установки с петаваттной мощностью и энергией свыше 1МДж для исследования свойств вещества в экстремальных состояниях и экспериментов по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС). Исследования по ЛТС, которые осуществляются в ряде научных центров в США, Европе, России, Японии, Китае были инициированы в 1960-х гг. в СССР, в Физическом институте им. П.Н. Лебедева. Возможность нагрева малых объемов плотной дейтериевой плазмы до термоядерных температур при воздействии лазерных импульсов наносекундной длительности была обоснована в известной публикации Н.Г. Басова и О.Н. Крохина, которая стимулировала разработку мощных лазеров и многочисленные экспериментальные и теоретические исследования лазерной плазмы. Ключевым элементом в этих исследованиях стали лазеры на неодимовом стекле с накачкой импульсными лампами, работающие в режиме одиночных импульсов. Для будущих лазеров-драйверов для ЛТС импульсно-периодического режима работы в качестве источников накачки рассматриваются полупроводниковые диоды, обеспечивающие КПД лазера  $\approx 10\%$ , а в качестве активной среды - керамика, активированная иттербием, и ряд других лазерных материалов. Ряд начальных этапов программы экспериментальных исследований по ЛТС, включающий разработку методов генерации и усиления нс и пс импульсов, создание первых лазерных установок на неодимовом стекле с энергией от десятков Дж до 1-2кДж, проведение первых экспериментов по нагреву плазмы с регистрацией нейтронов, был выполнен в ФИАН под руководством Н.Г. Басова.

Активное участие в создании первых неодимовых лазеров в ФИАН для нагрева плазмы, в исследованиях физики мощного твердотельного лазера, в разработке методов формирования лазерных пучков с высокой мощностью и яркостью излучения принимал Ю.В.Сенатский. В последнее время Ю.В. Сенатский участвовал также в исследованиях новых лазерных материалов на основе кристаллов и керамики, планируемых для применения в лазерах для ЛТС следующего поколения. Результаты исследований Ю.В.Сенатского в указанных направлениях за период с 1965 г. по настоящее время систематизированы в представленной им диссертации на тему «Физические процессы и методы формирования световых пучков в твердотельном лазере для экспериментов по нагреву плазмы», которая состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы из 430 наименований. Объем диссертации: 301стр., включая 118 рисунков, 6 таблиц. Каждая глава завершается выводами. Используется сквозная нумерация ссылок и рисунков; обзор литературных источников проводится по главам параллельно с изложением исследований автора. 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. Полный список основных публикаций автора приводится в диссертации. Остановимся на содержании диссертации.

Во введении представлен краткий исторический обзор развития работ по лазерам для нагрева плазмы: от первых лазеров на неодимовом стекле с накачкой импульсными лампами до современных неодимовых лазерных установок мегаджоульного уровня энергии и проектов лазеров-драйверов термоядерного реактора импульсно-периодического режима работы на керамике с иттербием и полупроводниковой накачкой. Четко изложены актуальность темы диссертации, цели и задачи работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, краткое содержание диссертации, дана информация об апробации работы на всесоюзных, российских и международных конференциях. Приведены формулировки положений, выносимых на защиту.

В первой главе представлен обзор свойств лазерных сред на основе неодимовых стекол. Рассматривается структура рабочего перехода  ${}^4F_{3/2}-{}^4I_{11/2}$  в стеклах на длине волны  $\approx 1,06\text{ мкм}$ , приводится иллюстрация контура неоднородно уширенной линии люминесценции силикатного стекла с переходами между штарковскими компонентами. Обсуждаются эксперименты по измерению времени жизни ионов неодима  $\tau_{21}$  в стеклах на нижнем лазерном уровне  ${}^4I_{11/2}$  (для большинства матриц  $\tau_{21} < 1\text{ нс}$ ). Представлены результаты выполненных автором первых экспериментов по генерации и усилению наносекундных импульсов в лазерах на неодимовом стекле, где была достигнута мощность излучения свыше 1 ГВт в импульсах длительностью 50 нс. Обсуждаются первые эксперименты по получению лазерной плазмы при фокусировке нс импульсов неодимового лазера на твердотельную мишень в вакуумной камере и в газовую среду. В этих экспериментах была показана большая эффективность вложения энергии лазера в твердотельную мишень, а не в газовую, поскольку развитие пробоя в газе препятствует концентрации энергии лазера в малом объеме.

Вторая глава посвящена формированию импульсов излучения с длительностью  $10^{-8} - 10^{-11}$  с в задающих генераторах для лазерных установок на неодимовом стекле. Автором был реализован лазер на неодимовом стекле с модуляцией добротности резонатора затвором Керра, получены импульсы длительностью 10-30 нс с энергией до 1 Дж. Для обострения переднего фронта импульсов генератора вне резонатора применялись электрооптические затворы, просветляющийся краситель, а также затвор из Al пленки на лавсане, просветлявшейся под действием лазерного излучения; сформированы нс импульсы с крутизной переднего фронта  $\leq 1\text{ нс}$  и контрастом до  $10^6$ . В генераторе на неодимовом стекле с просветляющимся красителем с пассивной синхронизацией мод получены ультракороткие импульсы с длительностью  $\approx 20\text{ пс}$ . Разработаны генераторы на неодимовом стекле и кристалле *Nd:YAG* с периодической модуляцией добротности резонатора затвором Поккельса, излучавшие пуг  $\approx 0,5\text{ нс}$  импульсов. В генераторах с пикосекундными и субнаносекундными импульсами на неодимовом стекле была обнаружена самофокусировка лазерного пучка. Установлено влияние самофокусировки на деградацию временной структуры и снижение контраста импульсов генерации. Определен уровень интенсивности в лазере ( $< 10^8\text{ Вт/см}^2$ ), при котором обеспечивалась генерация пуга одиночных УКИ. Разработанные задающие генераторы применялись в качестве источников нс и пс импульсов излучения в лазерных установках ФИАН.

В третьей главе изложены результаты исследований усиления нс и пс лазерных импульсов в активной среде из неодимового стекла. В усилителях лазерных установок, создававшихся при участии автора, основным видом активных элементов были стержни из неодимового стекла. Автором проведены исследования оптических искажений в стержнях генератора и усилителя, возникавших при накачке лампами, а также паразитных процессов, которые препятствовали созданию высокой инверсии в усилителе. Установлено влияние термонаведенного двулучепреломления в активных элементах на деполяризацию и профиль интенсивности излучения в генераторах и усилителях. В усилителе зарегистрировано формирование импульсов суперлюминесценции с длительностью  $\approx 10^{-8}$  с, которые опустошали инверсию, накопленную в среде при накачке. Создана лазерная система в составе задающий генератор - многокаскадный усилитель на стержнях из неодимового стекла, на выходе которой достигнуты рекордные для того времени параметры излучения: 3–5 нс импульсы с энергией 50–100 Дж с мощностью до  $2 \cdot 10^{10}$  Вт. Зарегистрированы эффекты эволюции временного профиля нс импульсов при усилении в неодимовом стекле в режиме насыщения: перемещение вершины и сокращение длительности усиливаемого импульса. С помощью численного моделирования исследована динамика сброса инверсии по контуру неоднородно-уширенной линии люминесценции рабочего перехода ( $\lambda \approx 1,06$  мкм) между уровнями  ${}^4F_{3/2}$ – ${}^4I_{11/2}$  ионов неодима в стекле при усилении нс импульсов. Получены иллюстрации эффекта «выжигания» спектральных дыр в контуре линии люминесценции излучением различного спектрального состава, а также зависимости коэффициента усиления и съема инверсии от плотности энергии в импульсах с различной длительностью и спектром. Результаты расчётов качественно соответствуют эксперименту. Проведенный автором анализ экспериментальных данных и результаты численного моделирования показали, что эффективному съему инверсии и усилению импульсов с длительностями  $\geq 1$  нс в неодимовых лазерах способствует не только опустошение нижнего лазерного уровня  ${}^4I_{11/2}$  при переходе на основной уровень  ${}^4I_{9/2}$  ( $\tau_{21} \leq 10^{-9}$  с), но и быстрая ( $\tau_t < 10^{-11}$  с) тепловая релаксация ионов неодима по штарковским компонентам лазерного перехода. В созданной при участии автора лазерной системе на неодимовом стекле в составе задающего генератора с самосинхронизацией мод и усилителя впервые достигнута при усилении  $\approx 20$  пс импульсов мощность излучения  $10^{11}$ – $10^{12}$  Вт. При усилении пс импульсов обнаружено ограничение роста плотности энергии лазерного пучка на уровне  $\leq 1$  Дж/см<sup>2</sup>, меньшем плотности энергии насыщения в неодимовом стекле. Установлено, что это ограничение связано с возникновением самофокусировки лазерного пучка в оптической среде усилителя и сопутствующим самофокусировке нелинейных потерь излучения.

Глава 4 посвящена исследованию физических механизмов ограничения мощности и яркости излучения в лазерной установке на неодимовом стекле. Основное внимание здесь уделяется самофокусировке лазерного пучка в оптической среде самой лазерной установки, впервые обнаруженной диссертантом вместе с соавторами. Возникновение в стержнях усилителя за одну вспышку лазера многочисленных нитевидных повреждений, анализ структуры разрушений в объеме и на торцах стержней, сопоставление их с теорией самофокусировки В.И.Беспалова - В.И.Таланова позволили классифицировать наблюдавшиеся явления как мелкомасштабную самофокусировку лазерного пучка в среде лазера. Представлены результаты исследований мелкомасштабной самофокусировки и сопутствующих ей явлений: разрушений в среде лазера, уширения спектра, рассеяния, поглощения лазерного излучения, искажений пространственных и временных

характеристик лазерных импульсов. Обнаружены и исследованы разрушения в усилителях нс и пс импульсов на неодимовом стекле из-за выбросов интенсивности на профиле лазерного пучка при его дифракции на диафрагмах и локальных неоднородностях в оптическом тракте установки. Дифракционные выбросы способствуют развитию самофокусировки и возникновению в среде лазера разрушений, в том числе с характерной квазипериодической структурой в результате расслоения пучка на отдельные самофокусирующиеся фрагменты. Диссертант вместе с соавторами впервые наблюдал на выходе лазерной установки самофокусировку коллимированного лазерного пучка в воздухе. Вызывает интерес проведенный диссертантом эксперимент с дисками из неодимового стекла, где при распространении лазерного пучка с интенсивностью  $10^9$ - $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> были обнаружены разрушения, обусловленные нелинейным эффектом формирования «горячих» изображений от локальных неоднородностей в среде (объяснение эффекта было дано в Ливерморской лаборатории, США). В результате проведенных комплексных исследований нелинейных процессов в среде лазера было установлено, что мелкомасштабная самофокусировка - основной механизм ограничения мощности и яркости излучения в неодимовых лазерах для импульсов  $10^9$ - $10^{12}$  с.

В главе 5 рассматриваются методы формирования пучков в оптическом тракте и на выходе лазерных установок на неодимовом стекле для экспериментов по нагреву плазмы. Один из центральных вопросов при создании твердотельной лазерной системы с короткими импульсами - это подавление самофокусировки. В главе 5 представлен краткий обзор методов подавления самофокусировки: с помощью пространственных фильтров-ретрансляторов, применением излучения с ограниченной когерентностью, при усилении «чирпированных» импульсов и др. Предложенные автором методы борьбы с самофокусировкой: секционирование протяженной среды лазера (стержней из неодимового стекла) на фрагменты (диски), использование в лазере расходящихся пучков, а также «мягких» диафрагм, подавляющих дифракционные выбросы на профиле лазерного пучка, были опробованы в экспериментах и нашли применение в лазерных установках. Надо сказать, что в первых лазерах для нагрева плазмы, созданных при участии автора, такие средства подавления самофокусировки и формирования пучков как вакуумные пространственные фильтры, усилители на дисках и мягкие диафрагмы отсутствовали. Тем не менее, коллектив сотрудников лаборатории КРФ ФИАН, работавший на лазерных установках, получил  $\approx 20$  пс импульсы с энергией 10-20 Дж и провел первые эксперименты по регистрации нейтронов из плазмы, образованной при фокусировке импульсов на мишень из LiD в вакуумной камере. При лазерном нагреве плазмы одной из серьезных проблем является изоляция мишени от фонового излучения лазера и защита самого лазера от отраженного мишенью излучения. Радикальным средством устранения этого эффекта оказалось предложенное Ю.В.Сенатским решение: использовать для воздействия на мишень излучение лазера, преобразованное в коротковолновую гармонику. Небольшая экспериментальная программа по облучению мишеней 2-ой гармоникой неодимового лазера, подтвердившая эффективность предложенного метода, была реализована при участии автора в лаборатории КРФ ФИАН. Облучение мишеней 2-ой и 3-ей гармониками неодимового и йодного лазера применяется в установках для экспериментов по ЛТС. В 5-ой главе рассматривается также предложенный автором метод формирования на выходе многоканальной лазерной установки составных пучков (кластеров пучков), позволяющий оптимизировать систему транспортировки и фокусировки лазерного излучения на мишень. Метод формирования

кластеров пучков был применен при проектировании и создании в ФИАН 108-канальной лазерной установки «Дельфин» с выходной энергией до 2,5 кДж в 2 нс импульсах в 6 составных пучках.

В шестой главе обсуждаются эксперименты с лазерными материалами на основе кристаллов и керамики, которые могут найти применение в импульсно-периодическом лазере для ЛТС с полупроводниковой накачкой. Автор принял участие в ряде экспериментов в ФИАН и в Институте лазерной науки (ИЛН) в Токио (Япония), направленных на изучение свойств новых лазерных материалов. В ИЛН были проведены измерения нелинейного показателя преломления  $n_2$  в оксидных керамиках YAG,  $Y_2O_3$ ,  $Sr_2O_3$ ,  $Lu_2O_3$ , которые позволили выявить преимущества керамики YAG (меньшее значение  $n_2$ ). Результатом проведенных в ряде лазерных центров исследований новых материалов стал выбор в качестве среды, перспективной для импульсно-периодического лазера, керамики Yb:YAG-материала, активно используемого в настоящее время (в том числе при криогенных температурах) в лазерных установках. Во время командировок в ИЛН автор принял также участие в разработке методов формирования инверсии и модового состава излучения в лазерах малой мощности на керамике Nd:YAG, Yb:YAG с селективной (полупроводниковой, лазерной) накачкой. Автором предложены и экспериментально опробованы 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 была получена генерация на скалярных и векторных модах Лагерра–Гаусса низших и высших порядков, многие из полученных мод высших порядков наблюдались впервые. Пучки на модах Лагерра–Гаусса благодаря своим специфическим характеристикам находят много применений, в том числе в областях, смежных с исследованиями по ЛТС: для ускорения частиц, в исследованиях взаимодействия излучения с веществом, в лазерной технологии.

В заключении к диссертации подведены итоги работы.

Разработка принципов построения и оптических схем современных твердотельных лазеров для ЛТС, их элементной базы опирается во многом на результаты исследований физических процессов в оптической среде мощного лазера и методов формирования пучков, которые были выполнены еще при создании первых неодимовых лазерных установок для нагрева плазмы. Многие исследования в этом направлении: разработка методов генерации наносекундных и пикосекундных импульсов в неодимовом лазере; исследования распространения этих импульсов в усилителе, 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, транспортировки лазерных пучков к мишени, развязки лазера от мишени были выполнены в ФИАН при участии Ю.В. Сенатского. В этой связи актуальность диссертации не вызывает сомнений и обусловлена тем, что проблемы, исследованию и решению которых посвящена представленная работа, возникают и решаются и в настоящее время при разработке лазерных систем нового поколения.

Наиболее важные результаты, полученные диссертантом:

1. Впервые в мире (1965 год) была создана лазерная система на неодимовом стекле (длина волны излучения  $\lambda \approx 1,06 \mu\text{м}$ ) в составе генератора с модуляцией добротности и усилителя 20-50нс импульсов с энергией 10-60Дж и мощностью свыше  $10^9 \text{Вт}$  и проведены первые эксперименты по нагреву плазмы лазерным излучением. Экспериментальная демонстрация этой лазерной установки показала перспективность разработки неодимовых лазеров для нагрева плазмы.

2. Проведены экспериментальные исследования по генерации и усилению наносекундных и пикосекундных импульсов в лазерах на неодимовом стекле:

- разработаны генераторы импульсов с длительностью в диапазоне  $10^{-8}$ - $10^{-11}$  с на неодимовом стекле и кристалле *Nd:YAG* и методы формирования временного профиля импульсов и контраста вне резонатора электрооптическими и просветляющимися затворами;

- проведены наблюдения эффектов эволюции временного профиля нс импульсов при усилении в неодимовом стекле в режиме насыщения: перемещения вершины и сокращения длительности импульсов;

- проведен анализ динамики сброса инверсии при усилении нс импульсов в неодимовом стекле с учетом штарковской структуры и неоднородного уширения уровней лазерного перехода  ${}^4F_{3/2}$ - ${}^4I_{11/2}$ ;

- проведены исследования термооптических искажений в активных элементах неодимового лазера;

- впервые зарегистрировано формирование в активной среде усилителя на неодимовом стекле «гигантских» импульсов суперлюминесценции наносекундной длительности;

- созданы лазерные систем, на выходе которых впервые достигнуты рекордные для своего времени параметры излучения: импульсы длительностью 3-5нс с энергией 50-100Дж с мощностью  $\approx 2 \times 10^{10} \text{Вт}$ , а также  $\approx 20 \text{пс}$  импульсы с мощностью  $10^{11}$ - $10^{12} \text{Вт}$ .

3. Проведены исследования нелинейных процессов, протекающих при высокой интенсивности лазерного излучения в активной среде и оптических элементах неодимовых лазеров и приводящих к ограничению мощности и яркости излучения на выходе лазерной установки:

- обнаружены разрушения на микровключениях в неодимовом стекле при усилении 20нс импульсов с плотностью энергии 4-5Дж/см<sup>2</sup>;

- в генераторах пикосекундных и субнаносекундных импульсов на неодимовом стекле обнаружена самофокусировка лазерного пучка в оптической среде самого лазера, установлено ее влияние на параметры генерации;

- обнаружены и исследованы мелкомасштабная самофокусировка (ММС) лазерного пучка с интенсивностью  $10^9$ - $10^{10} \text{Вт/см}^2$  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 с длительностью  $10^{-9}$ - $10^{-12}$ с;

- обнаружены и исследованы разрушения в усилителе из-за выбросов интенсивности на профиле лазерного пучка при его дифракции на диафрагмах и локальных неоднородностях в оптическом тракте установки; выбросы способствуют ММС пучка и возникновению в среде лазера разрушений, в том числе с характерной квазипериодической структурой в результате расслоения пучка на самофокусирующиеся фрагменты;

- в структуре дисков из неодимового стекла при распространении лазерного пучка с интенсивностью  $10^9$ - $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> обнаружены разрушения, связанные с эффектом «горячих» изображений от локальных неоднородностей в среде (объяснение эффекта дано в Ливерморской лаборатории, США);

- на выходе неодимового лазера с пс импульсами при плотностях мощности  $\approx 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> обнаружена самофокусировка лазерного пучка в воздухе.

4. Разработаны методы подавления самофокусировки в лазерной установке: 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.

5. Предложен метод нагрева мишени излучением высшей гармоники лазера-драйвера: для оптической развязки системы лазер-мишень, увеличения контраста лазерного импульса и эффективности вложения излучения лазера в мишень.

6. Предложен метод формирования на выходе многоканальной лазерной установки кластеров пучков, позволяющий оптимизировать систему транспортировки лазерного излучения на мишень. Метод формирования кластеров пучков использовался при проектировании и создании в ФИАН лазерной установки «Дельфин».

7. Разработаны методы формирования профиля инверсии и модового состава излучения в лазерах на основе кристаллов и керамики:

- 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 внутриврезонаторной 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; многие моды высших порядков наблюдались впервые.

Достоверность результатов исследований, выводов диссертации и защищаемых положений не вызывает сомнений. Представленные автором экспериментальные данные, наблюдавшиеся закономерности и новые эффекты получили адекватное теоретическое описание, результаты расчетных работ соответствуют эксперименту. Автор представлял доклады по результатам исследований, включенных в диссертацию, на национальных и международных конференциях, выступал на семинарах в научных центрах страны и за рубежом. Положения, сформулированные в диссертации, получили признание, публикации автора хорошо известны и неоднократно цитировались.

Информация о физических процессах, протекающих в оптической среде мощных твердотельных лазеров, предложенные в диссертации методы формирования световых пучков использовались при создании лазерных систем. В этом состоит практическая значимость результатов, полученных в диссертации. Обнаружение самофокусировки лазерного пучка в оптической среде самой лазерной установки стимулировало исследования этого явления и разработку методов подавления самофокусировки в лазерных системах. Обнаружение влияния дифракционных выбросов на профиле лазерного пучка на развитие самофокусировки и разрушений в среде лазера стимулировало разработку методов сглаживания профиля пучка «мягкими» диафрагмами. Предложенный метод облучения мишеней излучением высшей гармоники лазера-драйвера применяется в лазерных установках в исследовательских центрах, работающих по программе ЛТС.

Личный вклад автора. Диссертационная работа выполнена в Физическом Институте им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. 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. 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. Идеи расчетных работ, методы формирования лазерных пучков в генераторах и усилителях, рассмотренные в диссертации, предложены автором.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Как диссертация, так и автореферат отвечают критериям действующего «Положения о порядке присуждения учёных степеней» (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013г.).

К качеству рукописи и оформлению работы существенных замечаний нет.

По существу диссертации можно сделать следующие замечания.

1. На рис.46 приведена зависимость коэффициента усиления от плотности энергии входного сигнала. Утверждается, что наблюдаемое уменьшение коэффициента связано не с насыщением перехода, а с наличием существенных потерь, связанных с самофокусировкой. Для подтверждения этого важного вывода было бы правильным привести на этом же графике теоретические зависимости коэффициента усиления без учета самофокусировки и В-интеграла, накапливаемого в усилителях.

2. В параграфе 3.2 описаны исследования тепловых искажений в лазерных стержнях, в частности термонаведенная деполяризация в виде креста. Из текста не понятно, какие из результатов получены автором впервые, а какие были уже известны на момент проведения измерений.

3. Во втором выводе Главы 3 (стр.125) утверждается, что “в усилителе на неодимовом стекле экспериментально зарегистрированы эффекты эволюции временного профиля нс импульсов при усилении в режиме насыщения...”. В тексте нет рисунков, подтверждающих этот результат. Кроме того, не обсуждается его количественное соответствие теоретическим предсказаниям Франца, Нодвига и Таланова:

Frantz L.M., Nodvik J.S. Journal of Applied Physics, 34, 2346 (1963).

Таланов В.И. Известия ВУЗов. Радиофизика, 7, 491 (1964).

Эти замечания не влияют на обоснованность положений и выводов диссертации, не умаляют достоинств работы и не влияют на её общую положительную оценку. Диссертация «Физические процессы и методы формирования световых пучков в твердотельном лазере для экспериментов по нагреву плазмы» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена крупная научная проблема в области физики и техники мощных твердотельных лазеров. На основе выполненных исследований созданы уникальные лазерные комплексы с рекордными для своего времени параметрами и проведены эксперименты по взаимодействию излучения с веществом. Представленные в диссертации результаты несомненно полезны при разработке современных мощных твердотельных лазерных систем.

Диссертационная работа «Физические процессы и методы формирования световых пучков в твердотельном лазере для экспериментов по нагреву плазмы» полностью отвечает критериям, предъявляемым к докторским диссертациям действующим «Положением о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013г.) и является научно-квалификационной работой, в которой решена крупная научная проблема в области лазерной физики, а именно - исследованы основные физические процессы в мощных твердотельных лазерах, предложены и разработаны методы формирования лазерных пучков для физических экспериментов, а её автор Сенатский Юрий Всеволодович заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 - лазерная физика.

Официальный оппонент,  
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук,  
заместитель директора ИПФ РАН по научной работе



Хазанов Ефим Аркадьевич

ФАНО России  
Федеральное государственное  
бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики  
Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)  
603950, Россия, Нижний Новгород, дом 46.  
Тел. 8-831-436-57-36, e-mail: khazanov@appl.sci.nnov.ru

Подпись Е.А. Хазанова заверяю  
Ученый секретарь ИПФ РАН  
кандидат физико-математических наук  
И.В. Корюкин



Список основных статей официального оппонента Е.А. Хазанова, опубликованных в 2011-2015 гг. по теме диссертации Ю.В. Сенатского « Физические процессы и методы формирования световых пучков в твердотельном лазере для экспериментов по нагреву плазмы», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21- лазерная физика

1. Vyatkin, A. G.; Khazanov, E. A. Thermally induced beam distortions in laser ceramics at strong birefringence. JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA B-OPTICAL PHYSICS Vol.32, Issue: 6, Pages:1084-1096 (2015).
2. Mironov, S. Yu; Ginzburg, V. N.; Gacheva, E. I., Khazanov, E. A.; et al. Use of polyethylene terephthalate for temporal recompression of intense femtosecond laser pulses. LASER PHYSICS LETTERS Vol. 12, Issue: 2, 025301 (2015).
3. Kuz'mina, M. S.; Khazanov, E. A. Enhancement of temporal contrast of high-power laser pulses in an anisotropic medium with cubic nonlinearity. QUANTUM ELECTRONICS Vol. 45, Issue: 5, Pages: 426-433 (2015).
4. Kuzmin, A. A.; Khazanov, E.A.; Kulagin, O.V.; et al. Neodymium glass laser with a phase conjugate mirror producing 220 J pulses at 0.02Hz repetition rate. OPTICS EXPRESS Vol. 22, Issue: 17, Pages: 20842-20855 (2014).
5. Shaykin, A. A.; Fokin, A. P.; Khazanov, E. A., Soloviev, A.; et al. Laser amplifier based on a neodymium glass rod 150 mm in diameter. QUANTUM ELECTRONICS Vol.44 , Issue: 5, Pages: 426-430 (2014).
6. Zelenogorskii, V. V.; Andrianov, A. V.; Gacheva, E. I., Khazanov, E. A.; et al. Scanning cross-correlator for monitoring uniform 3D ellipsoidal laser beams QUANTUM ELECTRONICS Vol. 44, Issue: 1, Pages: 76-82 (2014).
7. Vadimova, O. L.; Mukhin, I. B.; Kuznetsov, II, Khazanov, E. A.; et al. Calculation of the gain coefficient in cryogenically cooled Yb:YAG disks at high heat generation rates Quantum Electronics Vol. 43, Issue: 3 Pages: 201-206 (2013).
8. Mironov, S. Y.; Lozhkarev, V. V.; Khazanov, E. A.; et al. Compression of femtosecond pulses with a Gaussian temporal and spatial intensity distribution Quantum Electronics Vol. 43, Issue: 8 Pages: 711-714 (2013).
9. Perevezentsev, E. A.; Mukhin, I. B.; Kuznetsov, II; et al. Cryogenic disk Yb:YAG laser with 120-mJ energy at 500-Hz pulse repetition rate. Quantum Electronics Vol. 43, Issue: 3 Pages: 207-210 (2013).
10. Kuzmina, M. S.; Khazanov, E. A.; Shaykin, A. A.; et al. Influence of cubic nonlinearity on accuracy of polarization transformation by means of a quarter-wave plate. Optics Express Vol. 21, Issue: 1 Pages: 135-144 (2013).
11. Kuzmin, A. A.; Kulagin, O. V.; Khazanov, E. A.; et al. Neodymium glass laser with a pulse energy of 220 J and a pulse repetition rate of 0.02 Hz Quantum Electronics Vol. 43 Issue: 7 Pages: 597-599 (2013).

12. Kuz'mina, M. S.; Khazanov, E. A.  
Small-scale instability of elliptically polarised waves in a medium with cubic nonlinearity.  
Quantum Electronics Vol. 43 Issue: 1 Pages: 21-28 (2013).
13. Snetkov, I. L.; Silin, D. E.; Palashov, O. V., Khazanov, E. A.; et al.  
Study of the thermo-optical constants of Yb doped Y2O3, Lu2O3 and Sc2O3 ceramic materials.  
Optics Express Vol. 21 Issue: 18 Pages: 21254-21263 (2013).
14. Mironov, S.; Lozhkarev, V.; Luchinin, G., Khazanov, E. A.; et al.  
Suppression of small-scale self-focusing of high-intensity femtosecond radiation. Applied  
Physics B-Lasers and Optics Vol. 113 Issue: 1 Pages: 147-151 (2013).
15. Perevezentsev, E.; Mukhin, I.; Vadimova, O. Khazanov, E. A.; et al.  
Yb:YAG ceramics application for high energy cryogenic disk amplifier development.  
Physica Status Solidi a-Applications and Materials Science Vol. 210 Issue: 6 Pages: 1232-1234  
(2013).

Официальный оппонент,  
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук,  
заместитель директора ИПФ РАН по научной работе

Хазанов Ефим Аркадьевич

20.11.2015

ФАНО России  
Федеральное государственное  
бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики  
Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)  
603950, Россия, Нижний Новгород, дом 46.  
Тел. 8-831-436-57-36, e-mail: khazanov@appl.sci-nnov.ru

Подпись Е.А. Хазанова заверяю  
Ученый секретарь ИПФ РАН  
кандидат физико-математических наук  
И.В. Корюкин

