

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, члена-корреспондента РАН,  
Гаранина Сергея Григорьевича  
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.

Диссертация Сенатского Юрия Всеволодовича «Физические процессы и методы формирования световых пучков в твердотельном лазере для экспериментов по нагреву плазмы» посвящена изучению процессов, протекающих в активных средах твердотельных лазеров, разработке методов генерации и усиления наносекундных (нс) и пикосекундных (пс) импульсов, формированию лазерных пучков с высокой мощностью и яркостью излучения и созданию первых неодимовых лазеров для экспериментов по нагреву плазмы, а также исследованию новых перспективных твёрдотельных активных сред.

Диссертация обобщает работы Ю.В.Сенатского в области разработки и применений лазеров на неодимовом стекле, выполненные за 50 лет (первые публикации автора по теме диссертации относятся к 1965 году). Этот период характеризуется бурным развитием физики и техники неодимовых лазеров. Были исследованы фундаментальные физические процессы, протекающие в активной неодимосодержащей среде – такие как динамика накопления и сброса инверсии, релаксационные процессы по компонентам лазерных уровней, механизмы уширения линии люминесценции. Обнаружены и получили объяснение нелинейные физические эффекты, проявляющиеся при распространении интенсивного лазерного излучения в оптических элементах лазерных установок: крупномасштабная и мелкомасштабная самофокусировка лазерного пучка, формирование «горячих» изображений локальных неоднородностей, уширение спектра, вынужденное комбинационное рассеяние лазерного излучения, наведенное в активной среде поглощение излучения. При создании лазерных систем с уровнем энергии, превышающим десятки джоулей и с длительностью импульса излучения от десятков пикосекунд до единиц

наносекунд пришлось решать ряд научных и технических задач, связанных с подавлением дифракционных эффектов, устойчивостью усилительных каскадов к самовозбуждению и повышению контраста лазерного импульса на мишени, выбором оптимальной архитектуры установок, конструкции усилительных модулей. В 60-е и 70-е годы XX века эти работы активно велись в Физическом институте им. П.Н.Лебедева (ФИАН) под руководством академика Н.Г.Басова. В эти годы вклад отечественной науки и техники в развитие лазеров на неодимовом стекле был во многом определяющим и показал перспективность применения этого класса лазерных систем для исследований в области инерциального термоядерного синтеза. Принципы построения современных установок для ЛТС базируются на этой основе. Ю.В.Сенатский стоял у истоков проводимых исследований практически по всем перечисленным выше направлениям и его значительный вклад в квантовую электронику и лазерную физику твёрдотельных лазеров несомненен.

Текст работы на 301 листе и содержит введение, 6 глав, заключение, список литературы из 430 наименований. Содержание работы достаточно полно представлено в 73 публикациях автора, в их числе 61 в изданиях, включённых в перечень ВАК и систему Web of Science, 6 авторских свидетельств.

**Во введении** представлен подробный исторический обзор развития физики и техники лазеров на неодимовом стекле, обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, изложены краткое содержание диссертации, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, информация об апробации работы на всесоюзных, российских и международных конференциях.

**В первой главе** проведён обзор основных свойств неодимосодержащих лазерных сред, приведены результаты численного моделирования динамики сброса инверсии и усиления наносекундных импульсов в неодимовом стекле с учетом штарковской структуры и неоднородного уширения лазерного перехода  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ . Основным результатом здесь является установление того факта, что быстрая тепловая релаксация ионов  $Nd^{3+}$  в стекле ( $\tau_r < 10^{-11}$  с) по штарковским компонентам уровней перехода способствует (наряду с релаксацией ионов на основной  ${}^4I_{9/2}$  уровень,  $\tau_{21} \leq 1$  нс) эффективному съему инверсии и усилению в неодимовых лазерных установках, работающих с импульсами длительностью  $\geq 1$  нс. Представлены результаты первых экспериментов по генерации и усилению наносекундных импульсов в лазерах на неодимовом силикатном стекле. Приводятся результаты экспериментов по получению с помощью этого

лазера плотной лазерной плазмы, показавшие большую эффективность вложения световой энергии в твердотельную мишень.

**Вторая глава** посвящена формированию коротких ( $10^{-8}$ - $10^{-11}$  с) импульсов в задающих генераторах для лазерных установок на неодимовом стекле. Создан генератор наносекундных импульсов с активной модуляцией добротности резонатора и вырезанием нс импульса с крутым (0,2нс) передним фронтом и контрастом до  $10^6$  электрооптическими затворами Керра и Поккельса. В генераторе с пассивной синхронизацией мод были получены ультракороткие (20 – 30)пс лазерные импульсы. Существенно, что в процессе исследований были получены данные, указывающие на флуктуационную природу формирования УКИ. В генераторах с периодической модуляцией добротности резонатора затвором Поккельса на неодимовом стекле и кристалле *Nd:YAG* получены субнаносекундные импульсы излучения. Разработанные задающие генераторы широко применялись в качестве источников излучения в лазерных установках ФИАН.

**В третьей главе** изложены результаты расчётно-теоретических и экспериментальных исследований усиления наносекундных и пикосекундных лазерных импульсов в активной среде из неодимового стекла. Подробно описана численная модель динамики сброса инверсии и усиления, учитывающая штарковскую структуру неоднородно уширенной линии люминесценции и процессы быстрой релаксации ионов  $Nd^{3+}$  по штарковским компонентам рабочего перехода. Проведено сравнение результатов расчётов с имеющимися на тот момент времени экспериментами. Приведены результаты экспериментальных исследований усиления нс и пс импульсов в лазерных установках на неодимовом стекле, построенным по схеме задающий генератор – усилители.

**Глава 4** посвящена исследованию физических механизмов ограничения мощности и яркости излучения в лазерной установке на неодимовом стекле. Приведены результаты экспериментов, в которых впервые были обнаружены разрушения в объеме активной среды, вызванные наличием микровключений платины. Подробно изложены результаты исследований мелкомасштабной самофокусировки пучка (ММС) и сопутствующих физических явлений. Доказано, что мелко-масштабная самофокусировка является основным механизмом, ограничивающим мощность и яркость излучения лазеров на неодимовом стекле. Результаты исследований, представленные в этой главе, во многом определили облик лазерных систем следующего поколения. Оптические схемы этих лазеров обязательно содержат узлы, подавляющие развитие ММС в

активной среде и оптических элементах (мягкие диафрагмы, пространственные фильтры, схемы перестроение изображений).

**В главе 5** изложены методы формирования световых пучков в лазерной установке на неодимовом стекле, результаты экспериментальной проверки метода нагрева мишеней излучением на высших гармониках и метода формирования на выходе многоканальной лазерной установки составных лазерных пучков (кластеров пучков), позволяющего оптимизировать систему транспортировки и фокусировки излучения на мишень. Результаты этих исследований также нашли применение при конструировании новых лазерных установок.

**Глава 6** посвящена изложению результатов разработки методов формирования световых пучков в лазерных средах на кристаллах и керамике, активированных ионами  $Nd^{3+}$  и  $Yb^{3+}$ , при селективной накачке. Предложены и экспериментально исследованы методы формирования профиля инверсии и селекции поперечных мод в лазерах на керамике  $Nd:YAG$ ,  $Yb:YAG$  с селективной накачкой, что позволило получить генерацию на многих модах Лагерра–Гаусса низших и высших порядков.

Каждая глава завершается выводами. В заключении приведены основные итоги работы.

**Актуальность** темы диссертации не вызывает сомнений и обусловлена тем, что проблемы, исследованию и решению которых посвящена представленная работа, являются в основном фундаментальными и чрезвычайно остро стояли в период создания первых неодимовых лазеров. Многие, подчас неожиданные, физические эффекты в твёрдотельных лазерах впервые наблюдались, были исследованы и получили объяснение именно при создании первых лазеров на неодимовом стекле с относительно небольшой (десятки и сотни джоулей) энергией. С ними приходится сталкиваться и их необходимо решать и при разработке современных лазерных систем нового поколения. Это касается исследованных в диссертации методов генерации лазерного импульса заданной длительности, процессов усиления и энергосъёма запасённой энергии, нелинейных процессов в активной среде лазера и в его оптических элементах, лучевой прочности оптических компонент, конструирования усилительных модулей, оптимизации оптических систем установки, повышению контраста лазерного излучения на мишени.

К числу наиболее существенных результатов, обладающих несомненной **новизной**, можно отнести следующие.

1. Результаты экспериментальных исследований генерации и усиления наносекундных и пикосекундных лазерных импульсов в неодимосодержащих активных средах:

- разработка семейства задающих генераторов с широким диапазоном длительности лазерного импульса (от десятков пс до десятков нс), которые широко применялись в качестве источников излучения в лазерных установках ФИАН;

- экспериментальное наблюдение эффекта эволюции временного профиля нс импульсов при усилении в режиме насыщения;

- обнаружение и исследование термо-оптических искажений в активных элементах;

- обнаружение и определение условий формирования «гигантских» импульсов суперлюминесценции;

- разработка способов оптической изоляции усилительных каскадов.

Итогом этих работ явилось создание лазерных систем, на выходе которых впервые достигнуты рекордные для своего времени параметры излучения: импульсы длительностью 3–5 нс с энергией 50–100 Дж с мощностью  $\approx 2 \cdot 10^{10}$  Вт, а также  $\approx 20$  пс импульсы с мощностью  $10^{11}$ – $10^{12}$  Вт.

2. Результаты исследований нелинейных физических 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:

- установление определяющей роли микровключений платины на объёмную лучевую прочность активных сред неодимовых лазеров;

- обнаружение мелкомасштабной самофокусировки (ММС) излучения с образованием нитевидных повреждений среды в активном элементе и сопутствующих этому эффекту явлений (уширение спектра, вынужденное комбинационное рассеяние лазерного излучения, наведенное в активной среде поглощение излучения);

- обнаружение фокусировки излучения и разрушения в дисковых активных элементах, обусловленных нелинейным эффектом формирования «горячих» изображений (объяснение этого эффекта было дано позднее в работах американских специалистов);

- определение источников возмущений, являющихся «затравкой» для развития ММС (дифракционные эффекты, локальные неоднородности).

3. Результаты разработки способов уменьшения нелинейных потерь из-за ММС (секционирование протяженной активной среды на фрагменты – диски, разделенные воздушными промежутками; увеличение угла расходимости лазерного пучка; применение «мягких» диафрагм).
4. Предложение и экспериментальная проверка способа облучения мишени излучением на второй гармонике, что обеспечивает эффективную развязку усилительного тракта от мишени и значительно повышает контраст лазерного излучения.
5. Предложение и экспериментальная реализация метода формирования на выходе многоканальной лазерной установки кластеров лазерных пучков, что позволяет оптимизировать систему транспортировки и фокусировки излучения на мишень.
6. Предложение и экспериментальная реализация методов формирования профиля инверсии и селекции поперечных мод в лазерах на новых перспективных материалах (керамики  $Yb:YAG$ ,  $Nd:YAG$  с селективной накачкой). Получение таким способом генерации на модах Лагерра-Гаусса низших и высших порядков.

**Достоверность и обоснованность** результатов исследований, выводов диссертации и положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнений и базируется на следующем. Наблюдаемые физические явления подтверждены детальным теоретическим анализом и их совпадением с результатами, полученными другими исследователями. Практически все исследованные автором физические эффекты и явления в активных средах лазеров на неодимовом стекле явились предметом дальнейших многочисленных исследований и разработок в ведущих лазерных центрах России и мира. Публикации Ю.В.Сенатского хорошо известны в научном сообществе и неоднократно цитировались. Ряд обнаруженных эффектов (например, мелкомасштабная самофокусировка, фокусировка излучения и разрушения в расположенных последовательно дисковых активных элементах) получили своё исчерпывающее объяснение в последующих работах других научных групп.

**Практическая значимость** результатов для дальнейшего развития науки также несомненна и состоит в следующем. Как отмечалось выше, на начальном этапе разработок лазеров на неодимовом стекле со многими протекающими в активных средах и в оптических элементах явлениями пришлось столкнуться впервые. Их исследование и объяснение позволили создать лазерные системы с килоджоульным уровнем энергии. Но, так как эти эффекты носят

фундаментальный характер и вызываются взаимодействием интенсивного лазерного излучения с активными (усиливающими) либо пассивными компонентами лазерных установок, то при переходе на качественно новый (мегаджоульный) уровень энергии они стоят не менее остро. Их решение, уже на новой элементной базе, во многом опирается на проведённые Ю.В.Сенатским исследования. По существу, представленная диссертация содержит объём результатов и знаний, необходимый всем разработчикам лазерных установок следующего поколения с твёрдотельной активной средой. Необходимо также отметить, что результаты исследований, выполненных Ю.В.Сенатским, стимулировали в дальнейшем развитие и совершенствование технологий в соответствующих отраслях промышленности.

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

Диссертация написана хорошим литературным языком и практически свободна от стилистических и грамматических ошибок. К качеству рукописи и оформлению работы существенных замечаний нет.

Личный вклад автора. Диссертационная работа выполнена в Физическом Институте им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. Все основные результаты работы получены автором лично либо под его руководством и при непосредственном творческом участии.

По существу диссертации можно сделать следующие **замечания**.

1. Представляется излишним в разделе 1.1, стр.43, описание эксперимента по определению времени релаксации  $\tau_{21}$  с уровня  ${}^4I_{11/2}$  на основной уровень  ${}^4I_{9/2}$ . Интерпретация результатов опытов, как и отмечает автор, была некорректна и не позволила верно определить время релаксации. Здесь была бы уместна также ссылка на работу *C.Bibeau, J.Trenholme, S.A.Payne. "Pulse Length and Terminal-Level Lifetime Dependence of Energy Extraction for Neodimium-Doped Phosphate Amplifier Glass". IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.32, N0.8, pp.1487-1496 (1996)*, в которой для стекла LG-750 измерено  $\tau_{21} \approx 250$  пс и подробно рассмотрено влияние длительности усиливаемого лазерного импульса на эффективность энергосъёма.

2. В разделе 5.1 (стр.185) описано предложение сотрудников ГОИ для подавления ММС использовать принцип увеличения длительности

усиливаемого импульса с последующей его компрессией с помощью ВКР либо ВРМБ либо дисперсионных элементов. Такой принцип (CPA для спектрально-упорядоченных импульсов) действительно широко применяется при конструировании сверхмощных лазерных систем с ультракороткой (десятки и сотни фемтосекунд) длительностью лазерного импульса на выходе. Однако физическая причина применения CPA в этих установках совершенно другая и заключается в том, что даже при очень слабых интенсивностях, при которых ещё не достигается порог ММС, произойдёт сильное дисперсионное расплывание усиливаемого сверхкороткого импульса.

Высказанные замечания не влияют на обоснованность положений и выводов, содержащихся в диссертации, не умаляют достоинств работы и не влияют на её общую **положительную** оценку.

Представленная Ю.В.Сенатским 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 твёрдотельных лазеров. На основе выполненных исследований созданы лазерные системы, на выходе которых впервые достигнуты рекордные для своего времени параметры излучения и проведены многочисленные эксперименты по взаимодействию излучения с веществом, получению и изучению свойств высокотемпературной лазерной плазмы. Результаты этих работ показали перспективность применения лазеров на неодимовом стекле в качестве инструмента для проведения исследований в области физики высоких плотностей энергии и управляемого термоядерного синтеза. Дальнейшее развитие работ в этом направлении в ведущих мировых лазерных центрах подтверждает этот вывод.

Представленные в диссертации результаты проведённых Ю.В.Сенатским исследований могут найти практическое применение при разработке современных мощных твёрдотельных лазерных систем, в частности, в Российском Федеральном ядерном центре – Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики.

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, протекающие в активных средах и оптических элементах твёрдотельных лазеров и разработаны методы формирования световых пучков для экспериментов по нагреву плазмы, а её автор Сенатский Юрий Всеволодович заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 - лазерная физика.

Официальный оппонент, генеральный конструктор по лазерным системам, заместитель директора ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» Госкорпорации по атомной энергии «Росатом» по лазерно-физическому направлению, директор института лазерно-физических исследований, член-корреспондент РАН, профессор по кафедре «Физика плазмы», доктор физико-математических наук, Гаранин Сергей Григорьевич

607188, Нижегородская обл., г.Саров, пр. Мира, д.37, тел. +7(83130)-4-46-10, e-mail: garanin@vniief.ru



Подпись С.Г.Гаранина удостоверяю:

ученый секретарь ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», доктор математических наук А.Н.Сизов

«РФЯЦ-ВНИИЭФ», доктор физико-



*Сизов*

*31.03.2016*

Список основных статей официального оппонента С.Г. Гаранина, 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. Бельков С.А., Бондаренко С.В., Вергунова Г.А., Гаранин С.Г., Гуськов С.Ю., Демченко Н.Н., Доскоч И.Я., Кучугов П.А., Змитриенко Н.В., Розанов В.Б., Степанов Р.В., Яхин Р.А. Термоядерные мишени прямого облучения лазерным импульсом мегаджоульного уровня. ЖЭТФ. 2015. Т. 148, No. 4, с. 784.
2. Bel'kov, S. A.; Voronich, I. N.; Garanin, S. G. et al. Study of the apodization of a laser beam by serrated aperture stops for high-power installations of laser thermonuclear synthesis. Journal of optical technology. 2015. Vol.82. P.330-338.
3. Bel'kov, S. A.; Voronich, I. N.; Garanin, S. G. et al. Aperture partitioning of a light beam in high-power installations for laser thermonuclear synthesis. Journal of optical technology. 2015. Vol. 82. P. 339-347.
4. Bel'kov, S. A.; Voronich, I. N.; Garanin, S. G. et al. Formation of a spatial laser-beam profile in a channel of high-power neodymium facilities. QUANTUM ELECTRONICS. 2015. Vol. 45. P. 503-507.
5. Garanin, S. G.; Bel'kov, S. A.; Rogozhnikov, G. S. et al. PS-1/S1 picosecond streak camera application for multichannel laser system diagnostics. QUANTUM ELECTRONICS. 2014. Vol.44.P.798-800.
6. Garanin, S. G.; Starikov, F. A.; Shnyagin, R. A. Applying the Stochastic Parallel Gradient Algorithm in the Auto Alignment Problem for the Amplifier Channel of the UFL-2M Facility Optics and spectroscopy. 2013. Vol.114. P. 851-858.
7. Chizhikov, S. I.; Garanin, S. G.; Goryachev, L.V. et al. Acousto-optical adaptive correction of a chirped laser pulse spectral profile in a Nd-phosphate glass regenerative amplifier LASER PHYSICS LETTERS. 2013. Vol. 10.P. 015301.
8. 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 // Appl.Optics.2012. Vol. 51. P. 5921.
9. Garanin S.G., Epatko I.V., Istomin R.I., L'vov L.V., Malyutin A.A., Serov R.V., and Sukharev S.A. Risky intensity peaks resulting from nonlinear holographic imaging //Appl. Optics.2011. Vol. 50. P.3733.
10. Bogachev, V. A.; Garanin, S. G.; Dolgoplov, Yu. V. et al. Phasing of multichannel laser radiation upon stimulated Brillouin scattering. QUANTUM ELECTRONICS. 2012. Vol. 42 P.531-534.
11. Гаранин С.Г. Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии//УФН. 2011. Т. 181. С. 434.



/Гаранин С. Г./