

ОТЗЫВ

официального оппонента

Яшина Владимира Евгеньевича – доктора физико-математических наук, профессора, начальника отделения «Институт лазерной физики» АО «Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова» 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 физических процессов в среде твердотельных лазеров, обуславливающих как усиление лазерных импульсов, так и ограничение энергии и мощности таких лазеров. Исследуемые и разрабатываемые автором лазеры предназначены для экспериментов по нагреву плазмы, в частности, для экспериментов по лазерному термоядерному синтезу, что обуславливает требования к длительности и форме импульсов, а также энергетике лазерного излучения.

Актуальность работы

Несомненная актуальность представленной на отзыв диссертационной работы связана с необходимостью создания мощных лазерных систем с уникальными характеристиками для проведения экспериментов по нагреву плазмы. Идея использования мощных лазеров для нагрева плазмы и реализации условий инерциального термоядерного синтеза была впервые высказана Н.Г. Басовым в 1961 г. и опубликована в совместной с О.Н. Крохиным статье в 1964 г., т.е. практически сразу после создания лазера Т.Мейманом в 1960 г. На основании этого предложения академиком Н.Г. Басовым была поставлена задача разработки и создания лазеров для реализации инерциального термоядерного синтеза. Ю.В. Сенатский подключился к решению этой грандиозной задачи сразу же после прихода в ФИАН в составе группы экспериментаторов и теоретиков лаборатории КРФ ФИАН. Первые же оценки энергии, необходимой для реализации термоядерных условий, показали, что уровень энергии наносекундных и, возможно, пикосекундных импульсов должен превышать сотни джоулей. Этот уровень энергии существенно превышал те уровни, которые существовали в начале 60-х годов. При создании лазерных систем с

уровнем энергии, превышающим десятки джоулей и с нано- пикосекундной длительностью импульса излучения пришлось решать целый ряд физических и технических задач, связанных с подавлением дифракционных и нелинейных эффектов, ограничивающих энергию и мощность излучения, устойчивостью усилительных каскадов к самовозбуждению, выбором оптимальной многоэлементной архитектуры установок, конструкции усилительных модулей. Эти работы, в которых самое активное участие принимал Ю.В. Сенатский, активно велись в ФИАН под руководством Н.Г. Басова. Результаты этих многолетних, пионерских для своего времени работ обобщены в представленной Ю.В. Сенатским диссертации.

Другим актуальным направлением работы Ю.В. Сенатского, которым он занимался на протяжении последних лет, является исследование перспективных лазерных активных сред на основе активированной керамики для нового поколения лазеров, способных работать в импульсно-периодическом режиме. Такие лазеры необходимы для создания драйверов для реальных термоядерных электростанций. Ю.В. Сенатский выполнил пионерские исследования в области исследования физических и оптических свойств новых лазерных сред, активированных ионами неодима и иттербия и показал перспективность их использования в мощных и эффективных лазерных системах.

Научная новизна

Ю.В. Сенатский в процессе работы над диссертацией получил ряд новых научных результатов:

- Автором впервые создан ряд лазерных систем на неодимовом стекле с рекордными на то время параметрами.
- Зарегистрирована и исследована самофокусировка излучения в лазерных генераторах и усилителях, приводящая к ухудшению пространственно-временных параметров их излучения и, в конечном счете, к оптическому разрушению элементов. Показано важное влияние дифракционных выбросов интенсивности излучения на развитие мелкомасштабной самофокусировки.
- Автором зарегистрирован и исследован ряд новых эффектов при взаимодействии мощного лазерного излучения с твердотельными и газовыми мишенями.
- Предложен ряд схемных решений для оптимизации оптических схем мощных лазерных систем.
- Проведены измерения нелинейного показателя преломления ряда новых перспективных лазерных керамических материалов.
- Предложен новый метод профилирования инверсии и селекции поперечных мод в лазерах.

Большинство исследований сочетает как экспериментальный, так и аналитический подходы, а также создание прототипов приборов, в которых реализованы новые идеи. Таким образом, можно утверждать, что диссертационная работа Сенатского Юрия Всеволодовича обладает несомненной новизной и содержит решение целого ряда задач, имеющих важное значение для лазерной физики.

Содержание работы

Текст диссертации изложен на 301 странице, содержит 118 рисунков и состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 430 источников. Результаты опубликованы в 73 работах соискателя в их числе 61 в изданиях, включённых в перечень ВАК и систему Web of Science, 6 авторских свидетельств. Структура диссертации хорошо продумана, диссертация обладает внутренней логикой и единством, материал работы хорошо и понятно изложен.

Во **введении** представлен подробный обзор различных вариантов лазера-драйвера для нагрева плазмы и реализации инерциального термоядерного синтеза, обосновывающий выбор лазера на неодимовом стекле. Обсуждаются различные модификации лазера на неодимовом стекле, обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи работы, излагается краткое содержание диссертации, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Дается информация об апробации работы на многочисленных конференциях, симпозиумах и семинарах.

В **первой главе** приводятся основные сведения о неодимовом стекле как активной среде лазеров с большой энергией и мощностью коротких импульсов. Именно неодимовое стекло используется в настоящее время в мегаджоульных лазерных установках для исследований по проблеме термоядерного синтеза, таких как «NIF», «LMJ». В этой же главе, в параграфе 1.2 описываются первые эксперименты с участием автора по генерации и усилению наносекундных импульсов в лазере на неодимовом стекле, показавшие возможность получения импульсов с пиковой мощностью порядка 1000 МВт. Впервые был применен затвор-развязка на основе тонкой алюминиевой пленки для обострения переднего фронта импульса и развязки усилителя от задающего генератора. С помощью созданного лазера были проведены одни из первых экспериментов по созданию плазмы на твердотельной LiH мишени. Делается неочевидный для того времени вывод о преимуществе этой мишени над газовой мишенью с точки зрения максимальной концентрации энергии и реализации термоядерных условий для будущих экспериментов с большой энергией.

Во **второй главе** исследуются особенности методов формирования наносекундных, субнаносекундных и пикосекундных импульсов. В параграфе 2.1 исследуется генератор с модуляцией добротности затвором Керра для генерации 20 нс импульсов достаточно большой (1 Дж) энергии. В этом же параграфе рассматриваются вопросы обострения переднего фронта наносекундных импульсов различными затворами. В параграфе 2.2 описан один из первых лазеров на неодимовом стекле с самосинхронизацией мод и пикосекундной длительностью импульса. Экспериментально зафиксировано вредное влияние самофокусировки с точки зрения ограничения мощности импульсов и искажения их формы.

В **третьей главе** представлены результаты исследования усилителей на неодимовом стекле нано- и пикосекундных импульсов. Обсуждаются различные схемы усилителей на основе дисков, плит (слэбов) и стержней. Делается обоснованный вывод о преимуществах использования дисков в лазерных системах с очень большой энергией при возможности использования стержней для лазеров умеренной энергии. Автор к тому времени располагал именно такой аппаратурой. К наиболее важным результатам, полученным автором в этой главе, можно отнести исследование особенности нелинейного усиления импульсов в режиме насыщения усиления и моделирование режима сброса инверсии в такой неоднородно-уширенной среде, как неодимовое стекло. Было показано, что нелинейное усиление может приводить к существенному изменению формы усиленного импульса, что особенно важно в лазерах для ЛТС. Результаты моделирования сброса инверсии позволили разработать программы реального моделирования процесса усиления и предсказать эффективность энергосъема для различных условий усиления, включая влияние ширины спектра исходного импульса.

В **четвертой главе** диссертации рассматривается ограничивающее влияние различных эффектов на энергию и мощность излучения лазеров на неодимовом стекле. Проведенные исследования показали, что наиболее опасными эффектами для лазеров на неодимовом стекле являются мелкомасштабная самофокусировка и оптическое разрушение. Кроме того, в ряде случаев может наблюдаться вынужденное комбинационное рассеяние и слабое нелинейное поглощение.

В **пятой главе** обсуждаются методы формирования пространственной структуры пучков в усилительной системе и на выходе лазерной системы. В параграфе 5.1. предложена возможность подавления крупномасштабной самофокусировки в расходящихся лазерных пучках. В этой же главе далее рассмотрены и другие методы подавления уже мелкомасштабной самофокусировки на основе секционирования усиливающей среды, пространственной фильтрации и использовании аподизирующих диафрагм.

Использование некоторых из этих методов позволило автору вместе с коллективом сотрудников лаборатории КРФ ФИАН создать одноканальную лазерную установку с рекордными на тот момент параметрами (мощность 10^{11} - 10^{12} Вт, яркость 10^{18} Вт.см²стер). На этой установке были проведены эксперименты по взаимодействию пикосекундных импульсов с мишенями и получены первые нейтроны. Для изоляции основной усилительной системы от отраженного плазмой излучения автором было предложено использовать преобразование частоты, что позволило также повысить контраст импульсов. Далее автором описаны работы по созданию и использованию многоканальной установки «Дельфин» в ФИАН для изучения лазерной плазмы. Автором был предложен новый на тот момент подход для фокусировки многих пучков на мишень с помощью объединения их в кластеры. Замечу, что существенно позже этот подход был использован на значительно более мощной установке «NIF» в Ливерморской национальной лаборатории.

В шестой главе приведены более поздние результаты работы автора с новыми лазерными материалами на основе кристаллов и керамики. Эти материалы, обладающие в отличие от неодимового стекла существенно большей теплопроводностью, позволяют создавать мощные лазеры для инерциального термоядерного синтеза, работающие с достаточно большой частотой повторения импульсов (>10 Гц). С использованием таких лазеров можно потенциально рассчитывать на создание энергетически выгодных термоядерных или гибридных реакторов. В параграфе 6.1 данной главы автором обсуждаются критерии выбора активной среды для таких лазеров драйверов. Одним из важных параметров является нелинейный показатель преломления, определяющий опасность развития самофокусировки. Автором совместно с зарубежными коллабораторами были проведены изменения этого параметра в оксидной керамике YAG, Y₂O₃, Sr₂O₃, Lu₂O₃, показавшие преимущество применения Yb:YAG в мощных лазерах. Другие параметры этого кристалла или керамики подтверждают этот вывод. Параграф 6.3 данной главы посвящен новому способу формирования поперечных мод Лагерра-Гаусса в лазере на Yb:YAG с лазерной диодной накачкой. Автором успешно продемонстрирована возможность эффективного формирования таких мод и делается вывод, что мощные лазеры на модах Лагерра-Гаусса могут применяться в лазерной технологии, исследованиях по взаимодействию излучения с веществом и для ускорения частиц.

В заключении подводятся общие итоги и формулируются основные результаты работы.

Достоверность и обоснованность результатов исследований, выводов диссертации и положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнений. Наблюдаемые физические эффекты подтверждены теоретическим анализом и их совпадением с результатами

других исследователей. Практически все исследованные автором эффекты в лазерах на неодимовом стекле явились предметом дальнейших исследований и разработок в ведущих лазерных центрах России и мира. Публикации Ю.В. Сенатского хорошо известны в научном сообществе и многократно цитировались (количество цитирований - 358, индекс Хирша – 8 в системе РИНЦ на сайте elibrary.ru).

Научная и практическая значимость диссертационной работы

Научная значимость диссертационной работы Ю.В. Сенатского заключается, на мой взгляд, в первую очередь в очень подробном и часто пионерском исследовании и анализе нелинейных эффектов, которые могут протекать в неодимовом стекле – основной активной среде для лазеров, изучаемых в диссертации. Это позволило автору четко разграничить возможности возникновения и развития этих эффектов по отношению к интенсивности лазерного излучения

Практическая значимость результатов, полученных Ю.В. Сенатским, для дальнейшего развития лазерной науки и техники несомненна. Так, например, им впервые сформулирована важность учета эффекта самофокусировки при создании лазеров на неодимовом стекле. Разработанные в том числе и им методы подавления этого процесса позволили создать лазеры сначала джоульного, а затем на новой элементной базе килоджоульного и мегаджоульного уровня. Разработанные и созданные Ю.В. Сенатским с коллективом лаборатории КРФ ФИАН лазерные установки на неодимовом стекле с наносекундной длительностью импульса обладали рекордными на тот момент параметрами и послужили полигонами для изучения новых физических эффектов и разработок в области новых технологий.

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.

Замечания по тексту диссертации

По существу диссертации можно сделать следующие замечания.

1. На стр. 199 диссертации отмечается, что «только несколько типов мягких диафрагм реально используются в мощных лазерных установках и среди них диафрагмы на светорассеянии и диафрагмы с изрезанным краем («зубчатые» диафрагмы) [226, 332, 333]». Отмечу, что список используемых аподизирующих диафрагм не ограничивается этими двумя примерами. Автор не упоминает, например, диафрагму, основанную на поляризационном принципе (С.Б. Паперный, В.А.Серебряков, В.Е.Яшин Формирование плавного поперечного распределения интенсивности светового пучка с помощью фазовращающей пластинки. Квантовая электроника, 1978, т.5, с.2059), обладающую рядом достоинств по сравнению с выше перечисленными. Такая диафрагма используется, например, в мощном субпеттаваттном лазере в Институте прикладной физики РАН.
2. На мой взгляд, из темы диссертации несколько выпадает раздел, посвященный модам Лагерра-Гаусса. Возможность применения лазеров с довольно экзотическими модами для нагрева плазмы, особенно в задачах инерциального термоядерного синтеза вызывает вопросы.

Сделанные замечания ни в коей мере не влияют на мою сугубо положительную оценку диссертационной работы Ю.В. Сенатского. Считаю, что Ю.В. Сенатский заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент

Яшин Владимир Евгеньевич

20.04.2016 г.

доктор физико-математических наук, профессор
начальник научного отделения «Институт лазерной физики»,
АО «Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова»

Почтовый адрес: 190034, Санкт-Петербург, Кадетская линия, д.5, корп.2.

Телефон: 812-328-5734

e-mail: vyashin@yandex.ru

Подпись В.Е. Яшина заверяю

Ученый секретарь АО «ГОИ им. С.И.Вавилова»

Кандидат технических наук

И.А. Забелина



Список основных статей официального оппонента В.Е. Яшина, 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. Г. Х. Ким, Ч. Янг, Б. Ли, Е. Г. Салль, С. А. Чижов, **В. Е. Яшин**, У. Канг «Исследование эффективности поглощения лазерной диодной накачки и термооптических эффектов в мощном лазере на кристаллах Yb:KGW. Квантовая электроника, 45(3), 211-215 (2015).
2. G.H. Kim, J. Yang, S.A. Chizhov, E.G. Sall, A.V. Kulik, **V.E. Yashin**, U. Kang “High brightness Q-switched oscillator and regenerative amplifier on dual-crystal Yb:KGW laser”. Laser Physics Letters, 10, 125004 (2013).
3. G. H. Kim, J.H. Yang, **V.E.Yashin**, A.V.Kulik, E.G.Sall, S.A. Chizhov, U. Kang. “Power limitation and pulse distortions in Yb:KGW laser system with chirped pulse amplification”. Quantum electronics, 43(8), 725-730 (2013)
4. G. H. Kim, J.H. Yang, **V.E.Yashin**, A.V.Kulik, E.G.Sall, S.A. Chizhov, U. Kang. “Application of Yb:KGd.(WO₄)₂ crystals to lasers with high brightness beams”. Laser Physics, 23, 05504 (2013)
5. G. H. Kim, J.H. Yang, **V.E.Yashin**, A.V.Kulik, E.G.Sall, S.A. Chizhov, U. Kang. “Spectral shaping of femtosecond laser pulses for gain narrowing suppression under regenerative amplification in Yb:KYW crystals”. Journal of Optical Technology, 80(3), 142-147 (2013).
6. S.N. Vlasov, E.V. Kuposova, **V.E. Yashin**. “Spectrum broadening and compression of high-power laser pulses in quasi-periodical systems with cubic nonlinearity”. Quantum Electronics, 42(11), 989-995 (2012)
7. Guang Hoon Kim, Juhee Yang, Elena Sall, Sergey Chizhov, Andrey Kulik, Dae-Sic Lee, **Vladimir Yashin**, and Uk Kang, “Development of Compact Femtosecond Yb:KYW Oscillators: Simulation and Experiment”. Journal of the Korean Physical Society, Vol. 61(3), 365-370 (2012).
8. G. H. Kim, J.H. Yang, D.S. Lee, **V.E.Yashin**, A.V.Kulik, E.G.Sall, S.A. Chizhov, U. Kang. “High power and high efficiency lasers on crystals Yb:KYW with end pumping operating in CW and pulsed regimes”. Quantum electronics, 42(4), 292-297 (2012).
9. G. H. Kim, J.H. Yang, D.S. Lee, **V.E.Yashin**, A.V.Kulik, E.G.Sall, S.A. Chizhov, U. Kang. “High average-power ultrafast CPA Yb:KYW laser system with dual-slab amplifier”, Optics Express, 20(4), 3434-3442 (2012).

10. V.D.Vinokurova, E.G.Sall, V.E.Yashin. "Comparative analysis of diffraction gratings for femtosecond pulse compression systems based on numerical simulation of their parameters", Optics and Spectroscopy, 110(6), 961-966 (2011).

11. N. V. Vysotina, N. N. Rosanov and V. E. Yashin. "Modeling of systems for broadening of spectrum of petawatt laser pulses and for their nonlinear compression". Optics and Spectroscopy, 110(6), 973-981 (2011).

Официальный оппонент

Яшин Владимир Евгеньевич

20.04.2016 г.

доктор физико-математических наук, профессор,
начальник научного отделения «Институт лазерной физики»,
АО «Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова»

Почтовый адрес: 190034, Санкт-Петербург, Кадетская линия, д.5, корп.2.

Телефон: 812-328-5734

e-mail: vyashin@yandex.ru

Подпись В.Е. Яшина заверяю

Ученый секретарь АО «ГОИ им. С.И. Вавилова»,

Кандидат технических наук

И.А. Забелина

