

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук

Чекалина Сергея Васильевича

на диссертационную работу **Шутова Алексея Викторовича**

«Нелинейные процессы при усилении мощных субпикосекундных УФ лазерных импульсов в KrF лазерной системе и их распространении в атмосфере», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 «Лазерная физика».

В диссертации соискателя Шутова Алексея Викторовича выполнен цикл исследований нелинейно-оптических явлений при усилении и распространении в воздухе и входящих в его состав газах мощных УФ лазерных импульсов на длине волны 248 нм. Актуальность темы диссертационного исследования предопределяется потребностью получения мощных УФ лазерных импульсов для большого круга задач, таких как генерация ВУФ излучения, создания плазменных каналов и волноводов в атмосфере. В работе Шутова А.В. исследуется широкий спектр научных проблем, связанных с многофотонной ионизацией воздуха 248-нм лазерным излучением, эволюцией фотоионизационной воздушной плазмы, множественной филаментацией такого излучения и её влиянием на предельные параметры лазерных систем на основе прямого многопроходного усиления УФ импульсов пикосекундной длительности в KrF усилителях с накачкой электронным пучком.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 179 страниц, включая 54 рисунка и 2 таблицы. Во Введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, его научная и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов работы.

Первая глава содержит обзор литературы на темы кинетических процессов в фотоионизационной воздушной плазме и процессов усиления коротких импульсов в эксимерных лазерных системах.

Вторая глава диссертации посвящена обзору используемого в работе экспериментального оборудования: электроразрядного KrF лазера, генерирующего перестраиваемое узкополосное излучение, титан-сапфирового лазера с утроением частоты и уникальной гибридной лазерной системы ГАРПУН-МТВ. В этой же главе обсуждаются схемы многопроходного усиления импульсов в эксимерных усилителях, диагностики фотоионизационной газовой плазмы и регистрирующая аппаратура.

Третья глава посвящена измерениям сечений многофотонной ионизации воздуха и входящих в его состав газов на длине 248 нм, исследованию гибели электронов в процессах трехчастичного прилипания к кислороду в воздухе различной влажности. В этой главе уделено особое внимание роли резонансных процессов при наработке электронов в воздухе.

Впервые показано, что для данного излучения, определяющую роль играют резонансные переходы в молекулах воды, которые на три порядка увеличивают сечение многофотонной ионизации паров воды, по сравнению с сечением многофотонной ионизации кислорода. Помимо этого, в третьей главе показано, что эффективная константа скорости трехчастичного прилипания электрона к кислороду в воздухе может двукратно возрасти с ростом влажности.

Четвёртая глава описывает исследование нелинейных потерь при многопроходном усилении субтераваттных УФ лазерных импульсов в KrF усилителях с накачкой электронным пучком. Измерены параметры неоднородностей интенсивности лазерного пучка, связанные с мелкомасштабной самофокусировкой и множественной филаментацией излучения, в модельных экспериментах измерен коэффициент нелинейного поглощения 248-нм излучения в CaF₂, материале окон усилителей, показано, что нелинейные потери, связанные с самофокусировкой излучения, ограничивают выходную энергию при многопроходном усилении.

Пятая глава посвящена экспериментам по подавлению мелкомасштабной самофокусировки и филаментации излучения за счет самодефокусировки 248-нм излучения в Хе, где за счет двухфотонного резонанса излучения с атомным уровнем кубическая поляризуемость среды имеет отрицательный знак.

В Заключение сформулированы основные научные результаты диссертации.

Наиболее важными результатами диссертации являются следующие:

- 1) Детально исследована фотоионизация воздуха импульсным излучением на длине волны 248 нм, измерены эффективные сечения фотоионизации компонентов воздушной среды для излучения на длине волны 248 нм и проведено их сравнение с известными литературными данными.
- 2) Детально исследован механизм трехчастичного прилипания электронов к кислороду. На основе экспериментально исследованной зависимости времени прилипания электронов от напряженности электрического поля и влажности воздуха, а также численного исследования кинетического уравнения для энергетического спектра электронов получена феноменологическая формула для времени прилипания.
- 3) Исследованы потери, связанные с нелинейным поглощением, рассеянием и уширением спектра излучения при множественной филаментации в выходных окнах усилителей из CaF₂.
- 4) Экспериментально продемонстрировано влияние керровской дефокусировки в Хе на формирование отдельного филамента в ансамбле их хаотического множества в УФ-излучении, прошедшем через кювету длиной 2,5 м, наполненную Хе под давлением 0,1 атм.

Основные результаты работы обладают оригинальностью и новизной, измеренные константы скорости многофотонной ионизации и распада фотоионизационной плазмы могут быть использованы при численном моделировании нелинейного распространения УФ излучения, атмосферной плазмохимии, газового разряда и т.п. Продemonстрированное подавление множественной филаментации может быть использовано для снижения

нелинейных потерь при усилении УФ импульсов в KrF усилителях и для сохранения профиля пучка при вводе излучения в атмосферу.

Достоверность полученных в работе результатов подкреплена согласованностью с выводами литературных источников по теме диссертации в тех случаях, когда такие результаты имеются, а также тем, что ряд экспериментальных данных хорошо согласуется с результатами численного моделирования. Кроме того, достоверность результатов в ряде случаев подкрепляется исследованиями одного явления различными методиками. Полученные результаты прошли широкую апробацию на 16 международных конференциях и опубликованы в 11 статьях в рецензируемых научных журналах, таких как Applied Physics Letters, Physics of Plasmas, Квантовая Электроника и др.

Достоинством диссертации является использование автором диссертации различных источников излучения, таких как узкополосный KrF лазер, титан-сапфировый лазер с утроением частоты и уникального комплекса на мощных KrF усилителях с электронной накачкой, что позволило охватить весь спектр поставленных задач, а также детальный анализ и калибровка диагностической аппаратуры для измерения концентрации электронов по проводимости лазерной плазмы филамента в продольной схеме регистрации.

В целом диссертация Шутова А.В. представляет собой законченное научное исследование, которое, к сожалению, не лишено ряда недостатков:

1. Защищаемое положение 3 "Множественная филаментация коллимированного широкоапертурного пучка приводит к нелинейным потерям в оптических элементах и активной среде KrF усилителей при многопроходном усилении импульсов. Нелинейное поглощение и рассеяние излучения, а также уширение спектра за пределы полосы усиления ограничивают выходную энергию субпикосекундных УФ импульсов в KrF усилителях" аналогично результатам работ, по исследованию нелинейных потерь при усилении УКИ в твердотельных лазерных системах, выполненных, в том числе, и в ФИАНе еще в прошлом веке (ни на одну из этих работ автор, к сожалению, не ссылается).
2. Из приведенного в главе 3 текста не совсем понятно назначение коэффициента фотоотрыва R_0 .
3. Из текста диссертации не следует приведенное в выводах к главе 3 утверждение, что "При средней интенсивности в лазерном импульсе $I > 10^9 \text{ Вт/см}^2$, лазерное излучение на длине волны 248 нм отрывает более 80% залипших электронов".
4. Фраза «Кроме того, окна KrF усилителей, ввиду высоких значений линейного и нелинейного показателей преломления CaF_2 , могут вносить дополнительный вклад в формирование филаментации пучка» (с. 137) не согласуется с проведенными автором экспериментами, из которых видно, что упомянутый вклад является не «дополнительным», а основным.
5. В выводах на с. 140 с. 162 утверждается, что «Экспериментально исследовано явление насыщения выходной энергии при усилении УКИ в эксимерных KrF усилителях». На самом деле в работе идет речь о нелинейных потерях энергии, связанных в основном с самофокусировкой, поэтому термин «насыщение» здесь неадекватен.

6. Фраза «напомним, что положение филаментов задаётся, в первую очередь, блочной структурой выходного окна оконечного усилителя» (с. 145) никак не следует из предыдущего текста.

Приведённые выше замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Тематика диссертационной работы соответствует специальности 01.04.21 «Лазерная физика», автореферат правильно отражает её содержание. Список цитируемой литературы полностью соответствует содержанию работы.

Таким образом, представленная Шутовым Алексеем Викторовичем диссертация «Нелинейные процессы при усилении мощных субпикосекундных УФ лазерных импульсов в KrF лазерной системе и их распространении в атмосфере» удовлетворяет требованиям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а автор работы, Шутов Алексей Викторович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 Лазерная физика.

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник, и.о. зав. лабораторией

Спектроскопии Ультрабыстрых Процессов

Института спектроскопии РАН (ИСАН)

д.ф.-м.н., профессор _____ Чекалин Сергей Васильевич

«26» августа 2020 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Спектроскопии Российской Академии Наук (ИСАН)

Почтовый адрес 108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5, ИСАН,

тел. 8(495) 851-02-37

e-mail: chekalin@isan.troitsk.ru, shekalin@yandex.ru

Подпись д.ф.-м.н., проф. Сергея Васильевича Чекалина удостоверяю:

Ученый секретарь ИСАН к.ф.-м.н.



Е.Б. Перминов

Список основных научных публикаций и.о. зав. лаб. Спектроскопии ультрабыстрых процессов ИСАН д.ф.-м.н.Чекалина Сергея Васильевича по теме диссертации Шутова Алексея Викторовича «Нелинейные процессы при усилении мощных субпикосекундных УФ лазерных импульсов в K₂F лазерной системе и их распространении в атмосфере», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - «лазерная физика».

1. Компанец В.О., Шипило Д.Е., Николаева И.А., Панов Н.А., Косарева О.Г., Чекалин С.В., «Нелинейное усиление резонансного поглощения при филаментации импульса среднего инфракрасного диапазона в газах высокого давления», *Письма в ЖЭТФ*, **111**(1-2), 27-31, 2020
2. S. V.Chekalin, A. E. Dormidonov, V. O. Kompanets, E. D. Zaloznaya and V. P. Kandidov «Light bullet supercontinuum», *JOSA*, **36**(2), A43-A53, 2019.
3. С.В. Чекалин, В.О. Компанец, Е.Д. Залозная, В.П. Кандидов, «Влияние дисперсии групповой скорости на фемтосекундную филаментацию бессель-гауссова пучка», *Квант. электроник*, **49** (4), 344-349, 2019
4. С.В. Чекалин, В. О. Компанец, А. Е. Дормидонов, В. П. Кандидов, «Динамика световых пульс в однородных диэлектриках», *УФН*, Том 189-299-305, 2019
5. В.П. Кандидов, В. О. Компанец, С. В. Чекалин, «Роль многофотонной ионизации в коротковолновом уширении спектра световой пули среднего ИК-диапазона», *Письма в ЖЭТФ*, **108**(5), 307-311, 2018
6. С. В. Чекалин, В. О. Компанец, А. Е. Дормидонов, В. П. Кандидов, «Длина пробега и спектр световых пульс среднего ИК диапазона длительностью в один цикл в прозрачных диэлектриках», *Квант. электроника*, **48**(4), 372-377, 2018
7. С.В. Чекалин, В.О. Компанец, А.Е. Дормидонов. В.П. Кандидов «Влияние наведенных центров окраски на частотно-угловой спектр световой пули излучения среднего ИК диапазона во фториде лития» *Квант. Электроника*, **47**(3), 259-265, 2017
8. С. В. Чекалин, В.О. Компанец, А. Е. Дормидонов, Е. Д. Залозная, В. П. Кандидов, «Спектр суперконтинуума при филаментации лазерных импульсов в условиях сильной и слабой аномальной дисперсии групповой скорости в прозрачных диэлектриках», *Квант. электроника*, **47**(3), 252-258, 2017
9. SVChekalin, V O Kompanets, A VKuznetsov, A E Dormidonov and V P Kandidov «Regular 'breathing' of a near-single-cycle light bullet in mid-IR filament», *Laser Physics Letters*, **13**, 065401, 2016
10. А. Е. Dormidonov, V. O. Kompanets, S. V. Chekalin, V. P. Kandidov, «Giantly blue-shifted visible light in femtosecond mid-IR filament in fluorides», *Optics Express*. **23**(22), 29202-29210, 2015