

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук

Кандидова Валерия Петровича

**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».**

Диссертация Шутова А.В. представляет собой экспериментальное исследование в области лазерной физики и нелинейной оптики импульсного ультрафиолетового излучения высокой мощности. В ней рассматриваются проблемы фотоионизации воздушной среды, эволюции наведенной лазерной плазмы, а также формирование и подавление множественной филаментацией в усиливающей среде и атмосфере при воздействии УФ импульсов. Эти проблемы привлекают внимание исследователей не только с фундаментальной точки зрения, но и с прикладной, в первую очередь, для различных задач атмосферной оптики мощного лазерного излучения. Следует отметить, что исследования в фемтосекундной атмосферной оптике сосредоточены, в основном, на излучении ближнего, а в последние годы и среднего ИК – диапазонов, для которых развита техника генерации мощного лазерного излучения и существуют коммерческие системы. Работ по нелинейной атмосферной оптике УФ-излучения относительно немного, что связано, в первую очередь, с небольшим числом лазеров высокой мощности в этом спектральном диапазоне. Однако, в ряде задач фотоионизации и генерации лазерной плазмы в воздухе имеет несомненное преимущество УФ-излучение, энергия кванта которого, а с ней и эффективность фотоионизации значительно выше. Диссертационная работа Шутова А.В., включающая широкий круг исследований как фотоионизации воздушных компонентов, так и множественной филаментации в эксимерном KrF усилителе и в атмосфере при распространении мощного импульсного излучения УФ диапазона, является, безусловно, актуальной в современной лазерной физике.

Автором диссертации использованы различные источники излучения, такие как узкополосный KrF лазер, титан-сапфировый лазер с утроением частоты и уникальный комплекс на мощных KrF усилителях с электронной накачкой, что позволило охватить весь спектр поставленных задач. Заслуживает уважения детальный анализ и калибровка

диагностической аппаратуры для измерения концентрации электронов по проводимости лазерной плазмы филамента в продольной схеме регистрации.

В диссертации большое внимание уделено изучению резонансно-усиленной многофотонной ионизации компонент воздушной среды при генерации лазерной плазмы в УФ-излучении фемто- и наносекундной длительности. Здесь следует отметить большую целенаправленность в детальном исследовании фотоионизации воздуха импульсным излучением на длине волны 248 нм и в поиске вклада именно резонансно – усиленного механизма. Автором выполнены всесторонние исследования концентрации электронов в различных газах высокой чистоты, в сухом и влажном воздухе при воздействии импульсами нано и фемтосекундной длительности. На основе обработки большой серии экспериментов определено, что для УФ-излучения концентрация фотоэлектронов в плазме воздушных компонент возрастает пропорционально третьей степени интенсивности, что соответствует прямой фотоионизации в кислороде и резонансно-усиленной – в азоте, потенциал ионизации которого значительно выше. Большое значение имеют результаты измерений эффективных сечений фотоионизации компонент воздушной среды для излучения на длине волны 248 нм и их сравнение с известными литературными данными. Эти результаты достойны быть представленными в справочной литературе.

В задаче об эволюции низкоплотной лазерной плазмы в воздухе детально исследован механизм трехчастичного прилипания электронов к кислороду. На основе экспериментально исследованной зависимости времени прилипания электронов от влажности и численного исследования кинетического уравнения для энергетического спектра электронов получена для времени прилипания феноменологическая формула, которая может быть полезной в анализе рекомбинации лазерной плазмы во влажном воздухе. Интересной и новой является идея получения долгоживущей лазерной плазмы в воздухе с помощью второго задержанного лазерного импульса, осуществляющего отрыв прилипших электронов. Экспериментальные результаты автора открывают некоторую перспективу в увеличении до сотни наносекунд времени жизни лазерной плазмы в воздухе, что может найти практическое применение в ряде задач атмосферной оптики, связанных, например, с управлением стоком атмосферного электричества, с созданием виртуальных СВЧ волноводов.

В исследованиях множественной филаментация импульсов УФ диапазона автором рассмотрено влияние этого явления на усиление и формирование мощного излучения в многокаскадной лазерной системе “ГАРПУН-МТВ” при различном числе проходов в каналах усиления. Регистрацией люминесценции в стекле К8 получена картина распределения множества горячих точек в выходном пучке одиночного импульса

мощностью 0,2 ТВт на расстоянии 25 м от выходной апертуры усилителя и получены оценки диаметра, мощности и плотности энергии для отдельного филамента. Большую значимость представляют результаты измерения потерь, связанных с нелинейным поглощением, рассеянием и уширением спектра излучения при множественной филаментации его в выходных окнах из CaF₂ усилителей на KrF.

Возможность замедления процесса распада пучка фемтосекундного излучения и возникновения множественной филаментации, исследованная в заключительной пятой главе диссертации, представляет собой практически важный результат, который может найти приложение в системах атмосферной оптики. 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. В системах атмосферной оптики подавление мелкомасштабной самофокусировки и множественной филаментации в УФ импульсах может найти применение в устройствах вывода мощного излучения на открытую трассу.

Структурно в диссертации кроме введения, в котором обосновываются актуальность и мотивация работы, сформулированы ее цель, задачи и положения, выносимые на защиту, представлена первая глава с детальным анализом современного состояния исследований в области лазерной физики и нелинейной оптики импульсного УФ излучения, что позволяет определить место и значимость защищаемой работы. В следующей главе представлены аппаратура и методика эксперимента, что свидетельствует о масштабности выполненных экспериментов и достоверности полученных результатов. В главах 3-5 приведены оригинальные результаты экспериментов и их анализ на основе математических моделей и наглядных физических представлений. В конце работы приведен обширный список публикаций по рассматриваемой теме.

В целом диссертация Шутова А.В. представляет собой глубокое научное исследование, к содержанию которого, однако, приходится сделать ряд замечаний:

1. При анализе влияния молекул воды на ионизацию воздуха ряд утверждений недостаточно обоснован. Так, вывод о малом влиянии канала передачи энергии с возбужденных молекул воды на ионизацию воздуха не подкреплён результатами эксперимента в азоте и кислороде при одинаковом содержании водяного пара (стр.72). Далее, три экспериментальные точки, представленные для сухого воздуха на рис.3.4, могут быть аппроксимированы как кубической, так и квадратичной зависимостью, характерной для влажного воздуха, в котором содержание воды составляло лишь 2,3%. Вместе с этим, интересные результаты,

полученные для зависимости концентрации электронов в плазме при широком изменении относительной влажности воздуха (Рис.3.8б) не обсуждаются в работе.

2. При анализе множественной филаментации в выходном излучении усилителя “Гарпун” автор для определения параметров филамента выделяет отдельную горячую точку в поперечном распределении сигнала люминесценции в стекле К8. Полученная таким образом оценка диаметра филамента вдвое превышает значения, известные в литературе (например, Opt. Commun., v.180, 383, (2000), Opt. Commun., v.197, 131, (2001)), что ставит под сомнение надежность полученных автором оценок. Однако, в работе отсутствует обсуждение столь значительного расхождения. Измерение параметров УФ-филамента в режиме одиночной филаментации, наряду с выполненными в работе, позволило бы проанализировать влияние соседних филаментов и обмен энергии между ними на их параметры при множественном режиме.
3. Предположение о том, что в коллимированном излучении на длине волны 248 нм ограничение роста интенсивности в филаменте не связано с дефокусировкой в наведенной лазерной плазме, не выдерживает критики. Простые оценки показывают, что нелинейный набег фазы, создаваемый плазмой при концентрации электронов $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, всего на один порядок меньше, чем вызванный керровской нелинейностью при интенсивности 10^{11} Вт/см^2 . А поскольку диаметр плазменного канала меньше, чем филамента, то оптические силы плазменной и керровской линз оказываются близки.
4. Возможность замедления развития множественной филаментации с помощью керровской дефокусировки в ксеноне является весьма полезным результатом. Однако анализ, проведенный на основе некоей формулы для перетяжки пучка, вызывает вопросы. Мощность в филаменте взята равной критической мощности самофокусировки, тогда как, ранее на стр.122 она считалась равной $2 P_{cr}$. Для перетяжки пучка в конце кюветы $w(x=2,5\text{м})$ приведено ошибочное значение. Выбор свободного параметра $x_0=3\text{м}$ не обоснован. Такой сомнительный анализ никак не добавляет значимости к полученным экспериментальным результатам по подавлению множественной филаментацией в УФ-диапазоне.
5. При анализе поперечного распределения интенсивности в отдельном филаменте (Рис. 4.9, 5.3, 5.7) автор использует аппроксимацию экспериментальных значений гауссовой кривой в линейном масштабе, что позволяет лишь качественно оценить адекватность аппроксимации. Тогда как, использование

нелинейного масштаба, при котором гауссова функция принимает вид прямой, дает полную картину о точности аппроксимации во всем диапазоне изменения координаты.

В целом диссертация Шутова А.В. представляет собой глубокое исследование, выполненное на высоком научном уровне. В качестве несомненного достоинства диссертационной работы следует отметить уникальность экспериментов, выполненных автором на комплексе мощных источников УФ излучения нано- и фемтосекундной длительности. Полученные в работе результаты являются новыми и вносят значимый вклад в развитие современных представлений о фотоионизации воздушной среды и множественной филаментации при распространении мощного УФ-излучения в атмосфере.

Указанные выше замечания не умаляют ценность проведенных исследований и полученных результатов, которые можно классифицировать как новые, обоснованные и имеющие большое практическое и научное значение.

Содержание опубликованных работ соискателя и автореферата соответствуют основным положениям диссертации.

Работа отвечает требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018), а её автор, Шутов Алексей Викторович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова
Доктор физико-математических наук _____
119991, ГСП-1, Москва Ленинские горы, МГУ имени М. В. Ломоносова, дом 1, строение 2, Физический факультет, тел. 8(495) 939 12 25
e-mail: kandidov@physics.msu.ru



Кандидов Валерий Петрович

26.08.20

Подпись В.П. Кандидова заверяю:

Декан
физического факультета МГУ
имени М. В. Ломоносова
Д. ф.-м. н, профессор _____



Сысов Николай Николаевич

Список основных научных публикаций профессора кафедры общей физики и волновых процессов МГУ им. М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н. Кандидова Валерия Петровича по теме диссертации Шутова Алексея Викторовича «Нелинейные процессы при усилении мощных субпикосекундных УФ лазерных импульсов в KrF 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. E.V. Vasilyev, S.A. Shlenov, **V.P. Kandidov**, «The Multifocus Structure of Radiation upon Femtosecond Filamentation of an Optical Vortex in a Medium with an Anomalous Group Velocity Dispersion». *Opt. Spectrosc.* **126**, 16–24, 2019.
2. S. V. Chekalin, A. E. Dormidonov, V. O. Kompanets, E. D. Zaloznaya and **V. P. Kandidov** «Light bullet supercontinuum», *JOSA B*, **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. V. V. Vasil'tsov, E. N. Egorov, F. V. Lebedev, A. V. Solov'ev, V. Ya. Panchenko, S. A. Shlenov, and **V. P. Kandidov**, «Focusing the quasicontinuous radiation of a waveguide CO₂ laser in the near-surface atmosphere under wind refraction conditions», *J. Opt. Technol.* **85**, 760-764, 2018
6. E.V. Vasilyev, S.A. Shlenov, **V.P. Kandidov**, «Annular light bullets of a femtosecond optical vortex in a medium with anomalous group velocity dispersion», *Laser Physics Letters*, **15**(11), 2018
7. **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
8. 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
9. 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
10. 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