

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки

Института общей физики им. А.М. Прохорова

Российской академии наук
академик РАН

Щербаков Иван Александрович

« 14 » сентября 2016 г.



Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Сунчугашевой Елены Сергеевны «Филаментация фемтосекундного лазерного излучения при жесткой фокусировке в воздухе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

За последние двадцать лет явление филаментации и его применения активно исследовались многими научными группами во всем мире. Основным интересом уделялся исследованию распространения коллимированного или слабосфокусированного излучения, были проведены обширные теоретические, численные и экспериментальные работы, поэтому к настоящему моменту процессы, сопровождающие филаментацию коллимированного или слабосфокусированного излучения, вопросов не вызывают. Однако распространение сфокусированного излучения, а так же происходящие при этом нелинейные оптические процессы, к началу работы над диссертацией рассматривались только в отдельных работах, в которых были получены не всегда согласующиеся друг с другом результаты. Поэтому одной из целей работы Е.С. Сунчугашевой было внести ясность в происходящие процессы при фокусировке фемтосекундных лазерных импульсов. Также в диссертационной работе были получены значения интенсивности излучения и параметров плазменных каналов при филаментации мощного излучения в условиях жесткой фокусировки, которые можно использовать для задач поверхностного структурирования и коммутации высоковольтных электрических разрядов. В работе предложен метод управления параметрами плазменных каналов с помощью модуляций волнового фронта импульса.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Экспериментально обнаружено, что при увеличении жесткости фокусировки фемтосекундного лазерного излучения выше значений числовой апертуры $2-4 \times 10^{-2}$ в процессе филаментации происходит стабилизация как интенсивности излучения, так и электронной плотности и поперечного размера плазменного канала.
2. Для широкого набора числовых апертур фокусирующих оптических систем определены значения электронной концентрации и геометрические параметры плазменных каналов, образующихся при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов.
3. Экспериментально зарегистрировано распространение третьей гармоники, полученной при филаментации лазерного излучения, в угол, не превосходящий геометрическую расходимость пучка.

4. Экспериментально обнаружен и исследован факт влияния апертурных диафрагм разного профиля, внесенных в область распространения пучка, на протяженность образованного при филаментации плазменного канала.
5. Установлено, что сферические aberrации и астигматизм пучка приводят к удлинению плазменного канала при филаментации лазерных импульсов УФ и ИК оптических диапазонах.
6. Экспериментально исследована динамическая модуляция волнового фронта фемтосекундного лазерного импульса излучения путем внесения прозрачного твердого диэлектрика в оптический путь системы.

Достоверность полученных результатов определяется всесторонним анализом экспериментальных данных и сопоставлением с имеющимися в настоящее время теоретическими расчетами. Проведенные научные исследования можно характеризовать как научно обоснованные разработки.

Практическая ценность работы определяется тем, что полученные результаты могут быть использованы для решения следующих задач:

1. Эффективная передача мощности излучения на заданное расстояние.
2. Лазерная обработка материалов фемтосекундными импульсами большой интенсивности.
3. Формирование излучения ультракороткой длительности в ультрафиолетовом диапазоне в малом объеме среды при филаментации сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения в инфракрасном диапазоне.
4. Управление протяженностью образованных при филаментации лазерного излучения плазменных каналов для задач коммутации высоковольтных разрядов.

Конкретное личное участие автора в получении результатов диссертации.

Все представленные в диссертации экспериментальные результаты были получены лично автором, при участии научного руководителя и научного консультанта. Автор участвовал в формулировке задач исследований, обсуждении и интерпретации полученных результатов. Автор непосредственно участвовал в создании и разработке большинства используемых в работе оптических схем, производил обработку и анализ полученных экспериментальных данных, участвовал в написании статей, выступал на конференциях и семинарах с полученными научными результатами.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и списка литературы.

Во **Введении** приведена общая информация об исследуемом явлении филаментации, обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, описана научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, а также представлена информация об апробации результатов исследования, а так же оценка личного вклада автора.

Первая глава посвящена объяснению физики процесса филаментации, а также сопутствующих ей явлений. В главе приведен краткий обзор истории исследований

самофокусировки и филаментации, после чего рассмотрены процессы, происходящие при распространении мощного фемтосекундного лазерного излучения в прозрачной среде, такие как самофокусировка излучения и ионизация среды, обсуждены различные модели филаментации мощных лазерных импульсов, а также описаны явления генерации суперконтинуума и третьей гармоники исходного излучения, сопровождающие филаментацию. Во второй половине первой главы автор приводит описание экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию филаментации коллимированного и сфокусированного излучения. Подробный анализ литературы в этой области позволил автору более наглядно показать актуальность поставленных в данной работе задач исследования филаментации жесткосфокусированного лазерного излучения.

Во **второй главе** представлено подробное описание экспериментальной титан-сапфировой установки, с излучением которой были проведены все эксперименты данной работы, а также приведены характеристики используемых при измерениях приборов.

В **третьей главе** приведены результаты экспериментального исследования влияния параметра фокусировки на филаментацию ультракоротких импульсов двух оптических диапазонов при жесткой фокусировке излучения в воздухе. Определены значения интенсивности УФ и ИК лазерного излучения, а так же геометрические размеры и электронная плотность плазменных каналов, образованных при филаментации при разных фокусировках. Получено, что при достижении числовой апертуры значения в несколько сотых происходит стабилизация этих параметров лазерного излучения и плазменных каналов при дальнейшем увеличении числовой апертуры. Также приведены спектральные исследования излучения при его филаментации в условиях жесткой фокусировки, а именно генерация конической эмиссии в угол, больший геометрической расходимости, и генерация излучения третьей гармоники в меньший геометрической расходимости угол. В последней части главы представлено сравнение параметров плазменного канала и исследование параметров пост-фокальной фокусировки лазерных импульсов при филаментации излучения УФ и ИК оптических диапазонов.

Различные методы управления протяженностью и другими параметрами плазменных каналов с помощью амплитудной и фазовой модуляции волнового фронта импульса исследовались в **четвертой главе**. Рассматривается амплитудная модуляция поперечного профиля излучения путем помещения амплитудных апертурных масок с различными с профилями – круглым, треугольным и сегментированным (состоящим из четырех кругов), - в область распространения пучка соосно с оптической осью излучения. Показано, что внесение апертур приводит к удлинению плазменных каналов, образованных при филаментации лазерного излучения, ввиду непрерывного взаимодействия дифракции и самофокусировки излучения. В качестве фазовой модуляции было рассмотрено внесение в пучок сферической aberrации и астигматизма, а так же проходной оптики. Сферическая aberrация вносилась с помощью адаптивной системы, состоящей из деформируемого зеркала и датчика волнового фронта, а астигматизм – с помощью поворота сферического зеркала. В эксперименте было получено почти двукратное удлинение плазменного канала при распространении излучения в условиях aberrаций. Влияние проходной оптики было рассмотрено для плоскопараллельных кварцевых пластинок, при этом протяженность

плазменного канала также увеличивалась вследствие наведения динамической керровской линзы в воздухе.

В Заключение сформулированы основные результаты работы, среди которых следует выделить следующие результаты:

1. Экспериментально показано, что увеличение числовой апертуры NA фокусирующей оптической системы приводит к увеличению интенсивности ИК лазерного излучения в области фокальной перетяжки при его распространении как в линейном режиме, так и в режиме самофокусировки и плазмообразования, однако при достижении числовой апертуры $NA = 0,02$ интенсивность излучения значительно не изменяется.
2. Показано, что при превышении числовой апертурой значения $2-4 \times 10^{-2}$ происходит стабилизация интенсивности лазерного излучения, поперечного размера и электронной плотности образованного плазменного канала.
3. Экспериментально установлено, что угловая расходимость третьей гармоники, образованной при филаментации излучения, соответствует геометрической расходимости пучка после линзы, в то время как коническая эмиссия распространяется в больший угол. Распространение суперконтинуума на оси излучения не происходит.
4. Получено, что увеличение протяженности плазменного канала при филаментации фемтосекундных УФ и ИК лазерных импульсов происходит как при амплитудной модуляции импульса с помощью апертурных диафрагм, так и при внесении фазовой модуляции волнового фронта импульса. Рассматривалась фазовая модуляция излучения в условиях сферической абберации, при распространении пучка в условиях астигматизма, а также в условиях динамической модуляции волнового фронта пучка при внесении плоскопараллельной кварцевой пластинки.

Экспериментальные исследования, проведенные Е.С. Сунчугашевой, в большинстве случаев сопровождались численным моделированием, выполненным ее коллегами из МГУ им. Ломоносова и ИОА СО РАН. В работе получено хорошее качественное согласие экспериментальных и численных результатов, достоверность и надежность результатов не вызывает сомнений.

По диссертации есть следующие замечания не принципиального характера:

1. При рассмотрении спектрально-угловых характеристик лазерного излучения в условиях филаментации (Раздел 3.3) на рисунке 26 не приведен динамический диапазон значений интенсивности регистрируемого излучения. Это может ввести читателя в заблуждение о том, каковы соотношения сигнал/шум и сигнал третьей гармоники/конической эмиссии в данном эксперименте.
2. Было бы интересно привести коэффициент преобразования исходного излучения в коническую эмиссию, аналогично энергетическим характеристикам выхода третьей гармоники.
3. Не на всех графиках приведены погрешности измерений.

Разумеется, данные замечания не влияют на высокую оценку диссертации в целом. Полученные в работе результаты обладают существенной новизной, а диссертация представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком международном уровне, в работе решена важная научная задача и получены интересные результаты.

Основные результаты диссертации были представлены в девятнадцати докладах на международных и всероссийских конференциях и опубликованы в виде одиннадцати статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Работа была заслушана на семинаре по физике многофотонных процессов ИОФ РАН 8 июня 2016 г.

Автореферат диссертации объективно и полно отражает ее содержание, а положения, выносимые на защиту, соответствуют основным результатам работы.

Диссертация Сунчугашевой Елены Сергеевны «Филаментация фемтосекундного лазерного излучения при жесткой фокусировке в воздухе» обладает практической значимостью и полностью соответствует требованиям к кандидатским диссертациям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор, без сомнения, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - Лазерная физика.

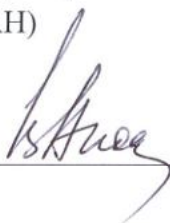
Отзыв составил
кандидат физ.-мат. наук,
научный сотрудник Отдела Мощных Лазеров
Федерального Государственного
Бюджетного Учреждения Науки
Института Общей Физики Им. А.М. Прохорова
Российской Академии Наук (ИОФ РАН)
119991, Москва, ул. Вавилова, 38
+7(499)503-8257
nickel@aha.ru



/Полужков Николай Павлович /

Отзыв на диссертацию Е.С. Сунчугашевой обсужден и одобрен на Ученом Совете Отдела Мощных Лазеров ИОФ РАН, протокол № 76 от 29.06. 2016 г.

Председатель Ученого Совета
Заведующий Отделом Мощных Лазеров
Федерального Государственного
Бюджетного Учреждения Науки
Института Общей Физики им. А.М. Прохорова
Российской Академии Наук (ИОФ РАН)
Доктор физ.-мат. наук, профессор



/Аполлонов Виктор Викторович /

«13» сент. 2016 г.

Список публикаций

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук по теме диссертации Сунчугашевой Елены Сергеевны «Филаментация фемтосекундного лазерного излучения при жесткой фокусировке в воздухе» на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

1. Chizhov, P.A., Volkov, R.V., Bukin, V.V., Ushakov, A.A., Garnov, S.V. and Savel'ev-Trofimov, A.B., 2013. Generation of terahertz radiation by focusing femtosecond bichromatic laser pulses in a gas or plasma. *Quantum Electronics*, 43(4), p.347.
2. Bukin, V.V., Garnov, S.V., Malyutin, A.A. and Strelkov, V.V., 2012. Interferometric diagnostics of femtosecond laser microplasma in gases. *Physics of Wave Phenomena*, 20(2), pp.91-106.
3. Чижов П.А., Букин В.В., Ушаков А.А., Гарнов С.В., 2016. Особенности динамики электронной плотности при филаментации фемтосекундного лазерного излучения в воздухе при повышенном давлении. *Квант. электроника*, 46 (4), с.332–334.
4. Chizhov, P.A., Ushakov, A.A., Bukin, V.V., Volkov, R.V., Garnov, S.V. and Savel'ev, A.B., 2014. Generation of terahertz radiation due to air breakdown induced by two-frequency laser pulses with different polarization states. *Physics of Wave Phenomena*, 22(4), pp.236-239.
5. Volkov, R.V., Chizhov, P.A., Ushakov, A.A., Bukin, V.V., Garnov, S.V. and Savel'ev, A.B., 2015. Optimal polarization of a two-colored pump for terahertz generation with a phase-unstable scheme. *Laser Physics*, 25(6), p.065403.
6. Labutin, T.A., Lednev, V.N., Ilyin, A.A. and Popov, A.M., 2016. Femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 31(1), pp.90-118.
7. Bunkin, A.F., Klinkov, V.K., Lednev, V.N., Lushnikov, D.L., Marchenko, A.V., Morozov, E.G., Pershin, S.M. and Yulmetov, R.N., 2012. Remote sensing of seawater and drifting ice in Svalbard fjords by compact Raman lidar. *Applied optics*, 51(22), pp.5477-5485.
8. Леднёв В.Н., Гришин М.Я., Першин С.М., Бункин А.Ф., Капустин И.А., Мольков А.А., Ермаков С.А., 2016. Лидарное зондирование пресноводной акватории с высокой концентрацией фитопланктона. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 13(1), с.119–134.
9. Pershin, S.M., Lednev, V.N., Klinkov, V.K., Yulmetov, R.N., Bunkin, A.F., 2014. Ice thickness measurements by Raman scattering. *Optics Letters*, 39 (9), pp. 2573-2575.
10. Bunkin, A.F., Davydov, M.A., Ivochkin, A.Yu., Mikhalevich, V.G., Pershin, S.M., Streltsov, V.N., 2014. High-resolution four-wave mixing spectroscopy of suspensions: The nonlinear mechanism of a Rayleigh-wing formation. *Laser Physics*, 24 (1), 015702.
11. Bunkin, A.F., Davydov, M.A., Ivochkin, A.Y., Mikhalevich, V.G., Pershin, S.M., Streltsov, V.N., 2012. High-resolution spectroscopy at steady-state lasing with multiphoton backscattering. *Physics of Wave Phenomena*, 20 (4), pp. 251-255.
12. Apollonov, V.V., Pletnev, N.V., 2012. Formation of extended conducting channels in atmosphere. *Quantum Electronics*, 42 (2), pp. 130-139.

13. Apollonov, V.V., 2013. High-power optics and its new manifestations. *Laser Physics*, 23 (6), 063001.
14. Kalashnikov, M., Andreev, A., Ivanov, K., Galkin, A., Korobkin, V., Romanovsky, M., Shiryayev, O., Schnuerer, M., Braenzel, J. and Trofimov, V., 2015. Diagnostics of peak laser intensity based on the measurement of energy of electrons emitted from laser focal region. *Laser and Particle Beams*, 33(03), pp.361-366.