

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Сунчугашевой Елены Сергеевны  
на тему «Филаментация фемтосекундного лазерного излучения  
при жесткой фокусировке в воздухе»,  
представленную в диссертационный совет Д002.023.03 при Физическом институте  
им. П.Н. Лебедева РАН на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Диссертация Елены Сергеевны Сунчугашевой посвящена экспериментальному исследованию нелинейно-оптического явления филаментации, которое происходит при распространении короткого (сотни фемтосекунд) мощного лазерного излучения в прозрачной среде. В результате нелинейного взаимодействия мощного излучения со средой происходит самофокусировка излучения, и образуются протяженные плазменные нити. Основная **новизна** исследования заключается в том, что в работе рассматривается распространение излучения в условиях жесткой фокусировки. Такой режим филаментации на момент начала выполнения работы был изучен не очень подробно, в работе были получены параметры излучения и образованного плазменного канала. Также исследование жесткофокусированных лазерных импульсов является **актуальным** с точки зрения лучшего понимания природы филаментации в целом и факторов, влияющих на ее характеристики. В настоящее время численное моделирование таких процессов достаточно времязатратно и затруднительно для экстремальных случаев, поэтому основную информацию о процессах, происходящих при жесткой фокусировке, получают из экспериментальных данных.

Основной **целью работы** было экспериментальное исследование распространения в воздухе фемтосекундного излучения и образующихся в процессе филаментации плазменных каналов при жесткой фокусировке лазерного излучения.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Введение характеризует работу в целом и включает в себя описание предмета исследования, то есть филаментации лазерного излучения, определение критерия жесткости фокусировки, краткую историю открытия филаментации и самофокусировки, обоснование научной новизны, актуальности и практической значимости работы, защищаемые положения, информацию об апробации исследования и оценку личного вклада автора.

Глава 1 состоит из трех логических частей: первая содержит описание истории открытия самофокусировки и дальнейшего исследования этого явления, вторая посвящена подробному описанию физических процессов, происходящих при филаментации мощного

лазерного излучения, а в третьей приведен литературный обзор экспериментальных, теоретических и численных исследований филаментации и сопутствующих ей процессов в настоящее время.

В главе 2 автор описывает схему генерации мощного излучения в фемтосекундной лазерной системе, описывает принцип работы генератора гармоник, который использовался для получения ультрафиолетового излучения. Диссертант приводит описание ключевых характеристик приборов, задействованных в экспериментах, останавливается на описании одного из методов регистрации плотности плазмы, который применялся во многих экспериментах.

Глава 3 состоит из четырех логических разделов. В первом исследуется зависимость интенсивности лазерного излучения от его фокусировки. Получено, что усиление жесткости фокусировки пучка приводит к увеличению интенсивности излучения, до уровня числовой апертуры в 0,02. Во втором разделе приводятся результаты экспериментов по определению геометрических параметров и плотности плазмы каналов, образующихся при филаментации сфокусированного излучения. Аналогично предыдущим экспериментам, плотность плазмы увеличивается, в то время как геометрические размеры плазменных каналов уменьшаются. Обнаружено, что эти зависимости так же имеет тенденцию к насыщению при увеличении числовой апертуры фокусирующих элементов, и значение числовой апертуры, характерной такому насыщению близко к предыдущему и соответствует нескольким единицам  $10^{-2}$ . В третьем разделе исследуется уширение спектра исходного излучения и преобразование его в третью гармонику. Получены энергетические характеристики такого преобразования в зависимости от мощности и фокусировки пучка, определено наиболее эффективное соотношение этих параметров. В четвертом разделе сравниваются плазменные каналы, образованные ультрафиолетовым и инфракрасным фемтосекундным лазерным излучением, а так же различные режимы их распространения после геометрического фокуса системы: в случае ультрафиолетового излучения плазменный канал плавно протягивается за фокус пучка, инфракрасный импульс приводит к рефокусировке излучения

В Глава 4 предложены различные методы управления длиной и профилем плотности плазменного канала. Так, при помощи амплитудной модуляции импульса (то есть апертурных масок различной формы) можно управлять количеством, распределением плотности энергии излучения и, следовательно, плотности образованной плазмы. Другим методом изменения протяженности плазменного канала является фазовая модуляция, исследованная для трех примеров: сферическая абберация, астигматизм, и динамическая фазовая модуляция при внесении кварцевых пластинок в область распространения



излучения. В этих методах было получено увеличение протяженности плазменного канала, сопровождающего филаментацию излучения, вплоть до двух раз.

Таким образом, обоснованность всех четырех защищаемых положений не вызывает сомнений. Полученные в работе результаты обладают **новизной**, имеют высокую степень **достоверности**, поскольку выполнены на современном оборудовании и хорошо согласуются с численным моделированием, проведенным различными научными группами, использующими различные подходы и уравнения для расчета. Также экспериментальные данные, полученные разными методами, хорошо согласуются друг с другом. Результаты исследований были доложены автором на множестве научных конференций.

Результаты, полученные в диссертации, имеют значение для **фундаментальных и прикладных научных задач**. Наблюдаемые процессы стабилизации параметров филаментов при ужесточении фокусировки, а так же тот факт, что при жесткой фокусировкой на оптической оси не распространяется суперконтинуум, существенно углубляют наши представления о филаментации в целом и процессах, ее сопровождающих. Возникают новые вопросы и требования к численному моделированию распространения мощного излучения при его жесткой фокусировке. Полученные значения интенсивности лазерного излучения при жесткой его фокусировки, значения геометрических размеров и электронной плотности плазмы, при этом образующейся, позволят эффективнее решать задачи микро- и наноструктурирования, а так же коммутации высоковольтных электрических разрядов.

В то же время, работа не лишена недостатков, главным из которых является недостаточное внимание описанию уравнений численного моделирования исследуемых процессов. В работе приведены расчетные кривые для сравнения с экспериментальными данными, однако нигде не приведены уравнения и лишь в некоторых экспериментах – условия моделирования. Более того, в разделе 3.2.1 области данных моделирования и эксперимента практически не пересекаются, что вызывает вопрос целесообразности сравнения этих результатов.

Также в работе имеются неаккуратности в оформлении текста (название раздела 3.1 не имеет нумерации, рисунки выполнены в разных стилях).

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. В целом диссертация Е.С. Сунчугашевой является большой по объему и высокой по качеству работы, в которой ею продемонстрированы хорошие навыки в экспериментальной работе. Основные результаты диссертации **опубликованы** в ведущих российских и зарубежных реферируемых журналах, например, таких как ЖЭТФ, Квантовая Электроника, Laser Physics, JOSA B, Laser

Physics Letters. В получение результатов, представленных в диссертации, автор внес определяющий вклад. Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее содержание.

Представленная диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и полностью удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Ее автор Елена Сергеевна Сунчугашева заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Отзыв составил официальный оппонент, старший научный сотрудник лаборатории спектроскопии ультрабыстрых процессов отдела лазерной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии Российской академии наук (ИСАН),

кандидат физико-математических наук



Компанец Виктор Олегович

20 сентября 2016 г.

108840 г. Москва, г.Троицк ул. Физическая, 5, +7(495)851-02-37

kompanetsvo@isan.troitsk.ru

Подпись официального оппонента заверяю:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института спектроскопии Российской академии наук

тел. +7(495)851-02-21

email perminov@isan.troitsk.ru



Е.Б. Перминов

20 сентября 2016 г.



## Список публикаций

официального оппонента Компанца Виктора Олеговича 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. Chekalin, S.V., Kompanets, V.O., Kuznetsov, A.V., Dormidonov, A.E. and Kandidov, V.P., 2016. Regular 'breathing' of a near-single-cycle light bullet in mid-IR filament. *Laser Physics Letters*, 13(6), p.065401.
2. Dormidonov, A.E., Kompanets, V.O., Chekalin, S.V. and Kandidov, V.P., 2015. Giantly blue-shifted visible light in femtosecond mid-IR filament in fluorides. *Optics express*, 23(22), pp.29202-29210.
3. Smetanina, E.O., Kompanets, V.O., Dormidonov, A.E., Chekalin, S.V. and Kandidov, V.P., 2013. Light bullets from near-IR filament in fused silica. *Laser Physics Letters*, 10(10), p.105401.
4. Chekalin, S.V., Kompanets, V.O., Smetanina, E.O. and Kandidov, V.P., 2013. Light bullets and supercontinuum spectrum during femtosecond pulse filamentation under conditions of anomalous group-velocity dispersion in fused silicalicati. *Quantum Electronics*, 43(4), p.326.
5. Smetanina, E.O., Kompanets, V.O., Chekalin, S.V., Dormidonov, A.E. and Kandidov, V.P., 2013. Anti-Stokes wing of femtosecond laser filament supercontinuum in fused silica. *Optics letters*, 38(1), pp.16-18.
6. Smetanina, E.O., Kompanets, V.O., Chekalin, S.V.E. and Kandidov, V.P., 2012. Femtosecond laser pulse filamentation under anomalous dispersion in fused silica. Part 1. Numerical investigation. *Quantum Electronics*, 42(10), pp.913-919.
7. Smetanina, E.O., Kompanets, V.O., Chekalin, S.V.E. and Kandidov, V.P., 2012. Femtosecond laser pulse filamentation under anomalous dispersion in fused silica. Part 2. Experiment and physical interpretation. *Quantum Electronics*, 42(10), pp.920-924.
8. Apatin, V.M., Kompanets, V.O., Lokhman, V.N., Ogurok, N.D., Poydashev, D.G., Ryabov, E.A. and Chekalin, S.V.E., 2014. A study of ionisation of free and clustered molecules under the action of femtosecond laser radiation. *Quantum Electronics*, 44(5), p.465.
9. Chekalin, S.V.E., Kompanets, V.O., Dokukina, A.E., Dormidonov, A.E.E., Smetanina, E.O. and Kandidov, V.P., 2015. Visible supercontinuum radiation of light bullets in the femtosecond filamentation of IR pulses in fused silica. *Quantum Electronics*, 45(5), p.401.
10. Dokukina, A.É., Smetanina, E.O. and Kompanets, V.O., 2014. Femtosecond filamentation of Bessel–Gaussian beams under conditions of anomalous group-velocity dispersion. *Journal of Optical Technology*, 81(8), pp.454-459.
11. Chekalin, S.V.E., Dokukina, A.E., Smetanina, E.O., Kompanets, V.O. and Kandidov, V.P., 2014. Plasma channels in a filament of a femtosecond laser pulse focused by an axicon. *Quantum Electronics*, 44(6), p.570.
12. Chekalin, S.V.E., Smetanina, E.O., Spirkov, A.I., Kompanets, V.O. and Kandidov, V.P., 2014. Filamentation of a phase-modulated pulse under conditions of normal, anomalous and zero group velocity dispersion. *Quantum Electronics*, 44(6), p.577.
13. Liang, H., Krogen, P., Grynkó, R., Novak, O., Chang, C.L., Stein, G.J., Weerawarne, D., Shim, B., Kärtner, F.X. and Hong, K.H., 2015. Three-octave-spanning supercontinuum generation and sub-two-cycle self-compression of mid-infrared filaments in dielectrics. *Optics letters*, 40(6), pp.1069-1072.
14. Blonskyi, I.V., Kadan, V.M., Puzikov, V.M. and Grin, L.A., 2013. Temporal autolocalization of femtosecond light pulses in the filaments observed in fused silica. *Ukrainian journal of physical optics*, (14, № 2), pp.85-90.
15. Gražulevičiūtė, I., Šuminas, R., Tamošauskas, G., Couairon, A. and Dubietis, A., 2015. Carrier-envelope phase-stable spatiotemporal light bullets. *Optics letters*, 40(16), pp.3719-3722.