

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Желтикова Алексея Михайловича на диссертацию
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

Диссертационная работа Е.С. Сунчугашевой посвящена экспериментальному исследованию филаментации фемтосекундных лазерных импульсов при распространении в воздухе в условиях жесткой фокусировки. При этом параметры филаментов и образованных плазменных каналов существенно отличаются от случая распространения коллимированного или слабо сфокусированного излучения, для которых в работе приведен довольно обширный обзор литературы.

Актуальность выполненной работы несомненна, так как сфокусированное излучение вызывает большой интерес у мирового научного сообщества в настоящее время. Проводятся как экспериментальные исследования процессов, сопровождающих распространение мощных лазерных импульсов в условиях жесткой фокусировки в нелинейном режиме, так и численное моделирование этих процессов. Опубликованные статьи диссертанта цитируются в последующих работах различных научных групп, что подтверждает актуальность исследуемых задач.

В диссертационной работе рассматривается процесс филаментации фемтосекундного лазерного излучения в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах длин волн при его жесткой фокусировке. При этом с одной стороны уделяется внимание фундаментальным вопросам физики процесса, например, изучается вопрос превышения интенсивности излучения над уровнем ограниченной интенсивности, полученном для коллимированного излучения. Также обнаружен процесс стабилизации интенсивности излучения, а также поперечного размера и значения электронной плотности плазменного канала, при увеличении значения числовой апертуры фокусирующей линзы или зеркала, то есть увеличении жесткости фокусировки. С другой стороны, в диссертации предложены экспериментально подтвержденные методы управления протяженностью плазменных каналов, образующихся при филаментации лазерного излучения, при фазовых и амплитудных модуляциях импульса.

Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 121 страницу, и включает в себя 62 рисунка, 34 формулы и 134 библиографических ссылки.

Во введении обоснована актуальность проводимого исследования, определена цель, научная новизна и значимость работы, сформулированы выносимые на защиту основные положения, приведено описание апробации результатов работы.

Первая глава начинается с исторической справки об открытии самофокусировки и филаментации лазерного излучения, после чего приведено описание механизма формирования филаментов при распространении мощного лазерного излучения в прозрачных средах, а также физики сопровождающих такое распространение процессов. Далее в главе представлен литературный обзор теоретических, численных и экспериментальных исследований на тему филаментации, проведенных к началу выполнения диссертационной работы. Стоит отметить, что автор не ограничилась литературным обзором в первой главе, но и привела некоторые библиографические ссылки по ходу диссертации во введениях к некоторым разделам, непосредственно касающиеся обсуждаемой в разделе экспериментальной задачи.

Вторая глава посвящена подробному описанию строения экспериментальной лазерной установки, позволяющей генерировать излучение ста-фемтосекундной длительности с двумя центральными длинами волн, а так же отмечены параметры измерительных приборов, использованных в экспериментах.

Основные и содержательные главы диссертации – это третья и четвертая, в них приведены результаты исследования жесткофокусированной филаментации. В третьей главе автор экспериментально получает значения интенсивности лазерного излучения при распространении сфокусированного ультрафиолетового и инфракрасного излучения. Проведенные эксперименты позволяют диссертанту утверждать о происходящей стабилизации как интенсивности лазерного излучения, так и параметров образованных плазменных каналов (радиус поперечного размера и электронная плотность плазмы), при уменьшении фокуса линзы или зеркала – увеличении числовой апертуры выше значения $2-4 \times 10^{-2}$. Это наблюдение вызывает наибольший интерес среди результатов третьей главы, поскольку оно позволит подобрать оптимальные параметры фокусировки излучения для прикладных задач. Также приведены спектральные измерения излучения после области его филаментации, и сделан вывод о характере углового распространения суперконтинуума и преобразованной в третью гармонику излучения. При жесткой фокусировке излучения на его оптической оси не наблюдается генерации суперконтинуума, что характерно для распространения коллимированного лазерного излучения. Эти сведения важны для задач спектроскопии. Получено, что при жесткой фокусировке в микромастшабном объеме происходит генерация излучения с утроенной частотой с такой же эффективностью, что и в случае протяженных областей нелинейного взаимодействия излучения со средой. Такой подход позволит создать дешевый и компактный источник ультрафиолетового излучения. В заключение третьей главы приведено сравнение параметров образованных плазменных каналов при распространении мощного ультракороткого излучения инфракрасного и ультрафиолетового оптических диапазонов, а так же режимов их рефокусировок после геометрического фокуса системы.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования, проведенного автором, и численного моделирования, проведенного коллегами диссертанта, методов управления филаментацией с помощью различных модуляций лазерного пучка. Была предложена амплитудная модуляция (с помощью апертурных диафрагм) и фазовые модуляции (внесение aberrаций и динамического искажения фазы в профиль пучка). Все перечисленные методы приводят к почти двукратному увеличению

протяженности плазменного канала излучения при неизменных параметрах начального излучения, относительно просты (кроме модулирования волнового фронта адаптивной системой) и могут быть использованы для прикладных задач. Предложенные методы применимы как для инфракрасного, так и для ультрафиолетового излучения, из чего вероятно следует применимость этих методов и для более широкого диапазона длин волн излучения.

В заключении еще раз приведены защищаемые положения и сформулированы основные научные результаты работы.

Диссертация Сунчугашевой Е.С. не имеет каких-либо значительных недостатков, но при чтении третьей и четвертой главы возникает вопрос, почему не все проведенные эксперименты выполнены для обеих имеющихся в распоряжении экспериментаторов длин волн. Было бы интересно выяснить, является ли полученная стабилизация параметров образованных плазменных каналов для инфракрасного излучения характерной и для более коротковолнового излучения, и если да, то при какой жесткости фокусировки начнется такая стабилизация. В диссертации не достаточно раскрыто сравнение филаментации двух оптических диапазонов, в то время как для этого есть условия.

Научная новизна работы состоит в том, что с одной стороны автор одним из первых достаточно полно рассматривает распространение жесткофокусированного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе и приводит различия параметров филаментации в сравнении с более привычным распространением коллимированного лазерного излучения. С другой стороны, Е.С. Сунчугашева предлагает простые методы управления образованием плазменных каналов, которые можно использовать для прикладных задач.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, и представляет собой цельную, законченную работу. Достоверность и обоснованность научных утверждений не вызывает сомнений, поскольку все эксперименты были выполнены на современном оборудовании, а результаты хорошо согласуются с независимо проведенными численными расчетами. Также результаты диссертационной работы было опубликовано в ведущих научных журналах и представлены автором лично на международных и всероссийских конференциях. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации и верно отражает полученные результаты работы.

Я считаю, что диссертационная работа «Филаментация фемтосекундного лазерного излучения при жесткой фокусировке в воздухе» обладает высоким уровнем качества исследований, научной новизной и большой практической значимостью и соответствует требованиям к кандидатским диссертациям, а Елена Сергеевна Сунчугашева заслуживает присвоения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

профессор Международного учебно-научного лазерного центра
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования

«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 62
+7-495-9393959
zheltikov@phys.msu.ru

доктор физико-математических наук,
профессор

/Желтиков Алексей Михайлович/

23 сентября 2016

Подпись официального оппонента заверяю:
Директор Международного учебно-научного лазерного центра
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 62

Телефон/Факс
+7(495)939-1225 / +7(495)939-3113
e-mail: enter@ilc.edu.ru



доктор физико-математических наук,
профессор

/Макаров Владимир Анатольевич/

23 сентября 2016

Список публикаций

официального оппонента Желтикова Алексея Михайловича 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. Nomura, Y., Shirai, H., Ishii, K., Tsurumachi, N., Voronin, A.A., Zheltikov, A.M. and Fuji, T., 2012. Phase-stable sub-cycle mid-infrared conical emission from filamentation in gases. *Optics express*, 20(22), pp.24741-24747.
2. Kartashov, D., Ališauskas, S., Pugžlys, A., Voronin, A.A., Zheltikov, A.M. and Baltuška, A., 2012. Third-and fifth-harmonic generation by mid-infrared ultrashort pulses: beyond the fifth-order nonlinearity. *Optics letters*, 37(12), pp.2268-2270.
3. Traverso, A.J., Sanchez-Gonzalez, R., Yuan, L., Wang, K., Voronine, D.V., Zheltikov, A.M., Rostovtsev, Y., Sautenkov, V.A., Sokolov, A.V., North, S.W. and Scully, M.O., 2012. Coherence brightened laser source for atmospheric remote sensing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(38), pp.15185-15190.
4. Mitrofanov, A.V., Voronin, A.A., Sidorov-Biryukov, D.A., Pugžlys, A., Stepanov, E.A., Andriukaitis, G., Flöry, T., Ališauskas, S., Fedotov, A.B., Baltuška, A. and Zheltikov, A.M., 2015. Mid-infrared laser filaments in the atmosphere. *Scientific reports*, 5.
5. Serebryannikov, E.E. and Zheltikov, A.M., 2014. Quantum and Semiclassical Physics behind Ultrafast Optical Nonlinearity in the Midinfrared: The Role of Ionization Dynamics within the Field Half Cycle. *Physical review letters*, 113(4), p.043901.
6. Mitrofanov, A.V., Voronin, A.A., Sidorov-Biryukov, D.A., Andriukaitis, G., Flöry, T., Pugžlys, A., Fedotov, A.B., Mikhailova, J.M., Panchenko, V.Y., Baltuška, A. and Zheltikov, A.M., 2014. Post-filament self-trapping of ultrashort laser pulses. *Optics letters*, 39(16), pp.4659-4662.
7. Lanin, A.A., Voronin, A.A., Stepanov, E.A., Fedotov, A.B. and Zheltikov, A.M., 2015. Multioctave, 3–18 μm sub-two-cycle supercontinua from self-compressing, self-focusing soliton transients in a solid. *Optics letters*, 40(6), pp.974-977.
8. Zhokhov, P.A. and Zheltikov, A.M., 2012. Nonlinear-optical coherent combining of supercontinua from multiple filaments. *Physical Review A*, 86(1), p.013816.
9. Kartashov, D., Ališauskas, S., Pugžlys, A., Voronin, A., Zheltikov, A., Petrarca, M., BÉjot, P., Kasparian, J., Wolf, J.P. and Baltuška, A., 2012. White light generation over three octaves by femtosecond filament at 3.9 μm in argon. *Optics letters*, 37(16), pp.3456-3458.
10. Kartashov, D., Ališauskas, S., Pugžlys, A., Voronin, A., Zheltikov, A., Petrarca, M., BÉjot, P., Kasparian, J., Wolf, J.P. and Baltuška, A., 2013. Mid-infrared laser filamentation in molecular gases. *Optics letters*, 38(16), pp.3194-3197.
11. Mitrofanov, A.V., Sidorov-Biryukov, D.A., Voronin, A.A., Pugžlys, A., Andriukaitis, G., Stepanov, E.A., Ališauskas, S., Flöri, T., Fedotov, A.B., Panchenko, V.Y. and Baltuška, A., 2015. Subterawatt femtosecond pulses in the mid-infrared range: new spatiotemporal dynamics of high-power electromagnetic fields. *Physics-Uspekhi*, 58(1), p.89.
12. Lanin, A.A., Fedotov, A.B. and Zheltikov, A.M., 2013. Generation of ultrashort pulses of electromagnetic radiation in the mid-and far-infrared ranges. *JETP letters*, 98(7), pp.369-372.
13. Voronin, A.A., Il'ya, V.F., Kobelke, J., Jäger, M., Schuster, K., Fedotov, A.B., Bartelt, H. and Zheltikov, A.M., 2012. Polarization instability of ultrashort pulses as a source of vectorial supercontinuum. *Optics letters*, 37(24), pp.5163-5165.
14. Zhokhov, P.A., Panchenko, V.Y. and Zheltikov, A.M., 2012. Filamentation-assisted self-compression of subpetawatt laser pulses to relativistic-intensity subcycle field waveforms. *Physical Review A*, 86(1), p.013835.
15. Mitrofanov, A.V., Voronin, A.A., Mitryukovskiy, S.I., Sidorov-Biryukov, D.A., Pugžlys, A., Andriukaitis, G., Flöry, T., Stepanov, E.A., Fedotov, A.B., Baltuška, A. and Zheltikov, A.M., 2015. Mid-infrared-to-mid-ultraviolet supercontinuum enhanced by third-to-fifteenth odd harmonics. *Optics letters*, 40(9), pp.2068-2071.