

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук Желтикова Алексея Михайловича

на диссертацию Селезнева Леонида Владимировича

«Филаментация ультракоротких лазерных импульсов в сходящихся пучках»

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.21- лазерная физика

Диссертационная работа Селезнева Л.В. посвящена экспериментальному исследованию филаментации фемтосекундных лазерных импульсов, распространяющихся в сходящихся пучках. В таком режиме распространения параметры филамента и сопутствующего ему плазменного канала существенно отличаются от случая распространения коллимированного лазерного пучка. **Актуальность** диссертационной работы определяется широким применением фемтосекундных лазеров в глазной хирургии, стоматологии, нейрохирургии, для сверления металлов, создания поверхностных структур, резки алмазов и др., при этом с целью увеличения плотности энергии обычно применяются сходящиеся (сфокусированные) лазерные пучки. Поскольку у фемтосекундных импульсов пиковая мощность высока, то при их распространении возможно проявление различных нелинейных эффектов, например, самофокусировка и ионизация среды распространения (филаментация). В диссертации рассматривается именно такой режим распространения фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе, различных газах и в конденсированных средах.

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

Во **введении** формулируется цель работы, обосновывается ее актуальность, приводится научная новизна, практическая значимость, защищаемые положения, информация об апробации работы, о личном вкладе автора.

В **Главе 1** содержится обзор литературы по теме исследований. Глава состоит из двух разделов, в первом из которых рассматривается явление самофокусировки и филаментация, описывается физика процессов, протекающих при филаментации. Во втором разделе приводится обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию филаментации фемтосекундных лазерных импульсов. Рассматривается филаментация коллимированных пучков, множественная филаментация, филаментация сходящихся пучков, уширение спектра и генерация третьей гармоники при филаментации, отдельно описывается филаментация УФ лазерных импульсов и

самофокусировка и филаментация лазерных импульсов в конденсированных средах, включая возможность микроструктурирования таких сред.

В **Главе 2** диссертант описывает титан-сапфировую лазерную систему, приводит ее основные характеристики. Также в главе содержится описание основных применяемых приборов и методов эксперимента, которые относятся ко всей диссертации.

Глава 3 посвящена исследованию филаментации сходящихся ИК и УФ пучков в воздухе. Автор рассматривает влияние числовой апертуры сходящегося пучка на параметры филамента и образующегося при этом плазменного канала. Показано, что увеличение числовой апертуры сходящегося пучка приводит к увеличению интенсивности излучения, а при числовой апертуре более 0.01 происходит стабилизация интенсивности. Приводятся результаты экспериментов по определению геометрических параметров и плотности плазмы каналов, образующихся при филаментации сходящихся пучков. Продемонстрировано, что при увеличении числовой апертуры более 10^{-2} также происходит стабилизация плотности плазмы на уровне 10^{18} см^{-3} , и радиуса плазменного канала 2-4 мкм, что на порядок меньше, чем размер плазменного канала, наблюдающийся при филаментации коллимированного пучка. Получены энергетические характеристики преобразования излучения и преобразование его в третью гармонику в зависимости от мощности и числовой апертуры пучка, определено наиболее эффективное соотношение этих параметров. Показано, что множественная филаментация (наличие нескольких плазменных каналов) наблюдается при 2 – 3 кратном превышении мощности лазерного импульса над критической мощностью самофокусировки. Отмечается, что при уменьшении числовой апертуры менее 10^{-2} в экспериментах образовывался одиночный филамент даже при десятикратном превышении мощности лазерного импульса над критической мощностью. В этой же главе приводятся результаты исследования распространения субтераваттных ультрафиолетовых сходящихся пучков. Показано, что в случае, когда мощность импульса составляет более 200 критических мощностей, после прохождения перетяжки происходит симметризация распределения плотности энергии по поперечному сечению пучка.

В **Главе 4** приведены результаты исследования филаментации сходящихся лазерных пучков при амплитудной или фазовой модуляции поперечного профиля. В главе определены основные закономерности филаментации сходящихся лазерных пучков ИК- и УФ- диапазонов спектра, с помощью которых можно в той или иной мере управлять параметрами формирующихся плазменных каналов, включая распределение электронной плотности и пространственные размеры.

Глава 5 посвящена изучению ионизации газов при воздействии мощных ультракоротких лазерных импульсов в широком диапазоне интенсивностей. Продемонстрировано, что УФ лазерные импульсы (длина волны 248 нм) с интенсивностью менее $5 \cdot 10^{10}$ Вт/см² эффективно взаимодействуют с водными парами в атмосферном воздухе, при этом нелинейность поглощения импульсов составляет 2. В случае осушенного воздуха, азота и кислорода степень фотонности составляет 3. При исследовании ионизации аргона и азота было показано, что при интенсивностях излучения более 10^{12} Вт/см² происходит нерезонансная четырехфотонная ионизация, а при меньших интенсивностях ионизация происходит при поглощении (3+1) квантов.

В **Главе 6** экспериментально исследуется распространение сходящихся лазерных пучков в конденсированных средах, включая режим филаментации. Продемонстрировано, что в лазерных пучках с числовой апертурой как минимум до 0.65 филаментация наблюдается. Продемонстрировано, что в объеме алмаза с помощью графитизации можно создавать линии с толщиной менее 2 мкм. Также показана возможность формирования микрополостей в просветленной глазной склере при лазерном воздействии.

В **Заключении** сформулированы **основные результаты**.

Полученные в работе результаты имеют высокую степень **достоверности**, что обусловлено выполнением экспериментов на современном оборудовании и хорошим согласием с результатами численного моделирования, которое проводилось несколькими ведущими в данной области научными группами. Кроме того, экспериментальные данные, полученные в различных экспериментах, хорошо согласуются друг с другом.

В целом диссертация Л.В.Селезнева является большой по объему и высокой по качеству работы. Основные результаты исследований и положения являются **обоснованными** и обладают **новизной**, были доложены автором на множестве научных конференций и опубликованы в ведущих российских и зарубежных реферируемых журналах, например, таких как ЖЭТФ, Квантовая Электроника, JOSA B, Laser Physics, Laser Physics Letters и др. В получение результатов, представленных в диссертации, автор внес определяющий вклад. Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее содержание.

В то же время, работа не лишена недостатков, одним из которых является недостаточное описание численного моделирования исследуемых процессов. В работе приводятся расчетные данные для сопоставления с экспериментальными, однако только для некоторых экспериментов описываются условия моделирования, и отсутствуют уравнения.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

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 доктора физико-математических наук, а Селезнев Леонид Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент
профессор кафедры Общей физики и волновых процессов
Физического факультета
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
E-mail: zheltikov@phys.msu.ru

Желтиков Алексей Михайлович

доктор физико-математических наук,
профессор

« 05 » октября 2018

Подпись официального оппонента заверяю:

Декан Физического факультета Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
+7 495 9391682
E-mail: info@physics.msu.ru
доктор физико-математических наук,
профессор

« 05 » октября 2018



Сысоев Николай Николаевич

Список основных работ официального оппонента Желтикова Алексея Михайловича по тематике защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет.

1. Voronin, A. A., Lanin, A. A., Fedotov, A. A., & Zheltikov, A. M. (2018). Ultrafast mid-infrared spectrochronography of dispersion near molecular absorption bands. *Optics letters*, 43(6), 1327-1330.
2. Voronin, A. A., Mitrofanov, A. V., Sidorov-Biryukov, D. A., Fedotov, A. B., Pugžlys, A., Panchenko, V. Y., ... & Zheltikov, A. M. (2018). Free-beam soliton self-compression in air. *Journal of Optics*, 20(2), 025504.
3. Zhokhov, P. A., & Zheltikov, A. M. (2018). Optical breakdown of solids by few-cycle laser pulses. *Scientific reports*, 8(1), 1824.
4. Maleki, Y., & Zheltikov, A. M. (2018). Generating maximally-path-entangled number states in two spin ensembles coupled to a superconducting flux qubit. *Physical Review A*, 97(1), 012312.
5. Pochechuev, M. S., Fedotov, I. V., Ivashkina, O. I., Roshchina, M. A., Anokhin, K. V., & Zheltikov, A. M. (2018). Two-photon imaging of fiber-coupled neurons. *Journal of biophotonics*, 11(1).
6. Meng, F., Liu, B., Wang, S., Liu, J., Li, Y., Wang, C., ... & Hu, M. (2017). Controllable two-color dispersive wave generation in argon-filled hypocycloid-core kagome fiber. *Optics Express*, 25(26), 32972-32984.
7. Mitrofanov, A. V., Voronin, A. A., Rozhko, M. V., Sidorov-Biryukov, D. A., Fedotov, A. B., Pugžlys, A., ... & Zheltikov, A. M. (2017). Self-compression of high-peak-power mid-infrared pulses in anomalously dispersive air. *Optica*, 4(11), 1405-1408.
8. Желтиков, А. М. (2017). Теория фотоионизации Келдыша: через барьеры. *Успехи физических наук*, 187(11), 1169-1204.
9. Fedotov, I. V., Ivashkina, O. I., Pochechuev, M. S., Roshchina, M. A., Toropova, K. A., Fedotov, A. B., ... & Zheltikov, A. M. (2017). Quantitative cognitive-test characterization of reconnectable implantable fiber-optic neurointerfaces for optogenetic neurostimulation. *Journal of biophotonics*, 10(11), 1485-1491.
10. Serebryannikov, E. E., Panchenko, V. Y., & Zheltikov, A. M. (2017). Multibeam synthesis of high-power subcycle field waveforms. *Physical Review A*, 96(3), 033853.
11. Zhokhov, P. A., & Zheltikov, A. M. (2017). Depth-resolved subcycle dynamics of photoionization in solids. *Physical Review A*, 96(3), 033415.
12. Voronin, A. A., & Zheltikov, A. M. (2017). Long-wavelength infrared solitons in air. *Optics letters*, 42(18), 3614-3617.
13. Voronin, A. A., & Zheltikov, A. M. (2017). The generalized Sellmeier equation for air. *Scientific reports*, 7, 46111.
14. Zheltikov, A. M. (2017). Phase matching as a gate for photon entanglement. *Scientific Reports*, 7, 46115.
15. Ermakova, Y. G., Lanin, A. A., Fedotov, I. V., Roshchin, M., Kelmanson, I. V., Kulik, D., ... & Balaban, P. M. (2017). Thermogenetic neurostimulation with single-cell resolution. *Nature communications*, 8, 15362.