

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н.Лебедева
Российской академии наук

На правах рукописи

Селезнев Леонид Владимирович

**ФИЛАМЕНТАЦИЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
В СХОДЯЩИХСЯ ПУЧКАХ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН).

Научный консультант:

Ионин Андрей Алексеевич доктор физико-математических наук, профессор (ФИАН)

Официальные оппоненты:

Желтиков Алексей Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор
Кафедры общей физики и волновых процессов
Физического факультета МГУ им. М.В.

Ломоносова, г. Москва

Кабанов Андрей Михайлович

доктор физико-математических наук, главный
научный сотрудник Лаборатории нелинейно-
оптических взаимодействий Института оптики
атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН

Лосев Валерий Федорович

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией Газовых лазеров
Института сильноточной электроники СО РАН

Ведущая организация:

Национальный исследовательский ядерный
университет «Московский инженерно-физический
институт» (МИФИ, г.Москва)

Защита диссертации состоится «22» октября 2018 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН, расположенном по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте www.lebedev.ru

Автореферат разослан «____» _____ 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.023.03
доктор физико-математических наук

А.С.Золотко

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Стремительное развитие фемтосекундной лазерной физики открыло широкие возможности по применению фемтосекундных лазеров в обработке различных материалов. В настоящее время такие лазеры используются в глазной хирургии, нейрохирургии, стоматологии; для создания поверхностных структур, в том числе наномасштабных; сверления металлов; резки алмазов, создания наночастиц и др. (см., например, обзоры Sugioka K. & Chen Y., 2014a; 2014b; Sugioka K., 2017; Pfeifenberger M. J. et al 2017; Balling P. & Schou J., 2013; Dausinger F. & Friedemann L., 2004). Для увеличения плотности энергии обычно применяются сходящиеся (сфокусированные) лазерные пучки. В случае медицинских применений взаимодействие лазерных импульсов с биологическими тканями происходит в нормальных условиях, т.е. в воздушной атмосфере. Технологические процессы (сверление, резка и др.) иногда требуют применения неокисляющей среды, например, инертных газов (аргона, азота и др.). Одним из эффективных способов наработки наночастиц в настоящее время является воздействие фемтосекундными лазерными импульсами на металлическую или полупроводниковую поверхность, находящуюся в воде или другом растворителе (Kabashin A. V. & Meunier M., 2003; Eliezer S. et al., 2004; Barcikowski S. et al., 2007). Таким образом, в большинстве случаев подобных применений еще до воздействия на обрабатываемый объект высокоинтенсивный сходящийся лазерный пучок взаимодействует с газообразной или конденсированной средой, где он распространяется. При этом может происходить его самофокусировка (эффект Керра) и, как следствие высокой интенсивности, ионизация среды распространения. В результате профиль поперечного сечения лазерного пучка будет существенно изменен еще до достижения обрабатываемого объекта, т.е. изменятся условия обработки. Кроме того, плазма, образующаяся при распространении такого пучка, будет также воздействовать на объект. Таким образом, для корректной фемтосекундной лазерной обработки необходимо учитывать особенности нелинейного распространения сходящихся пучков в прозрачных средах, в частности, самофокусировку и плазмообразование, т.е. филаментационный режим распространения.

Возможность самофокусировки электромагнитных волн в нелинейной среде была предсказана еще в 1962 году Г.А. Аскарьяном (Аскарьян Г.А., 1962). Теоретическое обоснование эффекта самофокусировки при распространении электромагнитного излучения в нелинейной среде было представлено в 1964 году в работах (Таланов В.И., 1964; Chiao R.Y., et al., 1964). В работе (Chiao R.Y., et al., 1964) было сделано предположение, что самофокусировка является пороговым эффектом, т.е. возникает в лазерном пучке, мощность которого превышает некоторую критическую мощность самофокусировки P_{cr} . Впервые экспериментально самофокусировка наблюдалась в 1965 году А.Р. Рустамовым и Н.Ф. Пилипецким (Пилипецкий Н.Ф. и Рустамов А.Р., 1965). В этих экспериментах наносекундные лазерные импульсы с пиковой мощностью 20 МВт фокусировались в кювету с жидкостями, обладающими высоким нелинейным показателем преломления. Надо сказать, что некоторые авторы ссылаются на статью 1964 года (Hercher M., 1964), как на первое экспериментальное наблюдение самофокусировки, где наблюдалось повреждение оптического стекла при воздействии на него фокусированного лазерного излучения. В теоретической статье (Chiao R.Y., 1966) было предложено рассматривать явление самофокусировки, как волноводное распространение пучка (самоканалирование). В воздухе самофокусировка и лазерная искра впервые наблюдались в 1968 году (Kogobkin V.V. & Alcock A.J., 1968) при фокусировке наносекундных импульсов. Первое сообщение о самофокусировке коллимированного излучения было опубликовано в работе (Басов Н.Г. и др., 1969), где наблюдалась самофокусировка импульсов пикосекундной длительности в неодимовом стекле.

Развитие фемтосекундных лазеров и, в особенности, метода усиления chirпированных импульсов (Strickland & Mourou, 1985) позволило получать лазерные импульсы большой мощности. Уже в 1994 году речь шла о создании установок с тера- и даже петаваттной пиковой мощностью (Perry & Mourou, 1994). В 1995 году появилось первое сообщение об экспериментальной филаментации коллимированного излучения в воздухе (Braun A., et al., 1995). В современной лазерной физике филаментацией называется нелинейное распространение лазерного импульса, когда высокоинтенсивная часть пучка локализуется вблизи оптической оси за счет самофокусировки. При этом схлопыванию пучка

препятствует образующаяся плазма за счет дефокусировки излучения на ней. В этой работе (Braun A., et al., 1995) наблюдалась филаментация импульса, генерируемого в титан-сапфировой лазерной системе на центральной длине волны 775 нм с длительностью 150 фс. Общая длина филамента в этих экспериментах превышала 50 м. Практически в то же время были проведены эксперименты по распространению и филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе (Nibbering E.T.J., et al., 1996; Brodeur A., et al., 1997; Kosareva O.G., et al., 1997). Эти экспериментальные работы положили начало широкого изучения процессов самофокусировки и филаментации фемтосекундных лазерных импульсов. Здесь следует отметить, что самофокусировка наносекундных импульсов в воздухе, которая исследовалась в ранних работах, сопровождалась ионизацией среды, ускорением электронов в сильном электромагнитном поле и, как следствие, к возникновению лазерной искры (пробоя воздуха). В случае же самофокусировки фемтосекундных импульсов в воздухе при атмосферном давлении, электроны, образующиеся в процессе фотоионизации, не успевают за время взаимодействия с лазерным импульсом долететь до ближайших молекул воздуха. Таким образом, при самофокусировке и филаментации таких импульсов лазерного пробоя воздуха не происходит. По результатам многочисленных публикаций (к настоящему моменту несколько тысяч) об исследованиях филаментации, которые включают в себя целый круг нелинейных взаимодействий (самофокусировка, фотоионизация, генерация суперконтинуума, третьей гармоники и др.), написано несколько обзоров (Chin S.L., et al., 2005; Couairon A. & Mysyrowicz A., 2007; Kasparian J. & Wolf J.-P., 2008; Кандидов В.П. и др., 2009; Chin S.L., et al., 2012; Чекалин С. В., & Кандидов В. П., 2013) и монографий (Faccio D., et al., 2007; Boyd R.W., et al., 2009; Chin S.L., 2010). В интернете создан ресурс, посвященный филаментации – www.filamentation.org, где имеется информация о научных группах, занимающихся филаментацией, расписание тематических конференций, календарный список публикаций на эту тему.

Исследование филаментации ультракоротких лазерных импульсов проводилось в основном для коллимированных или слабосходящихся пучков (Chin S.L. et al., 2005; Couairon A. & Mysyrowicz A. 2007; Кандидов В.П. и др., 2009). До исследований, результаты которых представлены в данной работе, изучение

филаментации сильносходящихся пучков (под сильносходящимися пучками в данной работе подразумевается такая фокусировка, где расстояние до перетяжки пучка много меньше, чем до нелинейного фокуса), которые обычно применяются для лазерной обработки, были посвящены лишь несколько работ. Например, в работе (Liu W. et al., 2002a) экспериментально и численно исследовалось поведение сильносходящихся пучков в конденсированной среде (в воде). Было показано, что для таких пучков вблизи геометрического фокуса происходит лавинная ионизация. В более разреженных средах, например в воздухе, время пролета электрона от своего иона до соседней молекулы существенно больше, чем длительность ультракороткого импульса, т.е. развитие лавины невозможно. Тем не менее, в работе (Liu W. et al., 2003) утверждалось, что в сильносходящихся пучках «филаментация прекращается, и вблизи перетяжки пучка появляется сильноионизованная плазма» (перевод автора), т.е. отрицался факт возможности филаментации сильносходящегося пучка. В более поздней работе (Liu W. et al., 2005) определялась критическая мощность самофокусировки по смещению максимума свечения плазменного образования (изменение положения фокуса определялось по формуле тонкой линзы – сложение геометрического и нелинейного фокуса), т.е. в этой работе также не учитывалось образование протяженного плазменного канала при филаментации.

В середине двухтысячных появилось несколько работ, посвященных исследованию филаментации сходящихся пучков (Deng Y.P. et al., 2006; Theberge F. et al., 2006). Эти статьи показали, что филаментация в этом случае все же происходит, однако изучение влияния фокусировки на процесс филаментации проведено не было. При этом стоит повторить, что филаментация и плазмообразование, которые могут происходить до перетяжки пучка, будут оказывать существенное влияние на параметры (пространственное распределение, интенсивность и др.) распространяющегося в газообразных и конденсированных средах сходящегося лазерного пучка, что весьма важно для лазерной обработки материалов (см., например, обзоры Sugioka K. & Chen Y., 2014a; 2014b; Sugioka K., 2017; Pfeifenberger M. J. et al 2017; Balling P. & Schou J., 2013; Dausinger F. & Friedemann L., 2004).

Поэтому **целью диссертационной работы** стало определение условий и

параметров распространения ультракоротких лазерных импульсов в сходящихся пучках, распространяющихся в режиме филаментации в газообразных и конденсированных средах.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Исследование влияния числовой апертуры сходящихся в воздухе пучков на параметры плазменных каналов, образующихся в воздухе при филаментации фемтосекундных ИК (740 нм) и УФ (248 нм) лазерных импульсов.
2. Изучение процесса распространения существенно закритических (сотни и тысячи критических мощностей самофокусировки) сходящихся УФ лазерных пучков в воздухе.
3. Определение влияния амплитудной и/или фазовой модуляции поперечного профиля лазерного пучка на филаментацию лазерных пучков и образование сопутствующих плазменных каналов в воздухе.
4. Исследование процессов ионизации различных газов ультракороткими УФ и ИК лазерными импульсами в широком диапазоне интенсивностей, перекрывающем характерные значения, наблюдаемые при филаментации.
5. Изучение режимов воздействия сходящихся ИК лазерных пучков на конденсированные среды, включая ПММА, алмаз и биологические ткани, с целью их микроструктурирования.

Научная новизна работы

1. В сходящихся ИК лазерных пучках в воздухе экспериментально обнаружена стабилизация интенсивности в филаменте, плотности плазмы и поперечного размера сопутствующего плазменного канала при увеличении числовой апертуры более $1-3 \cdot 10^{-2}$.
2. Экспериментально обнаружена симметризация поперечного профиля плотности энергии УФ лазерного пучка после прохождения перетяжки пучка в режиме существенно множественной (несколько сотен и более критических мощностей) филаментации.
3. Продемонстрировано, что фазовая или амплитудная модуляция поперечного профиля лазерного пучка при неизменных других параметрах (энергия, длительность) может изменять длину плазменного канала, образующегося при филаментации сходящихся пучков в воздухе.

4. Экспериментально показано изменение механизма ионизации аргона и азота фемтосекундными УФ лазерными импульсами с резонансного (3+1) на нерезонансный четырехфотонный при увеличении интенсивности выше 1 ТВт/см^2 .
5. Экспериментально наблюдалась множественная филаментация в сходящихся пучках с числовой апертурой, как минимум до 0.65, ИК лазерных импульсов в конденсированных средах.

Практическая значимость работы

1. Применение сходящихся пучков ИК лазерных импульсов в воздухе позволяет без применения нелинейных кристаллов создать квазиточечный (микронных размеров – область филаментации) источник ультракоротких УФ импульсов (преобразование в третью гармонику).
2. Симметризация мощного УФ лазерного пучка после прохождения перетяжки пучка может быть применена для «выравнивания» неоднородностей в распределении плотности энергии широкоапертурных пучков.
3. Управление положением и протяженностью плазменных каналов, образующихся при филаментации амплитудно- или фазово-модулированных лазерных импульсов, позволяет эффективно коммутировать высоковольтные разряды.
4. Исследованные режимы записи линий в природных алмазах могут найти применение в внутриобъемной маркировке алмазов.
5. Методика просветления склеры и записи в ней микрополостей может найти применение в микрохирургии глаза, например, для удаления опухолей.

На основании анализа результатов выполненных исследований автором сформулированы следующие **защищаемые положения**:

1. Увеличение числовой апертуры сходящихся в воздухе пучков фемтосекундных ИК (744 нм) лазерных импульсов более $\sim 10^{-2}$ (до 0.2, как минимум) приводит к изменению режима их самофокусировки и филаментации в воздухе. При пиковой мощности, превышающей критическую ($\sim 3 \text{ ГВт}$), происходит стабилизация параметров одиночного филамента: прекращается рост интенсивности и плотности плазмы, не меняется поперечный размер плазменного канала. При пиковой мощности лазерного импульса,

соответствующей нескольким критическим мощностям, возникает множественная филаментация, при которой диаметр плазменных каналов (2-4 мкм) на порядок меньше, чем при филаментации коллимированных пучков.

2. Фазовые и амплитудные искажения профиля гауссового пучка, сформированные при помощи адаптивных оптических систем, оптических элементов и амплитудных масок, влияют на условия самофокусировки различных пространственно-временных областей этого пучка и на особенности филаментации сходящихся пучков ультракоротких лазерных импульсов ИК- и УФ- диапазонов спектра. Закономерности влияния таких искажений позволили определить условия формирования плазменных каналов при филаментации в воздухе и управления их параметрами, включая распределение электронной плотности и пространственные размеры.
3. При интенсивностях ультракороткого лазерного импульса УФ диапазона спектра (248 нм), приближающихся к филаментационному уровню (более 1 ТВт/см^2) и превышающих его, превалирует нерезонансный четырех-фотонный механизм ионизации аргона и азота в нормальных условиях. При меньших интенсивностях лазерного импульса многофотонная ионизация газов происходит в резонансном режиме при поглощении (3+1) квантов.
4. Полученные закономерности распространения сходящихся пучков мощных ультракоротких лазерных импульсов в конденсированных средах позволяют реализовать филаментационный режим распространения надкритических сходящихся пучков с числовой апертурой до 0.65, как минимум. Выявленные особенности такого распространения дают возможность провести в объёме природного алмаза запись линий с толщиной менее 2 мкм, а также формировать внутриобъемные микро-полости при однократном импульсном воздействии на просветленную раствором глюкозы глазную склеру.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации представлены в 18 работах в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science (стр. 34), и в 23 материалах международных конференций (стр. 36).

Материалы диссертации докладывались на Ученом совете ФИАН, научных семинарах в ФИАН, ИОФ РАН и МГУ, на многих всероссийских и международных конференциях, в том числе:

High energy/average power lasers and intense beam applications, 2007, San Jose, California, USA; 3rd International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena “Channeling 2008”, 2008, Erice, Italy; XVII International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers, 2008 Lisboa, Portugal; ILLA / LTL '2009 International Conference & Symposium, 2009 Smolyan, Bulgaria; VI International Conference "Beam technologies and laser application", 2009, Saint-Petersburg Russia; XVI Symposium High Resolution Molecular Spectroscopy (HIGHRUS 2009), 2009 г., пос. Листвянка, Иркутская обл., Россия; III Всероссийская конференция «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине», 2009, Новосибирск, Россия; 6th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2009 San Francisco, CA, USA; 4-th International Conference on the Frontiers of Plasma Physics and Technology, 2009, Kathmandu, Nepal; International Symposium on High Power Laser Ablation 2010 Santa Fe, NM USA; International Conference Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies (FLAMN-10), 2010 St. Petersburg – Pushkin, Russia; 53 Annual Meeting of the American Physical Society Division of Plasma Physics co-located with 64 th Annual Gaseous Electronics Conf., 2011; Salt Lake City, USA; International Conference "Nonlinear Optics: East-West Reunion" 2011, Suzdal, Russia; ISTC-GSI Young Scientists School “Ultra-High Intensity Light Science and Applications” 2011, Darmstadt, Germany; 2, 3 International Symposium on Laser Interaction with Matter (LIMIS 2012) 2012 Xi'an, China; 2014 Nanjing, China; Conference on Technologies for Optical Countermeasures X; and High-Power Lasers - Technology and Systems 2013 Dresden, Germany; OPTO Meeting for Young Researchers 2013 & IONS-14 2013, Torun, Poland; International Conference ICONO/LAT 2010, Kazan, 2013, Moscow, Russia; X International Symposium “Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures RREPS-13” & III International Conference “Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences”, 2013, Lake Sevan, Armenia; 22, 26th International Laser Physics Workshop (LPHYS'13, 17), 2013, Prague, Czech Republic, 2017 Kazan, Russia; 16, 17th

International Conference on Laser Optics 2014, 2016 Saint-Petersburg, Russia; 5th International Symposium on Filamentation (COFIL2014), 2014, Shanghai, China; 18th International School on Quantum Electronics (ISQE) - Laser Physics and Applications, 2014 Sozopol, Bulgaria; 7th International conference Charge & Neutral Particles Channeling Phenomena, 2016, Sirmione, Italy; XIII International Conference on pulsed lasers and laser applications (AMPL-2017), 2017, Tomsk, Russia.

Отдельные результаты, представленные в диссертационной работе и объединенные в цикл работ под названием «Наблюдение, физические механизмы формирования и применения минифиламентов ультракоротких лазерных импульсов в газовых и конденсированных средах» были удостоены Премии им.Н.Г.Басова ОКРФ ФИАН (2011 г.) в составе научного коллектива А.А.Ионин, С.И.Кудряшов, Л.В.Селезнев и Д.В.Синицын; объединенные в цикл работ под названием «Формирование плазменных каналов при филаментации мощных ультракоротких лазерных импульсов и управление с их помощью высоковольтными электрическими разрядами» были удостоены Премии Физического института им.П.Н.Лебедева РАН (2014 г.) в составе научного коллектива: В.Д.Зворыкин, А.А.Ионин, С.И.Кудряшов, А.О.Левченко, Л.В.Селезнев, Д.В.Синицын, И.В.Сметанин, Е.С.Сунчугашева, Н.Н.Устиновский, А.В.Шутов.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации экспериментальные результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. Численное моделирование, результаты которого представлены в Главах 3 и 4, проводилось научными группами из Института Оптики Атмосферы и Океана СО РАН, г. Томск - проф. Ю.Э. Гейнц и проф. А.А. Землянов; из Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова под руководством проф. В.П.Кандидова и д.ф.м.н. О.Г.Косаревой. Из статьи [15] в «Списке публикаций автора...» в диссертацию вошли экспериментальные результаты по изучению распространения УФ лазерных импульсов после фокальной области в режиме множественной филаментации. Оптоакустический детектор, результаты экспериментов с которым приведены в Главе 5, был предоставлен к.ф.-м.н. Б.А.Тихомировым (ИОА СО РАН), эксперименты с детектором проводились при его непосредственном участии. Натуральные алмазы для микроструктурирования, результаты экспериментов с

которыми приведены в Главе 6, были предоставлены ОАО «Производственное объединение «Кристалл». Ткани глаза для экспериментов, описанных в Главе 6, были предоставлены Центральной клинической больницей РАН.

Структура и объем

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 227 страниц, включая 133 рисунка и список литературы из 205 наименований.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и задачи диссертационной работы, сформулирована научная новизна, показана практическая значимость работы и представлены выносимые на защиту научные положения.

В **Главе 1** «Филаментация фемтосекундных лазерных импульсов в прозрачных средах» описаны основные физические процессы, которые происходят при филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов, приводится обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию филаментации лазерных импульсов в газообразных и конденсированных средах и сопутствующих этому явлений.

В **Главе 2** «Экспериментальная установка и методики эксперимента» кратко описывается фемтосекундная лазерная система, генерирующая ультракороткие лазерные импульсы, приводятся ее характеристики. Описываются основные приборы и методы измерения параметров лазерных импульсов и лазерной плазмы, которые применялись в экспериментах, результаты которых описаны в главах 3-6.

В **Главе 3** «Филаментация фемтосекундных импульсов в воздухе в сильносходящихся пучках» представлены результаты исследования филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов ИК и УФ диапазонов в воздухе в сильносходящихся пучках, которые обычно применяются для лазерной обработки. Рассмотрены параметры плазменных каналов, образующихся при филаментации, в том числе множественной. Исследована симметризация поперечного профиля пучка, возникающая при прохождении перетяжки пучка. Исследованы энергетические и пространственные характеристики третьей гармоники, генерируемой в сходящихся пучках.

В разделе 3.1 экспериментально изучается влияние числовой апертуры сходящегося пучка на интенсивность лазерного импульса в филаменте (Рис.1). Увеличение числовой апертуры приводило к росту интенсивности, однако при числовых апертурах более 0.01 интенсивность лазерного импульса стабилизировалась на величине $\sim 10^{14}$ Вт/см².

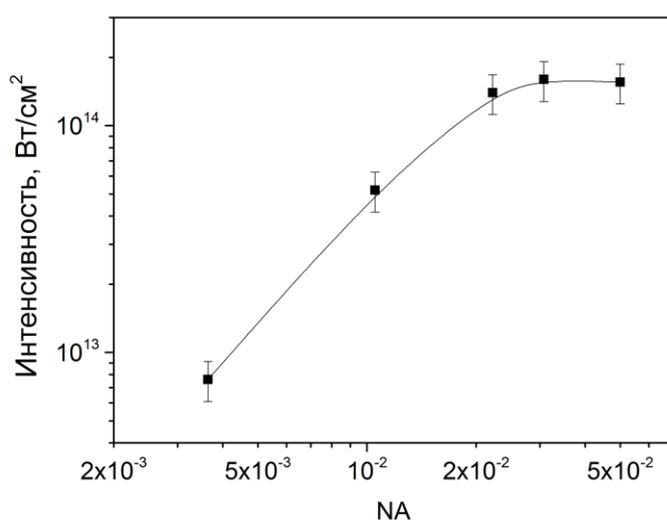


Рис.1. Зависимость интенсивности лазерного импульса в филаменте от числовой апертуры сходящегося пучка.

В разделе 3.2 исследуются параметры плазменных каналов, образующихся при филаментации сходящихся пучков в воздухе. На Рис.2 показана зависимость радиуса плазменного канала от числовой апертуры сходящегося пучка. Увеличение числовой апертуры сходящегося пучка в этих экспериментах приводило к уменьшению поперечного размера формирующихся при филаментации плазменных каналов. При относительно слабой фокусировке (числовая апертура менее 0.01) радиус плазменного канала слабо изменялся в диапазоне 40-60 мкм. При увеличении числовой апертуры более 0.01, с ростом параметра NA радиус уменьшался и при числовой апертуре 0.03 и более поперечный размер плазменного канала практически не изменялся, оставаясь на уровне 2-4 мкм. Следует отметить, что для максимальной в этих экспериментах числовой апертуры (0.2) размер абберрационного пятна в несколько раз превышал полученный радиус плазменного канала, т.е такая стабилизация не связана с абберрационным эффектом.

В разделе также представлены результаты экспериментов по измерению электронной плотности плазмы, образующейся при филаментации сходящихся пучков. На Рис.3 показана зависимость плотности плазмы от числовой апертуры, полученная двумя различными экспериментальными методами (по углу рефракции

лазерного импульса на плазме и по штарковскому уширению триплета линий атомарного кислорода) и в численном расчете (расчет проводился проф. Ю.Э. Гейнц и проф. А.А. Землянов, ИОА СО РАН). Рост числовой апертуры приводил к увеличению плотности плазмы, а при числовой апертуре более 0.02 – 0.03 значение плотности плазмы стабилизировалось на уровне $2-3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

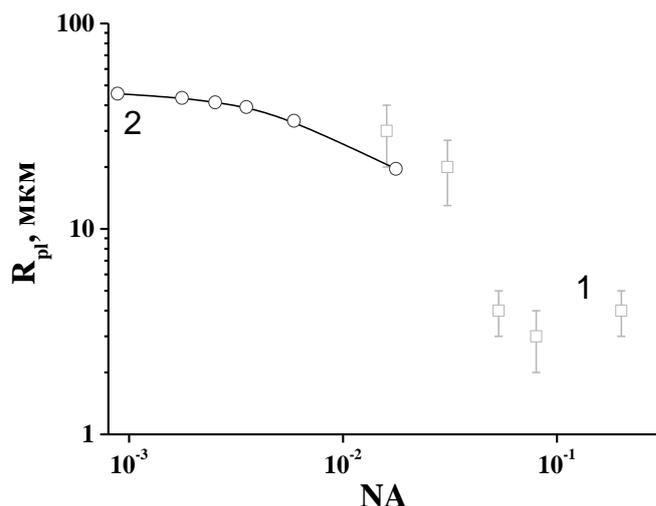


Рис.2. Зависимость радиуса плазменного канала от числовой апертуры сходящегося пучка. 1 – эксперимент, 2 результаты численного моделирования (проф. Ю.Э. Гейнц и проф. А.А. Землянов, ИОА СО РАН)

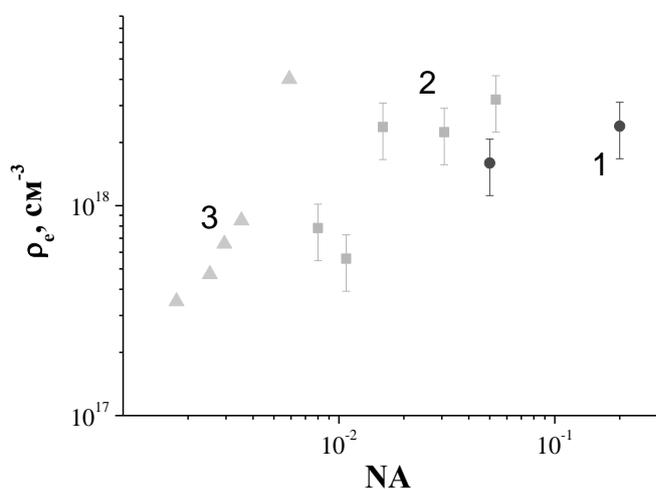


Рис.3. Зависимость плотности плазмы в филаменте от числовой апертуры сходящегося пучка. 1, 2 – экспериментальные данные, полученные различными методами; 3 результаты численного моделирования (проф. Ю.Э. Гейнц и проф. А.А. Землянов, ИОА СО РАН)

В следующем подразделе приводятся экспериментальные результаты исследования плазменных каналов, образующихся при филаментации лазерных импульсов с мощностями в несколько раз превышающими критическую мощность самофокусировки (для ИК импульсов в воздухе около 3 ГВт). Продемонстрировано, что при числовой апертуре сходящегося пучка более 0.01 двукратное превышение мощности импульса над критической уже приводит к образованию двух

плазменных каналов, т.е. начинается множественная филаментация. При числовых апертурах 0.01 и менее даже при десятикратном превышении мощности импульса над критической образуется одиночный филамент.

В разделе 3.3 экспериментально рассматриваются такие режимы филаментации сходящихся пучков, когда филамент протягивается за геометрический фокус пучка. Проводится сравнительный анализ параметров плазменных каналов, образованных при филаментации ИК и УФ лазерных импульсов. В этих экспериментах филаментация ИК импульсов приводила к рефокусировке излучения за перетяжкой, тогда как плазменный канал, созданный УФ импульсом, плавно протягивался за геометрический фокус.

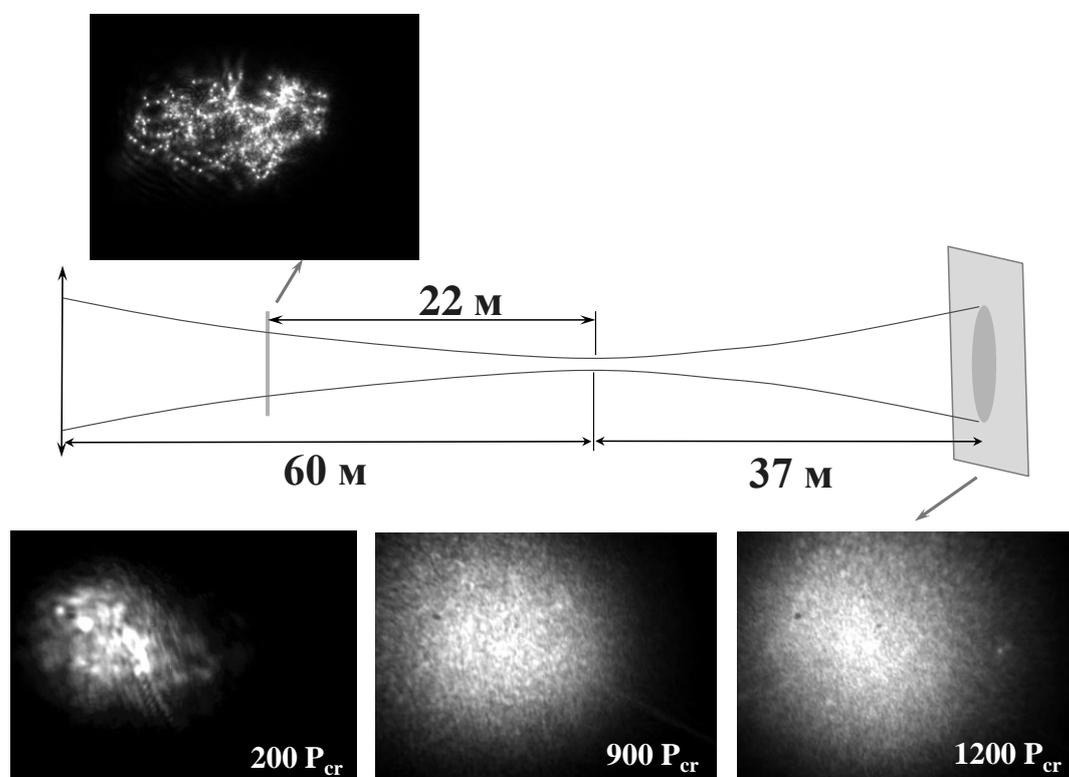


Рис.4. Распределение плотности энергии мощного субтераваттного УФ лазерного импульса на расстоянии 22 м до перетяжки (вставка сверху слева, мощность около 800 P_{cr}) и на расстоянии 37 м после перетяжки с различной мощностью (три вставки внизу, мощность указана в критических мощностях самофокусировки P_{cr}).

В разделе 3.4 приводятся результаты экспериментального исследования распространения мощного субтераваттного УФ лазерного импульса в воздухе и его прохождения через перетяжку пучка. На Рис.4 на вставке сверху слева показано

поперечное распределение плотности энергии такого пучка, полученное на расстоянии 22 м от перетяжки сходящегося пучка (мощность около 800 критических мощностей самофокусировки (P_{cr}), для УФ импульса в воздухе $P_{cr} \sim 100$ МВт). Распределение очень неоднородно, видны отдельные яркие точки, соответствующие отдельным филаментам. После прохождения перетяжки пучка при больших мощностях лазерного импульса ($900 P_{cr}$ и $1200 P_{cr}$) происходит сглаживание (симметризация) поперечного распределения плотности энергии (Рис.4, две правые вставки внизу). При мощностях $200 P_{cr}$ и менее такая симметризация плотности энергии не происходила. Следует отметить, что в более поздней работе (Milian et al., 2015) была получена подобная симметризация для мощных ИК импульсов.

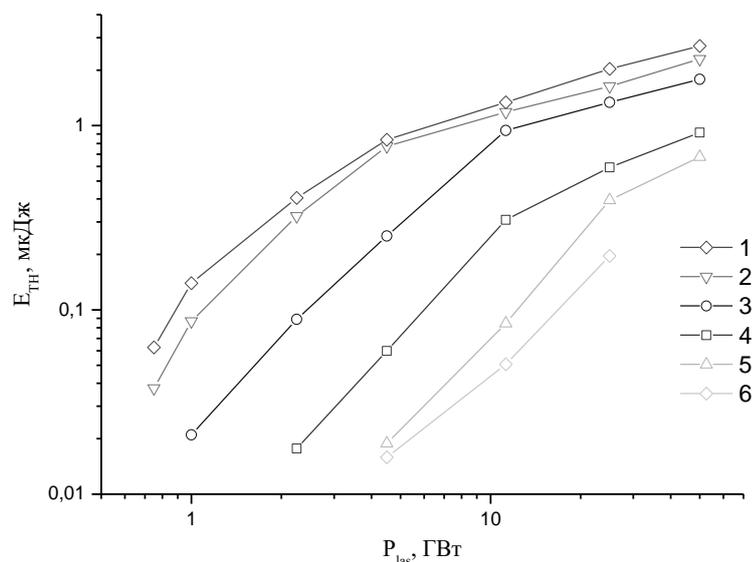


Рис.5. Зависимость энергии третьей гармоники от мощности лазерного импульса для различной числовой апертуры пучка: 1 – 0.06, 2 – 0.03, 3 – 0.016, 4 – 0.01, 5 – 0.008, 6 – 0.004

В разделе 3.5 приводятся экспериментальные результаты по изучению уширения спектра, возникновению конической эмиссии и генерации третьей гармоники при филаментации сходящихся пучков. На Рис.5 показаны зависимости энергии третьей гармоники от энергии лазерного импульса, полученные при различных числовых апертурах сходящегося пучка. Следует отметить, что критическая мощность самофокусировки для таких условий составляет около 3 ГВт. При числовых апертурах пучка 0.01 и более генерация третьей гармоники наблюдалась при мощностях меньших, чем критическая, т.е. в условиях, когда филаментация не происходила.

Глава 4 «Филаментация сходящихся лазерных пучков при амплитудной или фазовой модуляции поперечного профиля» посвящена исследованию влияния амплитудных или фазовых искажений пучка, которые могут вноситься оптическими элементами, доставляющими сходящийся лазерный пучок до объекта обработки, на самофокусировку и филаментацию. В разделе 4.1 описано влияние амплитудной модуляции поперечного профиля лазерного пучка на филаментацию, для этого рассматривалось влияние диафрагм различной формы (применялись круглая, треугольная и сегментированная, состоящая из 4 круглых отверстий) на распределение пиковой плотности энергии лазерного импульса вдоль оси распространения (Рис.6). Также, как и в численном моделировании, выполненным проф.Ю.Э.Гейнцем и проф. А.А.Земляновым из ИОА СО РАН, протяженность канала с большой пиковой плотностью энергии наименьшей была для гауссова пучка.

Отличие самофокусировки и филаментации пучков разных профилей может быть объяснено различием в динамике дифракции. Действительно, диафрагмирование приводит к появлению дополнительных локальных максимумов в распределении интенсивности, при этом положение таких максимумов зависит от формы диафрагмы. Например, для треугольной диафрагмы максимумы в распределении энергии пучка образуются в вершинах фигуры, тогда как сегментированный пучок разделен на четыре части, которые находятся на некотором расстоянии друг от друга. Образование таких максимумов определяет дальнейшее развитие самофокусировки пучка.

В разделе 4.2 рассматривается влияние фазовых искажений - сферическая aberrация, астигматизм, фазовый набег, возникающий в результате прохождения лазерного импульса через конденсированную среду (плоскопараллельную пластину) – на последующую самофокусировку и филаментацию ультракороткого лазерного импульса.

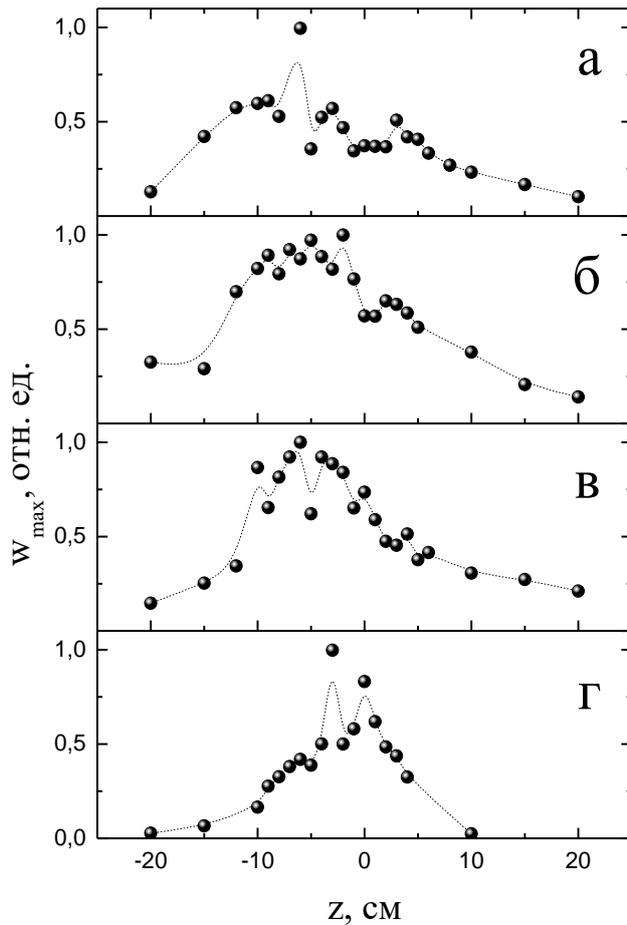


Рис. 6. Распределения пиковой плотности энергии (w_{\max}) импульса для различных диафрагм: а) круглая, б) треугольная, в) сегментированная, г) гауссов профиль без диафрагмы. Данные для наглядности аппроксимированы сплайном

В экспериментах сферическая aberrация вносилась в пучок с помощью адаптивного зеркала. Сферическая aberrация соответствует следующему полиному Цернике:

$$\varphi(r) = k\sqrt{5}(6(r/a_0)^4 - 6(r/a_0)^2 + 1) \times A_z,$$

где a_0 – диаметр пучка по уровню $1/e$, A_z – амплитуда смещения поверхности деформируемого зеркала, то есть амплитуда сферической aberrации. Эксперименты проводились с УФ и ИК импульсами. В экспериментах с ИК импульсами их энергия составляла 2 мДж. Излучение фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 70 см. С помощью оцифровки изображения ПЗС камеры были получены интегральные по поперечному сечению профили люминесценции плазменных каналов, образующихся при филаментации (Рис.7). Увеличение амплитуды сферической aberrации A_z приводило к существенному удлинению плазменного канала. Следует отметить, что интенсивность люминесценции плазмы при этом снижалась. Результаты численного моделирования, проведенного

проф.О.Г. Косаревой и к.ф.-м.н.Н.А. Пановым (МГУ) качественно хорошо согласуются с экспериментальными.

Таким образом, система адаптивной оптики позволяет не только исправлять волновой фронт излучения, но также вносить дополнительные aberrации. При внесении сферической aberrации длина плазменных каналов, образующихся при филаментации как УФ, так и ИК импульсов, увеличивается.

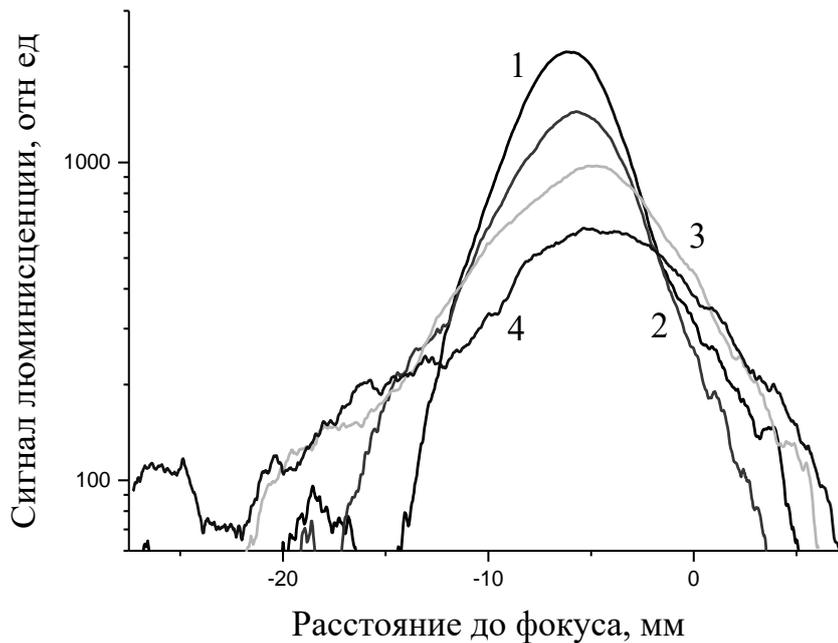


Рис. 7. Интенсивность люминесценции плазменных каналов, образующиеся при филаментации импульсов с различной амплитудой сферической aberrации A_z : 1 – 0 мкм, 2 – 0.1 мкм, 3 – 0.15 мкм, 4 – 0.18 мкм.

Помимо сферической aberrации в оптической схеме возможно появление других типов aberrаций, например, астигматизм. Такой тип aberrации можно специально внести с помощью деформируемого зеркала, описанного выше, а может появляться в оптической схеме при применении сферического зеркала, установленного под небольшим углом к оптической оси. Поворот лазерного пучка зеркалом на угол α приводит к возникновению астигматизма волнового фронта $\varphi(x,y)$:

$$\varphi(x, y) = \frac{kx^2}{2f_x} + \frac{ky^2}{2f_y}. \quad (3.14)$$

Для характеристики астигматизма вводился безразмерный параметр $\Delta f/f_0$, зависящий от угла α , где $\Delta f = |f_x - f_y|$ - это расстояние между сагиттальным и меридиональным фокусами, а f_0 - среднее фокусное расстояние, которое определялось, как $f_0 = (f_x + f_y)/2$. Распределение линейной плотности вдоль плазменного канала измерялось с помощью продольной системы электродов для различной жесткости фокусировки пучка, энергии импульса и параметра астигматизма. Экспериментально полученные распределения линейной плотности плазмы, возникающие при филаментации ИК лазерных импульсов, показаны на Рис.8. Для сильносходящихся ИК пучков ($f_0 = 25$ см) в распределении линейной плотности плазмы вдоль оси распространения рост параметра астигматизма проявлялся в возникновении двух ярко выраженных максимумов (Рис.8 а), в областях соответствующих меридиональному и сагиттальному фокусам. В этом случае протяженность плазменного канала, возникающего при филаментации, возрастала почти в два раза. При более мягкой фокусировке ($f_0 = 52$ см) эти максимумы становились менее выраженными, а удлинение канала при увеличении астигматизма становилось менее заметным (Рис.8б). При наиболее мягкой в этих экспериментах фокусировке ($f_0 = 110$ см) изменение параметра астигматизма практически не оказывало влияния на протяженность плазменного канала, образующегося при филаментации (Рис.8 в).

Для УФ импульсов наблюдалось аналогичное изменение распределения плотности плазмы при варьировании жесткости фокусировки и степени астигматизма. В расчетах, проведенных научной группой под руководством проф.В.П.Кандидова (МГУ), также наблюдалось, что увеличение астигматизма приводило к возникновению двух максимумов в распределении линейной плотности плазмы, соответствующих положениям сагиттального и меридионального фокусов.

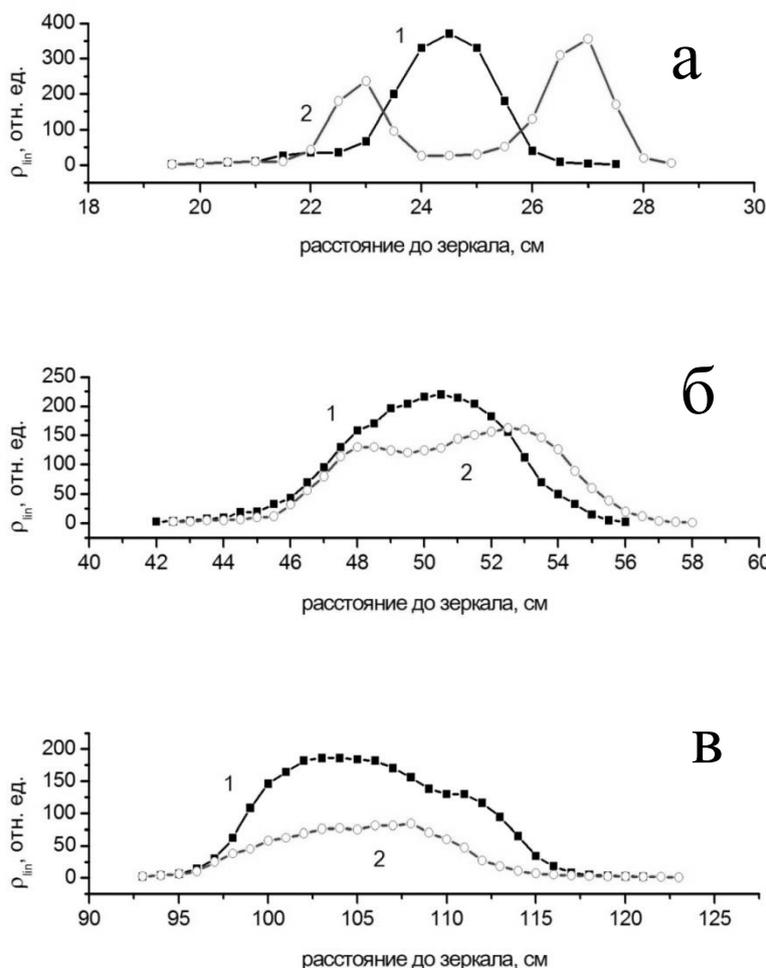


Рис. 8. Распределение линейной плотности плазмы вдоль распространения ИК лазерного импульса. Фокусное расстояние зеркал $f_0 = 25$ см (а), 52 см (б), 110 см (в). Энергия лазерного импульса 1.7 мДж. Параметр астигматизма $\Delta f/f_0 = 0.017$ (1) и 0.16 (2).

Таким образом, экспериментально и численно продемонстрировано, что внесение астигматизма в волновой фронт сильносходящегося пучка приводит к увеличению протяженности плазменного канала, образующегося при филаментации фемтосекундного лазерного импульса.

Керровская добавка к показателю преломления, которая обуславливает возникновение самофокусировки, в конденсированных прозрачных средах существенно (примерно на три порядка) выше, чем в газах. Поэтому в мощных лазерных системах для того, чтобы избежать нелинейных искажений пучка и, как следствие, повреждения оптических элементов применяется отражающая оптика. К сожалению, некоторые проходные оптические элементы, например, окно вакуумируемого компрессора лазерной системы, невозможно исключить из оптической схемы. Наличие проходной оптики может вносить существенные искажения в лазерный пучок. Поэтому отдельный подраздел диссертации был посвящен исследованию зависимости влияния на процесс филаментации и на

протяженность создаваемого при этом плазменного канала толщины проходной оптики, помещенной на значительном расстоянии до старта филамента.

Исследования филаментации сходящегося пучка и зависимость протяженности образующегося при этом плазменного канала от толщины кварцевой пластинки проводились с помощью системы электродов. Лазерный пучок фокусировался с помощью сферического зеркала, фокусное расстояние которого составляло 3 м. На расстоянии около 70 см перед сферическим зеркалом помещались плоскопараллельные пластинки из кварца, обладающие различной толщиной (в этих экспериментах 4.5 и 10.5 мм).

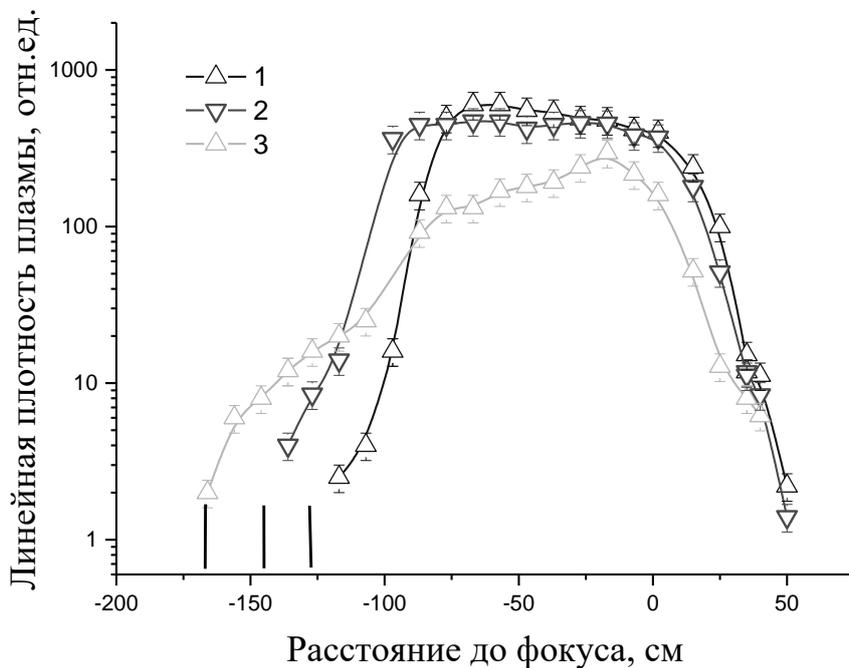


Рис.9. Зависимости распределения линейной плотности плазмы вдоль оптической оси для импульсов, прошедших пластинки различной толщины: 1) 0 мм, 2) 4.5 мм, 3) 10.5 мм. 0 – соответствует положению геометрической перетяжки.

На Рис.9 показаны распределения линейной плотности плазменных каналов, возникающих при филаментации лазерных импульсов прошедших через кварцевую пластинку различной толщины. Наличие даже тонкой кварцевой пластины в оптическом тракте приводило к более раннему началу филаментации. Стоит отметить, что присутствие пластинки не оказывало влияния на завершение филамента. Такое влияние пластинки обусловлено тем, что в пластинке происходит значительный нелинейный набег фазы в приосевой части импульса для наиболее интенсивных временных слоев. Поэтому самофокусировка именно этих слоев, которая определяет начало филаментации, происходит существенно раньше. В то же время, нелинейный набег фазы для наименее интенсивных временных слоев

импульса при распространении в кварцевой пластинке отсутствует. Поэтому наличие пластинки не оказывает на эти слои влияния, их фокусировка происходит вблизи геометрической перетяжки, что и определяет положение завершения филаментации. В этих экспериментах наличие в оптическом тракте импульса пластинки толщиной 10.5 мм приближало начало филаментации почти на 40 см, при этом общая протяженность плазменного канала увеличивалась примерно на 25% (Рис.9). Результаты измерений и численных расчетов находятся в хорошем качественном согласии.

При лазерной обработке многие технологические процессы проводятся в газовой атмосфере. Это могут быть как нормальные условия (воздух при атмосферном давлении), так и инертные газы – аргон, азот и др. При распространении в таких газах высокоинтенсивного сходящегося лазерного пучка возможна их ионизация даже при мощностях существенно меньших, чем критическая мощность самофокусировки, т.е. при отсутствии филаментации. Между тем, присутствие плазмы может существенно изменить условия лазерной обработки. Поэтому в **Главе 5** «Ионизация газов при воздействии мощных ультракоротких лазерных импульсов» рассматриваются процессы ионизации различных газов ультракороткими УФ и ИК лазерными импульсами в широком диапазоне интенсивностей вплоть до значений, наблюдаемых при филаментации ($\sim 5 \cdot 10^{13}$ Вт/см² для ИК и $\sim 2 \cdot 10^{12}$ Вт/см² для УФ диапазонов). В исследовании применяются два взаимодополняющих метода изучения взаимодействия лазерного излучения с газами: оптоакустический (ОА) и оптогальванический (ОГ). Описывается оптоакустическое оборудование, т.к. в других главах оно не используется.

На Рис.10 представлены зависимости амплитуды, регистрируемой при поглощении лазерного импульса с центральной длиной волны $\lambda = 744$ нм, от давления газа для кислорода, азота и атмосферного воздуха. В области давлений 100 – 1000 мбар наблюдалось слабое изменение амплитуды сигнала, связанное с филаментацией излучения. На это указывает то, что в указанной области давлений (100-1000 мбар) при заданной мощности импульса на выходе ячейки наблюдалась характерная коническая структура основного излучения, его третья гармоника и генерация суперконтинуума (уширение спектра) – нелинейные явления,

характерные для филаментации. В общем случае, уменьшение давления газа (уменьшение количества частиц, взаимодействующих с излучением) приводит к увеличению критической мощности самофокусировки.

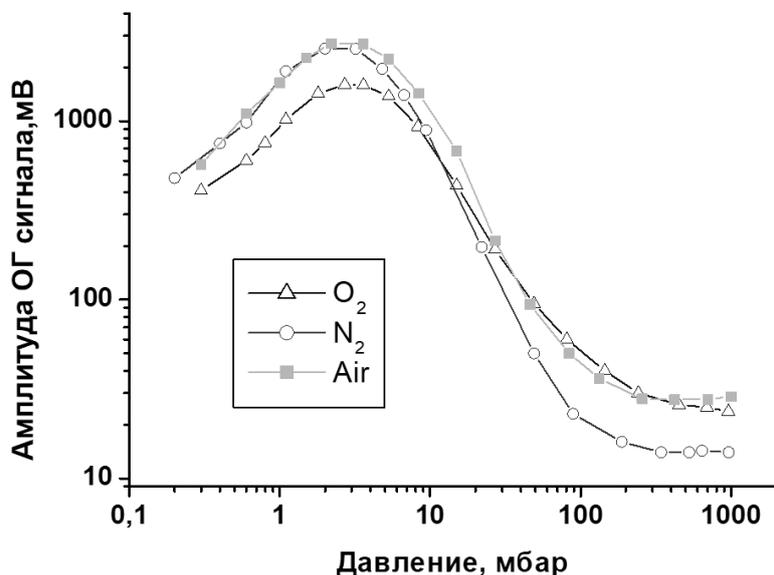


Рис. 10. Зависимость амплитуды ОГ сигнала от давления атмосферного воздуха, азота, кислорода.

Из сопоставления сигналов, полученных для воздуха, азота и кислорода можно провести оценку плотности плазмы. Так при давлениях более нескольких десятков миллибар амплитуда ОГ сигнала, полученного в воздухе, практически совпадает с амплитудой ОГ сигнала в кислороде. При давлениях менее нескольких миллибар этот сигнал совпадает с сигналом в азоте. Такое поведение, по-видимому, связано с тем, что при атмосферном и слегка пониженном давлении вероятность ионизации кислорода (потенциал ионизации 12.07 эВ) выше, чем ионизации азота (потенциал ионизации 15.58 эВ). При существенном уменьшении давления количество молекул кислорода уменьшается, и энергии импульса начинает хватать для ионизации азота. В эксперименте амплитуда ОГ сигнала, полученного в воздухе, начинает отличаться от амплитуды сигнала в кислороде при давлениях ~ 20 мбар. Отсюда, предполагая полную ионизацию оставшихся молекул кислорода, можно сделать оценку плотности плазмы, которая составляет $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Поскольку энергия импульса и условия фокусировки не изменялись, то можно предположить, что при атмосферном давлении плотность плазмы составит такую же величину, что неплохо согласуется с результатами, описанными в Главе 3.

В Главе также рассматривается ионизация газов при взаимодействии с УФ (длина волны 248 нм, энергия кванта 5 эВ) лазерными импульсами. Стоит отметить, что для такой длины волны параметр адиабатичности Келдыша даже для довольно высоких интенсивностях больше единицы, т.е. ионизация происходит в многофотонном режиме.

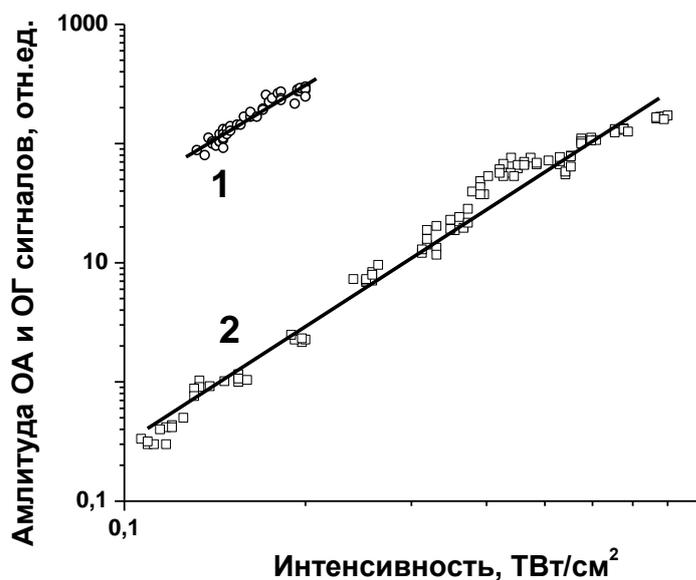


Рис.11. Зависимости ОА (1) и ОГ (2) сигналов в азоте атмосферного давления от интенсивности УФ лазерного импульса. Показатель нелинейности у кривой (1) 3.0 ± 0.1 , у кривой (2) – 3.3 ± 0.1

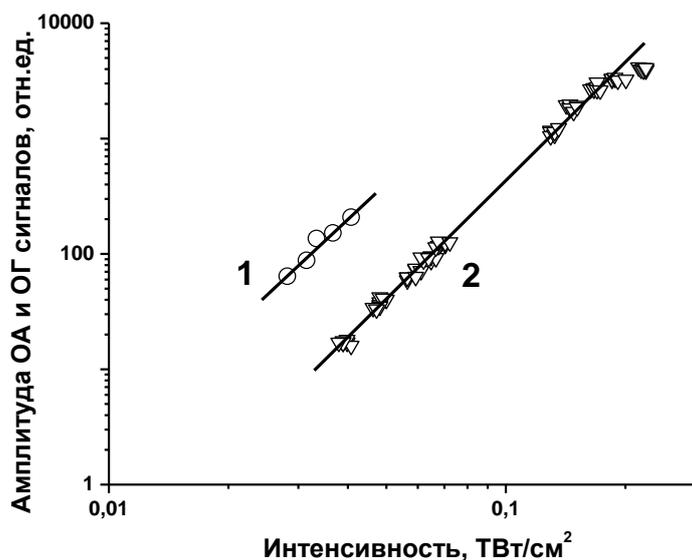


Рис.12. Зависимости ОА (1) и ОГ (2) сигналов в аргоне атмосферного давления от интенсивности УФ лазерного импульса. Показатель нелинейности у кривой (1) 3.2 ± 0.4 , у кривой (2) – 3.3 ± 0.1 .

На Рис.11 показаны зависимости ОА и ОГ сигналов от интенсивности УФ лазерного импульса, полученные в азоте атмосферного давления. Стоит отметить, что потенциал ионизации азота составляет 15.58 эВ, то есть при величине УФ

кванта 5 эВ, нелинейность процесса ионизации азота должна составлять $k = 4$. Однако, в наших экспериментах вплоть до интенсивностей ~ 1 ТВт/см², ионизация азота происходила по кубическому закону. Причем такая зависимость степени фотонности от интенсивности наблюдалась в независимых экспериментах по регистрации как ОА (кривая 1), так и ОГ (кривая 2) сигналов (Рис.11). По-видимому, в данном случае ионизация азота происходит по схеме резонансной многофотонной ионизации (3+1). В этом случае происходит трехфотонное возбуждение высоколежащих ридберговских состояний $b^1\Pi_u$, $b'^1\Sigma_u^+$, $c^1\Pi_u$, $c'^1\Sigma_u^+$ и $o^1\Pi_u$ молекулы азота относительно широкополосным ($h\nu = 5 \pm 0.02$ эВ) лазерным импульсом. Затем, происходит быстрая одноквантовая фотоионизация уже возбужденной молекулы.

Эксперименты, проведенные с аргоном (Рис.12), также показали зависимость близкую к кубической от интенсивности вплоть до ~ 0.3 ТВт/см² (потенциал ионизации аргона составляет 15.76 эВ). По-видимому, здесь мы имеем механизм ионизации, сходный с ионизацией азота (3+1): трехквантовое возбуждение высоколежащего ридберговского состояния $4d'[5/2]$, $J=3$ (энергия уровня 4.972 эВ) с последующей одноквантовой ионизацией. Таким образом, при интенсивностях УФ импульсов менее ~ 1 ТВт/см², в аргоне и азоте преобладает механизм резонансной многоквантовой ионизации (3+1).

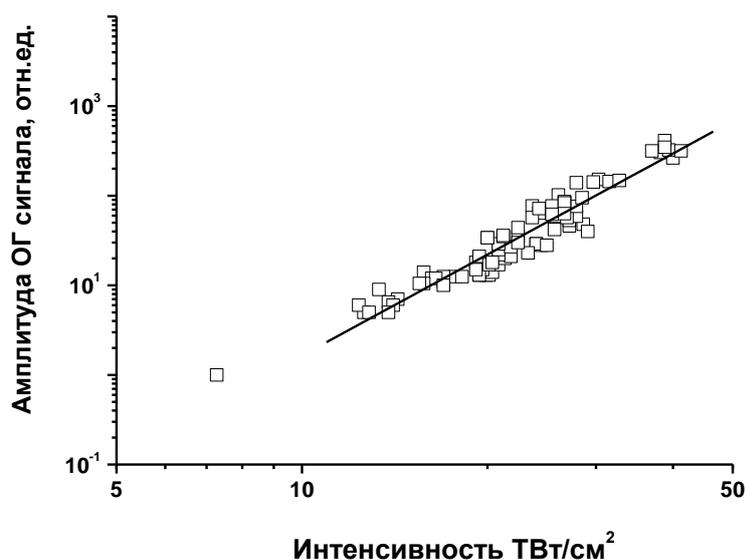


Рис.13. Зависимость ОГ сигнала в азоте атмосферного давления от интенсивности УФ лазерного импульса. Показатель нелинейности у кривой $k = 3.7 \pm 0.1$.

Дальнейшее увеличение интенсивности УФ лазерных импульсов (вплоть до нескольких десятков ТВт/см^2) приводило к изменению степени фотонности ионизации как азота, так и аргона до 4, т.е. наблюдалась прямая четырехфотонная нерезонансная ионизация газов (Рис. 13-14). По-видимому, при таких величинах поля оказываются существенными штарковские сдвиг и расщепление фотовозбуждаемых высоколежащих ридберговских уровней, а также пондеромоторный сдвиг потенциала ионизации в переменном линейно поляризованном электрическом поле. В результате, возникает необходимость в поглощении дополнительного УФ фотона для ионизации. При этом процесс ионизации азота и аргона становится четырехквантовым, т.е. нерезонансным.

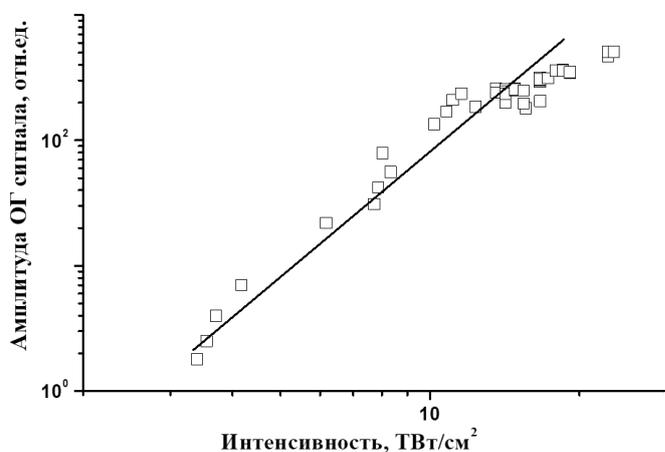


Рис.14. Зависимость ОГ сигнала в аргоне атмосферного давления от интенсивности УФ лазерного импульса. Показатель нелинейности у кривой $k = 3.8 \pm 0.15$.

В **Главе 6** «Филаментация и микроструктурирование конденсированных сред» рассматриваются различные режимы распространения, включая филаментацию, фемтосекундных лазерных импульсов в разных прозрачных средах. При лазерной обработке поверхности материала, находящейся в жидкости, например при синтезе наночастиц, при высокой пиковой мощности сходящегося пучка возможен переход в филаментационный режим. Более того в твердых средах реализация режима филаментационного распространения будет приводить к созданию протяженных внутриобъемных микроструктур. Такие структуры могут быть востребованы в оптоэлектронике, позволят создавать интегрированные микрооптические элементы для таких применений, как оптические волноводы, брэгговские решетки, элементы памяти и др.

В разделе 6.1 приводятся характеристики лазерной системы, основные методы и оптические схемы, применяемые в Главе 6.

Раздел 6.2 посвящен изучению филаментации ультракоротких лазерных импульсов, распространяющихся в полиметилметакрилате (оргстекле) и исследованию режимов его микроструктурирования. В описанных ниже экспериментах лазерное излучение при нормальном падении фокусировалось микрообъективом с числовой апертурой $NA = 0.65$ на глубину ≈ 300 мкм в объем образца. При различных энергиях падающих импульсов были записаны последовательности микроканалов, обусловленных филаментацией (Рис. 15).

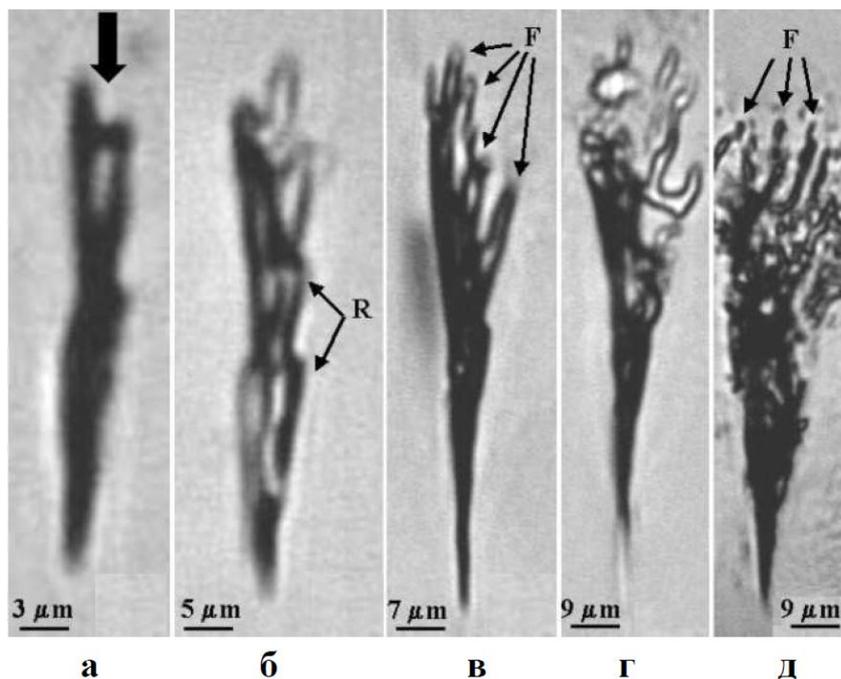


Рис. 15. Снимки микроканалов, образующихся при филаментации в ПММА, при $E = 0.5$ (а), 2 (б), 4 (в), 10 (г) и 25 (д) мкДж. Направление падения импульса - сверху вниз. Стрелками отмечены области рефокусировки (R) на (б) и множественной филаментации (F) на (в, д). Масштаб показан на рисунках.

При увеличении энергий в диапазоне 0.5-2 мкДж (пиковая мощность $P \approx 5-20$ МВт $> P_{crit, PMMA} \approx 3$ МВт) средний диаметр D и длина L каналов монотонно росли от 3 до 8 мкм и от 19 до 45 мкм, соответственно (Рис. 15а,б). Эти значения L значительно превышают длину перетяжки ≈ 1 мкм. При более высоких значениях энергии лазерных импульсов 4-25 мкДж ($P = 40-250$ МВт) форма каналов становилась более сложной. В этих экспериментах наблюдались микроструктуры выраженной конической формы и с явным разветвлением их начальной части (Рис. 15в-д). Такое разветвление указывает на множественную филаментацию в области, соответствующей началу микроканала. В этой области формировался пучок

отдельных треков (филаментов) с длиной в несколько микрон и с минимальным диаметром ~ 1.5 мкм (Рис. 15в-д).

В этом разделе было показано, что микроструктурные изменения в ПММА обусловлены филаментацией лазерных импульсов в твердом материале. Даже в условиях очень сильносходящихся пучков (в экспериментах вплоть до числовой апертуры $NA=0.65$) при существенно закритических мощностях наблюдалась множественная филаментация. Проведено исследование по возможностям микромаркировки образцов полиметилметакрилата. Зная условия возникновения филаментации в среде можно выбрать экспериментальные условия, позволяющие достичь наименьших значений диаметра и длины микроканала. В эксперименте были получены величины ~ 2 мкм и ~ 15 мкм, соответственно ($NA = 0.65$, ~ 0.5 мкДж, скорость сканирования - 200 мкм/с). Уменьшение скорости сканирования (10 мкм/с и менее) позволяло организовать запись линий, шириной ~ 3 мкм.

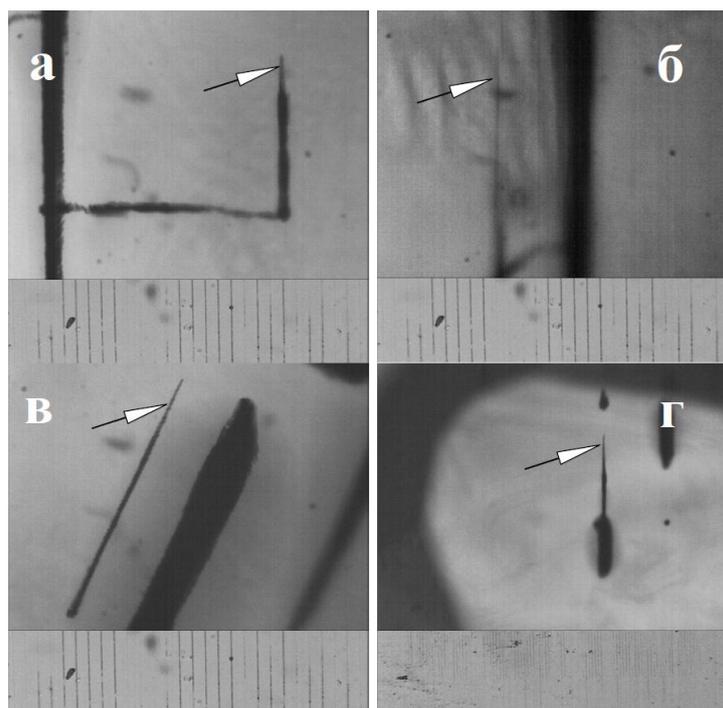


Рис.16. (а) – дорожка в объеме (глубина 300 мкм), при убывающей энергии лазерных импульсов 2-1 мкДж, (б) - дорожка в объеме (глубина 300 мкм), при убывающей энергии лазерных импульсов 2-0.5 мкДж, (в)- дорожка (показана стрелкой) в объеме на глубине 300 мкм, при убывающей энергии лазерных импульсов 4-1 мкДж, (г) – дорожка, записанная на глубине 500 мкм в объеме алмаза

при уменьшающейся снизу вверх энергии лазерных импульсов 13 - 0.8 мкДж. Ниже каждого рисунка - калибровочная шкала, период 10 мкм.

В разделе 6.3 приводятся результаты экспериментального исследования различных режимов распространения ультракоротких лазерных импульсов в природном и искусственном алмазах. Для записи структур в объеме образца фокус микрообъектива заглублялся на 300 и 500 мкм. В принципе глубина залегания структур может варьироваться от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров. На Рис.16а-в при большем увеличении показаны записанные структуры. Из Рис.16а,в видно, что при энергии ~ 1 мкДж возможна запись структур с поперечным размером 2-3 мкм. При уменьшении энергии до ~ 0.5 мкДж толщина записанной линии уменьшается (Рис.16б). При этом разрешения ПЗС камеры с микроскопом не хватает для измерения толщины. Оценки показывают, что максимальная толщина линии в этих экспериментах не превышает 1.5 мкм.

В разделе 6.4 представлены результаты исследования взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с биологическими тканями донорского глаза. Метод лазерной коррекции зрения стал применяться с 1986 и получил широкое распространение в мире. В настоящее время проводятся исследования возможности применения фемтосекундных лазерных импульсов для воздействия не только на роговицу, но и на другие ткани глаза, например, склеры глаза. Однако, из-за относительно сильного отличия коэффициентов преломления коллагена ($n_{col} \approx 1.47$) и водной компоненты внутритканевой жидкости ($n_{water} \approx 1.34$) - основные компоненты склеры – склера является сильно-рассеивающей средой. Из-за этого применение лазера для воздействия на склеру требует либо использования специфических длин волн, либо специальной обработки образца, например, обезвоживания ткани жесткими и небезопасными в клиническом отношении биосовместимыми дегидратирующими агентами. Анализ литературы показал, что существует более безопасный биосовместимый натуральный просветляющий агент – глюкоза (40%-ный водный раствор вещества) Оптический эффект глюкозы обусловлен не нежелательным эффектом дегидратации ткани склеры, а подстройкой показателя преломления внутритканевой жидкости до более высокого показателя преломления ее фибрильной компоненты. В этом разделе

рассматривается взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов с тканями глаза (роговицей и склерой – предоставлены Центральной клинической больницей РАН), а также возможность применения нетоксического натурального реагента для просветления ткани склеры. Просветление осуществлялось приложением тампона с просветляющим агентом в нужном месте склеры после удаления конъюнктивы.

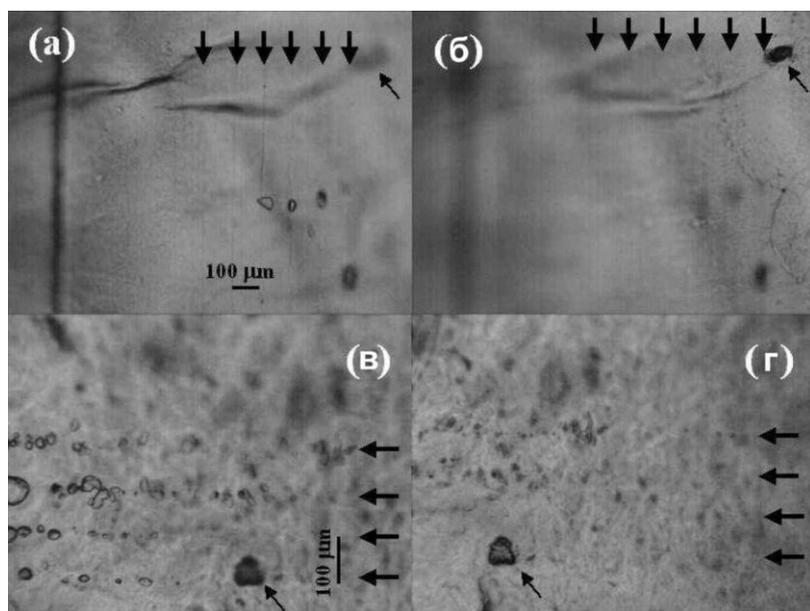


Рис.20. Изображение треков микро-пузырьков (показаны стрелками) в роговице (а, б – 0.8-12 мкДж, $NA = 0.4$) и в просветленной склере (в, г – 0.4-36 мкДж, $NA = 0.4$), полученные с помощью оптического микроскопа. (а, в) – изображение в объеме, (б, г) – изображение поверхности

В экспериментах «in vitro» при одноимпульсном фемтосекундном воздействии формировались внутриобъемные микрополости в роговице и склере тканей донорского глаза. Дорожки, записанные в ткани роговицы при различных энергиях лазерных импульсов (от 0.8 до 12 мкДж, $NA = 0.4$), состояли из отдельных микропузырьков (Рис.17а). Длина дорожек составляла около 2 мм, заглубление - около 400 мкм, что определялось с помощью оптической микроскопии. Следует отметить, что нарушение структуры вышерасположенных тканей не наблюдалось (Рис.17б). В склере в подобных условиях также были записаны микродорожки 2-мм длины при энергиях 0.4-36 мкДж. Глубина записанных структур также составляла около 400 мкм. В экспериментах со склерой перед воздействием лазерных импульсов применялось предварительное просветление склеры с помощью 40% раствора

глюкозы. Следует отметить, что при проведении экспериментов с непросветленной склерой наблюдалось существенное рассеяние лазерной энергии в тканях склеры. Проведенный последующий гистологический анализ показал наличие только поверхностных кратеров при различных условиях эксперимента ($NA = 0.17$, энергия 3-20 мкДж). Глубина таких кратеров не превышала нескольких десятков микрон.

В Заключение диссертационной работы представлены **основные результаты** проведенных исследований:

1. Для определения закономерностей филаментации при различных значениях числовой апертуры сходящихся пучков от 0.004 до 0.2 проведены эксперименты с ультракороткими ИК и УФ лазерными импульсами. Показано, что параметры филамента и плазменного канала стабилизируются при числовой апертуре сходящегося пучка более 10^{-2} : интенсивность $\sim 10^{14}$ Вт/см², радиус 2-4 мкм, плотность плазмы $\sim 3 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Продемонстрировано, что при таких условиях множественная филаментация (наличие нескольких плазменных каналов) наблюдается уже при двух- трех- кратном превышении мощности лазерного импульса над критической мощностью самофокусировки, при этом диаметр отдельных плазменных каналов на порядок меньше, чем при филаментации коллимированных пучков.

2. Проведенные эксперименты по изучению распространения сходящихся субтераваттных УФ лазерных импульсов в воздухе (до 200 мДж при длительности импульса ~ 900 фс) показали, что при значительном увеличении мощности ультракороткого лазерного импульса – более 200 раз выше критической мощности самофокусировки (~ 100 МВт) - происходит изменение характера прохождения таким импульсом перетяжки пучка в режиме множественной филаментации, что проявляется в симметризации (сглаживание) распределения энергии по поперечному сечению пучка.

3. Показано, что в сходящихся пучках генерация третьей гармоники происходит при мощностях импульса в несколько раз меньших, чем критическая мощность самофокусировки (~ 3 ГВт), т.е. при отсутствии филаментации. Увеличение мощности основного излучения вплоть до 50 ГВт и числовой апертуры сходящихся пучков до 0.06 приводило к росту энергии генерируемой третьей

гармоники до 2.7 мкДж, при этом размеры излучающей области приближались к микронным (2-4 мкм).

4. Проведены экспериментальные исследования влияния фазовых и амплитудных искажений поперечного профиля гауссового пучка, которые создавались с помощью адаптивной оптической системы, оптических элементов и амплитудных масок. В результате воздействия на условия самофокусировки различных областей сходящегося лазерного пучка определены закономерности филаментации ультракоротких лазерных импульсов ИК- и УФ- диапазонов спектра, которые позволили управлять параметрами формирующихся при этом плазменных каналов, включая распределение электронной плотности и пространственные размеры.

5. Представлены результаты по изучению ионизации различных газов ультракороткими УФ и ИК лазерными импульсами в широком диапазоне интенсивностей вплоть до характерных значений, наблюдаемых при филаментации в газах ($\sim 5 \cdot 10^{13}$ Вт/см² для ИК и $\sim 2 \cdot 10^{12}$ Вт/см² для УФ диапазонов). Для аргона и азота при переходе режима распространения ультракороткого УФ лазерного импульса от линейного к филаментационному при интенсивностях излучения более 1 ТВт/см² происходит изменение механизма ионизации, так при малых интенсивностях ионизация этих газов происходит при поглощении (3+1) квантов, а при интенсивностях, приближающихся и превышающих филаментационный уровень, доминирует нерезонансный четырехфотонный механизм ионизации

6. Проведено экспериментальное исследование распространения ультракоротких лазерных импульсов в конденсированных средах, в том числе в режиме филаментации. Показано, что филаментация, в том числе множественная, наблюдается в сходящихся пучках с числовой апертурой как минимум до 0.65. В результате исследования нелинейного режима распространения сходящихся пучков в конденсированной среде было показано, что в природном алмазе возможно проводить внутриобъемную запись линий с толщиной менее 2 мкм при следующих условиях: числовая апертура $NA = 0.65$, энергия ~ 0.5 мкДж, скорость сканирования - 2 мкм/с. Продемонстрирована возможность формирования внутриобъемных микрополостей при лазерном воздействии на просветленную биосовместимым

раствором глюкозы глазную склеру: просветление осуществлялось 40% раствором глюкозы в течение 10 минут до воздействия лазерных импульсов.

Таким образом, в работе рассмотрены и сформулированы основополагающие представления о формировании параметров сходящегося лазерного пучка, который применяется для обработки широкого круга материалов, при его распространении в режиме филаментации, а также параметров плазменных каналов, образующихся при таком распространении; показано существенное отличие процессов, протекающих при филаментации сходящихся пучков по сравнению с коллимированными.

Список публикаций автора в рецензируемых журналах по теме диссертации

1. Зворыкин В. Д., Ионин А. А., Кудряшов С. И., Пономарев Ю. Н., Селезнев Л. В., Синецын Д. В., Тихомиров Б. А. «Нелинейное поглощение ультрафиолетовых фемтосекундных лазерных импульсов в аргоне,» *Письма в ЖЭТФ*, **88** (1), 10-13, 2008.
2. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Макаров С. В., Селезнев Л. В., & Синецын Д. В. «Множественная филаментация мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе,» *Письма в ЖЭТФ*, **90** (6), 467-472, 2009.
3. Ionin A. A., Kudryashov S. I., Ponomarev Y. N., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V., Tikhomirov B. A., Zvorykin V. D. «Absorption and ionization of molecular nitrogen by UV femtosecond laser pulses,» *Opt. Comm.*, **282**(1), 45-47, 2009.
4. Alekhin A. A., Ionin A. A., Kozhushko S. E., Kourlyova I. M., Kudryashov S. I., Kuz'min K. K., Zakharov S. D. «In vitro femtosecond laser subsurface micro-disruption inside human cornea and pre-cleared sclera,» *Las. Phys. Letts*, **7**(6), 463-466, 2010.
5. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Селезнев Л.В., Синецын Д.В., Сунчугашева Е.С., «Особенности филаментации остросфокусированных ультракоротких лазерных импульсов в воздухе», *ЖЭТФ*, **138** (5), 822-829, 2010.

6. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Mikhin K.E., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. «Bulk femtosecond laser marking of natural diamonds,» *Las. Phys.*, 20(8), 1778-1782, 2010.
7. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S., Fedorov V.Y. «Third harmonic generation by ultrashort laser pulses tightly focused in air,» *Las. Phys.*, **21** (3), 500-504, 2011.
8. Ионин А.А., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кудряшов С.И., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С. «Особенности фокусированного распространения мощных лазерных импульсов фемтосекундной длительности в воздухе при пониженном давлении», *Опт. атм. и океана*, **25** (1), 18-25, 2012.
9. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С. «Нелинейное распространение мощного фокусируемого фемтосекундного лазерного импульса в воздухе при атмосферном и пониженном давлении», *Квант. Электрон.*, **42** (4), 319-326, 2012.
10. Дергачев А.А., Ионин А.А., Кандидов В.П., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С., Шленов С.А. «Филаментация фемтосекундных ИК и УФ импульсов при фокусировке в воздухе», *Квант. Электрон.*, **43** (1), 29-36, 2013.
11. Ionin A.A., Iroshnikov N.G., Kosareva O.G., Larichev A.V., Mokrousova D.V., Panov N.A., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S. «Filamentation of femtosecond laser pulses governed by variable wavefront distortions via a deformable mirror,» *JOSA B: Opt. Phys.*, **30** (8), 2257-2262, 2013.
12. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Изюмов Н.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С. «Самофокусировка профилированных световых пучков ультракороткого лазерного излучения в воздухе», *ЖЭТФ* **143** (2), 228-237, 2013.
13. Дергачев А.А., Ионин А.А., Кандидов В.П., Д.В. Мокроусова, Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С., Шленов С.А., Шустикова А.П. «Плазменные каналы при филаментации в воздухе фемтосекундного лазерного излучения с астигматизмом волнового фронта», *Квант. Электрон.*, **44** (12), 1085-1090, 2014.

14. Dergachev A. A., Ionin A.A., Kandidov V. P., Mokrousova D. V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S., Shlenov S. A., Shustikova A. P. «Effect of nonlinearity in the pass-through optics on femtosecond laser filament in air,» *Las. Phys. Letts.*, **12** (1), 015403 (1-4), 2015.
15. Zvorykin V. D., Ionin A. A., Levchenko A. O., Seleznev L. V., Shutov A. V., Sinitsyn D. V., Smetanin I.V., Ustinovskii N. N., «Effects of picosecond terawatt UV laser beam filamentation and a repetitive pulse train on creation of prolonged plasma channels in atmospheric air,» *Nuclear Instr. and Methods in Phys. Research Sec. B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **309**, 218-222, 2013.
16. Ionin A.A., Seleznev L.V. and Sunchugasheva E.S., «Formation of plasma channels in air under filamentation of focused ultrashort laser pulses,» *Las. Phys.*, **25**, 033001 (1-14), 2015.
17. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Ионин А.А., Мокроусова Д.В., Селезнев Л.В., Сеницын Д. В., Сунчугашева Е.С. «Сравнительный анализ постфокальной филаментации сфокусированных лазерных импульсов УФ и ИК излучения в воздухе», *Квант. Электрон.*, **45** (4), 321-329, 2015.
18. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Ионин А.А., Мокроусова Д.В., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С., «Постфиламентационное распространение мощных лазерных импульсов в режиме узконаправленных световых каналов в воздухе», *Квант. Электрон.*, **46** (11), 1009-1014, 2016.

Публикации автора в материалах международных конференций

1. Zvorykin V.D., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Levchenko A.O., Molchanov A.G., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Ustinovskii N.N., (2008) Plasma channels in air produced by UV laser beam: Mechanisms of photoionization and possible applications, *3rd International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena "Channeling 2008"*, 25 October – 1 November, Erice, Italy; Book of abstracts, p. 105
2. Ionin, A. A., Kudryashov, S. I., Ponomarev, Y. N., Seleznev, L. V., Sinitsyn, D. V., Tikhomirov, B. A., ... & Zvorykin, V. D. (2009). Nonlinear ionization of pure atomic and molecular gases by intense UV femtosecond laser pulses. *XVII International*

Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers, 15–19 September, Lisboa, Portugal; Proc. SPIE **7131**, p. 71311K

3. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Ponomarev Yu.N., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Tikhomirov B.A., and Zvorykin V.D. (2009) Non-linear absorption and ionization of atomic and molecular gases by intense UV femtosecond laser pulses, *4th International Conference on the Frontiers of Plasma Physics and Technology*, 6-10 April, Kathmandu, Nepal; Book of abstracts, p.22
4. Zaharov S., Ionin A., Kojushko S., Kudryashov S., Seleznev L., Sinitsyn D., Alexin A., Kuryleva I., Lixvantseva V., Samoilo M., (2009) Femtosecond laser microstructurization in non-conductor and its application in ophtalmology, *VI International Conference "Beam technologies and laser application"*, 23-25 September, Saint-Petersburg, Russia; Abstracts of papers and program, p.97
5. Kudryashov S.I., Ionin A.A., Makarov S.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., (2009) Multi-filamentation of high-power femtosecond laser pulses in air: optical and acoustic probing, *X International Conference Laser & laser information technologies: fundamental problems & applications and VI International Symposium Laser technologies & laser*, 18–22 October, Smolyan, Bulgaria; Proc. of ILLA/LTL-2009, p.428 (2010)
6. Kudryashov S.I., Ionin A.A., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., (2009) Femtosecond laser microstructuring inside bulk transparent materials: optical and acoustic studies, *X International Conference Laser & laser information technologies: fundamental problems & applications and VI International Symposium Laser technologies & laser*, 18–22 October, Smolyan, Bulgaria; Proc. of ILLA/LTL 2009, p.428 (2010)
7. Ionin A.A., Kozhushko S.E., Kudryashov S.I., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Zakharov S.D., Alekhin A.V., Likhvantseva V.G., Samoylov M.V., (2009) Basic physical processes and perspectives of femtosecond laser eye micro-surgery, *X International Conference Laser & laser information technologies: fundamental problems & applications and VI International Symposium Laser technologies & laser*, 18–22 October, Smolyan, Bulgaria; Proc. of ILLA/LTL 2009, p.433 (2010)
8. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Tikhonov A., Zvorykin V.D., (2009) Non-linear absorption and ionization of atomic and molecular gases by intense UV femtosecond pulses, *XVI Symposium High Resolution Molecular*

Spectroscopy (HIGHRUS 2009), 5–10 July, пос. Листвянка, Иркутская обл., Россия; Abstracts of Reports, p.26

9. Seleznev L.V., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S., Tikhomirov B.A., Fil' A.A., Ponomarev Yu.N., Popov A.M., Tikhonova O.V., Volkova E.A., (2010) Nonlinear photo-processes in gases induced by strong ultrashort laser fields, *XIX International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT-2010)*, Technical program, abstracts p.28
10. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Selezhev L.V., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S., Ponomarev Y.N., Tikhomirov B.A., Fil A.A., (2010) Nonlinear absorption and ionization in atomic and molecular gases impacted by femtosecond laser pulses with wavelengths of 248 and 744 nm, *XIX International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT-2010)*, 23-27 August, Kazan, Russia; Technical program, abstracts, p.40
11. Seleznev L.V., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S., Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., (2010) Filamentation of sharply focused femtosecond laser pulses in air, *XIX International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT-2010)*, 23-27 August, Kazan, Russia; Technical program, abstracts, p.59
12. Kudryashov S., Ionin A., Seleznev L., Sinitsyn D., (2010) Comparative ultrasonic characterization of femtosecond and nanosecond laser propulsion, *XIX International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT-2010)*, 23-27 August, Kazan, Russia; Technical program, abstracts, p.96
13. Sunchugasheva E.S., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., (2010) Third harmonic generation by sharply focused femtosecond laser pulses in air, *XIX International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT-2010)*, 23-27 August, Kazan, Russia; Technical program, abstracts, p.110
14. Seleznev L.V., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S., (2010) Self-focusing and plasma defocusing of sharply focused femtosecond laser pulses in air, *XIX International Conference on Coherent and Nonlinear*

Optics/Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT-2010), 23-27 August, Kazan, Russia; Technical program, abstracts, p.110

15. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S., Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., (2011) Formation of plasma channels and mini-filaments under tight focusing of femtosecond laser pulses in air, *53 Annual Meeting of the American Physical Society Division of Plasma Physics co-located with 64 th Annual Gaseous Electronics Conf.*, 14–18 November, Salt Lake City, USA; Bull. of American Phys.Soc., **56** (16) 183 (2011)
16. Ionin A. A., Seleznev L. V., & Sunchugasheva E. S. (2013). Controlling plasma channels through ultrashort laser pulse filamentation. *Technologies for Optical Countermeasures X; and High-Power Lasers 2013: Technology and Systems*, 23-26 September, Dresden, Germany; Proc. of SPIE **8898**, p. 88980Z
17. Ionin A., Seleznev L., and Sunchugasheva E., (2013) Control of plasma channel parameters at filamentation of femtosecond laser pulses, *22th International Laser Physics Workshop (LPHYS'13)*, 15–19 July, Prague, Czech Republic, Book of Abstracts, p. 56
18. Ionin A., Selznev L. and Sunchugasheva E., (2014) Formation of plasma channels in air under filamentation of focused ultrashort laser pulses, *5th International Symposium on Filamentation (COFIL2014)*, 18-24 September, Shanghai, China; Book of Abstracts, p.26
19. Ionin A., Selznev L. and Sunchugasheva E., (2014) Formation of plasma channels in air under filamentation of focused ultrashort laser pulses, *3-rd International Symposium on Laser Interaction with Matter LIMIS*, 2 - 5 November, Nanjing, China; Book of abstracts, p.110
20. Ionin A. A., Kudryashov S. I., Mokrousova D. V., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V., & Sunchugasheva E. S. (2014). Filamentation of IR and UV double femtosecond laser pulses. *16th International Conference on Laser Optics 2014*, 30 June - 4 July, Saint-Petersburg, Russia; Conference Paper, pp. 1
21. Ionin A. A., Mokrousova D. V., Seleznev L. V., Shustikova A. P., Sinitsyn D. V., Sunchugasheva E. S., Dergachev A. A., Kandidov V. P., Shlenov S. A. (2014). Femtosecond laser pulse filamentation with wave front modulation via pass-through

optics. *International Conference on Laser Optics 2014.*, 30 June - 4 July, Saint-Petersburg, Russia; Conference Paper, pp. 1

22. Shlenov S. A., Dergachev A. A., Ionin A. A., Kandidov V. P., Mokrousova D. V., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V., Sunchugasheva E. S., Shustikova A. P. (2015). Femtosecond laser filament and plasma channels in focused beam in air. *18th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications*, 29 September – 03 October, Sozopol, Bulgaria; Proc. of SPIE **9447**, p. 944717
23. Ionin A.A., Mokrousova D.V., Seleznev L.V., Sunchugasheva E.S. (2017) Filamentation of focused femtosecond laser pulses, *XIII International Conference on pulsed lasers and laser applications (AMPL-2017)*, 10-15 September, Tomsk, Russia, Conference abstract, p.68

Список цитируемой литературы

- Аскарьян Г.А., «Воздействие градиента поля интенсивного электромагнитного луча на электроны и атомы,» *ЖЭТФ*, **42**, 1567, 1962.
- Басов Н.Г., Крюков П.Г., Сенатский Ю.В., Чекалин С.В., «Получение мощных ультракоротких импульсов света в лазере на неодимовом стекле,» *ЖЭТФ*, **57**, 1175, 1969.
- Кандидов В.П., Шлёнов С.А., Косарева О.Г., «Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения,» *Квант. Электрон.*, **39**, 205, 2009.
- Пилипецкий Н.Ф., Рустамов А.Р., «Наблюдение самофокусировки света в жидкостях,» *Письма в ЖЭТФ*, **2**, 88, 1965.
- Таланов В.И., «Самофокусировка электромагнитных волн в нелинейных средах,» *Изв. ВУЗов, Радиоф.*, **7**, 564, 1964.
- Чекалин С. В., Кандидов В. П. «От самофокусировки световых пучков—к филаментации лазерных импульсов», *УФН*, **183**(2), 133, 2013.
- Balling P. & Schou J., «Femtosecond-laser ablation dynamics of dielectrics: basics and applications for thin films», *Rep. on Progress in Phys.*, **76**(3), 036502, 2013

- Barcikowski S., Hahn A., Kabashin A. V., & Chichkov B. N. «Properties of nanoparticles generated during femtosecond laser machining in air and water,» *Appl. Phys. A*, **87**(1), 47, 2007.
- Boyd R.W., Lukishova S.G., Shen Y.R., Self-focusing: Past and Present, New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2009.
- Braun A., Korn G., Liu X., Du D., Squier J., Mourou G., «Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air,» *Opt. Lett.*, **20**, 73, 1995.
- Brodeur A., Chien C.Y., Ilkov F.A., Chin S.L., Kosareva O.G., Kandidov V.P., «Moving focus in the propagation of ultrashort laser pulses in air,» *Opt. Lett.*, **22**, 304, 1997.
- Chiao R.Y., Garmire E., Townes C.H., «Self-Trapping of Optical Beams,» *Phys. Rev. Lett.*, **13**, 479, 1964.
- Chiao R.Y., Garmire E., Townes C.H., «Dynamics of the self-trapping of intense light beams,» *Phys. Rev. Lett.*, **16**, 347, 1966.
- Chin S.L., Hosseini S.A., Liu W., Luo Q., Theberge F., Aközbek N., Becker A., Kandidov V.P., Kosareva O.G., Schroeder H., «The propagation of powerful femtosecond laser pulses in optical media: physics, applications, and new challenges,» *Can. J. of Phys.*, **83**, 863, 2005.
- Chin S.L., «Femtosecond Laser Filamentation,» в *Springer series on atomic, optical and plasma physics*, New York, Springer Science + Business Media, LLC, 55, 2010a.
- Chin S.L., Wang T.-J., Marceau C., Wu J., Liu J.S., Kosareva O., Panov N., Chen Y.P., Daigle J.-F., Yuan S., Azarm A., Liu W.W., Seideman T., Zeng H.P., Richardson M., Li R., Xu Z.Z., «Advances in intense femtosecond laser filamentation in air,» *Laser Phys.*, **22**, 1, 2012.
- Couairon A., Mysyrowicz A., «Femtosecond filamentation in transparent media,» *Phys. Rep.*, **441**, 47, 2007.
- Dausinger F. and Friedemann L., «Femtosecond technology for technical and medical applications,» 96. Springer Science & Business Media, 2004.

- Deng Y.P., Zhu J.B., Ji Z.G., Liu J.S., Shuai B., Li R.X., Xu Z.Z., Théberge F., Chin S.L., «Transverse evolution of a plasma channel in air induced by a femtosecond laser,» *Opt. Lett.*, **31**(4), 546, 2006.
- Eliezer S., Eliaz N., Grossman E., Fisher D., Gouzman I., Henis Z., Pecker S., Horovitz Y., Fraenkel M., Maman S., & Lereah, Y. «Synthesis of nanoparticles with femtosecond laser pulses,» *Phys. Rev. B*, **69**(14), 144119, 2004.
- Faccio D., Couairon A., Trapani P.D., «Conical Waves, Filaments and Nonlinear Filamentation Optics,» Rome: ARACNE, 2007.
- Hercher M., «Laser-induced damage in transparent media,» *J. of Opt. Soc. of Am.*, **54**, 563, 1964.
- Kabashin, A. V., & Meunier, M. «Synthesis of colloidal nanoparticles during femtosecond laser ablation of gold in water», *J.of Appl.Phys.*, **94** (12), 7941, 2003.
- Kasparian J., Wolf J.-P., «Physics and applications of atmospheric nonlinear optics and filamentation,» *Opt. Express*, **16**, 466, 2008.
- Korobkin V.V., Alcock A.J., «Self-focusing effects associated with laser-induced air breakdown,» *Phys. Rev. Lett.* , **21**, 1433, 1968.
- Kosareva O.G., Kandidov V.P., Brodeur A., Chien C.Y., Chin S.L., «Conical emission from laser–plasma interactions in the filamentation of powerful ultrashort laser pulses in air,» *Opt. Lett.*, **22**, 1332, 1997.
- Liu W., Petit S., Becker A., Aközbeke N., Bowden C.M., Chin S.L., «Intensity clamping of a femtosecond laser pulse in condensed matter,» *Opt. Commun.*, **202**, 189, 2002a.
- Liu W., Luo Q., Chin .S.L., «Competition between multiphoton or tunnel ionization and filamentation induced by powerful femtosecond laser pulses in air,» *Chin. Opt. Lett.*, **1**, 56, 2003.
- Liu W., Chin S.L., «Direct measurement of the critical power of femtosecond Ti:sapphire laser pulse in air,» *Opt. Express*, **13**, 5750, 2005.
- Milian C., Jukna V., Couairon A., Houard A., Forestier B., Carbonnel J., Liu Y., Prade B., Mysyrowicz A., «Laser beam self-symmetrization in air in the multifilamentation regime,» *J. Phys. B*, **48**, 094013, 2015.

- Nibbering E.T.J., Curley P.F., Grillon G., Prade B.S., Franco M.A., Salin F., Mysyrowicz A., «Conical emission from self-guided femtosecond pulses in air,» *Opt. Lett.* , **21**, 62, 1996.
- Perry M.D., Mourou G. «Terawatt to petawatt subpicosecond lasers,» *Science* **264** (5161) 917, 1994a.
- Pfeifenberger M. J., Mangang M., Wurster S., Reiser J., Hohenwarter A., Pfleging W., Kiener D. & Pippin R., «The use of femtosecond laser ablation as a novel tool for rapid micro-mechanical sample preparation,» *Materials & Design*, **121**, 109, 2017.
- Strickland D., Mourou G., «Compression of amplified chirped optical pulses,» *Opt. Comm.*, **56** (3) 219, 1985.
- Sugioka K. & Chen Y., «Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing,» *Light: Science & Appl.*, 3(4), e149, 2014a.
- Sugioka K. & Cheng Y., «Fundamentals of Femtosecond Laser Processing,» In *Femtosecond Laser 3D Micromachining for Microfluidic and Optofluidic Applications* (pp. 19-33). Springer London, 2014b.
- Sugioka K., «Progress in ultrafast laser processing and future prospects,» *Nanophotonics*, **6**(2), 393, 2017.
- Theberge F., Liu W.W., Simard P.T., Becker A., Chin S.L., «Plasma density inside a femtosecond laser filament in air: Strong dependence on external focusing,» *Phys. Rev. E*, **74**, 7, 2006.
- Zvorykin V.D., Ionin A.A., Levchenko A.O., Seleznev L.V., Shutov A.V., Sinitsyn D.V., Smetanin I.V., Ustinovskii N.N., «Effects of picosecond terawatt UV laser beam filamentation and a repetitive pulse train on creation of prolonged plasma channels in atmospheric air,» *Nuclear Instr. and Methods in Phys. Research B*, **309**, 218, 2013.