

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

СМЕТАНИНА ЕВГЕНИЯ ОЛЕГОВНА

**СВЕТОВЫЕ ПУЛИ И СПЕКТР
ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ФИЛАМЕНТАЦИИ В ПЛАВЛЕНОМ КВАРЦЕ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Кандидов Валерий Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией газовых лазеров,
главный научный сотрудник
профессор Ионин Андрей Алексеевич,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физический институт им.
П.Н.Лебедева Российской академии наук,
г. Москва

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Карташов Ярослав Вячеславович
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт Спектроскопии
Российской Академии Наук (ИСАН), г. Москва,
г. Троицк

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования Санкт-
Петербургский национальный исследовательский
университет информационных технологий,
механики и оптики, г. Санкт-Петербург

Защита состоится « 19 » июня 2014 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 в МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, дом 1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект д. 27) и на сайте <http://phys.msu.ru/rus/research/disser/sovet-D501-001-31/>.

Автореферат разослан «__» апреля 2014 года

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба выслать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 501.001.31,
кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1. Актуальность темы

Управление длительностью импульсов, получение импульсов сверхкороткой длительности и генерация широкополосного излучения относятся к актуальным проблемам современной оптики. Использование дисперсионных свойств сред для управления пространственно-временным распределением интенсивности импульса и его спектральными параметрами в процессе нелинейного взаимодействия со средой представляет большой интерес для фундаментальных и прикладных аспектов современной нелинейной оптики. Наибольший интерес вызывает возможность формирования локализованного в пространстве и времени высокоинтенсивного волнового пакета, обладающего свойствами квази-солитона. Фемтосекундный филамент в объеме прозрачной среды является самоограничивающейся структурой, нелинейные процессы в которой подобны процессам в оптических волокнах, фотонных кристаллах и других направляющих системах. Образование солитонов в средах с нелинейностями различных порядков, в оптических структурах с оптимальным законом модовой дисперсии, и формирование световых пульс при филаментации фемтосекундного излучения на длине волны, попадающего в область аномальной дисперсии групповой скорости материала, имеют общие закономерности. Световую пулю, образующуюся в результате пространственно-временной компрессии фемтосекундного излучения в филаменте, можно рассматривать, как обобщение солитона в направляющей структуре на пространство размерности $3D+1$.

2. Цели и задачи диссертационной работы

Цель исследования состоит в экспериментальном и теоретическом анализе динамики пространственно-временной компрессии мощного фемтосекундного лазерного излучения, выявлении закономерностей формирования световых пульс и генерации широкополосного когерентного суперконтинуума в процессе филаментации в конденсированной прозрачной диэлектрической среде. Поставлены и решены следующие конкретные задачи:

- Исследование влияния дисперсии групповой скорости на формирование частотно-углового спектра суперконтинуума.
- Исследование природы формирования спектра суперконтинуума и его изолированного антистоксового крыла при филаментации, определение влияния интерференционных эффектов на спектр суперконтинуума.
- Выявление закономерностей формирования световых пульс - локализованных в пространстве и времени волновых пакетов с высокой плотностью мощности лазерного излучения в филаменте.
- Исследование процесса насыщения интенсивности в световой пуле фемтосекундного филамента.

3. Научная новизна работы

1. Впервые выполнено комплексное численное, экспериментальное и аналитическое исследование формирования частотно-угловых спектров суперконтинуума (СК) при филаментации фемтосекундного излучения в условиях нормальной, нулевой и аномальной дисперсии групповой скорости плавленого кварца.
2. Установлено, что независимо от характера дисперсии групповой скорости, рефокусировка излучения в филаменте приводит к модуляции частотно-углового спектра в результате интерференции излучения от последовательности распределенных когерентных источников, образующихся вдоль филамента.
3. Предсказано формирование квазипериодической последовательности «световых пульс» с высокой пространственно-временной локализацией светового поля при филаментации фемтосекундного излучения в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. Установлены основные закономерности формирования световых пульс.
4. Впервые экспериментально зарегистрировано формирование световых пульс при филаментации в плавленом кварце. На основе измерений автокорреляционной функции световой пули в образце плавленого кварца, определена минимальная длительность световой пули, которая достигла 13.5 фс, что составляет около двух осцилляций светового поля на длине волны 1800 нм.
5. Впервые предсказано на основе численного моделирования и зарегистрировано экспериментально формирование изолированного антистоксового крыла суперконтинуума при филаментации фемтосекундного излучения в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. Установлено, что с увеличением длины волны фемтосекундного излучения сдвиг изолированного высокочастотного крыла в синюю область возрастает, его ширина уменьшается. Величина антистоксового сдвига определяется порядком многофотонности процесса генерации лазерной плазмы и не зависит от характера дисперсии групповой скорости.
6. Новой является физическая интерпретация образования изолированного максимума в видимой области спектра суперконтинуума, согласно которой широкий минимум в спектре СК, отделяющий антистоксовое крыло от центральной длины волны импульса, является результатом деструктивной интерференции излучения суперконтинуума.
7. Установлено, что дисперсия групповой скорости качественно изменяет процесс насыщения интенсивности световой пули, который в отсутствие дисперсии определяется балансом оптических сил линз керровской и плазменной нелинейностей.

4. Практическая ценность работы

Полученные результаты и установленные закономерности могут быть использованы для:

1. Оптимизации системы компрессии лазерных импульсов до одного периода светового поля при филаментации в конденсированных средах для время-разрешенного зондирования и время-разрешенной спектроскопии.
2. Управления параметрами когерентного широкополосного излучения суперконтинуума на основе филаментации фемтосекундного лазерного излучения в прозрачных средах для спектроскопических исследований в широкой полосе длин волн.
3. Формирования высоко-локализованного в пространстве и времени интенсивного излучения среднего ИК диапазона в системах атмосферной оптики для экологического мониторинга окружающей среды.

4. Развития физических представлений о нелинейной филаментации фемтосекундного излучения в прозрачных конденсированных диэлектрических средах, излагаемых в учебных курсах.

5. Защищаемые положения

1. Квазипериодическая последовательность световых пульс - областей сильной пространственно-временной локализации светового поля образуется при фемтосекундной филаментации лазерного излучения в объеме прозрачной диэлектрической среды в условиях аномальной ДГС. Длительность световой пули при филаментации в плавленом кварце излучения на длине волны 1800 нм равна 13.5 фс, что составляет около двух периодов оптических осцилляций, ее пиковая интенсивность достигает величины 5×10^{13} Вт/см².

2. Возникновение световой пули обусловлено совместным проявлением самофокусировки и фазовой самомодуляции излучения в условиях аномальной ДГС. Световая пуля образуется в центральных временных слоях импульса и смещается к хвосту импульса при его распространении. Формирование последовательности световых пульс происходит в результате перекачки энергии с хвоста и фронта импульса к центру, вызванной аномальной дисперсией, и последующим пространственным сжатием временных слоев вследствие нелинейности.

3. При филаментации фемтосекундного лазерного импульса на длинах волн, лежащих в области аномальной ДГС плавленого кварца, в спектре генерируемого суперконтинуума формируется изолированное антистоксовое крыло в видимой области. При увеличении центральной длины волны излучения сдвиг изолированного антистоксового крыла в синюю область возрастает, его ширина уменьшается. Антистоксовый сдвиг СК возрастает независимо от характера ДГС вследствие возрастания крутизны заднего фронта импульса при увеличении порядка многофотонности процесса генерации лазерной плазмы.

4. Образование световой пули сопровождается монотонным уширением спектра СК в стоксову и антистоксову области. Появление широкого минимума в спектре СК, отделяющего его антистоксовое крыло от области в окрестности центральной длины волны, является результатом деструктивной интерференции широкополосного излучения суперконтинуума, которое генерируется в излучающей области конечной длины, формируемой движущейся световой пулей в филаменте.

5. В условиях аномальной дисперсии групповой скорости насыщение интенсивности в филаменте определяется как пространственными эффектами керровской и плазменной нелинейностей, так и перетеканием мощности к центру импульса, возникающим при фазовой самомодуляции светового поля. Интенсивность световой пули достигает максимума при плазменной дефокусировке, доминирующей над керровской самофокусировкой.

б. Независимо от характера дисперсии групповой скорости рефокусировка фемтосекундного излучения в филаменте вызывает модуляцию частотно-угловой спектра в результате интерференции излучения суперконтинуума от последовательности распределенных когерентных источников, образующихся вдоль филамента.

6. Апробация результатов работы

Основные результаты работы опубликованы в 10 научных статьях в журналах «Квантовая электроника», «ЖЭТФ», «Оптический журнал», «Applied Physics B», «Laser Physics», «Laser Physics Letters», «Optics Letters», «Proceedings of SPIE».

Докладывались автором на международных конференциях: XVII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, Россия, 2010); Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика» (Санкт-Петербург, Россия, 2011); SPIE Optics and Photonics (San Diego, USA, 2011); 20th International Laser Physics Workshop (Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2011); International Conference "Nonlinear Optics East-West Reunion" (NLO-50) (Суздаль, Россия, 2011), International Workshop on laser-matter interaction (Porquerolles, France, 2012); 4th International Symposium on Filamentation, (Tucson, Arizona, USA, 2012); International Conference on Coherent and Nonlinear Optics & International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (Москва, Россия, 2013); 22nd International Laser Physics Workshop (Prague, Czech Republic, 2013); а также на семинарах кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета и МЛЦ МГУ им. М.В. Ломоносова, отделения Квантовой радиофизики Физического института АН им. П.Н.Лебедева (ФИАН) и отдела Лазерной спектроскопии Института спектроскопии РАН (ИСАН).

7. Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 147 страниц, включая 58 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 189 наименований.

8. Личный вклад автора

Все использованные в диссертации результаты получены автором лично или при определяющем ее участии. Автор работы провела численное моделирование и анализ процесса филаментации мощного фемтосекундного излучения в плавленом кварце в условиях нормальной, нулевой и аномальной дисперсии, аналитическое исследование формы спектра суперконтинуума световой пули. На основе результатов численного моделирования и аналитического исследования автор осуществила детальное планирование

лабораторного эксперимента в Институте спектроскопии РАН, выполнила спектральные исследования антистоксового крыла суперконтинуума при филаментации импульсов в диапазоне длин волн от 1300 до 2300 нм и регистрацию длительности световых пучков в плавленом кварце.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и задачи диссертационной работы, сформулированы научная новизна и основные защищаемые положения.

В **Главе 1** «Состояние исследований явления филаментации в конденсированных и газообразных средах» дан краткий обзор состояния исследований по филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в различных средах. Приведены результаты экспериментальных и теоретических работ, которые дают представление о физических процессах, определяющих и сопровождающих явление филаментации фемтосекундных импульсов.

Раздел 1.1 посвящен пространственно-временной трансформации фемтосекундного лазерного излучения в процессе филаментации в прозрачных диэлектриках. В разделе описаны эксперименты по регистрации осциллирующей кольцевой структуры пространственного распределения интенсивности в филаменте, и распада импульса на субимпульсы в при филаментации в условиях нормальной дисперсии групповой скорости.

В Разделе 1.2 обсуждается явление сверхширения частотно-углового спектра фемтосекундных лазерных импульсов при филаментации в прозрачных диэлектриках. В литературе данное явление называют генерацией суперконтинуума или генерацией белого света. Представлены основные экспериментальные работы по регистрации конической эмиссии, частотных и частотно-угловых спектров суперконтинуума.

Раздел 1.3 посвящен явлению самокомпрессии импульсов в процессе филаментации. Рассмотрены работы по исследованию возможности формирования и устойчивости локализованных в пространстве и времени волновых пакетов - световых пучков - в средах с искусственными геометриями и каскадной квадратичной нелинейностью.

Раздел 1.4 содержит обзор существующих математических моделей, используемых для численных экспериментов по нелинейному распространению фемтосекундного излучения в прозрачных диэлектрических средах. Приведены физические модели, интерпретирующие коническую эмиссию суперконтинуума.

В **Главе 2** «Компьютерный эксперимент по филаментации фемтосекундного лазерного излучения в плавленом кварце» описана математическая модель, используемая в данной работе для численного расчета процесса распространения мощных сверхкоротких лазерных импульсов в плавленом кварце.

В Разделе 2.1 представлена математическая модель распространения фемтосекундного лазерного излучения в прозрачной диэлектрической среде. В отсутствие множественной филаментации применима аксиально-симметричная модель распространения лазерного излучения. Для аксиально-симметричной задачи распространения фемтосекундного излучения используется нелинейное волновое уравнение относительно медленно меняющейся комплексной огибающей светового поля импульса $A(\vec{r}, t)$ учитывающее дифракцию, полностью дисперсию согласно формуле Селмейра для плавленого кварца, керровскую и плазменную нелинейности, потери на ионизацию среды в процессе филаментации:

$$2ik_0 \frac{\partial A(\vec{r}, t)}{\partial z} = \hat{T}^{-1} \Delta_{\perp} A(\vec{r}, t) + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{1 + \Omega/\omega_0} \left(k^2(\omega_0 + \Omega) - (k_0 + k_1 \Omega)^2 \right) \tilde{A}(\vec{r}, \Omega) e^{i\Omega t} d\Omega +$$

$$+ \frac{2k_0^2}{n_0} \hat{T} [\Delta n_k(\vec{r}, t) A(\vec{r}, t)] - \frac{2k_0^2}{n_0} \hat{T}^{-1} [\Delta n_p(\vec{r}, t) A(\vec{r}, t)] - ik_0 \hat{T}^{-2} [\sigma N_e(\vec{r}, t) A(\vec{r}, t)] - ik_0 \alpha(\vec{r}, t) A(\vec{r}, t),$$

где $k(\omega)$ — волновое число в среде, $k_0 = k(\omega_0)$, $k_1 = \left. \frac{\partial k}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0}$,

$\Omega = \omega - \omega_0$ — отстройка частоты от центральной частоты импульса,

Δ_{\perp} — оператор Лапласа по поперечным координатам,

$n_0 = n(\omega_0)$ — показатель преломления среды на центральной частоте,

Δn_k и Δn_p — керровская и плазменная нелинейные добавки к показателю преломления,

N_e — концентрация свободных электронов,

σ — сечение обратного тормозного поглощения,

α — коэффициент поглощения при полевой ионизации среды.

$\hat{T} = 1 - \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t}$ — оператор волновой нестационарности.

В Разделе 2.2 обсуждается дисперсионная зависимость $n(\lambda)$ для плавленого кварца, описанная по формуле Селмейера в широком диапазоне длин волн.

Указаны области нормальной ($k_2 = \left. \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} > 0$), нулевой $k_2 \approx 0$ и аномальной

$k_2 < 0$ дисперсии групповой скорости.

В Разделе 2.3 представлены методы численного решения задачи о филаментации, параметры расчетной сетки; обсуждаются проблемы, возникающие при численном моделировании.

В Разделе 2.4 показаны использованные методы обработки данных численного моделирования, необходимые для представления результатов расчета в формате данных, регистрируемых экспериментально.

В Разделе 2.5 описана использованная в данной работе интерференционная модель формирования частотно-углового спектра импульса при филаментации фемтосекундного лазерного импульса в плавленом кварце. Модель позволяет получить аналитически частотно-угловое распределение спектральных компонент суперконтинуума, обусловленное интерференционными эффектами

при распространении широкополосного когерентного источника вдоль протяженной излучающей области филамента.

В **Главе 3** «Частотно-угловые спектры фемтосекундного лазерного излучения при филаментации в плавленном кварце» численно, аналитически и экспериментально исследована трансформация частотно-угловых спектров фемтосекундных лазерных импульсов с различными центральными длинами волн при филаментации в плавленном кварце. Установлено, что вне зависимости от вида дисперсии групповой скорости материала, частотно-угловой спектр импульса приобретает характерную интерференционную модуляцию при рефокусировке излучения в филаменте.

В Разделе 3.1 представлена схема эксперимента по регистрации плазменных каналов и частотно-углового спектра суперконтинуума при филаментации в плавленном кварце. Эксперименты выполнены на фемтосекундном спектроскопическом стенде Центра коллективного пользования Института спектроскопии РАН. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

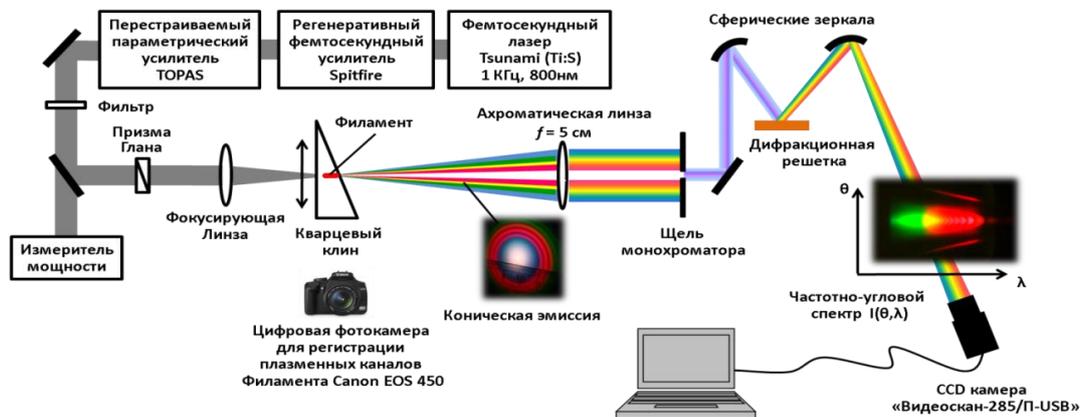


Рис.1 Схема эксперимента для регистрации частотно-углового распределения излучения суперконтинуума при филаментации фемтосекундного лазерного излучения в широком диапазоне центральных длин волн в плавленном кварце. Центр коллективного пользования Института спектроскопии РАН.

Задачей экспериментального исследования являлось изучение формирования частотно-углового спектра суперконтинуума в процессе филаментации фемтосекундных лазерных импульсов с центральной длиной волны, перестраиваемой от 400 нм до 2200 нм. В проводимых экспериментах использован образец в виде остроугольного клина из плавленного кварца. Изменяя положение клина в плоскости поперечного сечения, становится возможным получение частотно-углового спектра суперконтинуума в любой точке вдоль длины филамента, начиная с момента его образования, и вплоть до многократных рефокусировок, для начального импульса без варьирования его параметров. Эксперименты проводились в режиме одного филамента. Необратимое изменение показателя преломления плавленного кварца предотвращалось путем регулярного смещения положения образца.

В Разделе 3.2 представлен метод обработки численно полученных частотно-угловых спектров суперконтинуума для представления их в формате эксперимента. В численном моделировании определяется частотно-угловой

спектр в широкой полосе длин волн. Тогда как из-за ограничений на спектральный диапазон в системе регистрации, экспериментально наблюдаются только спектры СК в полосе длин волн, регистрируемой в полосе чувствительности ПЗС-матрицы.

В Разделе 3.3 представлены экспериментально зарегистрированные, численно и аналитически полученные частотно-угловые спектры суперконтинуума, приведенные в формате эксперимента для импульсов с центральными длинами волн, попадающими в область нормальной дисперсии групповой скорости в плавленном кварце.

В подразделе 3.3.1 рассмотрен импульс с центральной длиной волны $\lambda_0 = 800 \text{ нм}$. В лабораторном эксперименте на стенде ЦКП ИС РАН использовались импульсы с параметрами для выбранной центральной длины волны: длительность импульсов $\tau_{FWHM} = 40 \text{ фс}$, радиус в перетяжке $a_0 = 70 \text{ мкм}$ по уровню e^{-1} , энергия импульсов $W = 1.4 \text{ мкДж}$, что соответствует пиковой мощности $P_0 \approx 10 P_{cr}$.

Для импульсов с центральной длиной волны 800 нм на экспериментально полученном распределении спектральных компонент интенсивности на плоскости «угол расходимости - длина волны» $S_{\text{exp}}(\theta, \lambda)$ видно, что филаментация вызвала сверхуширение спектра импульса (рис. 2 д). Его спектральная полоса увеличилась до 150 нм по уровню e^{-1} при начальной ширине 20 нм. В дальней зоне сформировалось непрерывно расходящееся по углу излучение конической эмиссии, которое имеет вид радужных колец на рис. 2 б. При этом, радиус колец увеличивается с уменьшением длины волны широкополосного излучения. Как в экспериментальном спектре $S_{\text{exp}}(\theta, \lambda)$, так и в численном $S_{\text{sim}}(\theta, \lambda)$ и аналитическом $S_{\text{interf}}(\theta, \lambda)$, расходящееся излучение КЭ имеет вид «крыльев» на плоскости «угол - длина волны» (рис. 2 д, ж, и). При этом, слабо видна тонкая структура спектра в виде локальных максимумов по углу, которая возникает при интерференции излучения протяженного источника в филаменте конечной длины.

Далее, перемещением кварцевого клина в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения, увеличивалась длина нелинейно-оптического взаимодействия лазерного излучения в образце. При прохождении излучением расстояния, достаточного для его рефокусировки, формировалась цепочка из двух последовательных плазменных каналов (рис. 2 в). При этом расстояние от входной грани клина до старта филамента оставалось неизменным.

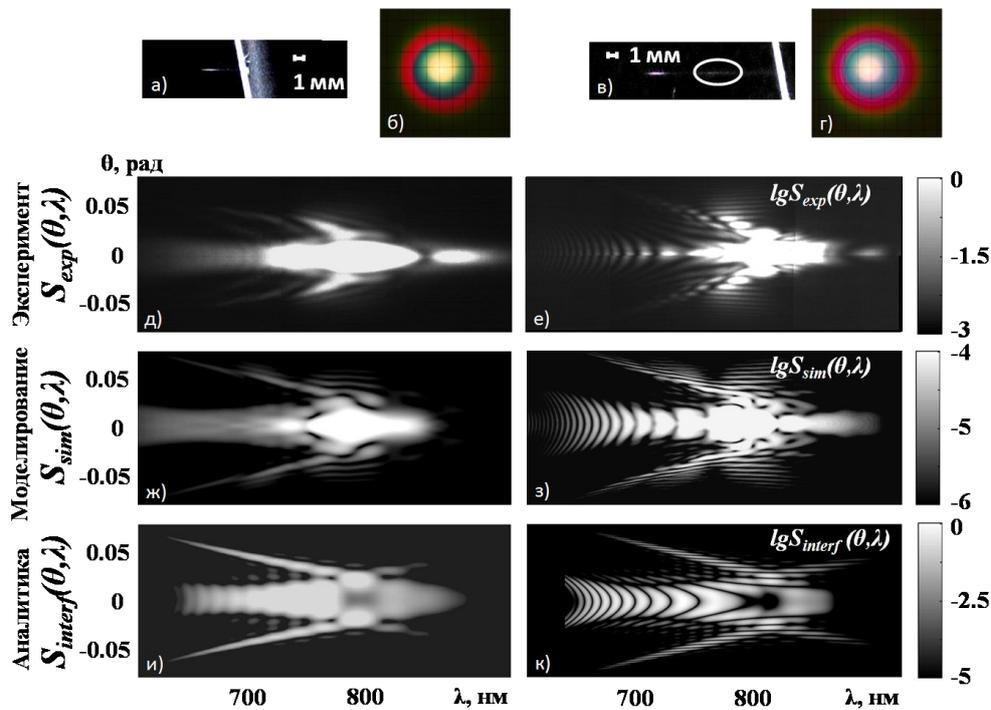


Рис. 2. Частотно-угловой спектр импульса на длине волны 800 нм до (левая колонка) и после (правая колонка) рефокусировки.

а), в) фотографии плазменного канала филамента в образце. Размытая белая наклонная полоса- входная грань клина;

б), г) фотографии колец конической эмиссии суперконтинуума;

д), е) экспериментально полученные частотно-угловые спектры суперконтинуума $S_{exp}(\theta, \lambda)$;

ж), з) численно полученные частотно-угловые спектры суперконтинуума в логарифмическом масштабе $S_{sim}(\theta, \lambda)$ с учетом спектральной чувствительности и динамического диапазона ПЗС-матрицы;

и), к) аналитически рассчитанные частотно-угловые спектры суперконтинуума в логарифмическом масштабе $S_{interf}(\theta, \lambda)$ с учетом спектральной чувствительности и динамического диапазона ПЗС-матрицы.

На экспериментально полученном распределении спектральных компонент излучения $S_{exp}(\theta, \lambda)$ (рис.2 е) видно появление модуляции как по длине волны λ , так и по углу θ . Модуляция расходящегося по углу излучения соответствует распаду ранее непрерывных колец конической эмиссии (рис. 2 б) на дискретные кольца, разделенные четкими интерференционными минимумами (рис. 2 г). Более детально появившаяся в результате рефокусировки, модуляция видна на полученном численно частотно-угловом спектре в формате эксперимента $S_{sim}(\theta, \lambda)$ (рис. 2 з). Модуляция частотно-углового спектра суперконтинуума обусловлена интерференцией излучения от двух соосных излучающих областей, что подтверждает изображение аналитически рассчитанного в рамках интерференционной модели частотно-углового спектра $S_{interf}(\theta, \lambda)$ (рис. 2 к). Рисунок 2 демонстрирует хорошее согласие спектров, полученных в лабораторном $S_{exp}(\theta, \lambda)$ и численном $S_{sim}(\theta, \lambda)$ экспериментах, и при аналитическом расчете $S_{interf}(\theta, \lambda)$.

В подразделе 3.3.2 рассмотрено формирование частотно-углового спектра суперконтинуума при филаментации излучения на длине волны $\lambda_0 = 400 \text{ нм}$. Эксперименты проводились с излучением длительностью $\tau_{FWHM} = 90 \text{ фс}$, радиусом $a_0 = 50 \text{ мкм}$, энергией $W = 1.1 \text{ мкДж}$. Полученные экспериментально, численно и аналитически, частотно-угловые спектры суперконтинуума приобретают, так называемую, X-образную форму, характерную для сильной нормальной дисперсии групповой скорости. Контрастная интерференционная модуляция появляется в спектре суперконтинуума при формировании второго плазменного канала за счет рефокусировки филаментирующего излучения.

В разделе 3.4 представлены экспериментальные, численные и аналитические частотно-угловые спектры при филаментации импульса на длине волны $\lambda_0 = 1300 \text{ нм}$, лежащей в области нулевой дисперсии групповой скорости плавленого кварца. Длительность излучения составляла $\tau_{FWHM} = 80 \text{ фс}$, радиус $a_0 = 70 \text{ мкм}$, энергия $W = 4.15 \text{ мкДж}$. Установлено, что для импульсов с длиной волны, лежащей в области нулевой ДГС в кварце, появление модуляции в частотно-угловом спектре суперконтинуума после рефокусировки филаментирующего излучения происходит аналогично появлению модуляции в частотно-угловом спектре конической эмиссии после рефокусировки импульсов с длинами волн, лежащими в области нормальной ДГС.

В разделе 3.5 исследовано формирование частотно-углового спектра излучения на длине волны, лежащей в области аномальной дисперсии групповой скорости в плавленом кварце. На длине волны $\lambda_0 = 1900 \text{ нм}$ эксперименты проводились с импульсами, длительность которых составила $\tau_{FWHM} = 80 \text{ фс}$, радиус - $a_0 = 80 \text{ мкм}$, энергия - $W = 12.5 \text{ мкДж}$. Старт филамента при рассматриваемых параметрах импульса происходит на расстоянии $z_f = 15 \text{ мм}$ от входной грани клина. При длине излучающей области филамента $l \approx 1.5 \text{ мм}$ (рис. 3 а), излучение суперконтинуума в дальней зоне на экране представляет собой белое пятно, окруженное непрерывной зелено-синией эмиссией, цвет которой монотонно сдвигается в фиолетовую область с увеличением ее радиуса (рис. 3 б). На экспериментально полученном распределении интенсивности спектральных компонент на плоскости «угол-длина волны» $S_{exp}(\theta, \lambda)$ (рис. 3 д) видно, что спектр импульса, центральная длина волны которого 1900 нм , уширился таким образом, что в нем имеется область с относительно высокой интенсивностью спектральных компонент в видимой полосе длин волн от 400 до 700 нм , соответствующая излучению конической эмиссии (рис. 3 б). Численный $S_{sim}(\theta, \lambda)$ и аналитический $S_{interf}(\theta, \lambda)$ спектры в формате эксперимента приведены на рис. 3 ж,и.

При увеличении протяженности области взаимодействия излучения с веществом на расстоянии около 9 мм от первого плазменного канала образуется второй, протяженностью около 1 мм (рис. 3 в), спектр $S_{exp}(\theta, \lambda)$ приобретает модуляцию (рис. 3 е), ответственную за разбиение конической эмиссии на дискретные кольца (рис. 3 г), и обусловленную интерференцией от двух

соосных излучающих областей. Более отчетливо данная модуляция представлена на численном $S_{sim}(\theta, \lambda)$ и аналитическом $S_{interf}(\theta, \lambda)$ спектрах суперконтинуума (рис. 3 з,к).

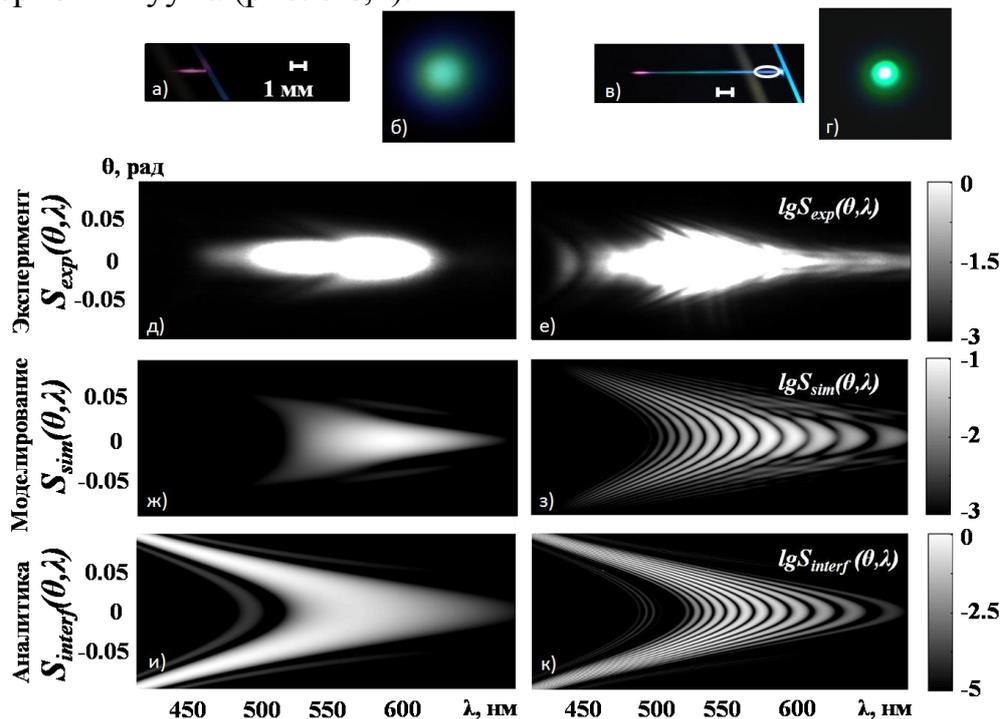


Рис. 3. Частотно-угловой спектр импульса на длине волны 1900 нм до (левая колонка) и после (правая колонка) рефокусировки;

а), в) фотографии плазменного канала филамента в образце. Размытая серая наклонная полоса- входная грань клина;

б), г) фотографии колец конической эмиссии суперконтинуума;

д), е) экспериментально полученные частотно-угловые спектры конической эмиссии $S_{exp}(\theta, \lambda)$;

ж), з) численно полученные частотно-угловые спектры конической эмиссии в логарифмическом масштабе $S_{sim}(\theta, \lambda)$ с учетом спектральной чувствительности и динамического диапазона ПЗС-матрицы;

и), к) аналитически рассчитанные частотно-угловые спектры конической эмиссии в логарифмическом масштабе $S_{interf}(\theta, \lambda)$ с учетом спектральной чувствительности и динамического диапазона ПЗС-матрицы.

Таким образом, для импульсов с длиной волны 1900 нм, лежащей в области аномальной ДГС в кварце, появление модуляции в частотно-угловом спектре в видимой полосе конической эмиссии после рефокусировки происходит аналогично появлению модуляции в частотно-угловом спектре конической эмиссии после рефокусировки при филаментации в кварце импульсов с длинами волн, лежащими в области нормальной и нулевой ДГС.

В Разделе 3.6 сформулированы основные выводы по третьей главе.

В **Главе 4** «Особенности формирования спектра суперконтинуума в условиях аномальной дисперсии плавленого кварца» представлены результаты экспериментального, численного и аналитического исследования спектра фемтосекундного лазерного излучения с центральной длиной волны в области аномальной дисперсии плавленого кварца в процессе филаментации. В отличие

от гл.3 здесь рассматривается спектральная плотность мощности $S(\lambda)$ излучения суперконтинуума, которая является результатом интегрирования по телесному углу частотно-углового распределения интенсивности спектральных компонент $S(\theta, \lambda)$. Получена спектральная карта суперконтинуума, который генерируется при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов с центральной длиной волны λ_0 , перестраиваемой от 800 нм до 2300 нм. Численно предсказано и экспериментально зарегистрировано формирование изолированного высокочастотного (антистоксового) крыла суперконтинуума при филаментации в условиях аномальной ДГС. На основе интерференционных представлений дана физическая интерпретация образования минимума, отделяющего антистоксовое крыло от центральной области спектра филаментирующего излучения.

В Разделе 4.1 представлены результаты серии численных экспериментов по филаментации в кварце, выполненных для фемтосекундного излучения с центральной длиной волны λ_0 , плавно перестраиваемой в интервале 800÷2300 нм. Результаты численного исследования обобщены в виде спектральной карты СК $S_{comp}(\lambda_0, \lambda)$, на которой интенсивность его спектральных компонент представлена поверхностью на плоскости: « λ (длина волны СК) – λ_0 (центральная длина волны падающего излучения)». Численно установлено, что формирование изолированного максимума спектральных компонент в высокочастотной области спектра суперконтинуума - антистоксового крыла- происходит при филаментации в условиях аномальной дисперсии групповой скорости.

Раздел 4.2 посвящен результатам численного, экспериментального и аналитического исследования антистоксового крыла суперконтинуума при филаментации излучения в широком диапазоне длин волн, лежащих в области аномальной дисперсии групповой скорости плавленого кварца.

В подразделе 4.2.1 исследовано влияние порядка многофотонности процесса генерации лазерной плазмы на формирование антистоксового крыла суперконтинуума. Показано, что независимо от характера ДГС антистоксовый сдвиг в спектре СК при филаментации определяется порядком многофотонности K процесса генерации лазерной плазмы, и его величина увеличивается при увеличении K .

В подразделе 4.2.2 численно показано, что источники антистоксового крыла суперконтинуума сосредоточены на хвосте импульса в процессе филаментации.

В подразделе 4.2.3 представлены результаты экспериментальной регистрации антистоксового крыла суперконтинуума при филаментации фемтосекундного лазерного излучения в плавленом кварце. В лабораторном эксперименте использовался источник фемтосекундного излучения на основе перестраиваемого параметрического усилителя TOPAS, совмещенного с регенеративным усилителем Spitfire Pro. Измерение длительности фемтосекундного излучения осуществлялось спектрометром ASF-20 фирмы

«Авеста-Проект». Фемтосекундные лазерные импульсы фокусировались тонкой кварцевой линзой с фокусным расстоянием 50 см на входную грань образца плавленного кварца (рис. 4). Образец имел форму остроугольного клина, что позволяло устанавливать фиксированную длину филамента при различных длинах волн импульса. Диаметр пучка в перетяжке составлял ~ 100 мкм. Излучение суперконтинуума собиралось ахроматической линзой на входную щель монохроматора. Матовая пленка, установленная на его входном окне, создавала рассеянное излучение, что позволяло исключить влияние угловой зависимости спектральных компонент СК, характерной для конической эмиссии. Спектроскопические измерения суперконтинуума в полосе длин волн $400 \div 1000$ нм осуществлялись монохроматором Solar - Tii MS2004 и в полосе $1100 \div 2700$ нм – оригинальным спектрометром ASP-IRHS, разработанным в 2010 году фирмой «Авеста-Проект». Динамический диапазон спектрометров составлял 10^3 .

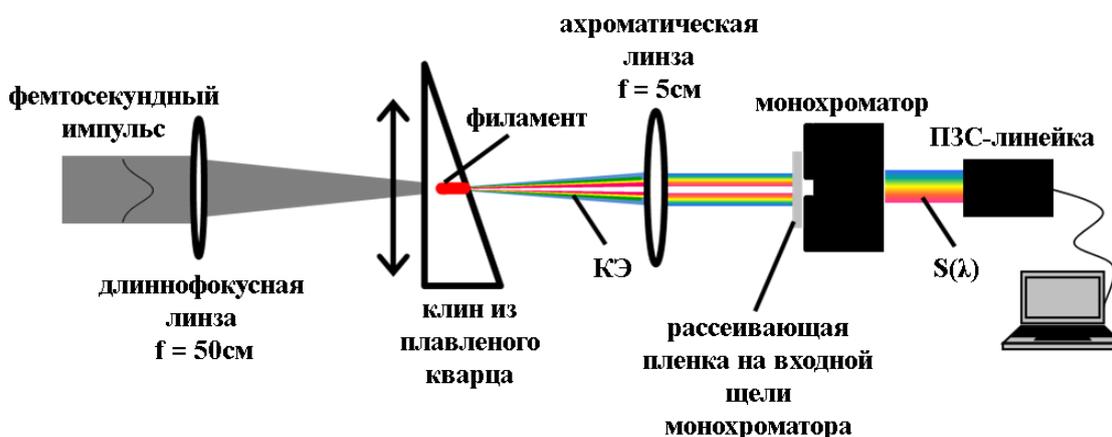


Рис. 4. Схема экспериментальной установки.

Задачей экспериментов являлось изучение влияния длины волны фемтосекундного излучения на генерацию антистоксового крыла суперконтинуума при филаментации в условиях аномальной дисперсии в плавленном кварце. Поэтому в проводимых экспериментах использовались импульсы ближнего ИК – диапазона с длиной волны, перестраиваемой от $\lambda_0 = 1300$ нм, соответствующей нулевой ДГС, до $\lambda_0 = 2300$ нм, соответствующей сильной аномальной ДГС в плавленном кварце. Длительность импульсов составляла $\tau_{FWHM} = 70\text{фс}$. При перестройке длины волны энергия излучения W увеличивалась от 2.2 мДж при $\lambda_0 = 1200$ нм до 4.5 мДж при $\lambda_0 = 1900$ нм, так что отношение пиковой мощности P_{peak} к критической мощности самофокусировки в плавленном кварце P_{cr} принимало одинаковое значение, близкое к 5. Для критической мощности самофокусировки P_{cr} было принято, что на длине волны $\lambda_0 = 1200$ нм ее величина равна $P_{cr} = 4.22$ МВт и возрастает при увеличении длины волны в соответствии с зависимостью $P_{cr} \sim \lambda_0^2$. На длине волны, превышающей 2000 нм, энергию импульса W приходилось увеличивать до $8 \div 12$ мДж для компенсации поглощения в плавленном кварце, которое повышается в этом диапазоне длин волн.

При измерениях клиновидный образец перемещался в направлении, перпендикулярном пучку, так чтобы для импульсов различных длин волн получить плазменные каналы равной протяженности, которые регистрировались через боковую грань образца плавленого кварца. Поскольку плазменный канал совпадает с областью высокой интенсивности, то ее положение и протяженность полностью определяют область филамента, в которой происходит самомодуляция фазы светового поля, вызывающая уширение частотного спектра импульса. Тем самым, перемещением образца достигалась равная протяженность «излучающих» областей филамента для импульсов различных длин волн. В наших экспериментах «излучающие» области филамента имели протяженность около 1 мм и находились, например, на расстоянии от входа в среду около 8 мм для импульса с $\lambda_0 = 1300$ нм и около 6.5 мм для $\lambda_0 = 1900$ нм. Таким образом, мы осуществляли регистрацию спектра суперконтинуума $S_{exp}(\lambda)$, который в отсутствие рефокусировки формируют излучающие области равной длины при филаментации импульсов с центральной длиной волны, перестраиваемой в широком диапазоне.

Спектры $S_{exp}(\lambda)$, полученные экспериментально, представлены в полулогарифмической шкале для ряда длин волн на рис. 5, на которые наложены для сравнения также численные спектры $S_{comp}(\lambda)$. Для каждой длины волны экспериментальные спектры в инфракрасной области $S_{exp}^{ir}(\lambda)$ ($1100\text{нм} < \lambda^{ir} < 2700\text{нм}$) нормированы на максимальные величины $S_{exp}^{ir}(\lambda_0)$. В видимой области $S_{exp}^{vis}(\lambda)$ ($400\text{нм} < \lambda^{vis} < 1100\text{нм}$) нормировка экспериментальных спектров $S_{exp}^{vis}(\lambda)/S_0$ такова, что их максимальные значения совпадают со значениями численных спектров $S_{comp}(\lambda)$ в этой спектральной полосе.

Относительное изменение спектров $S_{comp}(\lambda)$, полученных численно, представлено в диапазоне от 1 до e^{-8} , тогда как в экспериментальных $S_{exp}^{vis}(\lambda)$ и $S_{exp}^{ir}(\lambda)$ относительное изменение ограничено динамическим диапазоном спектрометров и составляет три порядка. Спектральные полосы чувствительности ПЗС-линейки монохроматора Solar - Tii MS2004 для коротковолновой области $400 \div 1200$ нм и спектрометра ASP-IRHS для инфракрасной области $1100 \div 2700$ нм отмечены на рис. 5 жирными отрезками на оси длин волн. Порядок многофотонности K в плавленом кварце указан для излучения различных длин волн λ_0 .

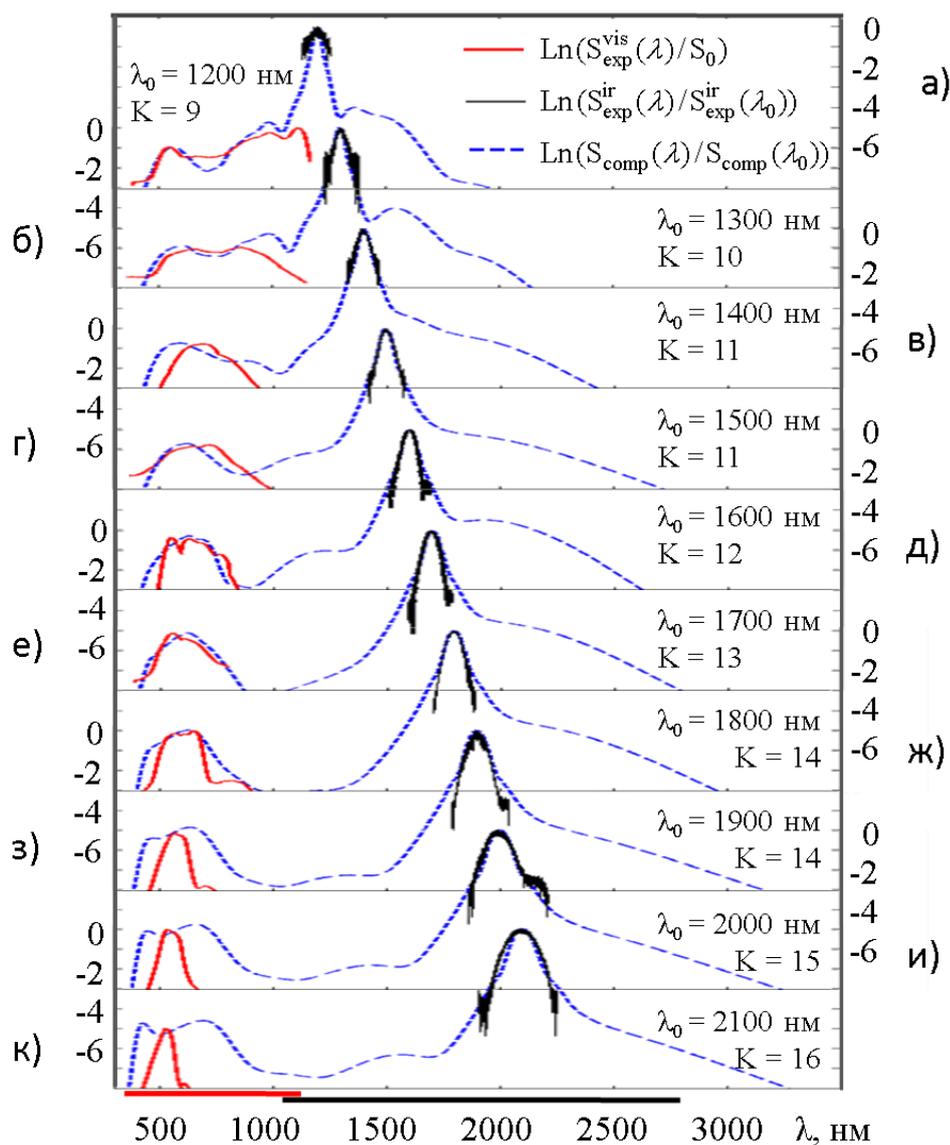


Рис. 5. Спектр суперконтинуума при филаментации импульсов на длинах волн от 1200 до 2100 нм. Непрерывные линии — экспериментально зарегистрированные спектры в ИК и видимом диапазонах, пунктирные линии — численное моделирование.

Для излучения на всех длинах волн экспериментально полученные спектры $S_{exp}^{vis}(\lambda)$ и $S_{exp}^{ir}(\lambda)$ в пределах динамического диапазона спектрометров близки к численным $S_{comp}(\lambda)$. С увеличением центральной длины волны излучения λ_0 от 1200 до 2100 нм спектр СК становится существенно немонотонным и формируется антистоксовое крыло в виде изолированного максимума в видимой области длин волн (рис.5). При этом спектральная полоса антистоксового крыла сужается, а интенсивность спектральных компонент увеличивается, достигая $e^{-5} \cdot S(\lambda_0)$. Длина волны коротковолновой отсечки антистоксовых компонент спектра λ_{min} уменьшается и антистоксовый сдвиг $\delta_{as} \lambda = \lambda_0 - \lambda_{min}$ этих компонент от центральной длины волны возрастает с увеличением порядка многофотонности K процесса генерации лазерной плазмы.

В подразделе 4.2.4 на основе интерференционной модели представлено аналитическое исследование формирования модуляции в спектре широкополосного когерентного источника, движущегося в филаменте. Показано, что в условиях аномальной дисперсии плавленого кварца, с увеличением протяженности излучающей области филамента - области, которую пролетает широкополосный точечный источник, - в спектре излучения в дальней зоне происходит формирование широкого минимума, разделяющего область спектра вокруг центральной длины волны и изолированный максимум в высокочастотной области спектра.

В Разделе 4.3 сформулированы основные выводы по четвертой главе.

В **Главе 5** «Световые пули при фемтосекундной филаментации» представлены результаты численного и экспериментального исследования пространственно-временной трансформации фемтосекундного лазерного импульса при филаментации в плавленом кварце в условиях аномальной ДГС. Исследовано влияние аномальной ДГС на процесс локализации энергии в пространстве и времени при филаментации. Численно предсказано и впервые экспериментально зарегистрировано в плавленом кварце образование световых пульс - локализованных в пространстве и времени областей с высокой интенсивностью светового поля - в фемтосекундном лазерном филаменте в условиях аномальной дисперсии для импульсов на длине волны 1800 нм.

В Разделе 5.1 с помощью численного моделирования представлена эволюция световой пули в процессе филаментации. Показано, что при аномальной дисперсии образуется последовательность световых пульс, возникновение которых обусловлено совместным проявлением временного и пространственного факторов. В этом случае происходит перекачка мощности с хвоста и переднего фронта импульса к центру, вызванная аномальной дисперсией в условиях положительной фазовой модуляции и последующее пространственное сжатие временных слоев вследствие самофокусировки.

В разделе 5.2 исследованы спектральные характеристики импульса при фемтосекундной филаментации в условиях аномальной дисперсии групповой скорости плавленом кварце. Установлено, что появление световой пули сопровождается резким выбросом антистоксовых компонент спектра суперконтинуума. С увеличением числа образованных пульс возрастает интенсивность спектральных компонент антистоксового крыла, в его спектра появляется интерференционная модуляция.

В разделе 5.3 представлен численный анализ трансформации длительности световой пули в процессе фемтосекундной филаментации. Показано, что первоначальная гауссова форма импульса трансформируется в несимметричную форму световой пули: ее передний фронт значительно менее крутой, чем хвост, в котором произошло сильное увеличение крутизны. Установлена связь между длительностью световой пули $\tau_{\text{pulse}}^{\text{comp}}$ и шириной ее

автокорреляционной функции $\tau_{\text{corr}}^{\text{comp}}$. Определено, что отношение $k = \tau_{\text{pulse}}^{\text{comp}} / \tau_{\text{corr}}^{\text{comp}}$ составляет 0.5 при достижении пучка минимальной длительности.

В разделе 5.4 рассмотрено вопрос о спектральной ограниченности световой пули. Численно показано, что световая пуля не является спектрально ограниченной, длительность световой пули на длине волны 1800 нм при синфазности ее спектральных компонент составила бы 5.4 фс.

Раздел 5.5 содержит результаты экспериментальной регистрации последовательности световых пучков при филаментации в плавленом кварце, а так же оценки минимальной зарегистрированной длительности световой пули.

В подразделе 5.5.1 представлена схема лабораторного эксперимента. Установка состояла из источника фемтосекундного излучения на основе перестраиваемого параметрического усилителя TOPAS, совмещенного с регенеративным усилителем Spitfire Pro. На регенеративный усилитель с накачкой твердотельным лазером Empower 30 подавались импульсы фемтосекундного генератора Tsunami (Ti:Sph) с непрерывным твердотельным лазером накачки Millennia Vs. Фемтосекундные лазерные импульсы с выхода усилителя фокусировались тонкой кварцевой линзой с фокусным расстоянием 50 см на входную грань образца. На длине волны $\lambda_0 = 1800 \text{ нм}$ длительность импульса составляла $\tau_0 = 50 \text{ фс}$, диаметр пучка в перетяжке $a_0 \approx 100 \text{ мкм}$, энергия W варьировалась от 1 до 20 мкДж.

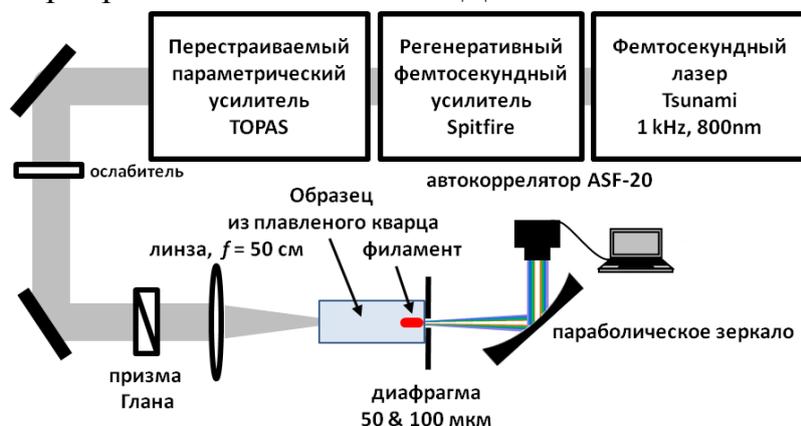


Рис. 6. Схема экспериментальной установки.

При автокорреляционных измерениях длительности световой пули приосевая часть филамента, в котором происходило ее формирование, выделялась диафрагмой, установленной у выходной грани образца, и собиралась параболическим зеркалом на входном окне автокоррелятора ASF-20 (рис. 6).

В подразделе 5.5.2 представлены экспериментально зарегистрированные автокорреляционные функции световых пучков $J_{\text{corr}}^{\text{exp}}(\tau)$ при филаментации 1800-нм фемтосекундного излучения в плавленом кварце.

В подразделе 5.5.3 на основе экспериментально зарегистрированных и численно полученных автокорреляционных функций световых пучков проведена оценка минимальной длительности световой пули, зарегистрированной

экспериментально. Для определения длительности световой пули по экспериментально зарегистрированной ширине автокорреляционной функции было использовано численно полученное отношение длительности световой пули к ширине автокорреляционной функции $k(z) = \tau_{\text{pulse}}^{\text{comp}}(z) / \tau_{\text{corr}}^{\text{comp}}(z)$, так как форма световой пули качественно отличается от гауссовой формы импульса на входе в среду. В соответствии с результатами численного моделирования принято, что отношение k длительности световой пули $\tau_{1/2}^{\text{comp}}$ к ширине ее АКФ $\tau_{\text{corr}}^{\text{comp}}$ лежит в интервале $0.5 \div 0.44$. Используя значение параметра $k = 0.5$, соответствующие минимальной длительности излучения мы оценили минимальную длительность экспериментально зарегистрированных световых пульс: $\tau_{1/2}^{\text{exp}} = 13.5 \text{ fs}$, которая соответствует 27-фс ширине экспериментально зарегистрированной автокорреляционной функции световой пули (рис. 7). Минимальная длительность световой пули составляет около 2 периодов светового поля для центральной длины волны импульса, испытывавшего филаментацию.

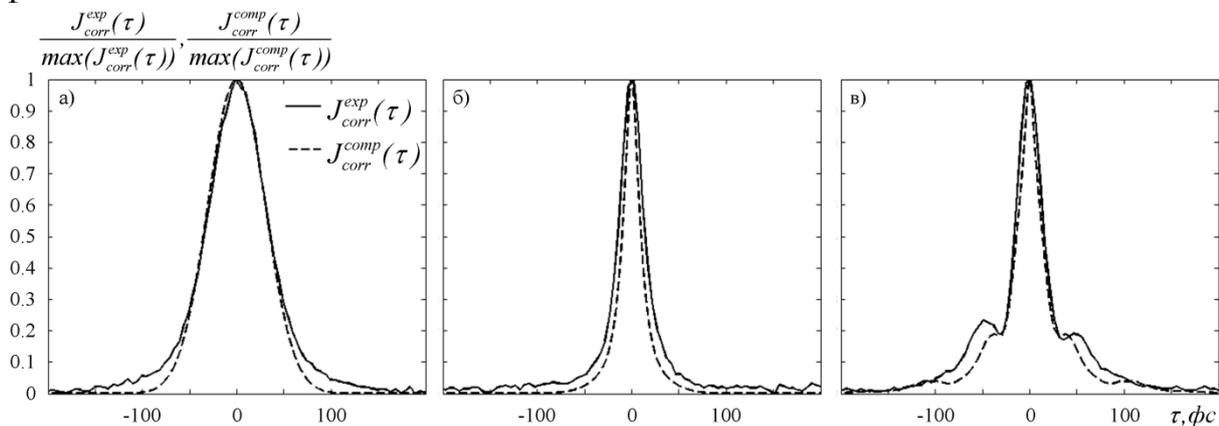


Рис. 7. АКФ $J_{\text{corr}}(\tau)$ световой пули при филаментации в кварце излучения на длине волны 1800 нм, длительностью 50 фс. Измеренные $J_{\text{corr}}^{\text{exp}}(\tau)$ - сплошные линии, полученные численным моделированием $J_{\text{corr}}^{\text{comp}}(\tau)$ - штриховые. а) Излучение на входе в среду. Ширина АКФ 70 фс. б) Одна световая пуля. Диаметр диафрагмы $D = 50 \text{ мкм}$, энергия импульса $W^* = 2.7 \text{ мкДж}$, толщина кварцевого образца 2 см. в) Две световых пули. Диаметр диафрагмы 100 мкм, энергия импульса $W = 9.4 \text{ мкДж}$, толщина кварцевого образца 1 см.

В разделе 5.6 представлен анализ процесса насыщения интенсивности в световой пуле. На основе результатов численного и экспериментального исследования пространственно-временного изменения показателя преломления в плавленом кварце при филаментации фемтосекундного импульса исследовано изменение с расстоянием интегральной величины оптической силы нелинейных линз, которая накапливается вдоль филамента. Экспериментальные исследования выполнены с участием автора в Институте Физики НАН Украины.

В подразделе 5.6.1 введено понятие оптической силы керровской и плазменной нелинейных линз филамента $D(\tau^*, z)$ во временном слое импульса

τ^* при распространении на расстоянии z . Кривизна нелинейного приращения показателя преломления $\Delta n(r, \tau^*, z)$ определяет в параксиальном приближении оптическую силу нелинейной линзы $D(\tau^*, z)$, наведенной на расстоянии z в филаменте:

$$D(\tau^*, z) = -\int_0^z \frac{\partial^2 \Delta n(r, \tau^*, z')}{\partial r^2} \Big|_{r=0} dz', \quad (2)$$

где суммарное приращение к показателю преломления $\Delta n(r, \tau^*, z)$, вызванное аддитивными керровской $\Delta n_K(r, \tau^*, z)$ и плазменной $\Delta n_{Pl}(r, \tau^*, z)$ нелинейностями $\Delta n(r, \tau^*, z)$, представлено в виде:

$$\Delta n(r, \tau^*, z) = \Delta n_K(r, \tau^*, z) + \Delta n_{Pl}(r, \tau^*, z). \quad (3)$$

При $\frac{\partial^2 \Delta n(r, \tau^*, z)}{\partial r^2} > 0$ - излучение в выбранном временном слое τ^* дефокусируется и интегральная оптическая сила нелинейных линз $D(\tau^*, z)$ уменьшается с расстоянием z согласно (2). При $\frac{\partial^2 \Delta n(r, \tau^*, z)}{\partial r^2} < 0$ - излучение в выбранном временном слое τ^* фокусируется и интегральная оптическая сила нелинейных линз $D(\tau^*, z)$ увеличивается.

В подразделе 5.6.2 представлены экспериментальные и численные результаты трансформации наведенного показателя преломления за счет керровской и плазменной нелинейностей при филаментации в плавном кварце импульсов на длине волны $\lambda_0 = 800$ нм длительностью $\tau_{FWHM} = 160$ фс и энергией $W = 2$ мкДж. Эксперименты проведены в центре коллективного пользования «Лазерный фемтосекундный комплекс» Института физики НАН Украины. В экспериментах используется метод фемтосекундной время-разрешающей оптической поляриграфии, вместе с теньвым методом регистрации поглощения самонаведенной лазерной плазмы для исследования динамики пространственно-временного распределения наведенного приращения показателя преломления в процессе филаментации в плавном кварце. Численно показано, что из равенства добавок $\max |\Delta n_{Pl}^{num}|_{r=0}$ и $\max |\Delta n_K^{num}|_{r=0}$ не следует условие для насыщения интенсивности в филаменте.

В подразделе 5.6.3 показано, что при слабом влиянии нормальной дисперсии групповой скорости интенсивность достигает своего максимального значения в первый раз в филаменте на расстоянии z_{str} когда суммарная оптическая сила нелинейных линз в филаменте $D(z) = D_{Pl}(z) + D_K(z)$ прекращает свой рост:

$$\frac{\partial (D_K + D_{Pl})}{\partial z} \Big|_{z_{str}} = 0. \quad (4)$$

Условие (4) означает, что насыщение интенсивности происходит, когда абсолютные значения радиальной кривизны керровской и плазменной добавок к показателю преломления достигают одинаковой величины.

В подразделе 5.6.4 установлено, что при аномальной ДГС равенство (4) не определяет насыщения интенсивности в филаменте. При аномальной дисперсии групповой скорости определяющее влияние временного фактора, связанного с перекачкой мощности излучения к центру импульса, качественно изменяет процесс насыщения интенсивности. Рост интенсивности продолжается в условиях плазменной дефокусировки, доминирующей над керровской самофокусировкой.

В разделе 5.7 сформулированы основные выводы по пятой главе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате данной работы впервые выполнено комплексное численное, экспериментальное и аналитическое исследование формирования световых пульс фемтосекундного филамента и частотно-углового спектра импульса при филаментации в плавленом кварце. В работе изучены общие закономерности формирования частотно-углового спектра суперконтинуума при филаментации в условиях нормальной, нулевой и аномальной дисперсии групповой скорости, определены условия генерации последовательности световых пульс филамента, показана возможность управления спектральными и пространственно-временными параметрами световых пульс.

Численным моделированием предсказано формирование квазипериодической последовательности «световых пульс» с высокой пространственно-временной локализацией светового поля при филаментации фемтосекундного излучения в условиях аномальной дисперсии групповой скорости плавленого кварца. Каждая «световая пуля» формируется в центральных временных слоях импульса, и затем, смещаясь к хвосту импульса, исчезает. Возникновение следующей световой пули происходит в результате перетекания мощности с хвоста и переднего фронта импульса к центру, вызванного аномальной дисперсией в условиях положительной фазовой модуляции. Пиковая интенсивность световой пули на длина волны 1800 нм достигает величины $5 \cdot 10^{13}$ Вт/см², радиус - 10 мкм и длительность - несколько периодов светового поля. На основе численного анализа формы световой пули установлено, что отношение ее длительности $\tau_{1/2}^{\text{comp}}$ к ширине АКФ $\tau_{\text{corr}}^{\text{comp}}$ составляет $0.44 \div 0.5$.

Предложен и осуществлен лабораторный эксперимент по регистрации последовательности световых пульс при филаментации в плавленом кварце. На основе результатов численного моделирования и экспериментальной регистрации ширины АКФ световой пули получена оценка длительности световой пули, согласно которой при минимальной экспериментально зарегистрированной ширине АКФ $\tau_{\text{corr}}^{\text{exp}} = 27$ фс ее длительность составляет 13.5 фс при диаметре селектирующей диафрагмы 50 мкм. При этом в филаменте не достигается полная синфазность спектральных компонент суперконтинуума, и излучение световой пули не является спектрально ограниченным.

Численно, экспериментально и аналитически исследовано формирование изолированного антистоксового крыла суперконтинуума в фемтосекундном импульсе на длинах волн $\lambda_0 = 1200 \div 2100$ нм в условиях аномальной ДГС в плавленом кварце. Установлено, что влияние увеличения длины волны излучения λ_0 на спектр суперконтинуума определяется двумя факторами: первый - увеличение антистоксового уширения спектра, вызванное сильным увеличением крутизны хвоста импульса, обусловленный ростом порядка многофотонности K , второй - деструктивная интерференция широкополосного излучения суперконтинуума и формирование широкого минимума в полосе

между изолированным антистоксовым крылом и уширенным спектром импульса. Независимо от характера ДГС величина антистоксового сдвига $\Delta_{as}\lambda = \lambda_0 - \lambda_{\min}$ излучения СК при филаментации возрастает с увеличением порядка многофотонности K процесса генерации лазерной плазмы.

Аналитически с помощью развитой интерференционной модели формирования излучения суперконтинуума, качественно расширяющей модель трехволнового смешения, получена убедительная физическая интерпретация образования изолированного максимума в видимой области спектра суперконтинуума (антистоксового крыла), обусловленного материальной дисперсией среды в процессе филаментации в условиях аномальной ДГС. Образование при филаментации фемтосекундного излучения на длине волны $\lambda_0 = 1200 \div 2100$ нм в плавном кварце широкого минимума в спектре СК, отделяющего его антистоксовое крыло от области в окрестности центральной длины волны, является результатом деструктивной интерференции широкополосного излучения суперконтинуума, которое генерируется в излучающей области конечной длины. При увеличении центральной длины волны излучения в условиях аномальной ДГС происходит уменьшение ширины антистоксового крыла СК и возрастание его сдвига в синюю область спектра.

При рефокусировке излучения в филаменте, не зависимо от характера ДГС происходит расщепление непрерывного частотно-угловой спектра суперконтинуума на множество контрастных максимумов в результате интерференции излучения от последовательности распределенных когерентных источников, образующихся вдоль филамента. В изображении конической эмиссии на экране при этом возникает дискретная структура цветных колец, в частотно-угловом спектре $S(\theta, \lambda)$ - характерная структура интерференционных минимумов и максимумов. Интерференция спектральных компонент охватывает весь антистоксовый диапазон суперконтинуума и может быть зарегистрирована в видимой области для филаментации излучения на длинах волн вплоть до 1900нм.

Численно и экспериментально исследована эволюция пространственно-временного распределения керровской $\Delta n_K(r, \tau)$ и плазменной $\Delta n_{pl}(r, \tau)$ добавок к показателю преломления плавного кварца в процессе фемтосекундной филаментации. Установлено, что при слабом влиянии ДГС насыщение пиковой интенсивности светового поля происходит в результате обращения в нуль приращения суммарной оптической силы керровской и плазменной нелинейных линз. При аномальной дисперсии групповой скорости сильное влияние временного фактора, связанного с перекачкой мощности излучения к центру импульса, качественно изменяет процесс насыщения интенсивности и ее увеличение продолжается в условиях плазменной дефокусировки, доминирующей над керровской самофокусировкой. Высокое значение пиковой интенсивности в условиях плазменной дефокусировки формируется и поддерживается потоками мощности с переднего фронта и хвоста импульса.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации отражены в следующих статьях:

1. Е.О. Сметанина, А.Е. Дормидонов, В.О. Компанец *Коническая эмиссия суперконтинуума при филаментации фемтосекундного лазерного импульса в плавленом кварце*. Оптический журнал 7 (77), 75-77 (2010)
2. В.П. Кандидов, Е.О. Сметанина, А.Е. Дормидонов, В.О. Компанец, С.В. Чекалин *Формирование конической эмиссии суперконтинуума при филаментации фемтосекундного лазерного излучения в плавленом кварце*. ЖЭТФ 140 (3), 484-496 (2011)
3. E.O.Smetanina, A. E. Dormidonov, V. P. Kandidov *Supercontinuum generation in filamentation of femtosecond laser pulse in fused silica*. Proc. SPIE 8159, 81590L (2011); DOI:10.1117/12.893108
4. E.O.Smetanina, A. E. Dormidonov, and V. P. Kandidov *Spatio-Temporal Evolution Scenarios of Femtosecond Laser Pulse Filamentation in Fused Silica*. Laser Physics 22 (7), 1189–1198 (2012)
5. Е.О.Сметанина, В.О.Компанец, С.В.Чекалин, В.П.Кандидов *Особенности филаментации фемтосекундного лазерного излучения в условиях аномальной дисперсии в плавленом кварце. Ч.1. Численное исследование* Квантовая Электроника 42, 913-919 (2012)
6. Е.О.Сметанина, В.О.Компанец, С.В.Чекалин, В.П.Кандидов *Особенности филаментации фемтосекундного лазерного излучения в условиях аномальной дисперсии в плавленом кварце. Ч.2. Эксперимент и физическая интерпретация* Квантовая Электроника 42, 920-924 (2012)
7. С. В. Чекалин, В. О. Компанец, Е. О. Сметанина, В. П. Кандидов
Световые пули и спектр суперконтинуума при филаментации фемтосекундного импульса в условиях аномальной дисперсии групповой скорости в плавленом кварце Квантовая Электроника 43, 326 (2013).
8. E.O.Smetanina, V. O. Kompanets, S. V. Chekalin, A. E. Dormidonov, and V. P. Kandidov *Anti-Stokes wing of femtosecond laser filament supercontinuum in fused silica* Optics Letters 38 (1), 16-18 (2013)
9. E.O. Smetanina, V.O. Kompanets, A.E. Dormidonov, S.V. Chekalin and V.P. Kandidov *Light bullets from near-IR filament in fused silica* Laser Physics Letters 10, 105401 (2013)
10. E.O.Smetanina, V.M.Kadan, I.V.Blonskyi, V.P.Kandidov *Dynamic lenses in femtosecond filament* Appl. Phys. B 2014 DOI 10.1007/s00340-013-5758-x

и тезисах докладов на международных и всероссийских конференциях:

1. 22th International Laser Physics Workshop (LPHYS'13), July 15-19, 2013, Prague, Czech Republic, Book of abstracts, Seminar 5, p.3.
Dynamics of Kerr and plasma lenses in the femtosecond filament
E.O.Smetanina, V.M.Kadan, I.V.Blonskyi, V.P.Kandidov

2. International Conference on Coherent and Nonlinear Optics & International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT 2013), June 18-22, 2013, Moscow, Russia, Technical Digest ICONO-09: ICONO Symposium: Femtosecond Laser Pulse Filamentation, p.31-32
Spatio-temporal evolution of the refractive index variations induced by femtosecond filament in fused silica
V.M.Kadan, I.V.Blonskyi, E.O.Smetanina, V.P.Kandidov
3. 4-th international symposium on filamentation (COFIL 2012), October 7-12, 2012, Tucson, Arizona, USA, Book of Abstracts, p.129-130
Light bullet and spectrum anti-Stokes wing from fs-filament in fused silica anomalous GVD regime
E.O. Smetanina, V.O. Kompanets, S.V. Chekalin, A.E. Dormidonov, V.P. Kandidov
4. 3rd International Workshop on Laser-Matter Interaction, June 25-29, 2012, Porquerolles, France, Book of Abstracts p.71
Spectral intensity map of supercontinuum in femtosecond near IR pulse filamentation in fused silica
E.O. Smetanina, V.P. Kandidov, A.E. Dormidonov, V.O. Kompanets, S.V. Chekalin
5. VII международная конференция молодых ученых и специалистов “Оптика 2011”, 17-21 октября, 2011, Санкт-Петербург, Россия, Сборник трудов, с. 5-6
Частотный спектр суперконтинуума при филаментации в плавленом кварце фемтосекундного лазерного импульса в условиях аномальной дисперсии
E.O. Сметанина, А.Е. Дормидонов, В.О. Компанец
6. SPIE Optics&Photonics 2011, San Diego, California, USA Technical Summaries, Conference 8159: Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XII, p 335
Supercontinuum under the filamentation of the femtosecond laser pulse in the fused silica
E.O. Smetanina, A.E. Dormidonov , V.P. Kandidov, V.O. Kompanets ,S.V. Chekalin
7. 20th International Laser Physics Workshop, July 11-15,2011, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina,Book of abstracts,seminar5 Nonlinear Optics and Spectroscopy,p.47
Splitting and compression of femtosecond laser pulse in filament in fused silica
E.O. Smetanina, A.E. Dormidonov , V.P. Kandidov
8. Пятая Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, 26 – 29 апреля, 2011, Саров, Россия, Сборник докладов, с 319-327
Пространственно-временная эволюция фемтосекундного лазерного импульса при филаментации в плавленом кварце
E.O. Сметанина
9. Конференция “Ломоносов - 2010” МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия
Частотно-угловые спектры фемтосекундных лазерных импульсов различных длин волн при филаментации в плавленом кварце
E.O. Сметанина