

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
ФГУП ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ имени Н.Л. ДУХОВА

*На правах рукописи*

ЗАЛОЗНАЯ ЕЛИЗАВЕТА ДМИТРИЕВНА

**СВОЙСТВА ЭКСТРЕМАЛЬНО СЖАТОГО ВОЛНОВОГО ПАКЕТА СРЕДНЕГО  
ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА В ОБЪЕМЕ ПРОЗРАЧНОЙ СРЕДЫ**

1.3.19 – лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и во Всероссийском научно-исследовательском институте автоматики им. Н.Л. Духова.

Научные руководители:

**Кандидов Валерий Петрович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
физический факультет МГУ имени  
М.В. Ломоносова, кафедра общей физики и  
волновых процессов, профессор

**Дормидонов Александр Евгеньевич**

кандидат физико-математических наук, ФГУП  
«Всероссийский научно-исследовательский  
институт автоматики им. Н.Л. Духова»  
начальник научно-исследовательского отдела

Официальные оппоненты:

**Сазонов Сергей Владимирович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
Национальный исследовательский центр  
«Курчатовский институт», начальник отдела,  
ведущий научный сотрудник

**Селезнев Леонид Владимирович**

доктор физико-математических наук, доцент,  
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
и.о. заведующего лабораторией,  
ведущий научный сотрудник

**Стрелков Василий Вячеславович**

доктор физико-математических наук,  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
ведущий научный сотрудник

Защита состоится «21» декабря 2023 г. в 16 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета МГУ.013.4 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, ауд. имени С.А. Ахманова.

E-mail: [diss.sov.31@physics.msu.ru](mailto:diss.sov.31@physics.msu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.4/2731>.

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.013.4,  
кандидат физ.-мат. наук

Коновко Андрей Андреевич

## Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию феномена световых пульс – экстремально сжатых волновых пакетов, формирующихся при филаментации фемтосекундного лазерного излучения среднего инфракрасного диапазона (1300 – 6000 нм) в условиях аномальной дисперсии групповой скорости в объеме прозрачных твердотельных диэлектриков.

**Актуальность** выбранной темы обусловлена активным развитием сферы нелинейной оптики фемтосекундного излучения среднего инфракрасного диапазона. Нелинейно-оптическое взаимодействие мощного фемтосекундного излучения с диспергирующей средой, результатом которого является пространственно-временная локализация световой энергии, определяет собой явление филаментации, в основе которого лежит динамическое противостояние керровской самофокусировки излучения и его дефокусировки на самонаведенной лазерной плазме.

Сжатие волнового пакета по пространству за счет самофокусировки и расплывание его во времени в условиях нормальной дисперсии групповой скорости приводит к распаду импульса на субимпульсы, каждый из которых характеризуется собственным спектральным составом и своей групповой скоростью. При филаментации излучения в условиях аномальной дисперсии групповой скорости наряду с самофокусировкой пучка в пространстве наблюдается самосжатие импульса во времени, компенсирующее дисперсионное расплывание. В результате согласованной компрессии волнового пакета в пространстве и во времени возможно зарождение экстремально сжатого высокоинтенсивного объекта – световой пули, интенсивность которой достигает  $10^{14}$  ТВт/см<sup>2</sup>, а длительность сравнима с периодом осцилляций на длине волны среднего инфракрасного диапазона.

На сегодняшний день явление филаментации фемтосекундного излучения широко исследовано в спектральном диапазоне, соответствующем нормальной дисперсии групповой скорости. Всестороннему изучению этого явления посвящено множество работ, где сформулированы основные закономерности трансформации волнового пакета, установлена определяющая роль резервуара энергии в поддержании высокой локализации светового поля в филаменте на протяженных трассах, показана возможность генерации суперконтинуума со спектральной полосой, простирающейся от видимого до среднего инфракрасного диапазона.

Активная в настоящее время разработка мощных лазерных источников фемтосекундного излучения среднего инфракрасного диапазона, соответствующего области аномальной дисперсии групповой скорости многих

прозрачных диэлектриков, обеспечивает высокий уровень актуальности исследований формирования и динамики световых пучков при распространении лазерного излучения в объеме среды. Нелинейное взаимодействие интенсивного светового поля со средой вызывает значительное изменение пространственно-временных и спектральных характеристик излучения, определение основных особенностей которого позволит целенаправленно задавать параметры формирующихся экстремально сжатых волновых пакетов.

Высокая пространственно-временная локализация оптического излучения и нелинейное сверхширение частотно-углового спектра световой пули привлекают внимание ученых не только с фундаментальной точки зрения, но и как актуальные прикладные вопросы современной нелинейной оптики.

Короткая длительность световой пули делает её перспективным инструментом для методов диагностики и управления сверхбыстрыми процессами в атомарных и молекулярных системах, твердом теле и биологических объектах, характерные времена которых сравнимы с периодом оптических осцилляций. Однако, высокая чувствительность таких процессов к абсолютной фазе воздействующего светового поля требует подробного исследования закономерностей формирования и распространения экстремально сжатых волновых пакетов.

Высокая интенсивность световой пули, ее малые поперечные размеры и значительная протяженность нелинейного взаимодействия со средой распространения позволяет осуществлять неразрушающую микромодификацию материала и запись волноводных структур, например, для создания элементов микрооптики. В отличие от режима воздействия остросфокусированными пучками, когда за один выстрел происходит модификация объема среды, соответствующего перетяжке светового поля, режим филаментации позволяет прочерчивать протяженную структуру при однократном воздействии. При этом, фазовые эффекты при взаимодействии одноциклового волнового пакета со средой в значительной степени определяют вероятность нелинейной фотоионизации и образования центров окраски, позволяя прецизионно управлять формируемым треком.

Сверхширение частотно-углового спектра при формировании световой пули – генерация конической эмиссии суперконтинуума или так называемых импульсов «белого света», характеризуется спектральной полосой, перекрывающей видимый и инфракрасный диапазоны длин волн, и обладает узкой направленностью, высокими спектральной яркостью и степенью когерентности входящих в его состав спектральных компонент. В условиях аномальной дисперсии групповой скорости происходит эффективная перекачка

энергии инфракрасного импульса в видимую область, и в спектре суперконтинуума формируется изолированное антистоксово крыло. Установление закономерностей нелинейной фазовой модуляции световой пули и управления ее спектральными свойствами позволит использовать ее в качестве источника затравки для параметрических генераторов света фемтосекундной длительности.

Несмотря на значительное число исследований, посвященных изучению феномена световых пульс и характеризующих достаточную **степень разработанности** выбранной темы, остается ряд нерешенных проблем, связанных с влиянием различных факторов на формирование, распространение и спектр экстремально сжатых волновых пакетов, что делает проводимые исследования востребованными.

**Цель** диссертационной работы состоит в определении основных свойств экстремально сжатых волновых пакетов среднего инфракрасного диапазона, формируемых в объеме прозрачных твердотельных диэлектриков при филаментации фемтосекундного лазерного излучения в условиях аномальной дисперсии групповой скорости.

В соответствии с поставленной целью сформулированы и решены следующие **основные задачи**:

1. Определение пороговой мощности формирования световой пули среднего инфракрасного диапазона в зависимости от соотношения между дифракционной и дисперсионной длинами волнового пакета. Исследование влияния энергии волнового пакета на время жизни световой пули и возможность формирования последовательности световых пульс. Анализ формирования последовательности световых пульс при филаментации волновых пакетов с различным соотношением дифракционной и дисперсионной длин;
2. Исследование особенностей формирования антистоксовой полосы суперконтинуума при филаментации фемтосекундных волновых пакетов в прозрачных твердотельных диэлектриках в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. Анализ влияния соотношения между дифракционной и дисперсионной длинами волнового пакета, энергии излучения и ширины запрещенной зоны диэлектрика на антистоксову полосу суперконтинуума световой пули;
3. Исследование динамического изменения длительности, радиуса, и энергии световых пульс среднего инфракрасного диапазона при их распространении

в твердотельных прозрачных диэлектриках в условиях аномальной дисперсии групповой скорости;

4. Анализ влияния аксиальной фокусировки излучения на особенности формирования и динамики световых пучков среднего инфракрасного диапазона. Исследование дислокаций фазы, возникающих в волновом пакете бессель-гауссова пространственного профиля при его филаментации в среде с керровской нелинейностью.

**Объектом** исследования диссертационной работы является экстремально сжатое в пространстве и времени высокоинтенсивное фемтосекундное лазерное излучение среднего инфракрасного диапазона – световая пуля. **Предметом** исследования является пространственно-временная и спектральная трансформация указанного излучения при распространении в прозрачных твердотельных диэлектриках, а также особенности нелинейно-оптического взаимодействия световой пули со средой распространения.

**Научная новизна** проведенных исследований определяется результатами, полученными в диссертации впервые, и состоит в следующем:

1. Впервые установлено, что отношение дифракционной длины волнового пакета к его дисперсионной длине определяет пороговую мощность образования световой пули при филаментации фемтосекундного лазерного излучения в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. Сформулированы закономерности пространственно-временной трансформации излучения при филаментации в условиях аномальной дисперсии групповой скорости в зависимости от соотношения его дифракционной и дисперсионной длин.
2. Обнаружено и численно исследовано формирование особых точек с разрывом волнового фронта при филаментации и образовании световой пули в излучении с бессель-гауссовым пространственным профилем. Выделены различные режимы филаментации в условиях аномальной дисперсии групповой скорости фемтосекундного излучения среднего инфракрасного диапазона, сфокусированного конической линзой. Показана возможность перехода между режимами посредством изменения соотношения между длиной самофокусировки и фокусом конической линзы.
3. Впервые продемонстрирована определяющая роль порядка многофотонности процесса ионизации диэлектрика в формировании антистоксова крыла спектра световой пули при численном моделировании филаментации фемтосекундного излучения в условиях аномальной

дисперсии групповой скорости в ряде модельных сред с варьируемой шириной запрещенной зоны.

4. Обнаружено появление модуляции интенсивности спектральных компонент антистоксова крыла спектра суперконтинуума при формировании в диэлектрике последовательности из нескольких световых пульс.
5. Разработан единый подход к определению параметров экстремально сжатых волновых пакетов, независимый от их формы и ширины спектра. Предложенный подход позволил впервые определить абсолютные параметры световой пули, исследовать эволюцию длительности, радиуса и энергии при формировании и распространении световой пули в объеме прозрачной среды.

**Теоретическая и практическая значимость** проведенных исследований заключается в возможном использовании введенных общих закономерностей формирования высокоинтенсивных световых пульс и генерации широкополосного суперконтинуума при создании мощных одноцикловых импульсов среднего инфракрасного диапазона с управляемыми параметрами, а также прогнозировании результатов экспериментальных исследований. Изучение экстремально локализованных световых пульс с широким спектром открывает новые возможности в развитии нелинейно-оптических методов исследования с высоким пространственным и временным разрешением, дистанционных методов широкополосного зондирования, флуоресцентной и эмиссионной нелинейной спектроскопии окружающей среды, в транспортировке энергии высокой мощности на большие расстояния. Представленные в диссертационной работе результаты расширяют физические представления о явлении филаментации при аномальной дисперсии групповой скорости и формировании экстремально сжатых волновых пакетов в объеме нелинейной диспергирующей среды.

**Методология диссертационного исследования** основана на современных методах компьютерного моделирования распространения импульсного излучения в объеме прозрачной среды, основные результаты которого подтверждены в экспериментах, проведенных в центре коллективного пользования Института спектроскопии Российской академии наук. Численное моделирование филаментации фемтосекундного волнового пакета среднего инфракрасного диапазона в объеме прозрачного диэлектрика в условиях аномальной дисперсии групповой скорости проводилось с помощью двух различных математических моделей – приближения медленно меняющейся

волны и приближения однонаправленного распространения импульсного излучения. Вычисления проводились на многопроцессорных вычислительных кластерах с использованием параллельного компьютерного кода. Исследовалась пространственно-временная и спектральная трансформация волнового пакета при формировании световых пульс в объеме плавленого кварца, фторидов лития, кальция и бария.

### Защищаемые положения

1. Пороговая мощность образования световой пули в условиях аномальной дисперсии групповой скорости, отнесенная к критической мощности стационарной самофокусировки гауссового пучка  $P_{cr}$ , определяется параметром подобия — отношением дифракционной длины волнового пакета к его дисперсионной длине  $L_{dif}/L_{disp}$ . При  $L_{dif}/L_{disp} < 1$  возможно формирование световой пули в волновом пакете, мощность которого ниже критической  $P_{cr}$ , при  $L_{dif}/L_{disp} > 1$  пороговая мощность становится в несколько раз выше  $P_{cr}$ .
2. Параметр подобия  $L_{dif}/L_{disp}$  определяет сценарий пространственно-временной трансформации волнового пакета при нелинейно-оптическом взаимодействии с прозрачным диэлектриком в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. В случае  $L_{dif}/L_{disp} < 1$  компрессия волнового пакета во времени преобладает над пространственной самофокусировкой, при  $L_{dif}/L_{disp} > 1$  линейное дисперсионное расплывание препятствует сжатию волнового пакета во времени. Приближенное равенство  $L_{dif}/L_{disp} \approx 1$  обеспечивает согласованную компрессию в пространстве и времени.
3. В распределении напряженности электрического поля  $E(r, t)$  световой пули, сформированной в прозрачном диэлектрике при фокусировке фемтосекундного волнового пакета аксиконом, присутствуют дислокации со скачком фазы  $2\pi$ , расположенные на окружностях с центром на оси пучка. Кольцевые дислокации возникают парами противоположного знака в различных временных слоях и мигрируют в плоскости  $(r, t)$  при распространении световой пули.
4. Крутизна фронтов временного профиля световой пули возрастает с увеличением начальной энергии излучения при  $L_{dif}/L_{disp} \ll 1$ , что приводит к смещению максимума антистоксова крыла спектра в коротковолновую область. При  $L_{dif}/L_{disp} \geq 1$  сильная компрессия волнового пакета во времени приводит к формированию устойчивой световой пули, положение



максимума антистоксова крыла которой не зависит от начальной энергии.

5. Крутизна заднего фронта временного профиля световой пули и градиент напряженности электрического поля в поперечном сечении пучка возрастают с увеличением порядка многофотонности процесса ионизации среды, что приводит к уменьшению длины волны максимума антистоксова крыла и увеличению предельного угла конической эмиссии суперконтинуума световой пули.
6. Пространственно-временные и энергетические параметры ядра световой пули, определяемого по уровню  $e^{-1}$  квадрата модуля напряженности электрического поля, синхронно осциллируют при распространении световой пули в диспергирующей среде. Амплитуда осцилляций возрастает при уменьшении отношения длительности  $\tau_c$  ядра световой пули к периоду  $T_0$  колебаний светового поля и стремится к нулю при  $\tau_c/T_0 > 2$ .

**Достоверность** численно рассчитанных **результатов** подтверждается повторяемостью при изменении используемой численной модели и согласованностью с экспериментальными результатами. Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, прошли проверку во время рецензирования при публикации в высокорейтинговых научных журналах и в процессе обсуждения с ведущими мировыми специалистами на тематических конференциях.

Основные результаты работы опубликованы в 16 статьях, опубликованных в реферируемых журналах «Квантовая электроника», «JOSA B», «Laser Physics Letters», «Applied Physics B», «Письма в ЖЭТФ», «Оптика и спектроскопия», «Вестник Московского Университета», «Оптика атмосферы и океана», «Краткие сообщения по физике» и 4 сборниках «Proceedings of SPIE» и трудах «Всероссийского молодежного конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике», а также представлены соискателем лично на таких всероссийских и международных конференциях как «Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики» (Москва, Россия, 2016), «Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам Ломоносов» (Москва, Россия, 2016/2017/2018/2019), «International coherent laser radar conference» (Боулдер, США, 2016), «International conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight)» (Москва, Россия, 2017/2019/2020/2021),

«Международный симпозиум Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, Россия, 2018), «Всероссийский молодежный конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике» (Самара, Россия, 2018/2019), «SPIE Optics + Photonics» (Сан Диего, США, 2018), «Международная конференция Фундаментальные проблемы оптики (ФПО)» (Санкт-Петербург, Россия, 2019), «Школа-семинар Волновые явления: физика и применения (Волны)» (Красновидово, Россия, 2022), «International Conference on Laser Filamentation (COFIL)» (Ханья, Греция, 2022), «International congress on energy fluxes and radiation effects (EFRE)» (Томск, Россия, 2022), «Latin America optica and photonics conference (LAOP)» (Ресифи, Бразилия, 2022), «Fortov international conference on interaction of intense energy fluxes with matter (ELBRUS)» (Терскол, Россия, 2023), «International conference on materials for advanced technologies (ICMAT)» (Сингапур, 2023).

**Личный вклад автора** состоит в самостоятельной постановке задач исследования, проведении численных расчетов, обработке и анализе полученных результатов. Все представленные в диссертационной работе численные результаты получены автором лично. Автором осуществлено планирование и постановка экспериментальных исследований, а также выполнена обработка и дана физическая интерпретация экспериментальных результатов, полученных на многофункциональном фемтосекундном лазерном комплексе Центра коллективного пользования Института спектроскопии Российской академии наук.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав текста, заключения, благодарностей и списка цитируемой литературы. Полный объем диссертации составляет 115 страниц, включая 59 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 123 наименования.

### **Содержание работы**

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, и степень ее разработанности, формулируется цель и основные задачи, описывается объект и предмет исследования, излагается научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертации, формулируются положения, выносимые на защиту, описывается степень достоверности и апробация результатов работы, а также личный вклад автора.

**Первая глава** представляет собой краткий обзор состояния исследований по теме диссертационной работы. В разделе 1.1 приведены основные результаты экспериментальных и теоретических исследований явления филаментации фемтосекундного лазерного излучения в прозрачных диэлектриках, сформулированы ключевые принципы этого процесса. Выделено определяющее влияние дисперсии групповой скорости на закономерности трансформации излучения при филаментации. Обсуждаются особенности филаментации фемтосекундного излучения, сфокусированного в оптически прозрачную нелинейную среду с помощью конической линзы. Раздел 1.2 посвящен явлению формирования высокоинтенсивной световой пули, длительность которой сравнима с периодом осцилляций светового поля, при филаментации в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. В разделе 1.3 представлены результаты исследований сверхуширения частотно-углового спектра фемтосекундного волнового пакета – генерации суперконтинуума – при формировании световой пули в прозрачных диэлектриках. В разделе 1.4 обсуждается влияние сдвига несущей волны относительно огибающей импульса на динамику одноциклового волнового пакета в диспергирующей среде. Приведены результаты численных и экспериментальных исследований, демонстрирующие значительное влияние абсолютной фазы излучения на процессы, сопровождающие филаментацию.

Во **второй главе** представлена математическая формулировка задачи распространения мощного импульсного излучения в однородной, прозрачной, изотропной среде с кубической нелинейностью. Приведено описание двух подходов к моделированию процесса фемтосекундной филаментации импульсного излучения в диэлектрике. В разделе 2.1 сформулирована математическая модель в приближении медленно меняющейся волны, согласно которой осесимметричное уравнение для медленно меняющейся комплексной амплитуды огибающей волнового пакета  $A(r,t,z)$  на несущей частоте  $\omega_0$  в движущейся с групповой скоростью системе координат записывается в виде:

$$2ik_0 \frac{\partial A}{\partial z} = \hat{T}^{-1} \Delta_{\perp} A + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{1 + \Omega/\omega_0} (k^2(\omega_0 + \Omega) - (k_0 + k_1\Omega)^2) \tilde{A}(r, \Omega, z) e^{i\Omega t} d\Omega + \\ + \frac{2k_0^2}{n_0} \hat{T}[\Delta n_k A] + \frac{2k_0^2}{n_0} \hat{T}^{-1}[\Delta n_p A] - ik_0 \hat{T}^{-2}[\sigma N_e A] - ik_0 \alpha A, \quad (1)$$

где  $\hat{T} = 1 - \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t}$  – оператор волновой нестационарности,  $\tilde{A}(r, \Omega, z)$  – фурье-образ огибающей импульса,  $\Omega = \omega - \omega_0$  – частотный сдвиг гармоники суперконтинуума на частоте  $\omega$  от несущей  $\omega_0$ ;  $k(\omega) = \omega n(\omega)/c_0$ , где  $n(\omega)$  – дисперсионная зависимость

конкретного материала, описываемая формулой Селмейера;  $c_0$  – скорость света в вакууме,  $v_{gr} = \frac{1}{k_1} = \left(\partial k / \partial \omega \Big|_{\omega=\omega_0}\right)^{-1}$  – групповая скорость,  $k_0=k(\omega_0)$ .  $\Delta n_k$  и  $\Delta n_{pl}$  – соответственно керровская и плазменная нелинейные добавки к показателю преломления,  $N_e$  — концентрация свободных электронов,  $\sigma$  — сечение обратного тормозного поглощения,  $\alpha$  — коэффициент поглощения при полевой ионизации среды. Уравнение (1) описывает дифракцию и дисперсию волнового пакета, нестационарные изменения показателя преломления среды, вызванные керровской и плазменной нелинейностями, генерацию лазерной плазмы при фото- и лавинной ионизации диэлектриков, ослабление излучения, вызванное тормозным поглощением и потерями на фотоионизацию. В разделе 2.2 представлена математическая модель филаментации, полученная в приближении однонаправленного распространения импульсного излучения. Векторное уравнение, записанное для спектральной компоненты напряженности электрического поля  $\check{E}(\omega, k_r, z)$  в нелинейной диспергирующей среде, в бегущей системе координат при аксиальной симметрии имеет следующий вид:

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} - ik_z(\omega)\right)\check{E}(\omega, k_r, z) = \frac{in_0\omega^2}{2k_z(\omega)c_0^2} [n_2I + 2\Delta n_{pl}]\check{E}(\omega, k_r, z) - \frac{n_0\omega}{4k_z(\omega)c_0} [\alpha + \sigma N_e]\check{E}(\omega, k_r, z), \quad (2)$$

где  $k_z^2(\omega) = \omega^2 n^2(\omega) / c_0^2 - k_r^2$  – продольная компонента волнового вектора. Уравнение (2) описывает эволюцию пространственно-временного распределения напряженности светового поля  $E(r, t, z)$  при распространении волнового пакета в оптически прозрачной среде, что позволяет снять все ограничения, накладываемые на минимальную длительность исследуемого излучения. В разделе 2.3 представлены особенности численной схемы, используемой при моделировании.

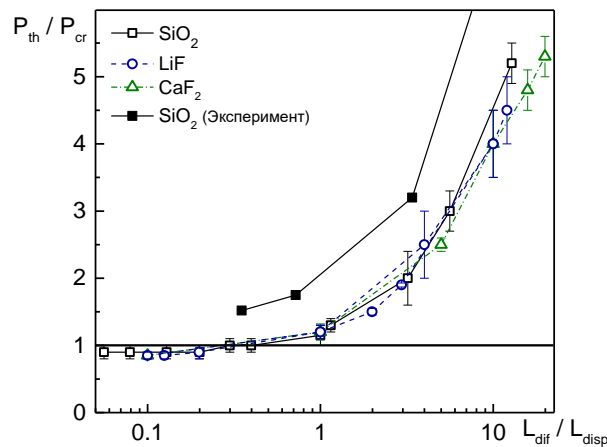
В третьей главе приведены результаты исследования формирования и распространения одиночных световых пульс и их последовательности при филаментации в условиях аномальной дисперсии групповой скорости в плавленом кварце и фторидах фемтосекундных волновых пакетов с гауссовым и бessel-гауссовым пространственным профилем. В разделе 3.1 представлены результаты численного и экспериментального исследования влияния дифракции и дисперсии фемтосекундного волнового пакета на сценарий и пороговую мощность образования световой пули. В приближении второго порядка теории дисперсии, справедливом на начальном этапе компрессии излучения, уравнение (1) для комплексной амплитуды огибающей светового поля  $A(r, t, z)$  в безразмерных переменных имеет вид:

$$2i \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{L_{\text{dif}}}{L_{\text{disp}}} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + \frac{2k_0}{n_0} L_{\text{dif}} \Delta n_k A, \quad (3)$$

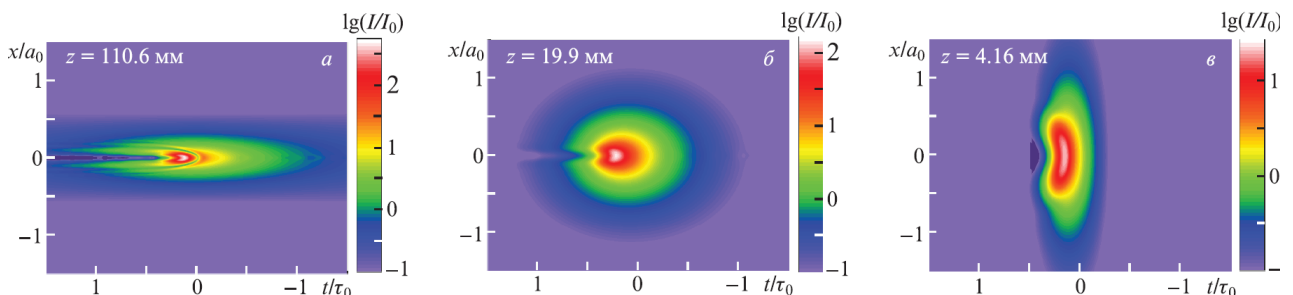
где  $L_{\text{dif}} = kr_0^2$  – дифракционная длина излучения,  $L_{\text{disp}} = \tau_0^2/|k_2|$  – дисперсионная длина,  $k_2 = \partial^2 k / \partial \omega^2$  – коэффициент дисперсии групповой скорости.

На рис.1 приведено изменение относительной пороговой мощности образования световой пули  $P_{\text{th}}/P_{\text{cr}}$  в зависимости от отношения дифракционной и дисперсионной длин волнового пакета  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}}$ . Вне зависимости от длины волны излучения, размеров волнового пакета и среды распространения относительная пороговая мощность  $P_{\text{th}}/P_{\text{cr}}$  образования световой пули определяется единой зависимостью от отношения  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}}$ . В случае  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} \ll 1$  возможно формирование световой пули в волновом пакете, мощность которого ниже критической мощности стационарной самофокусировки гауссового пучка  $P_{\text{cr}}$ . С увеличением значения параметра  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}}$  пороговая мощность  $P_{\text{th}}$  возрастает в несколько раз по сравнению с  $P_{\text{cr}}$ .

Зависимость пороговой мощности образования световой пули от параметра  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}}$  определяется различным сценарием трансформации волнового пакета в



**Рис. 1** Пороговая мощность образования световой пули  $P_{\text{th}}$ , отнесенная к критической мощности стационарной самофокусировки  $P_{\text{cr}}$ , в зависимости от параметра  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}}$  (эксперимент –  $\text{SiO}_2$  (■); численное моделирование –  $\text{SiO}_2$  (□),  $\text{LiF}$  (○),  $\text{CaF}_2$  (△)).

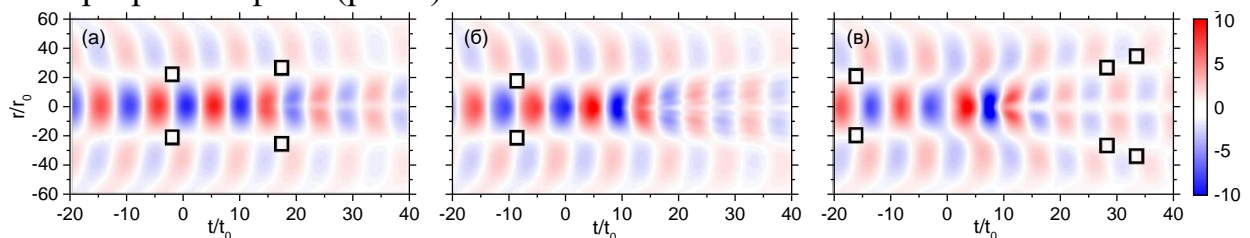


**Рис. 2** Пространственно-временное распределение интенсивности в волновом пакете, представленное в логарифмическом масштабе яркости  $\lg(I(\mathbf{r}, t)/I_0)$  на характерных расстояниях в  $\text{LiF}$  (а) при параметре  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} = 10$  и пиковой мощности  $P_0 = P_{\text{th}} = 4P_{\text{cr}}$ , (б) при  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} = 1$  и  $P_0 = P_{\text{th}} = 1.15P_{\text{cr}}$ , (в) при  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} = 0.1$  и  $P_0 = P_{\text{th}} = 0.85P_{\text{cr}}$ .

зависимости от соотношения дифракционной и дисперсионной длин. При  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} \gg 1$  дисперсионное расплывание волнового пакета (рис.2а) на начальном этапе распространения препятствует образованию световой пули, в результате чего пороговая мощность  $P_{\text{th}}$  оказывается значительно выше критической мощности стационарной самофокусировки  $P_{\text{cr}}$ . При  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} \approx 1$  сжатие волнового пакета в пространстве и во времени происходит согласованно (рис.2б) и пороговая мощность  $P_{\text{th}}$  близка к критической  $P_{\text{cr}}$ . При  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} \ll 1$  нелинейная фазовая модуляция, приводящая к сжатию импульса во времени на начальном этапе филаментации (рис.2в), формирует режим, когда пороговая мощность  $P_{\text{th}}$  ниже критической  $P_{\text{cr}}$ .

В [разделе 3.2](#) выделены различные режимы филаментации гауссова пучка фемтосекундного излучения, сфокусированного аксиконом в плавленый кварц, в зависимости от длины самофокусировки  $L_{\text{marb}}$  и фокусного расстояния аксикона  $L_{\text{bess}}$ . При преобладании керровской фокусировки над аксиконной ( $L_{\text{marb}} < 3L_{\text{bess}}$ ) световая пуля образуется в отсутствие кольцевой структуры бесселева пучка. При сравнимых фокусировках  $L_{\text{marb}} \approx 3L_{\text{bess}}$  световая пуля образуется в центральном лепестке бессель-гауссова распределения интенсивности. При  $L_{\text{marb}} \gg L_{\text{bess}}$  световая пуля может не образоваться вследствие малой мощности в центральном лепестке бессель-гауссова распределения интенсивности.

В [разделе 3.3](#) представлены результаты исследования особенностей трансформации напряженности электрического поля волнового пакета при формировании световой пули в сфокусированном аксиконом излучении на примере филаментации в LiF фемтосекундного волнового в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. Суперпозиция излучения с коническим волновым фронтом, созданным аксиконом, сходящимся, в результате керровской фокусировки, и расходящимся при дефокусировке в плазме формирует сложную картину с сильными искажениями волнового фронта и появлением в распределении напряженности светового поля особых точек с разрывом фазы (рис.3).



**Рис. 3** Пространственно-временное распределение напряженности светового поля при филаментации и образовании световой пули в фемтосекундном волновом пакете на длине волны 3500 нм, сфокусированном аксиконом, на нескольких расстояниях в LiF. Излучение распространяется справа – налево. Черным контуром отмечены области с дислокациями фазы.

Особенности в виде разрыва волнового фронта излучения формируются вблизи минимумов напряженности поля в пространственной бессель-гауссовой кольцевой структуре излучения – между центральным максимумом и кольцом первого порядка, а также соседними кольцами (рис.3). Положение особой точки с дислокацией фазы и ее знак определялись по ненулевому значению набега фазы  $\Phi(r_d, t_d)$ , вычисляемому как интеграл фазы светового поля  $\varphi(r, t, z) = \arctg\{\text{Im } E(r, t, z) / \text{Re } E(r, t, z)\}$  по замкнутому контуру  $L_d$ , охватывающему эту точку:

$$\Phi(r_d, t_d, z) = \oint_{L_d} \varphi(r, t, z) dl. \quad (4)$$

Появление в сфокусированном аксиальном волновом пакете дислокаций со скачком фазы  $2\pi$  происходит парами противоположного знака. Линейное изменение фазы  $\varphi$  на участках постоянного радиуса, характерное для набега фазы вдоль гармонической функции, сменяется нелинейным на участках постоянной длительности и кратно  $2\pi$  при полном обходе вокруг особой точки. Установлено, что особые точки мигрируют в плоскости  $(r, t)$  при распространении световой пули.

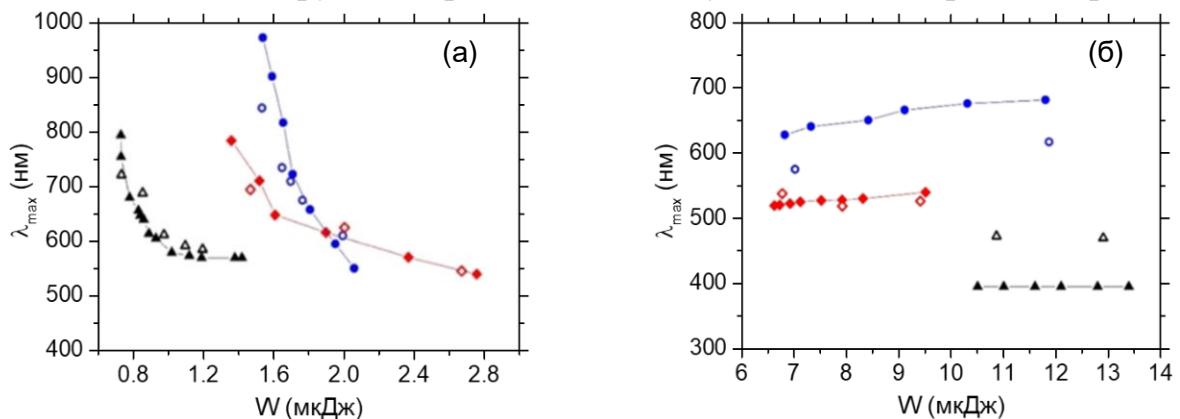
В разделе 3.4 приведены результаты численного и экспериментального исследования влияния энергии волнового пакета на длину пробега световой пули в различных режимах дисперсии групповой скорости. Показано, что в условиях аномальной дисперсии групповой скорости в волновом пакете формируется устойчивая световая пуля, длина пробега которой не зависит от начальной энергии излучения и в кристалле LiF составляет около 500 мкм.

Раздел 3.5 посвящен изучению условий формирования последовательности световых пуль в процессе филаментации фемтосекундного излучения при аномальной дисперсии групповой скорости. Установлено, что для формирования последовательности из нескольких световых пуль аномальная дисперсия групповой скорости должна быть достаточной, чтобы после диссипации первой световой пули в результате компрессии импульса при фазовой самомодуляции мощность в центральном временном слое волнового пакета вновь достигла критической величины.

В **четвертой главе** приведены результаты исследования особенностей формирования антистоксовой полосы суперконтинуума при филаментации фемтосекундных волновых пакетов в плавленом кварце и фторидах в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. В разделе 4.1 приведен подробный анализ процесса уширения спектра волнового пакета при формировании световой пули в излучении с гауссовым и бессель-гауссовым пространственным

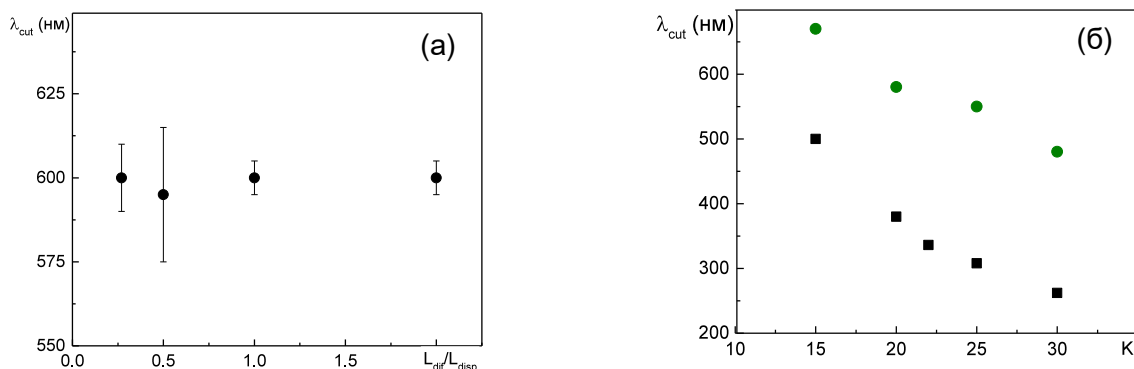
профилем. Показана непосредственная связь между образованием высокоинтенсивной световой пули и сдвигом коротковолновой отсечки изолированного антистоксова крыла в сторону меньших длин волн. В разделе 4.2 представлены результаты исследования влияния энергии излучения на положение максимума антистоксового крыла  $\lambda_{\max}$  в спектре световой пули. Установлено, что при филаментации в условиях  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} \ll 1$   $\lambda_{\max}^{\text{as}}$  уменьшается с ростом энергии распространяющегося волнового пакета (рис.4а). Так, при увеличении от 0.7 до 1.4 мкДж начальной энергии волнового пакета, распространяющегося в плавленом кварце,  $\lambda_{\max}$  уменьшается от 725 до 590 нм, при изменении энергии волнового пакета от 1.5 до 2 мкДж в ВаF<sub>2</sub> и от 1.4 до 2.7 мкДж в СаF<sub>2</sub> длина волны максимума антистоксового крыла  $\lambda_{\max}$  смещается от 850 до 615 нм и от 700 до 550 нм соответственно. При филаментации в условиях  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} \geq 1$  компрессия импульса в пространстве и во времени происходит одновременно, в результате чего формируется высокоинтенсивная робастная световая пуля, длина волны максимума антистоксового крыла  $\lambda_{\max}$  спектра которой практически не зависит от энергии (рис.4б).

В разделе 4.3 установлено, что ни положение коротковолновой отсечки антистоксова крыла, ни сценарий ее формирования в спектре световой пули не зависят от параметра  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}}$  (рис.5а). При этом численное моделирование филаментации излучения в модельных средах с изменяемой шириной запрещенной зоны, результаты которого представлены в разделе 4.4, выделяет ключевую роль порядка многофотонности процесса ионизации на длину волны коротковолновой отсечки антистоксова крыла спектра. Согласно результатам, полученным при моделировании филаментации фемтосекундного излучения в LiF и ряде модельных сред LiF с варьируемой шириной запрещенной зоны, а также в СаF<sub>2</sub> и моделируемых кристаллах СаF<sub>2</sub>, увеличение ширины запрещено

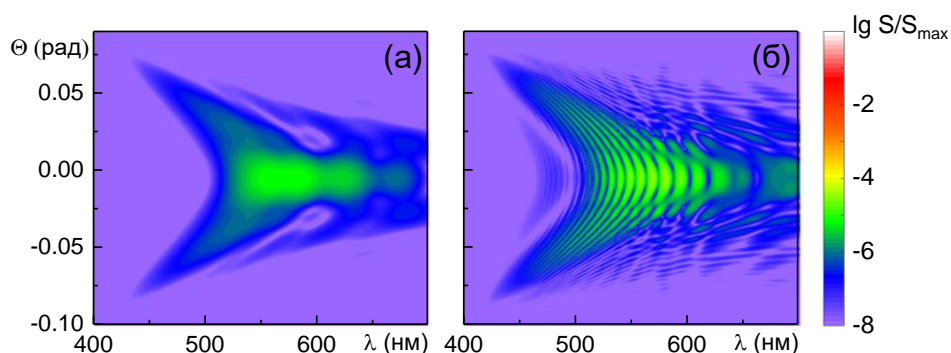


**Рис. 4** Зависимости длины волны спектрального максимума антистоксовой полосы  $\lambda_{\max}^{\text{as}}$  суперконтинуума от энергии импульса  $W$  при филаментации в SiO<sub>2</sub> (▲, Δ), СаF<sub>2</sub> (◆, ◇), ВаF<sub>2</sub> (●, ○) (а) при  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} \ll 1$  и (б) при  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} \approx 1$ . Эксперимент – ▲, ◆, ●, численное моделирование – Δ, ◇, ○.





**Рис. 5** Зависимости длины волны коротковолновой отсечки спектра световой пули (а) от параметра  $L_{dif}/L_{disp}$  для импульса на длине волны  $\lambda_0 = 3000$  нм в  $CaF_2$ ; (б) от порядка многофотонности  $K$  для импульса на длине волны  $\lambda_0 = 2000$  нм в модельных средах  $LiF$  и  $CaF_2$  с измененной шириной запрещенной зоны.



**Рис. 6** Частотно-угловой спектр антистоксова крыла (а) одной световой пули и (б) двух световых пучей. Несущая длина волны излучения  $\lambda_0 = 1900$  нм.

зоны диэлектрика вызывает увеличение предельного угла конической эмиссии суперконтинуума и смещение максимума и коротковолновой отсечки антистоксова крыла спектра в сторону меньших длин волн (рис.5б).

Раздел 4.5 посвящен исследованию спектра антистоксовой полосы суперконтинуума последовательности световых пучей. На рис.6 приведены рассчитанные численно частотно-угловые спектры антистоксова крыла суперконтинуума при формировании в филаменте одной (рис.6а) и двух (рис.6б) световых пучей. При образовании в диэлектрике последовательности из двух или нескольких световых пучей антистоксово крыло спектра последовательности становится модулированным (рис.6б), что происходит в результате интерференции излучения суперконтинуума, излучаемого двумя когерентными движущимися источниками – световыми пучками. Период осцилляций определяется длиной волны спектральной компоненты и увеличивается с переходом в сторону больших длин волн, имея линейную зависимость в логарифмическом масштабе.

**Пятая глава** посвящена исследованию пространственно-временной и энергетической трансформации одноцикловых световых пульс среднего инфракрасного диапазона при распространении в плавленом кварце и фторидах.

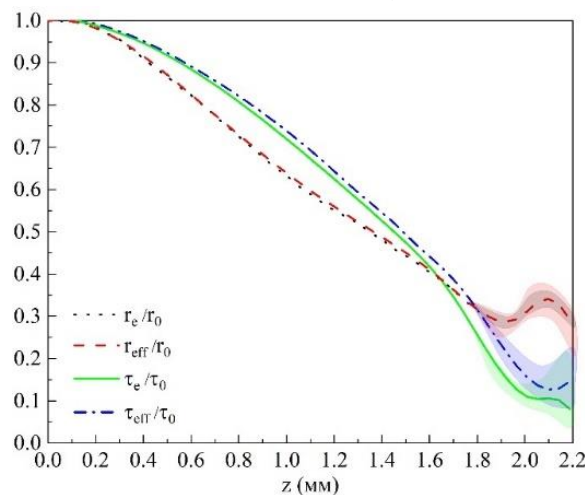
В разделе 5.1 предложен способ определения параметров экстремально сжатых волновых пакетов, основывающийся на анализе пространственно-временного распределения напряженности светового поля и не зависящий от их формы и ширины спектра. Эволюция пространственного  $r_{\text{eff}}$  и временного  $\tau_{\text{eff}}$  параметров волнового пакета, определяемых по (5а) и (5б) соответственно, при филаментации в условиях аномальной дисперсии групповой скорости в LiF представлена на рис.7.

$$r_{\text{eff}} = \left( \frac{\int_{S_c} r^2 |E(r,t,z)|^2 dS}{W_c(z)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5a)$$

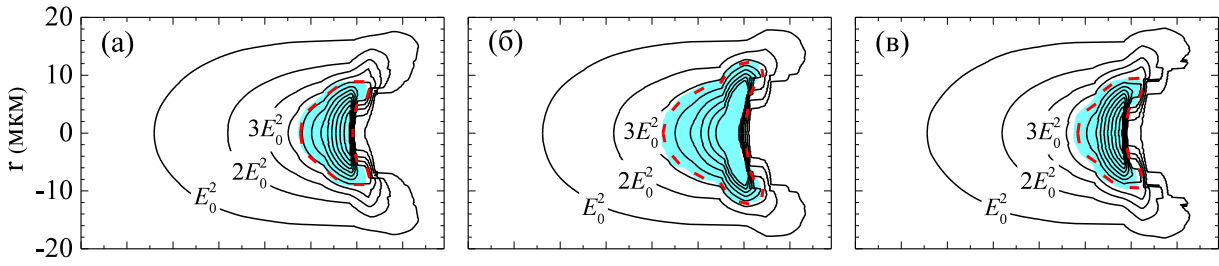
$$\tau_{\text{eff}} = \left( \frac{\int_{S_c} t^2 |E(r,t,z)|^2 dS}{W_c(z)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5б)$$

где  $W_c(z) = \int_{S_c} |E(r, t, z)|^2 dS$  – энергия в ядре  $S_c$ .

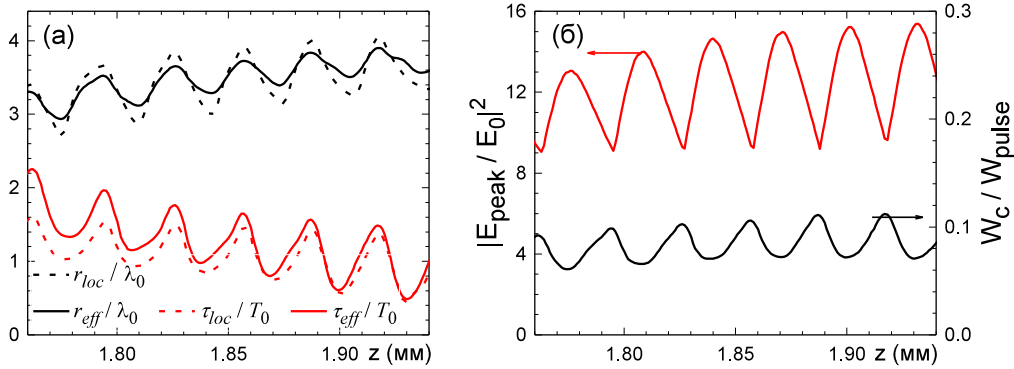
На начальном этапе самокомпрессии волнового пакета ( $z \leq 1.7$  мм) происходит монотонное уменьшение радиуса, и длительности волнового пакета, сменяющееся осциллирующим изменением после формирования световой пули ( $z > 1.7$  мм). Установлено, что длительность световой пули, образовавшейся в LiF, не превышает двух периодов оптических осцилляций  $T_0$  независимо от длины волны  $\lambda_0$ , в то время как диаметр увеличивается от 5 до 25 мкм при изменении  $\lambda_0$  от 1900 до 3500 нм (что составляет  $(2.5 \div 6) \cdot \lambda_0$ ).



**Рис. 7** Изменение с расстоянием относительной длительности  $\tau/\tau_0$  и радиуса  $r/r_0$  при компрессии волнового пакета и образовании световой пули при филаментации фемтосекундного излучения в LiF,  $\lambda_0 = 3100$  нм,  $2\tau_0 = 120$  фс,  $r_0 = 30$  мкм.



**Рис. 8** Изолинии квадрата напряженности электрического поля на ряде расстояний в LiF, иллюстрирующие осцилляции световой пули при распространении. Ядро световой пули выделено цветом, ее граница — пунктирная кривая



**Рис. 9** Изменение с расстоянием параметров световой пули в LiF: (а) нормированных радиуса и длительности; (б) квадрата пиковой напряженности электрического поля и энергии в ядре световой пули.

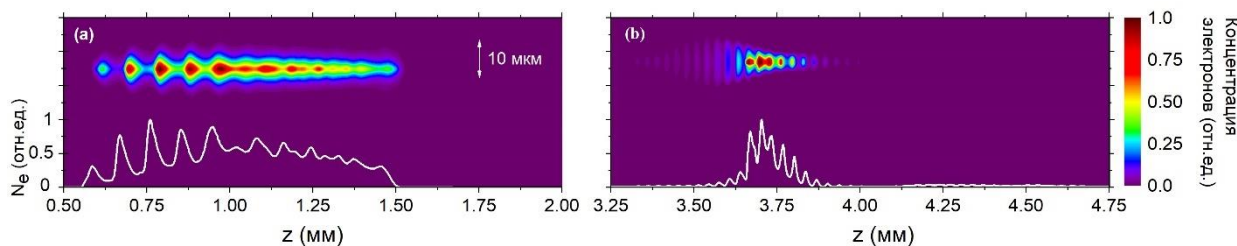
Как показано в [разделе 5.2](#), при распространении световой пули ее ядро периодически сжимается и расширяется в пространстве и времени (рис.8), что сопровождается синхронными осцилляциями всех его параметров: радиуса, длительности, пиковой напряженности электрического поля и энергии, локализованной в световой пуле (рис.9).

При распространении световой пули в LiF все ее параметры колеблются с одинаковым периодом  $\Delta z$ , который не меняется на длине пробега и с точностью до 10% оценивается по аналитической зависимости от несущей длины волны излучения, записанной для симметричного гауссового импульса с гармонической несущей в линейной диспергирующей среде [Кузнецов А.В. и др., Квант. электроника, 46, 379, (2016)]:

$$\Delta z(\lambda_0) = \frac{\lambda_0 V_{gr}(\lambda_0) V_{ph}(\lambda_0)}{2c_0 [V_{ph}(\lambda_0) - V_{gr}(\lambda_0)]}. \quad (6)$$

Осцилляции параметров световой пули вызывают периодическое изменение силы и соответственно эффективности ее нелинейного воздействия на диэлектрик, что проявляется в периодическом изменении концентрации свободных носителей заряда в плазменном канале, создаваемом световой пулей при распространении (рис.10). На рис.10а приведен плазменный канал,

наведенный в ВаF<sub>2</sub> световой пучей на длине волны  $\lambda_0 = 4700$  нм, на рис.10б – наведенный в LiF световой пучей на длине волны  $\lambda_0 = 3500$  нм.



**Рис. 10** Численно рассчитанное пространственное распределение концентрации электронов в (а) ВаF<sub>2</sub> на  $\lambda_0 = 4700$  нм, (б) LiF на  $\lambda_0 = 3500$  нм. Белой кривой приведено распределение концентрации электронов на оси.

Установлено, что амплитуда осцилляций размеров и пиковой амплитуды напряженности электрического поля световой пули определяется количеством осцилляций несущей волны под огибающей экстремально сжатого волнового пакета. Амплитуда осцилляций пренебрежимо мала при  $\tau_{\text{eff}} > T_0$  и резко возрастает при самосжатии импульса до одноциклового.

## Заключение

Основные научные результаты диссертационной работы:

1. Отношение дифракционной длины волнового пакета к его дисперсионной длине  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}}$  является параметром подобия, определяющим трансформацию волнового пакета в процессе формирования световой пули при нелинейно-оптическом взаимодействии мощного фемтосекундного лазерного излучения среднего инфракрасного диапазона с прозрачными диэлектриками в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. Относительная пороговая мощность  $P_{\text{th}}/P_{\text{cr}}$  образования световой пули при филаментации волнового пакета в условиях аномальной дисперсии групповой скорости определяется параметром подобия  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}}$  и не зависит от параметров излучения и среды. Пороговая мощность  $P_{\text{th}}/P_{\text{cr}}$  слабо меняется в области, где  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} \approx 1$  и  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} \ll 1$ , и монотонно возрастает с увеличением параметра  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}}$ .

2. Для гауссова пучка фемтосекундного излучения, сфокусированного аксиконом, возможны различные режимы филаментации и образования световых пучей в зависимости от соотношения длины самофокусировки  $L_{\text{marb}}$  и длины формирования бессель-гауссова пространственного распределения интенсивности  $L_{\text{bess}}$ . При филаментации излучения с бессель-гауссовым пространственным профилем в волновом пакете возникают кольцевые

дислокации фазы со скачком фазы равным  $2\pi$ , принципиально отсутствующие в излучении с гауссовым пространственным распределением интенсивности. Особые точки формируются парами противоположных знаков вблизи минимумов напряженности светового поля, перемещаются по фронту  $(r, t)$  и исчезают.

3. Длина пробега сформировавшейся световой пули остается неизменной при варьировании начальной энергии волнового пакета и одинакова для гауссова и бессель-гауссова пучков, что свидетельствует об ее устойчивости.

4. Формирование изолированного антистоксова крыла в спектре волнового пакета непосредственно связано с формированием экстремально сжатого волнового пакета при филаментации в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. Длина волны коротковолновой отсечки спектра стремительно уменьшается в интервале распространения, где наблюдается резкое возрастание интенсивности волнового пакета и образуется световая пуля с большим градиентом интенсивности на хвосте.

5. Положение изолированного антистоксова крыла в спектре волнового пакета при филаментации в условиях аномальной дисперсии групповой скорости зависит от крутизны его заднего фронта. Увеличение энергии волнового пакета при филаментации в условиях  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} \ll 1$  приводит к дополнительному увеличению градиента интенсивности на хвосте световой пули, что вызывает уменьшение длины волны максимума антистоксова крыла. При формировании в условиях  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}} \geq 1$  устойчивой световой пули, крутизна фронтов которой не зависит от начальной энергии, варьирование энергии излучения не приводит к сдвигу антистоксова крыла.

6. Положение антистоксова крыла в спектре световой пули определяется порядком многофотонности процесса генерации лазерной плазмы и не зависит от параметра подобия  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}}$ . Длина волны максимума антистоксова крыла в спектре световой пули уменьшается, а предельный угол конической эмиссии увеличивается при увеличении порядка многофотонности процесса генерации лазерной плазмы.

7. Возможность формирования последовательности из нескольких световых пуль определяется параметром дисперсии групповой скорости  $k_2$  и не зависит от параметра подобия  $L_{\text{dif}}/L_{\text{disp}}$ . Образование в филаменте последовательности световых пуль приводит к осцилляциям интенсивности компонент антистоксова крыла спектра, возникающим как результат интерференции широкополосного излучения от нескольких последовательно сформированных источников суперконтинуума. В логарифмическом

масштабе период модуляции антистоксова крыла линейно зависит от длины волны спектральной компоненты, уменьшаясь при сдвиге в область меньших длин волн.

8. Параметры экстремально сжатого волнового пакета, определяемые по распределению напряженности электрического поля, являются характеристиками, не зависящими ни от пространственно-временных, ни от спектральных искажений. Радиус световой пули монотонно увеличивается с несущей длиной волны  $\lambda_0$ , и при ее изменении от 1900 до 3500 нм для световой пули, сформированной в LiF, составляет  $1.2 \div 3.3\lambda_0$ . Длительность сформированной и распространяющейся световой пули меньше двух периодов оптических осцилляций на несущей длине волны  $T_0$  и не зависит от длины волны излучения.

9. При распространении одноциклового световой пули в диспергирующей среде все ее пространственно-временные и энергетические характеристики осциллируют с одинаковым периодом  $\Delta z$ , который не меняется на промежутке существования световой пули и монотонно уменьшается с ростом несущей длины волны  $\lambda_0$ . Значение периода осцилляций сильно искаженной одноциклового световой пули со сверхшироким спектром подчиняется с точностью до 10% единой аналитической зависимости от несущей длины волны излучения, записанной для симметричного гауссового импульса с гармонической несущей в линейной диспергирующей среде. Нелинейное отклонение фазовой и групповой скоростей световой пули от табличных значений, составляющее не более 0.4%, сильно влияет на период осцилляций ее параметров, величина которого изменяется на 5-10%.

10. Осцилляции параметров световой пули приводят к периодической модуляции эффективности ее нелинейно-оптического взаимодействия со средой. Глубина модуляции размеров и пиковой амплитуды напряженности электрического поля световой пули и соответственно степень ее воздействия на диэлектрик однозначно зависят от длительности волнового пакета. Амплитуда осцилляций параметров многоциклового волнового пакета пренебрежимо мала и резко возрастает до 30% при его самосжатии до одноциклового.

### **Список публикаций по теме диссертации**

Основные результаты работы отражены в следующих научных статьях, опубликованных в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в Перечне изданий МГУ:

1. **Залозная Е.Д.**, Дормидонов А.Е., Кандидов В.П. Влияние параметров фемтосекундного излучения ближнего и среднего ИК-диапазонов на закономерности формирования последовательности световых пульс в прозрачных диэлектриках // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 3. С. 184-191. IF RSCI = 1.47, вклад соискателя 60%.
2. Чекалин С.В., Компанец В.О., Дормидонов А.Е., **Залозная Е.Д.**, Кандидов В.П. Спектр СК при филаментации лазерных импульсов в условиях сильной и слабой аномальной дисперсии групповой скорости в прозрачных диэлектриках // Квантовая электроника. 2017. Т.47, № 3. С. 252-258. IF WoS JIF = 1.404, вклад соискателя 30%.
3. **Залозная Е.Д.**, Компанец В.О., Дормидонов А.Е., Чекалин С.В., Кандидов В.П. Параметр подобия процесса образования световых пульс среднего ИК-диапазона // Квантовая электроника. 2018. Т.48, № 4. С. 366-371. IF WoS JIF = 1.404, вклад соискателя 60%.
4. Чекалин С.В., Компанец В.О., **Залозная Е.Д.**, Кандидов В.П. Влияние ДГС на фемтосекундную филаментацию бессель-гауссова пучка // Квантовая электроника. 2019. Т.49, № 4. С. 344-349. IF WoS JIF = 1.184, вклад соискателя 40%.
5. Chekalin S.V., Dormidonov A.E., Kompanets V.O., **Zaloznaya E.D.**, Kandidov V.P. Light bullet supercontinuum // Journal of the Optical Society of America B. 2019. Vol.36, № 2, P. A43-A53. IF WoS JIF = 2.18, вклад соискателя 20%.
6. **Залозная Е.Д.**, Дормидонов А.Е., Компанец В.О. Влияние характерных масштабов фемтосекундного волнового пакета среднего ИК диапазона на пороговую мощность филаментации // Краткие сообщения по физике. 2019. Т. 4. С. 20-26. IF WoS JIF = 0.477, вклад соискателя 60%.
7. Geints I.Yu., **Zaloznaya E.D.**, Kompanets V.O., Dormidonov A.E., Chekalin S.V., Kandidov V.P. Dependence of the short-wavelength cutoff in the mid-IR pulse spectrum on the interaction length in SiO<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub> // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1692. P. 012016. IF Scopus SJR = 0.183, вклад соискателя 20%.
8. **Залозная Е.Д.**, Компанец В.О., Чекалин С.В., Дормидонов А.Е., Кандидов В.П. Интерференционные эффекты в формировании спектра световой пули при аксиконной фокусировке // Квантовая электроника. 2020. Т.50, № 4. С. 366-374. IF WoS JIF = 1.022, вклад соискателя 30%.
9. **Залозная Е.Д.**, Дормидонов А.Е., Компанец В.О., Чекалин С.В., Кандидов В.П. Параметры световой пули // Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики". 2021. Т.113, № 12. С. 817-824. IF WoS JIF = 1.4, вклад соискателя 60%.

10. **Zaloznaya E.D.**, Kompanets V.O., Dormidonov A.E., Geints I.Yu., Chekalin S.V., Kandidov V.P. Short-wavelength cutoff of the light bullet spectrum in calcium fluoride // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. 2021. Vol.127. P. 42. IF WoS JIF = 2.171, вклад соискателя 40%.
11. Кандидов В.П., **Залозная Е.Д.**, Дормидонов А.Е., Компанец В.О., Чекалин С.В. Световые пули в прозрачных диэлектриках // *Квантовая электроника*. 2022. Т.52, № 3, 233-246. IF WoS JIF = 1.194, вклад соискателя 40%.
12. Дормидонов А.Е., **Залозная Е.Д.**, Кандидов В.П., Компанец В.О., Чекалин С.В. Формирование световой пули эллиптически поляризованного излучения // *Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики"*. 2022. Т.115, № 1. С. 15-19. IF WoS JIF = 1.4, вклад соискателя 30%.
13. Дормидонов А.Е., **Залозная Е.Д.**, Компанец В.О., Чекалин С.В., Кандидов В.П. Определение длительности одноциклового световой пули среднего инфракрасного диапазона по структуре индуцированных плазменных каналов или центров окраски // *Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики"*. 2022. Т.116, № 7. С. 434-441. IF WoS JIF = 1.4, вклад соискателя 30%.
14. **Залозная Е.Д.**, Дормидонов А.Е., Компанец В.О., Чекалин С.В., Кандидов В.П., Влияние материальной дисперсии на осцилляции одноциклового волнового пакета, *Оптика и спектроскопия*. 2022. Т.130, № 12. С. 1871-1874. IF WoS JIF = 0.6, вклад соискателя 50%.
15. **Zaloznaya E.D.**, Kompanets V.O., Savvin A.D., Dormidonov A.E., Chekalin S.V., Kandidov V.P. Carrier-envelope phase effect on light bullet dynamics // *Laser Phys. Lett.* 2022. Vol.19, № 7. P. 075402. IF WoS JIF = 1.704, вклад соискателя 40%.
16. **Залозная Е.Д.**, Дормидонов А.Е., Кандидов В.П. Экстремально сжатые волновые пакеты в излучении, сфокусированном аксионом // *Квантовая электроника*. 2023. Т.53, № 6. С. 469-474. IF WoS JIF = 1.194, вклад соискателя 60%.

Иные публикации:

1. **Zaloznaya E.D.**, Kandidov V.P. Optimal conditions for the formation of high-intensity light bullets in a femtosecond filament // *Proc. SPIE 10770*. 2018. Vol. 107700Z, с. 107700Z-1-107700Z-6. Вклад соискателя 70%.
2. **Zaloznaya E.D.**, Kandidov V.P. Dynamics of mid-IR light bullets// *Proc. SPIE 10833*, 24<sup>th</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics:



- Atmospheric Physics. 2018. Vol. 108333, № 108331X. P. 1-5. Вклад соискателя 70%.
3. **Залозная Е.Д.**, Дормидонов А.Е., Компанец В.О. Влияние характерных масштабов фемтосекундного волнового пакета среднего ИК диапазона на пороговую мощность филаментации // Сборник трудов XVI Всероссийского молодежного Самарского конкурса – конференции научных работ по оптике и лазерной физике. 2018. С. 315-321. Вклад соискателя 70%.
  4. **Залозная Е.Д.**, Дормидонов А.Е. Пространственно-временная трансформация световой пули при распространении в прозрачном диэлектрике // Сборник трудов XVII Всероссийского молодежного Самарского конкурса – конференции научных работ по оптике и лазерной физике. 2019. С. 89-95. Вклад соискателя 70%.