

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Васильев Евгений Владимирович

**Филаментация фемтосекундных оптических вихрей
при аномальной дисперсии групповой скорости
в прозрачных твердотельных диэлектриках**

Специальность: 1.3.19 – лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

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

Научный руководитель: **Шленов Святослав Александрович**
кандидат физико-математических наук,
доцент, физический факультет МГУ имени
М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты: **Козлов Сергей Аркадьевич**
доктор физико-математических наук,
профессор, Санкт-Петербургский
национальный исследовательский
университет ИТМО, профессор

Сазонов Сергей Владимирович
доктор физико-математических наук,
профессор, Национальный
исследовательский институт
«Курчатовский институт», начальник
отдела

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

Защита состоится «02» марта 2023 года в 15 ч. 00 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

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27). С информацией о регистрации участия в защите и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/520779609/> и на странице <https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.4/2378>.

Автореферат разослан «___» января 2023 года.

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

Коновко Андрей Андреевич

Общая характеристика работы

Актуальность

Самовоздействие мощных лазерных импульсов в прозрачных диэлектриках приводит к формированию филамента – высокоэнергетичной структуры, которая сохраняется на больших расстояниях вдоль направления распространения излучения [1; 2]. При филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в условиях аномальной дисперсии групповой скорости (ДГС) в таких прозрачных твердотельных диэлектриках, как плавленый кварц, фториды кальция и лития, могут образовываться локализованные в пространстве и времени высокоинтенсивные световые пули [3], формирование которых сопровождается сильным уширением спектра излучения [4]. Фемтосекундная филаментация при аномальной ДГС широко исследована для гауссовых пучков [5; 6], пучков Бесселя [7; 8] и Эйри [9; 10], в меньшей степени – для оптических вихрей с фазовой сингулярностью (дислокацией) на оси. Фазовая дислокация возникает в том случае, когда при круговом обходе плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучка, фазовый фронт испытывает один или несколько скачков на 2π . Интерес к оптическим вихрям возник в последней четверти прошлого века [11–17]. Современные работы, касающиеся сингулярных пучков, посвящены изучению различных способов генерации вихрей, особенностям их распространения в среде, а также различным практическим приложениям. Фемтосекундные оптические вихри могут быть получены, в частности, в схемах с одноосным кристаллом [18; 19] или с использованием спиральных фазовых пластинок [20–23]. При распространении оптических вихрей, в том числе в условиях самовоздействия, сохраняется их орбитальный угловой момент и отсутствует поле в области фазовой дислокации [24–27]. Филаментация оптических вихрей ближнего ИК диапазона может сопровождаться генерацией суперконтинуума [28; 29]. К многочисленным применениям фемтосекундных оптических вихрей относятся, в частности, оптические пинцеты [30], передача данных в оптоволокне [31], создание квантовых ячеек памяти [32], улучшение разрешения изображений в микроскопии [33]. Отдельно стоит выделить микромодификацию показателя преломления в объеме диэлектрика, которая ранее была осуществлена в плавленом кварце с помощью гауссова пучка [34], а по результатам исследований в диссертации может применяться также с использованием вихревых пучков для создания кольцевых каналов микромодификации [35]. С учетом сказанного, изучение особенностей филаментации оптических вихрей в твердотельных диэлектриках при аномальной ДГС, анализ пространственно-временной динамики нелинейно-оптических трансформаций, а также спектрального уширения излучения, является актуальным направлением исследований.

Степень разработанности темы

Многочисленные исследования явления фемтосекундной филаментации гауссовых, эллиптических и бесселевых пучков, сопоставление с результатами большого количества экспериментов позволили сформулировать развитую и апробированную математическую модель самовоздействия излучения в нелинейных средах [8; 36–40], которая была использована (с некоторыми отличиями) в настоящей работе для анализа филаментации вихревых пучков. На момент написания работы изложенные в литературе результаты изучения филаментации фемтосекундных оптических вихрей касались, в основном, области нормальной ДГС. Указанная математическая модель применялась для исследования самовоздействия оптических вихрей ближнего ИК диапазона.

Цели и задачи

Цели настоящей работы состоят в исследовании филаментации фемтосекундных оптических вихрей в условиях аномальной дисперсии групповой скорости в прозрачных твердотельных диэлектриках, анализе особенностей пространственно-временной динамики и спектрального уширения излучения в режиме формирования кольцевых световых пульс (КСП). Основой работы является численное моделирование, при этом проведено сравнение результатов расчетов с экспериментом. Поставлены и решены следующие задачи:

- Получение типичных характеристик кольцевых световых пульс и многофокусной структуры излучения при филаментации в плавленом кварце, а также фторидах кальция и лития, оптических вихрей на длине волны ближнего ИК диапазона, соответствующей области аномальной ДГС.
- Изучение влияния дисперсии групповой скорости, топологического заряда и мощности оптического вихря на его самовоздействие в различных средах, сравнение с филаментацией гауссова пучка.
- Исследование трансформации частотно-углового спектра оптических вихрей и анализ особенностей его уширения при образовании КСП.
- Разработка программного кода, включающего несколько пакетов программ для численного анализа нелинейно-оптических трансформаций излучения в среде. К ним относятся, во-первых, программный пакет для моделирования фемтосекундной филаментации вихревых пучков в твердотельных диэлектриках в аксиально-симметричном приближении. Во-вторых, пакет для моделирования самофокусировки вихревых пучков, имеющих шумовую компоненту. В третьих, программа для обработки и построения частотных и частотно-угловых спектров, измеренных экспериментально.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования диссертационной работы является высокоинтенсивное фемтосекундное лазерное излучение оптических вихрей. Предмет исследования – самовоздействие указанного излучения при распространении в прозрачных твердотельных диэлектриках (плавленом кварце, фторидах кальция и лития), в процессе которого проводится анализ пространственно-временной динамики нелинейно-оптических трансформаций, а также особенностей спектрального уширения импульса.

Научная новизна

- Впервые получены пространственные, временные и энергетические характеристики последовательности КСП при филаментации вихревых пучков в условиях аномальной ДГС в прозрачных твердотельных диэлектриках.
- Установлено, что аномальная дисперсия групповой скорости оказывает существенное влияние на формирование КСП. Рост интенсивности в первом нелинейном фокусе может ограничиваться не плазменной нелинейностью, а дифракцией сфокусированного трехмерного вихря.
- Показано, что равенство дифракционной и дисперсионной длин фемтосекундного оптического вихря в условиях аномальной дисперсии групповой скорости ведет к формированию наиболее интенсивных кольцевых световых пульс. При филаментации вихревого пучка с топологическим зарядом $m = 1$ и пиковой мощностью, в четыре-пять раз превышающей критическую мощность самофокусировки вихря, формируется последовательность из трех КСП, последняя из которых является наиболее интенсивной. При $m = 2$ образуется $2 \div 3$ КСП, но самой интенсивной, как правило, является первая.
- Впервые обнаружено, что при самовоздействии фемтосекундных оптических вихрей с топологическим зарядом $m = 1$ в прозрачных твердотельных диэлектриках уширенный частотно-угловой спектр импульса содержит полосы, свидетельствующие о существенном падении интенсивности излучения под определенными углами к оси пучка. Такой характер углового распределения поля в широком частотном диапазоне обусловлен формированием в поперечнике пучка последовательности колец, соседние из которых имеют сдвинутые на π по отношению друг к другу спиральные фазы.

Теоретическая и практическая значимость

- Предложенная физическая картина самофокусировки стационарных оптических вихрей позволяет качественно объяснить полосатую структуру углового спектра при самовоздействии фемтосекундных вихревых пучков как в первом нелинейном фокусе, так и при дальнейшем распространении.
- Анализ частотного и углового уширения спектров излучения при филаментации оптических вихрей углубляет понимание механизмов нелинейно-оптических трансформаций сингулярных пучков в нелинейных средах.
- Описанные особенности самовоздействия фемтосекундных вихревых пучков позволяют детально проанализировать возможности получения с их помощью протяженных трубчатых микромодификаций показателя преломления в объеме прозрачных твердотельных диэлектриков.
- Разработанные программные пакеты позволяют моделировать филаментацию оптических вихрей в твердотельных диэлектриках, а также самофокусировку в условиях наличия шумов. Кроме того, они позволяют строить частотные и частотно-угловые спектры, измеренные экспериментально.

Методология исследования

Диссертационная работа включает в себя численное исследование самовоздействия излучения в прозрачных твердотельных диэлектриках. С помощью ряда приближений из уравнений Максвелла получено волновое уравнение распространения фемтосекундного оптического вихря в нелинейных средах. Уравнение содержит слагаемые, описывающие дифракцию пучка, дисперсию импульса, керровскую и плазменную нелинейности, обратное тормозное и нелинейное поглощения, а также экстинкцию. Кроме того, учитывается оператор волновой нестационарности, позволяющий описывать эффект самоукручения волнового фронта импульса. Кинетическое уравнение для самонаведенной лазерной плазмы включает полевую ионизацию молекул среды согласно модели Келдыша, а также лавинную ионизацию и рекомбинацию носителей заряда. Указанная система уравнений решается численно методом расщепления по физическим факторам. Для корректного численного решения требуется большое число узлов в расчетной сетке, поэтому в целях сокращения времени расчетов используется адаптивный шаг по эволюционной координате и распараллеливание программного кода. На основе полученных решений строятся зависимости для пространственного и временного распределения интенсивности, поверхностной плотности энергии, пиковой и линейной концентрации плазмы, а также частотные и частотно-угловые спектры излучения.

Защищаемые положения

- При филаментации оптического вихря ближнего ИК диапазона с топологическим зарядом $m = 1$ и пятикратным превышением мощности над критической в прозрачном твердотельном диэлектрике в условиях аномальной дисперсии групповой скорости (ДГС) формируется последовательность кольцевых световых пучков с шириной колец в несколько микрометров и длительностью, близкой к периоду осцилляции поля. Радиус световых пучков уменьшается по мере распространения вихря и может сокращаться до 10 микрометров. Спектральное уширение импульса при формировании кольцевых пучков несимметрично – в длинноволновую область переходит более половины оптической энергии.
- Дисперсия групповой скорости существенно влияет на характер нелинейно-оптических трансформаций при самовоздействии оптических вихрей в твердотельных диэлектриках. При аномальной ДГС образуются кольцевые световые пучки, в то время как при нормальной и нулевой ДГС формирования световых пучков не происходит. В условиях сохранения аксиальной симметрии пучка ограничение интенсивности кольцевых пучков в первом нелинейном фокусе при самовоздействии вихря с топологическим зарядом $m = 1$ и мощностью около пяти критических наступает в безыонизационном режиме вследствие дифракции сфокусированного узкого кольца. Групповая скорость кольцевых световых пучков меньше групповой скорости импульса в линейной среде.
- При самовоздействии вихревого пучка с топологическим зарядом $m = 1$ и мощностью, превышающей критическую в несколько раз, в частотно-угловом спектре импульса образуется система полос, свидетельствующая о существенном падении интенсивности излучения под определенными углами к оси пучка. Такой характер углового распределения поля в широком частотном диапазоне обусловлен формированием в поперечнике пучка последовательности колец, соседние из которых имеют сдвинутые на π по отношению друг к другу спиральные фазы.
- Уширение спектра при филаментации в образце плавленого кварца оптического вихря в условиях аномальной дисперсии групповой скорости сопровождается появлением в окрестности нелинейного фокуса локализованных максимумов в стоксовой и антистоксовой частях. При одинаковом превышении критической мощности уширение спектра в оптическом вихре меньше, чем в гауссовом пучке, так как фазовая дислокация препятствует самофокусировке излучения на оси и, соответственно, достижению больших градиентов интенсивности.

Степень достоверности

Степень достоверности результатов диссертационной работы определяется использованием современных подходов численного исследования распространения фемтосекундного лазерного излучения в среде и сравнением результатов с экспериментальными данными. Кроме того, проводится тестирование программного кода на сходимость численного решения с известными аналитическими выражениями и полуэмпирическими формулами.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы опубликованы в 8 статьях научных журналов «Laser Physics Letters», «Квантовая электроника», «ЖЭТФ», «Оптика и спектроскопия», «Известия Российской академии наук. Серия физическая», «EPJ Web of Conferences» и 3 сборниках «Proceedings SPIE», «Progress in Photon Science: Springer Series in Chemical Physics», а также докладывались на международных конференциях: «Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2015" / "Ломоносов-2016"» (Москва, Россия, 2015 / 2016), «IX Международная конференция молодых ученых и специалистов "Оптика-2015"» (Санкт-Петербург, Россия, 2015), «V Международная конференция по фотонике и информационной оптике» (Москва, Россия, 2016), «SPIE Optics + Photonics 2016» (Сан-Диего, США, 2016), «International Conference on Coherent and Nonlinear Optics / International Conference on Lasers, Applications and Technologies 2016» (Минск, Беларусь, 2016), «XI Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии» (Светлогорск, Россия, 2017), «International Conference on Ultrafast Optical Science 2017» (Москва, Россия, 2017), «The Third STEPS Symposium on Photon Science» (Москва, Россия, 2018), «Международная конференция "Фундаментальные проблемы оптики 2018 / 2019"» (Санкт-Петербург, Россия, 2018 / 2019), «XIII International Conference on Hole Burning, Single Molecule, And Related Spectroscopies: Science and Applications» (Суздаль, Россия, 2018), «International Conference on Ultrafast Optical Science 2018» (Москва, Россия, 2018), «International Workshop on Quantum Optics 2019» (Владимир, Россия, 2019), «19th International Conference on Laser Optics 2020» (Санкт-Петербург, Россия, 2020) и на семинарах кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации теоретические результаты получены автором лично. Экспериментальные результаты получены в Институте спектроскопии РАН на основе фемтосекундного лазерного комплекса Центра коллективного пользования (ЦКП ИСАН) старшим научным сотрудником В.О. Компанцом под руководством заведующего лабораторией С.В. Чекалина

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав текста, заключения, списка публикаций по теме диссертации, благодарностей, приложения, а также списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 186 страниц, включая 74 рисунка и 15 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 276 наименований.

Содержание работы

Введение

Обосновывается актуальность темы работы и степень ее разработанности, ставятся цели и задачи, описывается объект и предмет исследования. Перечисляются тезисы, соответствующие научной новизне, а также теоретической и практической значимости диссертации. Указывается методология исследования, и формулируются защищаемые положения. Описывается степень достоверности и апробация результатов работы, а также личный вклад автора.

Глава I. Состояние исследований

Глава посвящена обзору состояния исследований филаментации оптических вихрей при аномальной ДГС в прозрачных твердотельных диэлектриках. Описаны физические механизмы филаментации, а также особенности самовоздействия в твердотельных диэлектриках. Рассмотрено получение световых пульс в средах с аномальной ДГС, пространственно-временная динамика и спектральное уширение излучения. Дано определение фазовой сингулярности и оптического вихря как однокольцевой моды Лагерр-Гауссова пучка с винтовой фазовой дислокацией. Перечислены различные способы генерации оптических вихрей – в частности, с помощью спиральной фазовой пластинки. Приведено множество практических приложений вихревых пучков, из которых наиболее близким к теме диссертации является формирование протяженных кольцевых каналов микромодификации в образцах твердотельных диэлектриков.

Глава II. Математическая модель фемтосекундной филаментации оптических вихрей в твердотельных диэлектриках

В главе продемонстрировано получение нелинейного волнового уравнения распространения лазерного излучения и кинетического уравнения для электронов плазмы при фемтосекундной филаментации оптических вихрей в твердотельных диэлектриках из системы уравнений Максвелла с использованием ряда приближений. Рассматривается диэлектрическая, немагнитная, изотропная среда с кубичной нелинейностью, в которой распространяется пространственно-модулированная гармоническая волна с медленно меняющейся огибающей в квазимонохроматическом импульсе [41; 42]. Пренебрегается генерацией третьей гармоники [43], отклик среды в связи с вынужденным комбинационным рассеянием на вращательных переходах молекул среды считается частично инерционным [44]. Учитывается оператор волновой нестационарности \hat{T} [45], который позволяет описывать самоукручение импульса при распространении в нелинейной среде. Ток проводимости описывается в рамках модели Друде при наличии электрон-ионных соударений [46], скорость ионизации среды рассчитывается согласно модели Келдыша [47]. Итоговая система уравнений, записанная относительно медленно меняющейся комплексной огибающей $A(r, t, z)$ и концентрации электронов плазмы $N_e(r, t, z)$, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2ik_0 \frac{\partial A}{\partial z} = \underbrace{\hat{T}^{-1} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} - \frac{m^2}{r^2} \right) A}_{\text{дифракция}} + \underbrace{\hat{T}^{-1} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(k^2(\omega_0 + \Omega) - (k_0 + k_1 \Omega)^2 \right) \tilde{A} \exp\{i\Omega t\} d\Omega}_{\text{дисперсия}} + \\ + \underbrace{\frac{2k_0^2}{n_0} \hat{T} \Delta n_k A}_{\text{керровская нелинейность}} + \underbrace{\frac{2k_0^2}{n_0} \hat{T}^{-1} \Delta n_{pl} A}_{\text{плазменная нелинейность}} + \underbrace{i\hat{T}^{-2} \sigma A}_{\text{обратное тормозное поглощение}} - \underbrace{ik_0(\alpha + \delta) A}_{\text{нелинейное поглощение и экстинкция}}, \quad (1a) \\ \frac{\partial N_e}{\partial t} = \underbrace{R_E(N_0 - N_e)}_{\text{полевая ионизация}} + \underbrace{\nu_i N_e}_{\text{лавина}} - \underbrace{\beta N_e}_{\text{рекомбинация}}. \quad (1b) \end{array} \right.$$

При получении уравнения (1a) замена вида $A \rightarrow A \exp\{im\varphi(x, y)\}$, где $m \geq 0$ – топологический заряд, $\varphi(x, y) = \text{arctg}(x, y)$ – вихревая фаза, приводит к появлению в поперечном лапласиане слагаемого $-m^2/r^2$, которое позволяет в осесимметричном приближении уравнения описывать влияние вихревой фазы пучка [16].

В правой части нелинейного волнового уравнения (1a) присутствуют слагаемые, ответственные за дифракцию пучка, дисперсию импульса, керровскую и плазменную нелинейность, обратное тормозное и нелинейное поглощение, а также экстинкцию. В кинетическом уравнении для концентрации электронов плазмы (1b) учтены полевая ионизация, лавинная ионизация и рекомбинация носителей заряда.

С помощью описанной системы уравнений (1) в работе проведено численное исследование самовоздействия фемтосекундных оптических вихрей, представляющих собой однокольцевую моду Лагерр-Гаусса [27] (Рис. 1):

$$A_V(r, t, z)|_{z=0} = A_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^m \exp \left\{ -\frac{r^2}{2r_0^2} \right\} \exp \left\{ im\varphi \right\} \exp \left\{ -\frac{t^2}{2t_0^2} \right\}, \quad (2)$$

При $m = 0$ выражение (2) трансформируется в гауссов пучок.

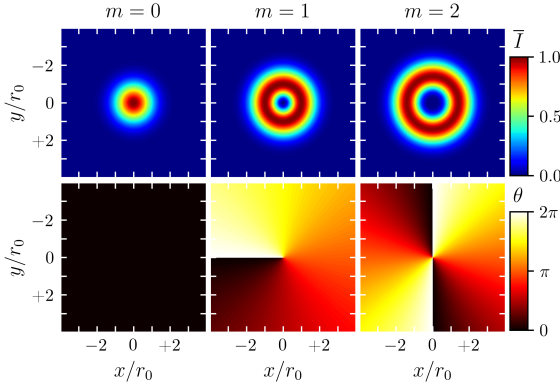


Рис. 1 Пространственное распределение интенсивности $\bar{I}(x, y)$ (сверху) и фазы $\theta(x, y)$ (снизу) для гауссова пучка ($m = 0$) и оптических вихрей с топологическими зарядами $m = 1, 2$. Каждое распределение интенсивности нормировано на свой максимум.

Численное решение задачи (1), (2) проводилось с помощью метода расщепления по физическим факторам. Уравнения, описывающие дифракцию пучка и дисперсию импульса, решались в спектральном пространстве, уравнение для нелинейности – в пространстве координат (r, t, z) . С целью ускорения расчетов использовалось распараллеливание программного кода, а также адаптивный шаг по эволюционной координате z .

Тестирование программного кода выполнялось как на предмет сравнения полученных численно результатов с аналитическими выражениями, описывающими дифракцию гауссовых и вихревых пучков, а также дисперсию импульса, так и на предмет сравнения с полуэмпирической формулой Марбургера [48], устанавливающей связь нелинейной длины $z_{\text{нл}}$ и критической мощности самофокусировки гауссова пучка P_G . Кроме того, проверена формула зависимости критической мощности самофокусировки оптического вихря $P_V^{(m)}$ от m и P_G [25].

Отдельно исследовано влияние параметров модели на численное решение. Проанализировано изменение вклада инерционной керровской нелинейности,

проведено сравнение линейного и нелинейного ослабления излучения при самовоздействии, рассмотрена роль лавины и рекомбинации. Изучено влияние оператора волновой нестационарности и последствия его частичного учета в нелинейном волновом уравнении. В рамках анализа динамики распада оптического вихря вследствие азимутальной модуляционной неустойчивости при самофокусировке в нелинейной среде получено, что наличие шума с относительной амплитудой порядка десятых долей процента и радиусом корреляции, существенно отличающимся от характерного пространственного масштаба вихря r_0 , приводит к распаду вихревого пучка в районе первого нелинейного фокуса или далее, что позволяет до этого момента считать распределение интенсивности в нем квазиаксиально-симметричным. Указанный результат согласуется с [26], где показано, что при $m = 1$ нелинейная длина вихревого пучка может быть меньше расстояния до его распада вследствие шумов.

В приложение вынесены выкладки, касающиеся получения выражения для частоты лавинной ионизации, параметров k_1 и k_2 для формулы Селлмейера [49], оценок вычислительной сложности модели и получения частотно-углового спектра, расчета оптимального окна свертки при учете инерционной керровской нелинейности и описания алгоритма генерации коррелированного гауссова шума.

Глава III. Кольцевые световые пули при филаментации оптического вихря в условиях аномальной дисперсии групповой скорости

Представлены результаты исследования формирования кольцевых световых пуль при самовоздействии в плавленом кварце фемтосекундных оптических вихрей в условиях аномальной ДГС.

В рамках решения стационарной задачи нелинейного распространения вихревых пучков продемонстрировано пространственное разделение периферической низкоинтенсивной моды и высокоинтенсивной самофокусирующейся, которое сопровождается незначительным падением интенсивности. Предложена обобщенная на случай оптических вихрей формула Марбургера, описывающая зависимость расстояния до нелинейного фокуса z_{nl} в единицах дифракционных длин $z_{\text{diff}} = kr_0^2$ от превышения мощности над критической $P_{\text{rel}} = P_0/P_{\text{cr}}$, где $P_{\text{cr}} = P_G$ для гауссова пучка и $P_{\text{cr}} = P_V^{(m)}$ для оптического вихря с топологическим зарядом m . Согласно этой формуле, нелинейная длина оптических вихрей с $m = \overline{1,4}$ больше, чем у гауссова пучка.

Филаментация нестационарного оптического вихря исследовалась на примере пучка с $m = 1$, $\lambda_0 = 1.8$ мкм, $P_0/P_V^{(m)} = 5$. Продемонстрировано формирование трех кольцевых световых пуль на расстояниях $z = 0.9$ см (а), 4.1 см (б) и 4.3 см (в) (Рис. 2). Каждая следующая пуля сдвинута относительно предыдущей по направлению к хвосту импульса из-за определяющего влияния оператора волновой нестационарности и инерционной керровской

нелинейности. Пиковая по трассе интенсивность 4×10^{13} Вт/см² и плазма $N_e \sim 10^{-4} N_0$ достигаются в последней пуле, в то время как в первых двух они существенно меньше и приблизительно равны между собой.

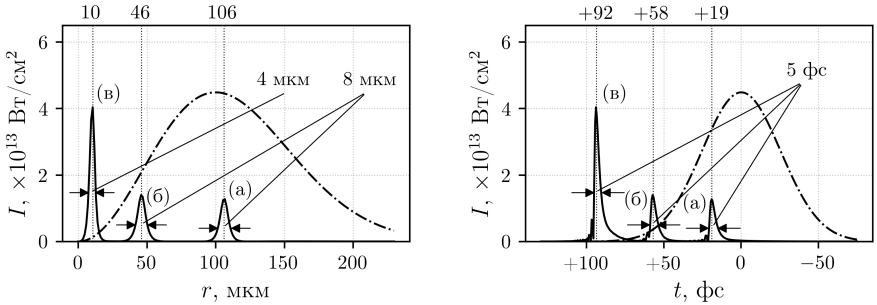


Рис. 2 Пространственный (слева) и временной (справа) профили интенсивности на расстояниях $z = 0.9$ см (а), 4.1 см (б) и 4.3 см (в), соответствующих появлению кольцевых световых пуль при филаментации рассматриваемого оптического вихря. Штрих-пунктирной линией показан профиль интенсивности на входе в среду, умноженный на коэффициент 200. Для каждого из профилей указана ширина кольца / длительность импульса по уровню e^{-1} . Вверху вынесены значения расстояния от оси (слева) и координаты времени (справа) для пространственного / временного положения пиковой интенсивности пуль.

Радиус кольцевых пуль уменьшается по мере распространения вплоть до 10 мкм в последней пуле, ширина кольца составляет $4 \div 8$ мкм. Характерная длительность пуль одинакова и приблизительно соответствует осцилляции светового поля. Энергия кольцевых пуль уменьшается примерно с 30% до 10% от энергии импульса на текущем расстоянии.

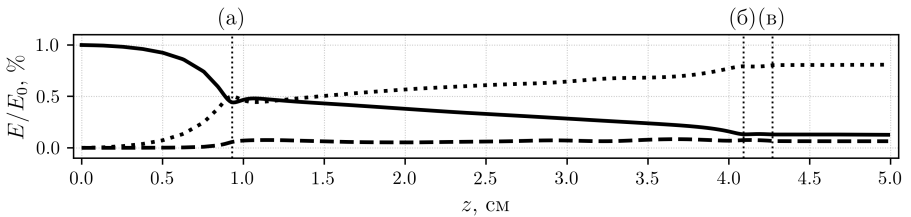


Рис. 3 Трансформация энергии из центральной спектральной области (1600 ÷ 2057 нм, сплошная кривая) в Стоксову (> 2057 нм, точечная кривая) и анти-Стоксову (< 1600 нм, штриховая кривая) в зависимости от расстояния вдоль направления распространения излучения z . Расстояния $z = 0.9$ см (а), 4.1 см (б) и 4.3 см (в) соответствуют нелинейным фокусам.

Филаментация оптического вихря приводит к формированию

многофокусной структуры излучения с пиковым значением поверхностной плотности энергии 0.2 мДж/см^2 , которое достигается в последнем нелинейном фокусе.

Для оценки спектральной трансформации энергии излучения (Рис. 3) частотная область была условно разделена на центральную (вблизи центральной длины волны), Стоксову (с большими длинами волн) и анти-Стоксову (с меньшими длинами волн). Получено, что в результате самовоздействия около 80% оптической энергии переходит в стоксову область. В центральной области доля энергии стабильно падает и после формирования третьей пули остается на уровне $\sim 10\%$, что приблизительно равно энергии в анти-Стоксовой области.

Глава IV. Особенности филаментации кольцевых пучков с фазовой дислокацией

Исследовано влияние различных параметров излучения на самовоздействие фемтосекундных оптических вихрей.

Влияние дисперсии групповой скорости на нелинейно-оптические трансформации фемтосекундных вихревых пучков в плавленом кварце проанализировано на примере трех длин волн: в области нулевой ДГС ($\lambda_0 = 1235 \text{ нм}$), а также слабо- и сильно-аномальной ДГС ($\lambda_0 = 1557 \text{ нм}$ и $\lambda_0 = 1800 \text{ нм}$ соответственно). Получено, что наличие выраженной самокомпрессии импульса при $\lambda_0 = 1800 \text{ нм}$ в присутствии самофокусировки приводит к повышению пиковой интенсивности импульса в первом нелинейном фокусе приблизительно в 15 раз. Резкое повышение пиковой интенсивности также наблюдается при нестационарном самовоздействии по сравнению со стационарным в случае сильно-аномальной ДГС, в отличие от области нулевой ДГС, где указанная разница невелика. Ограничение роста интенсивности в первом нелинейном фокусе наступает не под воздействием дефокусировки в самонаведенной плазме, концентрация которой пренебрежимо мала, а вследствие дифракции кольцевого распределения поля в оптическом вихре, которая в радиальном направлении происходит подобно щелевому пучку. При этом фазовая сингулярность практически не оказывает влияния на нелинейно-оптические трансформации, поскольку кольцо интенсивности на входе пучка в среду расположено далеко от оптической оси (Рис. 4).

Исследовано влияние отношения дифракционной длины пучка к дисперсионной $z_{\text{rel}} = z_{\text{diff}}/z_{\text{disp}}$ на процесс самовоздействия нестационарных оптических вихрей. Для вихрей с $m = 1, 2$, фиксированной z_{diff} , λ_0 и $P_0/P_V^{(m)}$ получено, что равенство указанных длин приводит к формированию наиболее интенсивных кольцевых световых пуль. Вследствие самокомпрессии импульса в условиях аномальной ДГС и роста пиковой интенсивности первый нелинейный фокус появляется раньше, а именно вблизи расстояния, на котором в стационарном случае происходит выделение периферической кольцевой моды.

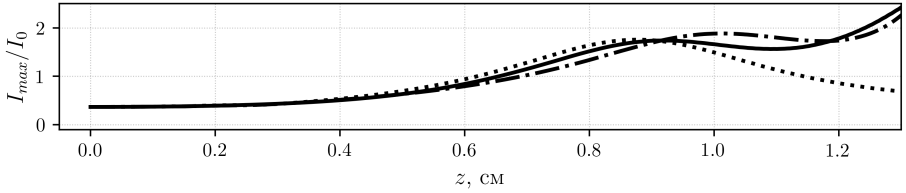


Рис. 4 Зависимость нормированной пиковой интенсивности от расстояния вдоль направления распространения излучения при стационарном самовоздействии оптического вихря в кристалле LiF на длине волны 1800 нм (сплошная кривая). Точечной кривой показана пиковая интенсивность щелевого пучка, начальным условием для которого является радиальное сечение указанного оптического вихря при $z = 0$ см. Штрих-пунктирной кривой показана пиковая интенсивность для стационарного кольцевого пучка без фазовой сингулярности.

Первый нелинейный фокус в вихревых пучках с $z_{\text{rel}} = 0.5$ наступает позже, чем в случаях $z_{\text{rel}} = 1, 2$, из-за менее выраженной самокомпрессии импульса. Пиковая и линейная концентрация плазмы для $m = 1, 2$ максимальны при равенстве дифракционной и дисперсионной длины.

Изучено влияние материала на особенности формирования кольцевых световых пулей. Для плавленого кварца, а также фторидов кальция и лития, получено, при умеренном превышении мощности над критической около $P_0/P_V^{(m)} = 4 \div 5$ сценарии самовоздействия различны для топологических зарядов $m = 1, 2$, но одинаковы для всех рассматриваемых материалов. При $m = 1$ формируется три световые пули, последняя из которых является наиболее интенсивной. При $m = 2$ образуется $2 \div 3$ пули, и, как правило, первая пуля имеет наибольшую интенсивность.

Получено, что для различных диапазонов превышения мощности над критической ($P_0/P_V^{(m)} = 2$ – низкое, $P_0/P_V^{(m)} = 4 \div 6$ – среднее, $P_0/P_V^{(m)} = 8$ – высокое превышение) наибольшее число кольцевых световых пулей возникает в кристалле LiF. Указанная особенность может быть связана с меньшей скоростью ионизации по сравнению с плавленым кварцем и фторидом кальция. Продолжительность существования пулей также максимальна в LiF и составляет $2 \div 5$ мм (в SiO₂ и CaF₂ – $0.5 \div 2.0$ мм). Кроме того, однозначно нельзя сказать, для какого топологического заряда возникает максимум кольцевых пулей – в SiO₂ их больше при $m = 1$, в CaF₂ – при $m = 2$, в LiF число пулей одинаково для обоих m .

Сравнение самовоздействия в плавленом кварце оптических вихрей с $m = 1, 2$ и гауссова пучка при заданном превышении мощности над критической для каждого пучка показало, что в вихревых пучках формируется меньше световых пулей (Рис. 5). В среднем кольцевые световые пули обладают меньшими пиковой интенсивностью, максимальной и линейной концентрациями плазмы. Первый нелинейный фокус достигается раньше

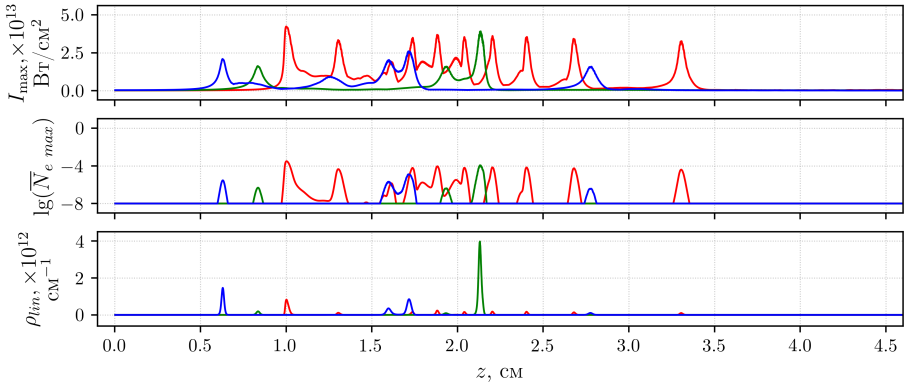


Рис. 5 Зависимость пиковой интенсивности I_{max} , логарифма нормированной пиковой концентрации плазмы $\lg \bar{N}_{e\ max} = \lg(N_{e\ max}/N_0)$ и линейной концентрации плазмы ρ_{lin} оптических вихрей с топологическими зарядами $m = 1$ (зеленые кривые) и $m = 2$ (синие кривые), а также гауссова пучка (красные кривые), от расстояния вдоль направления распространения излучения z при филаментации в кристалле SiO_2 .

в оптических вихрях, поскольку в стационарном случае расстояние, где выделяется периферическая мода, меньше, чем нелинейная длина гауссова пучка. Световые пули в обоих пучках по мере распространения излучения смещаются к хвосту импульса, их характерные ширины по пространству сопоставимы, а длительность одинакова и приблизительно соответствует одной осцилляции поля.

Глава V. Спектральное уширение оптических вихрей

Рассмотрены особенности спектрального уширения оптических вихрей, а также проведено сравнение численных расчетов с экспериментальными результатами.

Предложено объяснение появления полос вдоль угловой координаты частотно-углового спектра при самовоздействии фемтосекундных оптических вихрей. Для этого рассмотрена самофокусировка стационарного вихря и проанализирована эволюция распределений интенсивности, фазы и спектральной плотности мощности. Показано, что при самофокусировке вихревых пучков линия скачка фазы начинает сильно искривляться на расстоянии от оси, соответствующем пиковой интенсивности в кольце, что связано с керровской добавкой к показателю преломления. По мере распространения пучка описанное искривление приводит к формированию в распределении фазы картины из вложенных спиральных фазовых пластинок (Рис. 6). При этом в угловом спектре появляется система колец различной интенсивности.

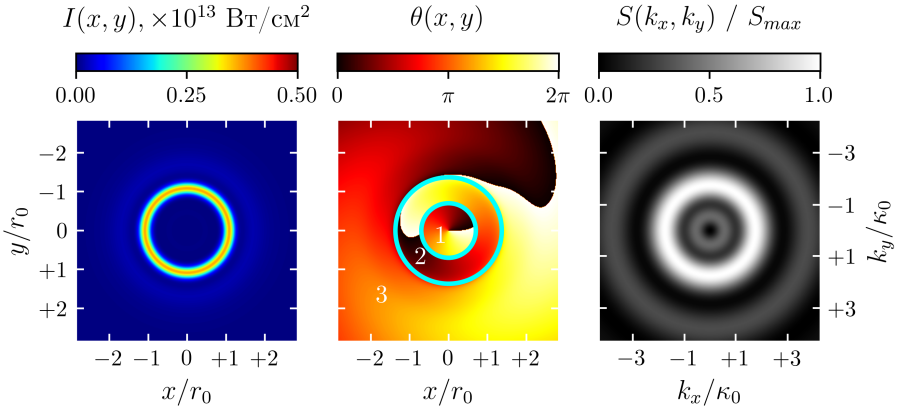


Рис. 6 Пространственное распределение интенсивности $I(x, y)$ (слева) и фазы $\theta(x, y)$ (в центре), а также углового спектра $S(k_x, k_y)$ (справа), при самофокусировке оптического вихря на расстоянии $z = 0.21z_{\text{diff}}$. Частотные оси нормированы на значение $\kappa_0 = 1/r_0$. На распределении фазы $\theta(x, y)$ голубыми окружностями изображены границы трех вложенных спиральных пластинок с номерами 1, 2, 3.

Продемонстрировано, что сложная система колец в спектре является результатом суперпозиции спектров от излучения, соответствующего каждой из вложенных спиральных пластинок в распределении фазы пучка. В зависимости от соотношения между амплитудами излучения внутри пластинок результирующая система колец в спектре также меняет относительные амплитуды. Число вложенных пластинок влияет на спектр, и при формировании одной спиральной пластинки в процессе закручивания фазы в спектре наблюдается единственное кольцо, что соответствует спектру излучения на входе в среду. В случае импульсного излучения ширина полос в угловом спектре вихревого пучка не зависит от длины волны и определяется характерным пространственным масштабом оптического вихря.

Результаты численных расчетов, проводимых в рамках используемой математической модели, сравнивались с экспериментальными данными. Эксперимент проводился в Институте спектроскопии РАН на основе фемтосекундного лазерного комплекса Центра коллективного пользования (ЦКП ИСАН) старшим научным сотрудником В.О. Компанцом под руководством заведующего лабораторией С.В. Чекалина. Фемтосекундный оптический вихрь с топологическим зарядом $m = 1$ был получен с помощью спирального фазового транспаранта [50]. Как в численных, так и в экспериментальных частотных спектрах обоих пучков наблюдается по два ярко выраженных максимума (Рис. 7). Ширина спектров импульсов по уровню 10^{-1} на выходе из образца больше, как минимум, в 2.5 раза, по сравнению с началом рас-

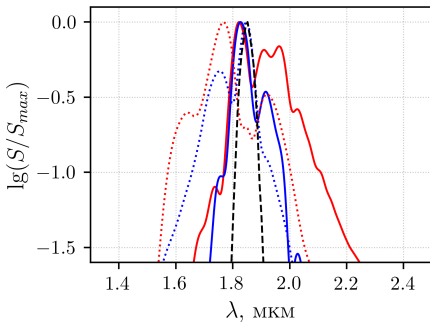


Рис. 7 Частотные спектры фемтосекундного импульса на выходе из образца плавяного кварца длиной 3 см, полученные экспериментально (сплошные кривые, $E_0 = 4.6$ мкДж) и численно (точечные кривые, $P_0/P_{cr} = 1.5$) для гауссова пучка (красные кривые) и оптического вихря (синие кривые). Каждый спектр нормирован на собственный максимум. Черной штриховой кривой показан спектр импульсов на входе в среду (численный).

пространения. Характерная ширина численных спектров отличается от экспериментальных значений не более, чем на 15%, при этом уширение спектра оптического вихря меньше, чем в гауссовом пучке. Указанная особенность объясняется тем, что фазовая дислокация препятствует самофокусировке излучения на оси и, соответственно, достижению больших градиентов интенсивности. Уширение частотно-угловых спектров по обеим координатам в вычислительном эксперименте оказывается больше экспериментального, что может объясняться аксиальной несимметрией оптического вихря на входе в нелинейную среду. При этом вдоль угловой координаты спектра оптического вихря присутствуют полосы, которые могут свидетельствовать о суперпозиции спектров от мод излучения, распределение фазы которых имеет спиральный вид.

Заключение

Основные научные результаты диссертационной работы:

- Филаментация оптических вихрей с топологическим зарядом $m = 1$ в плавяном кварце на длине волны $\lambda_0 = 1.8$ мкм, что соответствует аномальной ДГС, может приводить к формированию кольцевых световых пуль. При относительно небольшом превышении пиковой мощности над критической мощностью самофокусировки ($P_0 = 4 \div 5P_V^{(m)}$) формируется последовательность кольцевых световых пуль, каждая из которых имеет длительность, близкую к одной осцилляции поля, и ширину в несколько микрометров. Радиусы световых пуль уменьшаются по мере распространения вихря и могут сократиться до 10 микрометров. Энергия каждой следующей пули меньше предыдущей и составляет от 30% до 10% полной энергии импульса на этом расстоянии. Образование последовательности кольцевых световых пуль приводит к появлению многофокусной структуры излучения с поверхностной плотностью энергии в нелинейном

фокусе порядка 10^2 мДж/см². Наибольшие значения интенсивности и поверхностной плотности энергии достигаются при уменьшении радиуса кольцевой моды в последних нелинейных фокусах. Формирование пули сопровождается уширением частотно-углового спектра излучения. Частотное уширение происходит, в основном, в длинноволновую область, куда переходит более половины оптической энергии.

- Дисперсия групповой скорости существенно влияет на характер нелинейно-оптических трансформаций при самовоздействии оптических вихрей в твердотельных диэлектриках. При самовоздействии фемтосекундного вихря в условиях аномальной дисперсии групповой скорости первый нелинейный фокус формируется раньше, чем в стационарном случае, благодаря самокомпрессии импульса. Ограничение интенсивности кольцевой световой пули в первом нелинейном фокусе при самовоздействии в условиях аномальной ДГС оптического вихря с топологическим зарядом $m = 1$ и превышением пиковой мощности в $4 \div 5$ раз наступает вследствие дифракции сфокусированного кольца, которая проявляется тем сильнее, чем меньше ширина кольца.
- При превышении пиковой мощности над критической $P_0/P_V^{(m)} \simeq 4 \div 5$ наиболее интенсивные кольцевые световые пули формируются в оптических вихрях с равными дифракционной и дисперсионной длинами. Сценарии формирования кольцевых пуль в SiO₂, LiF и CaF₂ определяются топологическим зарядом оптического вихря и для $m = 1, 2$ слабо зависят от параметров диэлектрика. При $m = 1$ формируется три световых пули, последняя из которых является наиболее интенсивной. При $m = 2$ образуется $2 \div 3$ пули, но самой интенсивной, как правило, является первая. Рост мощности излучения ведет к формированию большего числа кольцевых световых пуль. Наибольшее количество КСП в рассматриваемых твердотельных диэлектриках образуется в кристалле LiF, в котором скорость ионизации на порядки меньше, чем в SiO₂ и CaF₂, и баланс наведенных нелинейно-оптических линз, соответствующих керровской самофокусировке и плазменной дефокусировке, наступает позже. Нелинейный и лавинообразный характер формирования КСП в описанных условиях в среднем ведет к росту числа пуль при распространении вихревого пучка в среде.
- Процессы образования световых пуль в вихревых и гауссовых пучках имеют как сходства, так и отличия. Как правило, для одинакового превышения мощности над критической мощностью самофокусировки соответствующего пучка плазменные каналы в оптических вихрях содержат меньшую по сравнению с гауссовым пучком концентрацию плазмы. Однако при филаментации вихря с $m = 1$ в третьем фокусе, где кольцевая световая пуля является наиболее интенсивной, линейная концентрация плазмы в вихревом пучке может существенно превышать

таковую в нелинейных фокусах гауссова пучка. Групповая скорость обычных и кольцевых световых пучков уменьшается по мере распространения излучения, поэтому они смещаются к хвосту импульса. Ширина кольцевых пучков в вихревых пучках сопоставима с шириной пучков в гауссовом пучке, длительность каждой пули в обоих пучках близка к осцилляции светового поля.

- Стационарное самовоздействие оптического вихря с топологическим зарядом $m = 1$ вызывает искривление линии скачка фазы на расстоянии от оси, равном радиусу фокусирующейся кольцевой моды, что приводит к закручиванию линии скачка фазы и формированию в фазе системы вложенных спиральных распределений, соседние из которых имеют сдвинутые на π по отношению друг к другу спиральные фазы. Излучение с фазой, соответствующей каждому такому распределению, имеет угловой спектр, состоящий из системы колец, амплитуда которых уменьшается при смещении в сторону высоких гармоник. Угловой спектр вихря представляет собой суперпозицию спектров излучения для каждого такого спирального распределения фазы. В условиях нестационарного самовоздействия вихрей указанные кольца в частотно-угловом спектре соответствуют полосам вдоль угловой координаты, что согласуется с экспериментальными результатами измерения частотно-угловых ИК спектров оптических вихрей в плавленом кварце.
- При самовоздействии оптического вихря на центральной длине волны в окрестности 1800 нм в образце плавленого кварца уширение спектра излучения сопровождается появлением в окрестности нелинейного фокуса локализованных максимумов в стоксовой и антистоксовой частях. В условиях аномальной дисперсии групповой скорости при одинаковом превышении критической мощности уширение спектра в оптическом вихре меньше, чем в гауссовом пучке, так как фазовая дислокация препятствует самофокусировке излучения на оси и, соответственно, достижению больших градиентов интенсивности.

Список публикаций по теме диссертации

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

1. **Васильев Е.В.** Шленов С.А. Филаментация кольцевого пучка с вихревой фазовой дислокацией в плавленом кварце. *Квантовая Электроника*. Т. 46, С. 1002 (2016). IF WoS: 1.194. Авторский вклад: 50%.
2. **Vasilyev E.V.** Shlenov S.A. Kandidov V.P. Femtosecond filamentation of optical vortex in a medium with anomalous group velocity dispersion. *EPJ*

Web of Conferences, V. 161, P. 02029 (2017). IF Scopus: 0.9. Авторский вклад: 50%.

3. **Vasilyev E.V.** Shlenov S.A. Kandidov V.P. Multifocus self-focusing of a femtosecond optical vortex. *EPJ Web of Conferences*, V. 190, P. 03015 (2018). IF Scopus: 0.9. Авторский вклад: 50%.
4. **Vasilyev E.V.** Shlenov S.A. Kandidov V.P. Annular light bullets of a femtosecond optical vortex in a medium with anomalous group velocity dispersion. *Laser Physics Letters*. V. 15, P. 115402 (2018). IF WoS: 1.704. Авторский вклад: 50%.
5. **Васильев Е.В.** Шленов С.А. Кандидов В.П. Многофокусная структура излучения при фемтосекундной филаментации оптического вихря в среде с аномальной дисперсией групповой скорости. *Оптика и спектроскопия*. Т. 126, С. 24 (2019). IF WoS: 0.74. Авторский вклад: 50%.
6. **Vasilyev E.V.** Shlenov S.A. Topological charge influence on self-action of femtosecond optical vortices in the range of anomalous group velocity dispersion. *EPJ Web of Conferences*, V. 220, P. 02019 (2019). IF Scopus: 0.9. Авторский вклад: 50%.
7. **Васильев Е.В.** Кандидов В.П. Компанец В.О. Чекалин С.В. Шленов С.А. Формирование кольцевых световых пучков в вихревом пучке фемтосекундного излучения. *Известия РАН. Серия Физическая*. Т. 83, С. 1602 (2019). IF Scopus: 0.8. Авторский вклад: 50%.
8. Шленов С.А. **Васильев Е.В.** Чекалин С.В. Компанец В.О. Скиданов Р.В. Спектральное уширение фемтосекундных оптических вихрей при филаментации в плавленом кварце в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. *ЖЭТФ*. Т. 159, С. 400 (2021). IF WoS: 1.111. Авторский вклад: 40%.

и иных научных трудах соискателя:

- 1.01 **Vasilyev E.V.** Shlenov S.A. Influence of optical angular momentum on filamentation of 800 nm femtosecond laser pulses in fused silica. *Proceedings of SPIE 9922 Optical Trapping and Optical Micromanipulation XIII*, V. 9922, P. 99222E (2016). IF Scopus: 0.9. Авторский вклад: 50%.
- 1.02 Shlenov S.A. **Vasilyev E.V.** Kandidov V.P. Spatio-temporal and spectral transformation of femtosecond pulsed beams with phase dislocation propagating under conditions of self-action in transparent solid-state dielectrics. *Progress in Photon Science: Springer Series in Chemical Physics*. V. 119, P. 43 (2019). IF Scopus: 0.6. Авторский вклад: 40%.

- 1.03 Shlenov S.A. **Vasilyev E.V.** Kandidov V.P. Dergachev A.A. Soyfer F.I. Self-action of femtosecond optical vortex in a medium with Kerr nonlinearity. *Progress in Photon Science: Springer Series in Chemical Physics*. V. 125, P. 1 (2021). IF Scopus: 0.6. Авторский вклад: 40%.
- 2.01 **Васильев Е.В.** Шленов С.А. Уширение частотно-углового спектра при самовоздействии фемтосекундного лазерного импульса на длине волны 800 нм в кольцевом пучке с фазовой сингулярностью в плавленом кварце. *Сборник трудов XXII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2015»* (Москва, Россия, 2015)
- 2.02 **Васильев Е.В.** Шленов С.А. Пространственно-временная динамика и частотно-угловые спектры при самовоздействии фемтосекундного лазерного импульса в плавленом кварце на длине волны 800 нм в кольцевом пучке с фазовой сингулярностью. *Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2015»* (Санкт-Петербург, Россия, 2015)
- 2.03 **Васильев Е.В.** Шленов С.А. Частотно-угловые спектры оптических полей с фазовой дислокацией при самовоздействии в плавленом кварце. *Сборник Трудов V Международной конференции по фотонике и информационной оптике* (Москва, Россия, 2016)
- 2.04 **Васильев Е.В.** Шленов С.А. Филаментация кольцевых пучков с фазовой сингулярностью в плавленом кварце на длине волны 800 нм. *Сборник трудов XXIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2016»* (Москва, Россия, 2016)
- 2.05 **Vasilyev E.V.**, Shlenov S.A. Influence of optical angular momentum on filamentation of 800 nm femtosecond laser pulses in fused silica. *Proceedings of SPIE Optics + Photonics* (Сан-Диего, США, 2016)
- 2.06 **Vasilyev E.V.** Shlenov S.A. Femtosecond filamentation of double-charged optical vortex in fused silica. *Proceedings of International Conference on Coherent and Nonlinear Optics / International Conference on Lasers, Applications and Technologies 2016* (Минск, Беларусь, 2016)
- 2.07 **Васильев Е.В.** Шленов С.А., Кандидов В.П. Фемтосекундная филаментация оптического вихря в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. *Сборник трудов XI Международного симпозиума по фотонному эхо и когерентной спектроскопии* (Светлогорск, Россия, 2017)
- 2.08 **Vasilyev E.V.** Shlenov S.A. Kandidov V.P. Spatiotemporal dynamics of optical vortex in femtosecond mid-IR filament. *Proceedings of International Conference on Ultrafast Optical Science 2017* (Москва, Россия, 2017)

- 2.09 Shlenov S.A. **Vasilyev E.V.** Kandidov V.P. Spatio-temporal and spectral transformation of femtosecond pulsed beams with phase dislocation propagating under conditions of self-action in transparent solid-state dielectrics. *Proceedings of The Third STEPS Symposium on Photon Science* (Москва, Россия, 2018)
- 2.10 **Васильев Е.В.** Шленов С.А. Пространственно-временная динамика и спектры фемтосекундного лазерного излучения в вихревом пучке при самовоздействии в среде с аномальной дисперсией групповой скорости. *Сборник трудов X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики 2018»* (Санкт-Петербург, Россия, 2018)
- 2.11 **Vasilyev E.V.** Shlenov S.A. Kandidov V.P. Multifocus self-focusing of a femtosecond optical vortex. *Proceedings of XIII International Conference on Hole Burning, Single Molecule, And Related Spectroscopies: Science and Applications* (Суздаль, Россия, 2018)
- 2.12 **Vasilyev E.V.** Shlenov S.A. Kandidov V.P. Femtosecond annular light bullets in a medium with anomalous group velocity dispersion. *Proceedings of International Conference on Ultrafast Optical Science* (Москва, Россия, 2018)
- 2.13 **Васильев Е.В.** Шленов С.А. Суперконтинуум вихревых кольцевых пучков фемтосекундного лазерного излучения при самовоздействии в области аномальной дисперсии групповой скорости. *Сборник трудов XI Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики 2019»* (Санкт-Петербург, Россия, 2019)
- 2.14 **Васильев Е.В.** Шленов С.А. Влияние топологического заряда на самовоздействие вихревых пучков фемтосекундного излучения в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. *Proceedings of International Workshop on Quantum Optics 2019* (Владимир, Россия, 2019)
- 2.15 **Vasilyev E.V.** Shlenov S.A. Kandidov V.P. Kompanets V.O. Chekalin S.V. Skidanov R.V. Spectral broadening of femtosecond optical vortices under filamentation in a medium with anomalous group velocity dispersion. *Proceedings of 19th International Conference on Laser Optics 2020* (Санкт-Петербург, Россия, 2020)

Литература

1. Couairon A., Mysyrowicz A. // *Physics Reports*. — 2007. — Мар. — Vol. 441, no. 2–4. — P. 47–189.
2. *Кандидов В. П., Шленов С. А., Косарева О. Г.* // *Квантовая Электроника*. — 2009. — Март. — Т. 39, № 3. — С. 205–228.

3. *Smetanina E. O., Kompanets V. O., Dormidonov A. E., Chekalin S. V., Kandidov V. P.* // Laser Physics Letters. — 2013. — Aug. — Vol. 10, no. 10. — P. 105401.
4. *Dormidonov A., Kompanets V., Chekalin S., Kandidov V.* // Optics Express. — 2015. — Oct. — Vol. 23, no. 22. — P. 29202.
5. *Smetanina E. O., Dormidonov A. E., Kandidov V. P.* // Laser Physics. — 2012. — June. — Vol. 22, no. 7. — P. 1189–1198.
6. *Залозная Е. Д., Дормидонов А. Е., Кандидов В. П.* // Оптика атмосферы и океана. — 2016. — Т. 29, № 3. — С. 184–191.
7. *Dota K., Pathak A., Dharmadhikari J. A., Mathur D., Dharmadhikari A. K.* // Physical Review A. — 2012. — Aug. — Vol. 86, no. 2.
8. *Dokukina A. E., Smetanina E. O., Kompanets V. O.* // Journal of Optical Technology. — 2014. — Aug. — Vol. 81, no. 8. — P. 454.
9. *Polynkin P., Kolesik M., Moloney J. V., Siviloglou G. A., Christodoulides D. N.* // Science. — 2009. — Apr. — Vol. 324, no. 5924. — P. 229–232.
10. *Panagiotopoulos P., Papazoglou D., Couairon A., Tzortzakis S.* // Nature Communications. — 2013. — Oct. — Vol. 4, no. 1.
11. *Phillips R. L., Andrews L. C.* // Applied Optics. — 1983. — Mar. — Vol. 22, no. 5. — P. 643.
12. *Kruglov V. I., Volkov V. M., Vlasov R. A., Drits V. V.* // Journal of Physics A: Mathematical and General. — 1988. — Dec. — Vol. 21, no. 23. — P. 4381–4395.
13. *Soto-Crespo J. M., Heatley D. R., Wright E. M., Akhmediev N. N.* // Physical Review A. — 1991. — July. — Vol. 44, no. 1. — P. 636–644.
14. *Allen L., Beijersbergen M. W., Spreeuw R. J. C., Woerdman J. P.* // Physical Review A. — 1992. — June. — Vol. 45, no. 11. — P. 8185–8189.
15. *Heckenberg N. R., McDuff R., Smith C. P., White A. G.* // Optics Letters. — 1992. — Feb. — Vol. 17, no. 3. — P. 221.
16. *Kruglov V., Logvin Y., Volkov V.* // Journal of Modern Optics. — 1992. — Nov. — Vol. 39, no. 11. — P. 2277–2291.
17. *Quiroga-Teixeiro M., Michinel H.* // Journal of the Optical Society of America B. — 1997. — Aug. — Vol. 14, no. 8. — P. 2004.
18. *Воляр А., Фадеева Т., Егоров Ю.* // Письма в ЖТФ. — 2002. — Ноябрь. — Т. 28, № 22. — С. 70–77.
19. *Shvedov V. G., Hnatovsky C., Krolikowski W., Rode A. V.* // Optics Letters. — 2010. — July. — Vol. 35, no. 15. — P. 2660.
20. *Kotlyar V. V., Kovalev A. A., Skidanov R. V., Khonina S. N., Moiseev O. Y., Soifer V. A.* // Journal of Optical Technology. — 2007. — Oct. — Vol. 74, no. 10. — P. 686.

21. *Miyamoto K., Miyagi S., Yamada M., Furuki K., Aoki N., Okida M., Omatsu T.* // Optics Express. — 2011. — June. — Vol. 19, no. 13. — P. 12220.
22. *Скиданов Р. В., Ганчевская С. В.* // Компьютерная оптика. — 2015. — Т. 39, № 5. — С. 674–677.
23. *Wang X., Nie Z., Liang Y., Wang J., Li T., Jia B.* // Nanophotonics. — 2018. — Aug. — Vol. 7, no. 9. — P. 1533–1556.
24. *Vinçotte A., Bergé L.* // Physical Review Letters. — 2005. — Oct. — Vol. 95, no. 19.
25. *Vuong L. T., Grow T. D., Ishaaya A., Gaeta A. L., 't Hooft G. W., Eliel E. R., Fibich G.* // Physical Review Letters. — 2006. — Apr. — Vol. 96, no. 13.
26. *Власов Р., Волков В., Дедков Д.* // Квантовая Электроника. — 2013. — Февр. — Т. 43, № 2. — С. 157–161.
27. *Котляр В., Ковалев А.* — Физматлит, 2018.
28. *Neshev D. N., Dreischuh A., Maleshkov G., Samoc M., Kivshar Y. S.* // Optics Express. — 2010. — Aug. — Vol. 18, no. 17. — P. 18368.
29. *Hansinger P., Maleshkov G., Garanovich I. L., Skryabin D. V., Neshev D. N., Dreischuh A., Paulus G. G.* // Journal of the Optical Society of America B. — 2016. — Mar. — Vol. 33, no. 4. — P. 681.
30. *Ran L.-L., Guo Z.-Y., Qu S.-L.* // Chinese Physics B. — 2012. — Oct. — Vol. 21, no. 10. — P. 104206.
31. *Reddy A. N. K., Anand V., Khonina S. N., Podlipnov V. V., Juodkazis S.* // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — P. 143341–143348.
32. *Ding D.-S., Zhang W., Zhou Z.-Y., Shi S., Xiang G.-Y., Wang X.-S., Jiang Y.-K., Shi B.-S., Guo G.-C.* // Physical Review Letters. — 2015. — Feb. — Vol. 114, no. 5.
33. *Xie X., Chen Y., Yang K., Zhou J.* // Physical Review Letters. — 2014. — Dec. — Vol. 113, no. 26.
34. *Watanabe W., Asano T., Yamada K., Itoh K., Nishii J.* // Optics Letters. — 2003. — Dec. — Vol. 28, no. 24. — P. 2491.
35. *Fu S., Mahieu B., Mysyrowicz A., Houard A.* // Optics Letters. — 2022. — Sept. — Vol. 47, no. 19. — P. 5228.
36. *Kandidov V., Kosareva O., Golubtsov I., Liu W., Becker A., Akozbek N., Bowden C., Chin S.* // Applied Physics B: Lasers and Optics. — 2003. — Sept. — Vol. 77, no. 2/3. — P. 149–165.
37. *Кандидов В., Федоров В.* // Квантовая Электроника. — 2004. — Дек. — Т. 34, № 12. — С. 1163–1168.
38. *Сметанина Е., Компанец В., Чекалин С., Кандидов В.* // Квантовая Электроника. — 2012. — Окт. — Т. 42, № 10. — С. 913–919.

39. *Дергачев А., Ионин А., Кандидов В., Селезнев Л., Симицын Д., Сунчугашева Е., Шленов С.* // Квантовая Электроника. — 2013. — Янв. — Т. 43, № 1. — С. 29–36.
40. *Chekalin S. V., Dokukina A. E., Dormidonov A. E., Kompanets V. O., Smetanina E. O., Kandidov V. P.* // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. — 2015. — Apr. — Vol. 48, no. 9. — P. 094008.
41. *Shen Y.* — Wiley-Interscience, 2002.
42. *Ахманов С., Никитин С.* — Издательство Московского университета, 2004.
43. *Aközбек N., Iwasaki A., Becker A., Scalora M., Chin S. L., Bowden C. M.* // Physical Review Letters. — 2002. — Sept. — Vol. 89, no. 14.
44. *Stolen R. H., Tomlinson W. J., Haus H. A., Gordon J. P.* // Journal of the Optical Society of America B. — 1989. — June. — Vol. 6, no. 6. — P. 1159.
45. *Brabec T., Krausz F.* // Physical Review Letters. — 1997. — Apr. — Vol. 78, no. 17. — P. 3282–3285.
46. *Ашкрофт Н., Мермин Н.* — Мир, 1979.
47. *Келдыш Л.* // ЖЭТФ. — 1964. — Т. 47, № 5. — С. 1945–1957.
48. *Marburger J.* // Progress in Quantum Electronics. — 1975. — Apr. — Vol. 4. — P. 35–110.
49. *Malitson I. H.* // Journal of the Optical Society of America. — 1965. — Oct. — Vol. 55, no. 10. — P. 1205.
50. *Шленов С. А., Васильев Е. В., Чекалин С. В., Компанец В. О., Скиданов Р. В.* // ЖЭТФ. — 2021. — Т. 159, № 3. — С. 400–408.