

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

На правах рукописи
УДК 621.372; 621.373

Вислобоков Никита Юрьевич

**КАНАЛИРОВАНИЕ И СВЕРХУШИРЕНИЕ
ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА МОЩНЫХ ОПТИЧЕСКИХ
ИМПУЛЬСОВ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ
ПЛАЗМЫ В ПРОЗРАЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007

Работа выполнена на кафедре радиофизики физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук,
профессор А. П. Сухоруков

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
профессор В. А. Алешкевич

Доктор физико-математических наук,
профессор С. В. Сазонов

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники РАН

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2007 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д.501.001.67 в МГУ им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, ГСП 2, Ленинские Горы, МГУ, физический факультет.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан «_____» _____ 2007 г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета Д.501.001.67
кандидат физико-математических наук

А. Ф. Королев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В последние годы большой научный и практический интерес вызывают исследования нелинейного распространения сверхмощных ультракоротких оптических импульсов в прозрачных твёрдых телах, когда сильно проявляется влияние ионизационных процессов, но пробой вещества не наступает [1 - 4]. Особое внимание уделяется изучению каналирования электромагнитного излучения в диэлектриках типа сапфир и кварцевое стекло, широко применяющихся в лазерной физике. При превышении порога самофокусировки динамику распространения импульсных лазерных пучков во многом определяет генерация электронной плазмы. Плазма свободных электронов предотвращает коллапс электромагнитного поля в нелинейном фокусе и обеспечивает квазисолитонный или пульсирующий режим распространения [5]. Результаты таких исследований используются для создания лазеров и лазерных усилителей предельно высокой мощности [6].

Другой важной задачей современной лазерной физики и нелинейной оптики является генерация излучения с предельно широким континуальным частотным спектром в прозрачных диэлектриках, например, кварцевом стекле. В экспериментах по генерации суперконтинуума в кварцевом стекле наблюдалась асимметрия распределения спектральных компонент: практически все уширение простирается в область высоких частот [7 - 9]. Создание источников сверхширокополосного излучения позволяет значительно увеличить эффективность работы ряда спектральных приборов, информационных и волокооптических устройств, компрессоров оптических импульсов и т.д. [9 - 11]. Здесь также на первом плане находятся исследования распространения сверхмощных коротких импульсов в условиях генерации плазмы свободных электронов.

Однако, в силу весьма сложной динамики взаимодействия излучения с веществом при генерации электронной плазмы и наличия самых разнообразных

режимов, работы в этой области далеки от своего завершения. На первый план выходит анализ механизмов каналирования и сверхуширения в условиях конкуренции керровской и плазменной нелинейностей с учетом многофотонного поглощения и дисперсионных эффектов. Именно такой комплексный многофакторный подход к исследованию эволюции сверхкоротких оптических импульсов позволит выработать практические рекомендации для управления пространственно-временными и частотными характеристиками мощного лазерного излучения в нелинейных средах.

Цель работы.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование динамики распространения высокоинтенсивных фемтосекундных импульсов в прозрачных диэлектриках типа сапфир и кварцевое стекло с учётом вклада индуцированной электронной плазмы.

В соответствии с этим решались следующие задачи:

- разработка физической модели и создание программ для численного моделирования распространения мощного импульсного пучка в диэлектрике, учитывающей дифракцию, дисперсию, нелинейности третьего и высшего порядков, нелинейность и поглощение лазерной плазмы, образующейся при многофотонной, лавинной и туннельной фотоионизации;

- выявление механизмов каналирования сверхмощных оптических пучков в виде пространственных квазисолитонов и пульсирующих нелинейных волноводов в условиях лазерно-индуцированной ионизации диэлектрика;

- детальное изучение и объяснение причин сверхуширения исходного частотного спектра в кварцевом стекле одновременно в высокочастотную и низкочастотную области оптического диапазона.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые развита дифракционно-дисперсионная теория нелинейного распространения сверхмощного фемтосекундного оптического излучения в прозрачном кристалле с учётом влияния фотоионизационных процессов и индуцированной электронной плазмы;

- в диэлектриках типа сапфир и кварцевое стекло определены параметры излучения и среды, при которых происходит пространственная самолокализация излучения в виде квазисолитона на длинах более полутора сантиметра;

- доказано существование протяженного пульсирующего канала мощного лазерного пучка в кварцевом стекле на длинах до 50 мм формирующегося в результате баланса между керровской самофокусировкой и дефокусировкой, обусловленной индуцированной электронной плазмой;

- найден режим филаментации мощного излучения на несколько фрагментов, каждый из которых продолжает распространяться в пульсирующем (до 70 мм) или квазисолитонном (до 50 мм) режиме на расстояния, в несколько раз превышающие длину одиночного квазисолитона;

- впервые осуществлено сверхуширение частотного спектра лазерного излучения (исходная несущая частота – 800 нм) в кварцевом стекле как в сторону высоких, так и в сторону низких частот при более чем 10-и кратном превышении критической мощности самофокусировки.

Достоверность результатов диссертации обеспечена корректностью постановки задач, использованием обоснованных методов расчета, а также соответствием известных результатов данным проведенного автором численного моделирования при верификации численной модели.

Научная и практическая значимость работы:

- разработанная (3+1)-мерная модель, основанная на численном решении эволюционных уравнений по оригинальным алгоритмам и программа, позволяет описать динамику генерации электронной плазмы и распространение мощных ультракоротких лазерных импульсов в прозрачных диэлектриках типа сапфир и кварцевое стекло;

- каналирование оптического излучения может повысить эффективность работы лазерных усилителей и генераторов предельно высокой мощности;

- одновременная генерация низко- и высокочастотного континуального излучения в кварцевом стекле может найти разнообразные применения в спектроскопии, системах оптической связи и обработки информации, в технике сверхкоротких импульсов света и т.д.

Полученные результаты могут быть использованы и в других областях нелинейной оптики и лазерной физики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. захват лазерного пучка с мощностью большей мощности самофокусировки в пространственный квазисолитон происходит благодаря генерации плазмы свободных электронов, которая вносит дефокусирующую нелинейность и тем самым уравнивает керровскую самофокусировку. Длина квазисолитона в кварцевом стекле может достигать 15 мм при ширине пучка 50 мкм;

2. в пульсирующем канале высокоинтенсивный фемтосекундный импульсный пучок может распространяться, сохраняя свою форму, в кварцевом стекле на расстояния до 50 мм, что в несколько раз больше, чем в квазисолитонном режиме;

3. при распространении мощного лазерного излучения в квазисолитонном и пульсирующем режимах частотный спектр излучения изменяется незначительно, величина плотности электронной плазмы остаётся, как минимум, на порядок величины меньше критического значения, при котором возможно появление структурных изменений в кристалле диэлектрика;

4. распространение лазерного излучения с начальной длиной волны 800 нм при 30-ти кратном превышении мощности самофокусировки в кварцевом стекле сопровождается значительным уширением частотного спектра излучения как в сторону высоких, так и в сторону низких частот;

5. генерация континуальных компонент лазерного излучения обусловлена сильным воздействием на импульсный пучок плазмы, генерируемой в результате нестационарных индуцированных ионизационных процессов, что в свою очередь приводит к динамической фазовой самомодуляции и сверхуширению частотного спектра излучения.

Апробация работы.

Материалы диссертации докладывались на VIII Всероссийской школе-семинаре “Волновые явления в неоднородных средах” (Московская область, 2002 г.), IX Всероссийской школе-семинаре “Физика и применение микроволн” (Московская область, 2003 г.), XI Международной конференции по лазерной оптике (Санкт-Петербург, 2003 г.), IX Всероссийской школе-семинаре “Волновые явления в неоднородных средах” (Московская область, 2004 г.), X Всероссийской школе-семинаре “Физика и применение микроволн” (Московская область, 2005 г.), Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике (Санкт-Петербург, 2005 г.), V Международной конференции по фотонике, устройствам и системам (Прага, Чехия, 2005 г.), Международном конгрессе по оптике и оптоэлектронике (Варшава, Польша, 2005 г.), X Всероссийской школе-семинаре “Волновые явления в неоднородных средах” (Московская область, 2006 г.), VI Международной конференции “Лазерная физика и оптические технологии” (Гродно, Беларусь, 2006 г.).

Материал диссертации докладывался и обсуждался на семинарах кафедры радиофизики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Публикации.

Основные результаты диссертации изложены в 16 опубликованных работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, приложения, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 156 наименований. Общий объем работы составляет 143 страницы включая 38 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится обзор литературы, обосновывается актуальность избранной темы, формулируются цель работы, её задачи, защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость, описывается структура диссертации.

В первой главе исследуется взаимодействие высокоинтенсивного ($I \geq 1 \text{ ТВт/см}^2$) фемтосекундного лазерного импульса с диэлектрической средой и индуцированной электронной плазмой при различных начальных параметрах излучения и среды. На основе анализа результатов исследования показано, что при динамическом балансе между самофокусировкой и дефокусировкой на индуцированной электронной плазме происходит захват высокоинтенсивного светового излучения в долгоживущий квазисолитон. Рассматриваются наиболее значимые результаты исследования по эволюции долгоживущих фемтосекундных квазисолитонов в сапфире и кварцевом стекле. Определяются параметры лазерного излучения и среды, наиболее благоприятные для формирования квазисолитона.

В разделе 1.1. представлено селективное описание влияния таких процессов, как дифракция, дисперсия групповой скорости, самофокусировка, обусловленная керровской нелинейностью, многофотонная и лавинная ионизации, туннелирование на эволюцию пространственно временного профиля лазерного пучка, распространяющегося в кристалле диэлектрика при различных параметрах лазерного излучения.

В разделе 1.2. используя оригинальное комбинирование ряда численных методов, разрабатываются физическая и численная модели распространения мощного импульсного пучка в диэлектрике с учётом дифракции, дисперсии,

керровской нелинейности, вклада нелинейности лазерной плазмы и ионизации (многофотонной (МФИ) и лавинной ионизаций).

Для корректного описания процесса эволюции импульсного пучка необходимо модифицировать традиционно используемое нелинейное уравнение Шредингера с учетом ионизации:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{i}{2k} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \hat{T}^{-1} E - i \frac{\beta_D}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial \tau'^2} + P_{nl} \\ P_{nl} = ik_0 n_2 \hat{T} |E|^2 E - \frac{\sigma_{IBS}}{2} \hat{T}^{-1} (1 + i\omega_0 \tau_c) \rho E - \frac{1}{2} \frac{W_{MPI} U}{|E|^2} E \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} = W_{MPI} + \eta \rho |E|^2 - \frac{\rho}{\tau_r} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь E – амплитуда напряжённости электрического поля, z – продольная координата, r – поперечная координата, оператор $\hat{T} = (1 + i/\omega_0 \cdot \partial/\partial \tau)$ - оператор, учитывающий влияние конечной ширины спектра на дифракцию и самовоздействие, $\tau = t - z/v_g$ – время в движущейся системе координат, β_D – коэффициент дисперсии групповой скорости, ω_0 – несущая частота лазерного излучения, τ_c – характерное время столкновений электронов, ρ – плотность свободных электронов в среде, $W_{MPI} = (\sigma_m I^m \rho_{at})$ – скорость многофотонной ионизации, σ_m – коэффициент МФИ, ρ_{at} – плотность атомов, m – порядок многофотонного перехода, U – ширина запрещённой зоны диэлектрика. Поперечное сечение обратного тормозного излучения σ_{IBS} , следуя модели Друдде-Стюарта:

$$\sigma_{IBS} = k\omega_0 \tau_c / n_0^2 \rho_c (1 + \omega_0^2 \tau_c^2). \quad (2)$$

На входе аксиальносимметричный гауссов импульсный пучок:

$$E(r, 0, t) = \exp\left(-r^2/w_0^2 - t^2/\tau_p^2\right), \quad (3)$$

где w_0 – начальный радиус пучка, а τ_p – длительность импульса.

При верификации модели ряд расчётов производился с использованием параметров, соответствующих условиям экспериментов, известных из публикаций. Полученные результаты контрольных расчётов соответствовали данным сопоставленных экспериментов.

Далее, на примере сапфира, показано, что при средних интенсивностях падающего излучения в диапазоне величин $I_0 = 1 \div 10 \text{ ТВт/см}^2$ форма пространственно-временной огибающей интенсивности при распространении на одну дифракционную длину заметных искажений не претерпевает. Имеет место небольшой рост пиковой интенсивности, тем больший, чем меньше диаметр падающего пучка. Рост плотности свободных электронов таков, что её величина оставалась как минимум на порядок меньше критического значения, при котором начинаются необратимые структурные изменения в кристалле диэлектрика. Однако уже при начальной интенсивности 12 ТВт/см^2 форма огибающей интенсивности в процессе распространения импульса становится заметно асимметричной.

В разделе 1.3. на основе проведённых нами расчётов показано, что благодаря дефокусирующему вкладу индуцированной электронной плазмы, увеличение пиковой интенсивности ультракоротких импульсов до 1 ТВт/см^2 и более и одновременное с этим уменьшение его длительности до величины в несколько десятков фемтосекунд при начальной ширине пучка, не превышающей 70 мкм , способствует образованию квазисолитона (не повреждая при этом кристалл диэлектрика), который распространяется в диэлектрике, как минимум, на одну дифракционную длину (рис. 1, $L_{df} = 14.6 \text{ мм.}$), фазовая модуляция и спектр распространяющегося квазисолитона фактически не изменяются.

Приставка “квази-“ в данном случае означает, что импульс распространяется с незначительными изменениями формы огибающей интенсивности, что делает его похожим на солитон, правда на ограниченном расстоянии. Заметим, что в твердотельных материалах узкий высокоинтенсивный квазисолитон, распространяющийся на расстояние

более 1 мм, уже считается долгоживущим. В твердых средах захватить лазерное излучение в квазисолитон гораздо сложнее, чем, например, в воздухе или жидкости, в том числе и потому, что здесь вклад керровской нелинейности на несколько порядков больше.

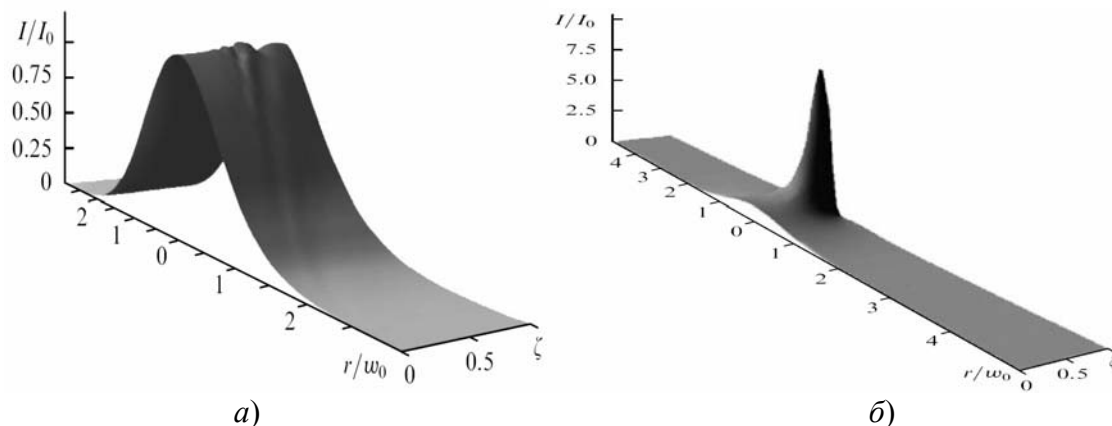


Рис. 1. Изменение огибающей пучка в центре импульса, распространяющегося вдоль продольной координаты ζ в кварцевом стекле, с учётом (а) и без учёта (б) ионизации ($I_0 = 5.71$ ТВт/см², $w_0 = 50$ мкм, $\tau_p = 70$ фс., $\zeta = z/L_{df}$, $L_{df} = 14.6$ мм).

В разделе 1.4. на основе результатов численного моделирования проведена сравнительная оценка селективного вклада индуцированных ионизационных процессов в нелинейную эволюцию лазерных импульсов. Показано, что ослабление самофокусировки благодаря плазменной дефокусировке лазерного пучка больше, чем за счёт многофотонного поглощения.

В разделе 1.5. определяются начальные значения интенсивности, длительности импульса и ширины пучка, необходимые для образования высокоинтенсивного фемтосекундного квазисолитона в сапфире и кварцевом стекле.

Показано, что слабая нормальная дисперсия способствует квазисолитонному распространению лазерного пучка, оказывая на него стабилизирующее влияние. Кроме того, при малом значении β_D отмечается снижение чувствительности квазисолитона к начальным параметрам импульса. Полученные результаты и их анализ приводят к выводу, что осуществить захват излучения в солитон легче в кварцевом стекле, чем в сапфире.

Отметим, что для формирования квазисолитона в реальном эксперименте важное значение имеет ширина диапазона начальных пиковых интенсивностей, при которых происходит каналирование в диэлектрике. В кварцевом стекле, например, при $\tau_p = 70$ фс, $w_0 = 50$ мкм наблюдается наиболее широкий диапазон начальных интенсивностей излучения для захвата излучения в квазисолитон ($4.1\text{--}5.7$ ТВт/см²).

Исследования, результаты которых изложены во **второй главе**, нацелены на то, чтобы найти способ значительно увеличить “время жизни” (расстояние распространения) мощного фемтосекундного квазисолитона, распространяющегося в прозрачном диэлектрике. После детального теоретического анализа полученных в диссертации результатов установлено, что более продолжительное каналирование достигается при возбуждении пульсирующего канала распространения, при котором пучок претерпевает квазипериодические небольшие изменения при сохранении формы огибающей.

Кроме того, в этой главе изучена генерации серии мощных сверхкоротких импульсных пучков (мощность одного пучка $P > P_{cr}$, P_{cr} – критическая мощность самофокусировки, длительность менее 50 фс), формирующихся при расщеплении начального фемтосекундного лазерного импульса. Такие структуры могут распространяться, например, в кварцевом стекле в пульсирующем или квазисолитонном режимах на расстояния 70 мм и 30 мм соответственно. Особенно важно то, что расстояние между ними таково, что каждый субимпульс, распространяется в плазме, созданной предыдущим фрагментом.

В **разделе 2.1.** рассматривается процесс распространения мощного лазерного пучка в кристалле диэлектрика на нескольких дифракционных длинах. На рисунке 2 изображено изменение огибающей пучка в центре импульса, распространяющегося в кварцевом стекле вдоль продольной координаты на расстояние $z = 4L_{df} = 58.4$ мм. До $z \approx L_{df}$ лазерный пучок распространяется как квазисолитон (изображённый на рис. 1а). Однако далее

ситуация изменяется: интенсивность пучка с расстоянием постепенно уменьшается, а ширина пучка увеличивается. В кварцевом стекле световые пучки претерпевали меньшие изменения, чем в сапфире. Добиться увеличения “времени жизни” фемтосекундного квазисолитона простым увеличением начальной интенсивности не удалось: динамическое равновесие между фокусирующими и дефокусирующими силами не устанавливалось.

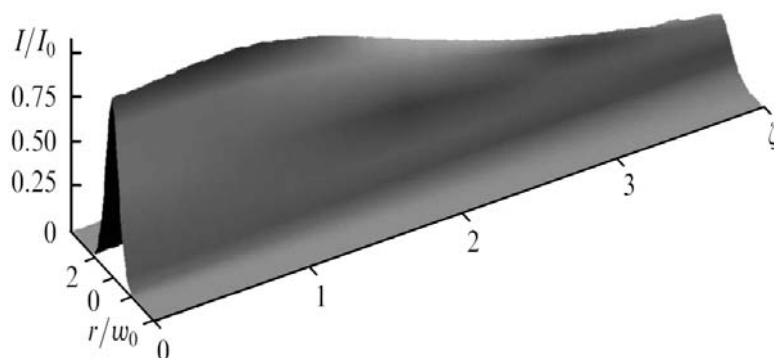


Рис. 2. Изменение огибающей пучка в центре импульса, распространяющегося вдоль продольной координаты $\zeta = z/L_{df}$ в кварцевом стекле до $\zeta = 4$ ($I_0 = 5.71$ ТВт/см², $w_0 = 50$ мкм и $\tau_p = 70$ фс, $L_{df} = 14.6$ мм).

Детальный анализ закономерностей распространения коротких импульсов показал, что сохранения формы на сравнительно больших расстояниях можно добиться, если импульсный пучок будет последовательно переходить из фазы фокусировки в фазу дефокусировки и наоборот. Эта идея была подтверждена при численном моделировании, когда был найден режим захвата излучения в пульсирующий канал (рис. 3). На рисунке 3 показана

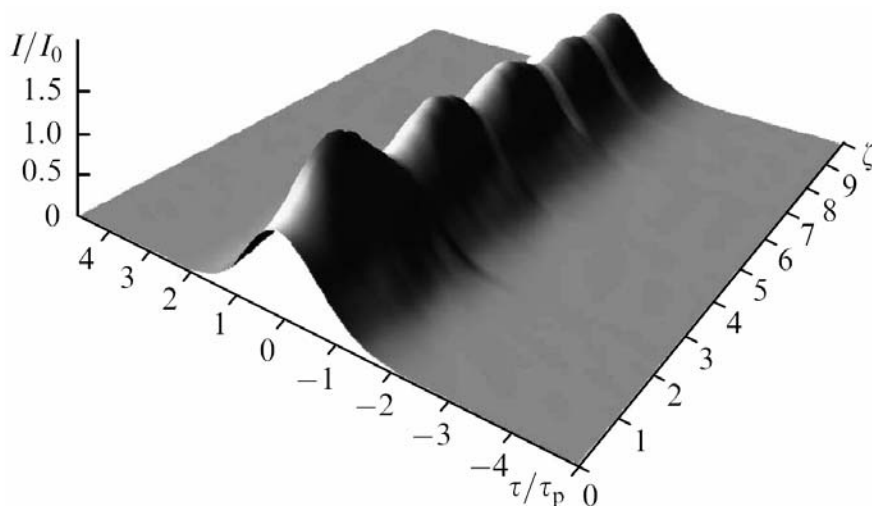


Рис. 3. Пространственно-временное распределение огибающей интенсивности при распространении импульса на расстояние $10L_{df}$ в кварцевом стекле в пульсирующем канале.

динамика изменения огибающей пучка в центре импульса, распространяющегося вдоль продольной координаты ζ при распространении высокоинтенсивного 70-и фемтосекундного импульса в кварцевом стекле на расстояние 10 дифракционных длин (здесь $10L_{df} = 52.67$ мм, начальная ширина пучка $w_0 = 30$ мкм). Видно, что каналирование пучка происходит в пульсирующем режиме. Следует подчеркнуть, что при распространении в пульсирующем канале форма пучка сохраняется.

Описанный выше режим каналирования наблюдался и при других параметрах излучения, однако длина каналирования и количество перефокусировок сократилось. В ряде случаев был отмечен рост интенсивности лазерного излучения вплоть до таких значений, когда для эволюции мощного светового излучения в диэлектриках становится заметным вклад туннелирования фотоиндуцированных электронов из валентной зоны, через запрещённую, в зону проводимости.

В разделе 2.2. кратко описана модификация разработанной модели, когда необходимо учитывать одновременно различные механизмы лазерно-индуцированной ионизации: многофотонный, лавинный и туннельный. Обобщение теории приводит к замене скорости многофотонной ионизации W_{MPI} скоростью фотонной ионизации в поле сильной электромагнитной волны W_{PI} .

Наилучшее соответствие численных расчётов с экспериментальными данными при интересующих нас условиях было достигнуто при вычислении W_{PI} в соответствии с теорией Келдыша:

$$W_{PI}(|E|) = \frac{2\omega_0}{9\pi} \left(\frac{\omega_0 m^*}{\hbar\sqrt{\Gamma}} \right)^{3/2} Q(\gamma, x) \exp\{-\alpha \text{int} \langle x+1 \rangle\}. \quad (4)$$

Здесь параметр $\gamma = \omega_0 / eE \sqrt{m^* U}$; $m^* = 0.634 m_e$ - эффективная масса электрона и дырки, m_e - масса электрона (более подробно вычисление по формуле (4) описано в **разделе.2.2** диссертационной работы). Кроме того, в соответствии с результатами ряда известных работ учтём нелинейность пятого порядка.

В итоге самосогласованная система эволюционных уравнений для огибающей напряженности электрического поля УКИ в диэлектрике имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{i}{2k} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \hat{T}^{-1} E - i \frac{\beta_{D2}}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial \tau^2} + P_{nl} \\ P_{nl} = ik_0 n_2 \hat{T} |E|^2 E + ik_0 n_4 \hat{T} |E|^4 E - \frac{\sigma_{IBS}}{2} \hat{T}^{-1} (1 + i\omega_0 \tau_c) \rho E - \frac{1}{2} \frac{W_{PI} U}{|E|^2} E, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} = W_{PI} + \eta |E|^2 \rho - \frac{\rho}{\tau_r} \end{cases}, \quad (5)$$

где n_4 - коэффициент нелинейности поляризации среды 5-го порядка по полю. Последнее слагаемое во втором уравнении системы (5) описывает теперь фотопоглощение, то есть энергетические потери оптического поля за счёт всех механизмов ионизации, а не только многофотонное поглощение.

В **разделе 2.3.** исследуются особенности распространения УКИ в диэлектриках при такой начальной мощности излучения, когда в эволюцию импульсного пучка вносят значимый вклад все три основных механизма фотоионизации в поле лазерной волны.

Особенно интересен случай, когда мощный импульсный пучок, распадается в кварцевом стекле на несколько сверхкоротких субимпульсов и субпучков, которые следуют друг за другом с интервалом в несколько фемтосекунд (рис. 4). Поэтому каждый последующий субимпульс следует в сгустке плазмы свободных электронов, созданного предыдущими субимпульсами.

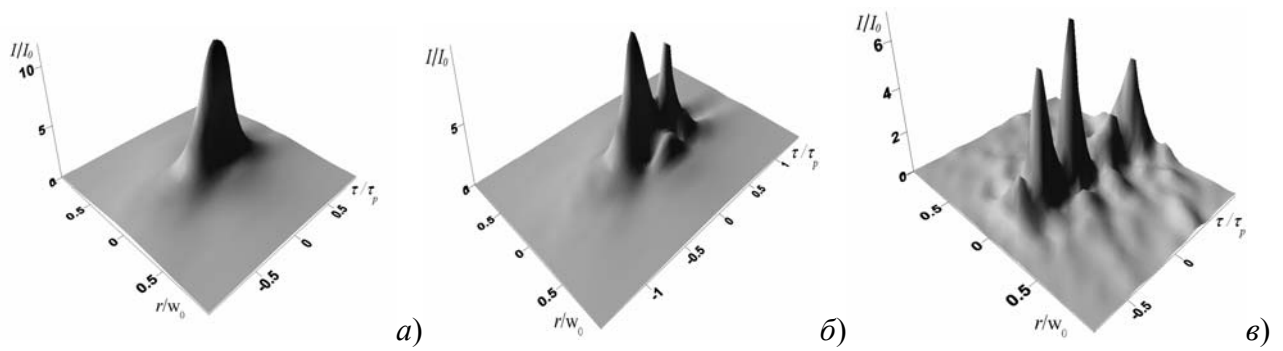


Рис. 4. Картина расслоения сверхмощного импульсного пучка ($P_{in}/P_{cr} = 9$, $T = 150$ фс) на субимпульсы в кварцевом стекле. Распределение интенсивности в диэлектрике показано на расстояниях *a)* $\zeta = 0.15$, *б)* $\zeta = 0.3$, *в)* $\zeta = 0.53$ ($\zeta = z/L_{df}$, $w_0 = 30$ мкм, $L_{df} = 5.267$ мм).

Такой режим распространения возникал при уровне входной мощности $P_{in}/P_{cr} \approx 3 \div 5$ (точное значение обусловлено по большей части выбором τ_p) и начальных длительностях импульса порядка $\tau_p \approx 100 \div 150$ фс.

Показано, что при определённых параметрах эти сверхкороткие высокоинтенсивные субимпульсы могут распространяться в кристалле кварцевого стекла в квазисолитонном режиме дальше, чем на 30 мм, и в пульсирующем канале, сохраняя форму пучка, на расстояние порядка 70 мм.

Предложен способ управления количеством и параметрами образующихся субимпульсов за счёт варьирования начальных параметров импульсного лазерного излучения: шириной пучка, длительностью импульса, мощностью лазерного излучения.

Третья глава посвящена изучению генерации континуального излучения сверхмощным ($P_{in}/P_{cr} > 10$) фемтосекундным импульсом в оптически однородных средах. Особенно актуальна сейчас генерация суперконтинуума в широко распространённых прозрачных диэлектриках типа кварцевое стекло. Основным недостатком уже наблюдавшихся в кварцевом стекле континуальных спектров (при облучении его мощным лазерным излучением на длине волны 800 нм) является резкая асимметричность: большое уширение спектра в область высоких частот и весьма незначительное уширение в низкочастотную область (рис.6 *а*). В данной главе представлены результаты

исследования нелинейных механизмов сверхширения спектра сверхмощного фемтосекундного лазерного импульса в кварцевом стекле.

В разделе 3.1. изучается эволюция сверхмощных фемтосекундных импульсов в кварцевом стекле, когда динамическая конкуренция между самофокусировкой и дефокусировкой, обусловленной ионизацией, возникает уже на входе в диэлектрик. Генерация суперконтинуума мощным фемтосекундным лазерным излучением в сплошной прозрачной среде есть следствие самомодуляции фазы светового поля и возникновения её временного градиента, обусловленного воздействием индуцированных фотоионизационных процессов (многофотонная, лавинная и туннельная ионизации) на распространяющееся лазерное излучение. В то же время известна роль ширины запрещённой зоны диэлектрика как фактора, ограничивающего возможность сверхширения спектра ($U \geq 4.7$ эВ для генерации континуального спектра). Кварцевое стекло обладает рядом преимуществ: распространённый и недорогой материал, большая для прозрачного диэлектрика запрещённая зона ($U = 9$ эВ), возможность волноводного каналирования сверхмощного излучения на сравнительно большие расстояния. Поэтому кварцевое стекло может стать одним из наиболее перспективных материалов для генерации суперконтинуума.

В разделе 3.2. приведены результаты численного исследования динамики изменения пространственно-временной огибающей и спектрального профиля сверхмощного ультракоротких импульсов в кварцевом стекле.

Наиболее интересен и важен случай эволюции 50 фс лазерного импульса шириной $w_0 = 30$ мкм при мощности $P_{in}/P_{cr} = 30$. В результате филаментации импульсный пучок теряет около 40% своей начальной энергии и расслаивается на субимпульсы и субпучки, причем почти вся энергия лазерного излучения локализуется в двух импульсных пучках.

Как показало моделирование распространения сверхмощного излучения расслоение пучка сопровождается резким уширением частотного спектра как в сторону высоких, так и в сторону низких частот (рис. 5 б), что отличает его от случая генерации континуального спектра при небольшом превышении порога

самофокусировки (рис. 5 а). Спектральные структуры, аналогичные изображённому на рисунке 5 а, наблюдались экспериментально в кварцевом стекле.

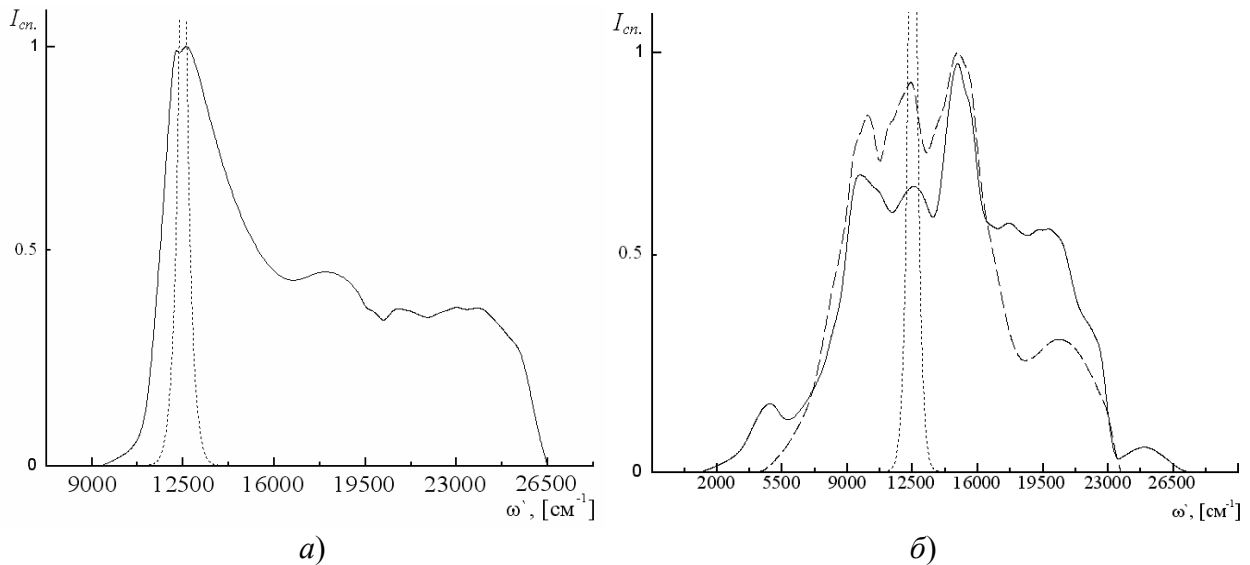


Рис. 5. (а) Высоочастотный континуальный спектр, генерируемый 140 фс импульсом в кварцевом стекле при $P_{in}/P_{cr} = 1.1$. (б): Суперконтинуальный спектр, генерируемый импульсами длительностью 50 фс (сплошная кривая) и 150 фс (штриховая кривая) в кварцевом стекле при $P_{in}/P_{cr} = 30$ (пунктирной кривой изображён исходный спектр лазерного импульса, $\omega' = 1/\lambda$, $\omega'_0 = 12500 \text{ см}^{-1}$).

Отметим, что для лазерного импульса с начальной длительностью $\tau_p = 50$ фс полученное уширение спектра в сторону низких частот было больше, чем для $\tau_p = 150$ фс (см. рис. 5 б). Кроме того, с уменьшением начальной длительности импульса от 150 фс до 50 фс – увеличился интервал, на протяжении которого вдоль продольной оси ζ наблюдается резкое уширение частотного диапазона импульсного лазерного излучения.

Раздел 3.3. посвящён анализу физической природы процессов, приводящих к генерации континуальных компонент частотного спектра. Полученное высоко- и низкочастотное уширение спектра объясняется нелинейной фазовой модуляцией $\varphi_{nl} = 2\pi/(\lambda_0) \int_0^L \Delta n dz$. С производной (градиентом) фазы связана мгновенная частота $\Delta\omega(r, \tau) = \partial\varphi_{nl}(r, \tau)/(\partial\tau)$, которая и определяет уширение спектра. Очевидно, сверхуширение обязано формированию крутых фронтов на

огибающей лазерного импульса, в частности, под воздействием фотоионизационных процессов, обуславливающих резкий скачок фазы.

Неоднократно наблюдавшиеся в диэлектриках только высокочастотные уширения объясняются тем, что изменение фазы на заднем фронте импульса обусловлено преимущественно ионизацией: φ_{nl} резко спадает за время $\tau_{f-} \approx 1.5$ фс. Скорость изменения φ_{nl} переднего фронта, идущего в нейтральной диэлектрической среде, значительно больше (как правило: $\tau_{f+} \geq 10$ фс). Даже если пик импульсного пучка расслаивается на две или более частей, эти части распространяются в непосредственной близости друг от друга, и уширение частотного диапазона обусловлено крутизной переднего фронта первого субимпульса и заднего фронта второго.

В нашем случае, когда через кристалл диэлектрика проходит сверхмощный лазерный импульс, его пространственно-временной профиль при определённых условиях (соответствующая область параметров приводится в диссертационной работе) принимает специфическую форму: основная часть энергии лазерного излучения концентрируется в двух субимпульсных пучках. Хвостовой субимпульс находится на достаточном расстоянии от предыдущих, так что влияние плазмы на его параметры через дефокусировку было незначительным, и он мог принести свой заметный вклад в генерацию континуального излучения в кварцевом стекле.

Передний фронт первого субимпульса распространяется в нейтральной среде – рост фазы, обусловленный, по большей части, самофокусировкой, здесь происходит довольно медленно за время порядка $10 \div 35$ фс в отличие от заднего фронта, где изменение фазы обусловлено фотоионизационными процессами, и φ_{nl} спадает за время порядка 1.5 фс. Частотный спектр, генерируемый этим филаментом, представлен на рисунке 6а. Виден достаточно широкий пьедестал уширения спектра в сторону высоких частот и почти отсутствующее уширение в сторону низких.

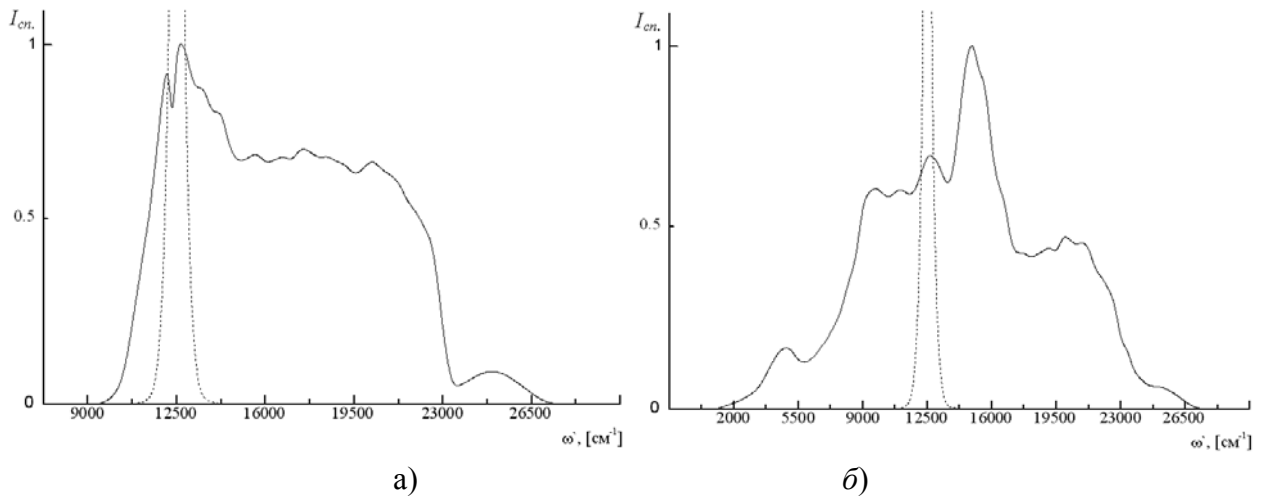


Рис. 7. Континуальный спектр, генерируемый первым (а) и вторым (б) осевыми филаментами, образовавшимися при распространении в кварцевом стекле сверхмощного ($P_{in}/P_{cr} = 30$) ультракороткого лазерного импульса (на входе $\tau_p = 50$ фс, $w_0 = 30$ мкм); $\omega'_0 = 12500$ см^{-1} , $\omega' = 1/\lambda$.

Хвостовой субимпульс, распространяющийся в поле первого субимпульса, образуется в результате взаимодействия мощного лазерного излучения с диэлектриком и электронной плазмой, поэтому ионизационные процессы играют ведущую роль в формировании как его переднего фронта, так и заднего (для хвостового субимпульса $\tau_{f+} \approx \tau_{f-} \approx 1.5 \div 3$ фс). Это фактически определяет динамику процесса самомодуляции фазы. В результате происходит значительное уширение частотного спектра этого филамента как в область высоких частот, так и в сторону низких (рис. 6 б).

Именно за счёт резкого скачка фазы на переднем фронте последнего субимпульсного пучка мы и наблюдаем на рисунке 5 б континуальное уширение интегрального частотного диапазона лазерного импульса в сторону низких частот.

Отметим, что получение суперконтинуального спектра стало возможным только тогда, когда были учтены туннельная и лавинная ионизации, а также нелинейность пятого порядка. Наблюдаемый процесс деформации пространственно - временного профиля лазерного импульса качественно аналогичен филаментации лазерного излучения в воздухе, который также сопровождается генерацией суперконтинуума.

Максимально достигаемое значение плотности электронной плазмы при численном моделировании в диссертационной работе оставалось, как минимум, на порядок меньше критического значения (для кварцевого стекла, например, $\rho_{cr} = 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а $\rho_{max} = 1.9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$), превышение которого влечёт за собой внесение структурных изменений в оптическом кристалле.

В **приложении А** численно исследуется влияние фотоиндуцированных поперечных и продольных неоднородностей показателя преломления среды на процесс распространения мощного УКИ в среде с керровской нелинейностью. Показано, что отражение от нелинейного фокуса зависит от величины отношения P_{in}/P_{cr} . Даже в отсутствие ионизации коэффициент при значении $P_{in}/P_{cr} < 20$ отношение интенсивностей отраженной и падающей волн не превышает 5%, а при $P_{in}/P_{cr} > 30$ пиковые значения этого отношения могут достигать 10%.

В **заключении** сформулированы основные положения и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны оригинальная модель распространения мощного импульсного пучка в диэлектрике, учитывающая дифракцию, дисперсию, нелинейности третьего и пятого порядков, вклад дефокусирующей нелинейности лазерной плазмы и кинетику многофотонной, лавинной и туннельной фотоионизации в поле лазерного излучения.

2. На основе предложенной модели выполнено численное моделирование сложных динамических процессов каналирования пучков и сверхуширения частного спектра.

3. Выявлено, что при балансе между самофокусировкой и дефокусировкой на электронной плазме происходит захват лазерного излучения в пространственный квазисолитон. Определены условия формирования квазисолитона в сапфире и кварцевом стекле.

4. Показано, что слабая нормальная дисперсия групповой скорости оказывает стабилизирующее влияние на формирование квазисолитона. Отмечено, что захватить излучение в солитон легче в кварцевом стекле, чем в сапфире.

5. Установлено, что при соотношении входной и критической мощностей $3 < P_{in}/P_{cr} < 5$, импульсный пучок распространяется в нелинейном диэлектрике в виде пульсирующего канала, в котором наблюдается поочерёдное преобладание самофокусировки или дефокусировки на индуцированной электронной плазме; в канале длиной 50 миллиметров форма пучка сохраняется.

6. Представлен способ генерации серии сверхкоротких (длительностью менее 50 фс) оптических субимпульсов, распространяющихся в кристалле диэлектрика с интервалом несколько фемтосекунд, после распада под воздействием фотоионизации мощного фемтосекундного импульса ($3 < P_{in}/P_{cr} < 10$, $\tau_p = 100 \div 150$ фс). Показано, что субимпульсы продолжают распространяться в кристалле кварцевого стекла в квазисолитонном режиме на 30 мм или в пульсирующем канале на расстояние порядка 70 мм.

7. Показана возможность генерации одновременно низко- и высокочастотного континуального излучения сверхмощным фемтосекундным лазерным импульсом ($P_{in}/P_{cr} \approx 30$, $\lambda_0 = 800$ нм) в кварцевом стекле. Ранее, как нам известно, наблюдалась генерация континуального спектра в кварцевом стекле с заметным уширением спектра только в высокочастотную область.

Отмечено, что для лазерного импульса с начальной длительностью $\tau_p = 50$ фс уширение спектра в сторону низких частот было больше, чем для $\tau_p = 150$ фс.

8. Анализ динамики генерации континуальных компонент показал, что полученное высоко- и низкочастотное уширение спектра становится возможным благодаря резкому изменению фазы после распада лазерного импульса на субимпульсы и субпучки под воздействием фотоионизационных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Couairon, L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, and A. Mysyrowicz. *Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses* // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 125435-1.
2. М.Б. Виноградова, О.В. Руденко, А.П. Сухоруков. *Теория волн*. М.: “Наука”. 1990.
3. Ю.С. Кившарь, Г.П. Агравал. *Оптические солитоны*. М.: “Физматлит”. 2005.
4. С.А. Ахманов, В.А. Выслоух, А.С. Чиркин. *Оптика фемтосекундных лазерных импульсов*. М.: “Наука”. 1988.
5. Zh. Wu, H. Jiang, L. Luo, H. Guo, H. Yang, and Q. Gong. *Multiple foci and a long filament observed with focused femtosecond pulse propagation in fused silica* // Opt. Lett. 2002. V. 27. № 6. P. 448.
6. J. Philip, C. D’Amico, G. Che’riaux, A. Couairon, B. Prade, and A. Mysyrowicz. *Amplification of femtosecond laser filaments in Ti:sapphire* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. P. 163901-1.
7. A. Brodeur and S.L. Chin. *Ultrafast white-light continuum generation and self-focusing in transparent condensed media* // J. Opt. Soc. Am. B. 1999. V. 16. № 4. P. 637.
8. A.K. Dharmadhikari, F.A. Rajgara, D. Mathur. *Systematic study of highly efficient white light generation in transparent materials using intense femtosecond laser pulses* // Appl. Phys. B. 2005. V. 80. №.1. P. 61.

9. А.М. Жёлтиков. *Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами* // УФН. 2006. Т. 176. №. 6. С. 623.

10. K. Shi, P. Li, Sh. Yin, Zh. Liu. *Chromatic confocal microscopy using supercontinuum light* // Optics Express. 2004. V. 12. №. 10. P. 2096.

11. A. Couairon, J. Biegert, C. Hauri, W. Kornelis, F.W. Helbing, U. Keller, A. Mysyrowicz. *Pulse self-compression of ultrashort laser pulses down to one optical cycle by filamentation* // J. Modern Optics. 2006. V. 53. P. 75.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Н.Ю. Вислобоков, Т.В. Смирнова, А.П. Сухоруков, О.М. Федотова, О.Х. Хасанов. *Процессы, индуцированные мощными фемтосекундными импульсами в объемных диэлектриках* // Известия РАН. Сер. физическая. 2002. Т. 66. №. 12. С. 1827.

2. Т.В. Смирнова, О.М. Федотова, О.Х. Хасанов, Н.Ю. Вислобоков, А.П. Сухоруков. *Распространение тераваттных фемтосекундных импульсов в широкозонных диэлектриках* // Известия РАН. Сер. физическая. 2003. Т. 67. №. 12. С. 1754.

3. А.П. Сухоруков, Н.Ю. Вислобоков, О.М. Федотова, О.Х. Хасанов, Т.В. Смирнова. *Квазисолитонное распространение мощного оптического излучения в прозрачных диэлектриках* // Известия РАН. Сер. физическая. 2004, Т. 68. №. 12. С. 1740.

4. Н.Ю. Вислобоков *Квазисолитонное и многофокусное распространение высокоинтенсивных лазерных импульсов в стекле BK7* // Вестник ВГУ. 2006. Т. 2. №.40. С. 120.

5. Н.Ю. Вислобоков. *Квазисолитонное и многофокусное распространение высокоинтенсивных лазерных импульсов в кварцевом стекле* // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. №. 8. С. 773.

6. О.Х. Хасанов, Т.В. Смирнова, О.М. Федотова, А.П. Сухоруков, Н.Ю. Вислобоков. *Распространение мощного светового импульса с учетом*

отражения от нелинейного фокуса // Известия РАН. Сер. физическая. 2006. Т. 70. №. 12. С. 1740.

7. Н.Ю. Вислобоков, Т.В. Смирнова, А.П. Сухоруков, О.М. Федотова, О.Х. Хасанов. *Процессы, индуцированные мощными фемтосекундными импульсами в объемных диэлектриках* // Труды VIII Всероссийской школы-семинара “Волновые явления в неоднородных средах”, Красновидово. 2002. Ч. 1. С. 31.

8. Т.В. Смирнова, О.М. Федотова, О.Х. Хасанов, Н.Ю. Вислобоков, А.П. Сухоруков. *Распространение тераваттных фемтосекундных импульсов в широкозонных диэлектриках* // Труды IX Всероссийской школы-семинара “Физика и применение микроволн”, Звенигород. 2003. Ч. 2. С. 108.

9. O.M. Fedotova, T.V. Smirnova, O.K. Khasanov, V.E. Gruzdev, V.V. Temnov, K. Sokolovski-Tinten, K. Rethfeld, D. von der Linde, A.P. Sukhorukov, N.Yu. Vislobokov. *Intense femtosecond pulse propagation in bulk dielectrics* // Technical Program of XI Conference on Laser Optics, St. Petersburg, Russia, June 30 – July 4. 2003. P. 72.

10. О.Х. Хасанов, Т.В. Смирнова, О.М. Федотова, А.П. Сухоруков, Н.Ю. Вислобоков. *Распространение мощного светового импульса с учетом отражения от нелинейного фокуса* // Труды IX Всероссийской школы-семинара “Волновые явления в неоднородных средах Волны-2004” Моск. обл., 24 - 29 мая 2004 г. С.27.

11. A.P. Sukhorukov, N.U. Vislobokov, T.V. Smirnova, O.M. Fedotova, O.K. Khasanov. *Waveguide propagation of laser pulses in dielectrics with plasma generation* // Technical Digest of International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO - 2005), St. Petersburg, Russia, May 11-15, 2005. P. 67. Thesis IThS34.

12. A.P. Sukhorukov, N.Yu. Vislobokov, O.K. Khasanov, T.V. Smirnova. *Comparative nonlinear dynamics of Gauss and Bessel-Gauss pulses in Kerr-media with saturable nonlinearity* // Technical Digest of International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO - 2005), St. Petersburg, Russia, May 11-15, 2005. P. 152. Thesis LSuM30.

13. A.P. Sukhorukov, N.Yu. Vislobokov, O.K. Khasanov, T.V. Smirnova, O.M. Fedotova. *Quasi-soliton regime of high-intensive pulse propagation in bulk dielectrics* // Book of abstracts of the 5th International Conference on Photonics, Devices and Systems, June 8-11, 2005, Prague, Czech Republic. P. 207.

14. O.K. Khasanov, T.V. Smirnova, O.M. Fedotova, A.P. Sukhorukov, N.U. Vislobokov. *Powerful light pulse self-reflection from nonlinear focus at propagation in Kerr dielectrics* // Int. Congress on Optics and Optoelectronics. Warsaw, Poland. 28 Aug. – 2 Sept. 2005. №. 5949-48. P. 82.

15. А.П. Сухоруков, Н.Ю. Вислобоков, О.М. Федотова, О.Х. Хасанов, Т.В. Смирнова. *Распространение высокоинтенсивных лазерных импульсов в кварцевом стекле* // Труды X Всероссийской школы-семинара “Физика и применение микроволн”, Звенигород, 23-28 мая 2005. Секция 4 “Когерентные и нелинейные явления”. С. 49-51.

16. Н.Ю. Вислобоков, А.П. Сухоруков, О.Х. Хасанов, Т.В. Смирнова, О.М. Федотова. *Вклад дисперсии в динамику распространения фемтосекундных квазисолитонных лазерных импульсов в диэлектриках* // Материалы VI Международной конференции “Лазерная физика и оптические технологии”. Гродно, Республика Беларусь. 25-29 сентября 2006 г. Ч. 2. С. 21.