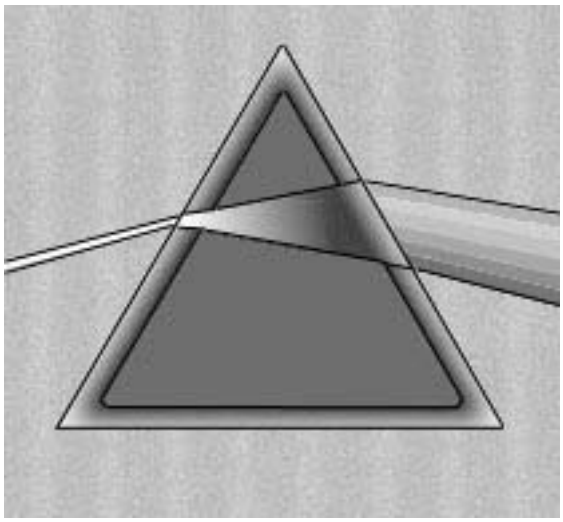
Е.М. Буяновская, С.А. Козлов, О.А. Мохнатова

Методические рекомендации по выполнению исследовательских курсовых работ, научно-технологических практик и выпускных квалификационных бакалаврских работ



Санкт-Петербург
2009

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

«Образование»

Е.М. Буяновская, С.А. Козлов, О.А. Мохнатова

Методические рекомендации по выполнению исследовательских курсовых работ, научно-технологических практик и выпускных квалификационных бакалаврских работ

ИТМО

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Санкт-Петербург

2009

Буяновская Е.М., Козлов С.А., Мохнатова О.А. **Методические рекомендации по выполнению исследовательских курсовых работ, научно-технологических практик и выпускных квалификационных бакалаврских работ**: Методическое пособие – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 98 с.: ил.

В пособии изложены принципы сквозной системы исследовательских курсовых работ и практик, которые начинаются для студентов факультета фотоники и оптоинформатики с четвертого семестра. Приведены примеры выпускных квалификационных работ и презентаций к ним.

Рекомендовано к печати ученым советом факультета фотоники и оптоинформатики от 04 декабря 2008 года, протокол №3

СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007-2008 годы и успешно реализовал инновационную образовательную программу «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий», что позволило выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворять возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях науки. Реализация этой программы создала основу формирования программы дальнейшего развития вуза до 2015 года, включая внедрение современной модели образования.

© Буяновская Е.М., Козлов С.А., Мохнатова О.А., 2009
© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2009

Оглавление…….3

Предисловие……...5

Глава 1. Сквозная система курсовых исследовательских работ, научно-технологических практик и выпускной квалификационной работы бакалавра – инновационная технология адаптации студентов к профессиональной деятельности в науке и индустрии фотоники и оптоинформатики…..……6

1.1. Место курсовых исследовательских работ и научно-технологических практик в учебной программе.……7

1.2. Периодичность получения технических заданий на курсовые исследовательские работы и их образцы……..9

1.3. Периодичность отчетности по курсовым исследовательским работам и практикам и образцы отчетов……14

1.4. Образцы писем руководителям компаний и фирм, в которые направляются для выполнения курсовых исследовательских работ и практик студенты кафедры фотоники и оптоинформатики…..…….……..19

Глава 2. Инструкции к подготовке выпускных квалификационных работ бакалавров……20

2.1. Рекомендации положения об итоговой государственной аттестации выпускников СПбГУ ИТМО……21

2.2. Рекомендации положения о выпускных квалификационных работах бакалавра……24

2.3. Методические материалы по организации выполнения выпускных квалификационных работ бакалавра……29

Глава 3. Примеры выпускных квалификационных работ бакалавров по направлению 200600 «Фотоника и оптоинформатика»……...37

1.1. Бакалаврская выпускная квалификационная работа «Взаимодействие встречных импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах»……37
1.2. Бакалаврская выпускная квалификационная работа «Нелинейное отражение фемтосекундного спектрального суперконтинуума от диэлектрических сред»……55
Глава 4. Примеры презентаций выпускных квалификационных работ бакалавров ……79

Предисловие

Уважаемые студенты кафедры фотоники и оптоинформатики. Настоящее пособие, надеюсь, поможет Вам лучше сориентироваться в применяемой на нашем факультете важной технологии адаптации студентов к профессиональной работе в научных организациях и индустрии фотоники и оптоинформатики.

Из изложенного в пособии Вы узнаете, что сквозная система исследовательских курсовых работ и научно-технологических практик, которые начинаются для Вас уже со второго курса с четвертого семестра, утверждена инновационной образовательной программой нашего университета. С этой программой наш университет в 2007 году стал победителем общероссийского конкурса инновационных университетов. Вы поймете, почему все выпускающие кафедры нашего факультета уделяют много внимания этой образовательной технологии. Вы найдете в этом пособии образцы технических заданий и отчетов за курсовые работы, которые отличаются от семестра к семестру Вашими нарастающими достижениями в практике реальной работы по профессии. Думаю, что полезными для Вас окажутся рекомендации по подготовке бакалаврских выпускных квалификационных работ, а также примеры таких квалификационных работ и их презентаций первых в России выпускников бакалавратуры по направлению 200600 «Фотоника и оптоинформатика» кафедры фотоники и оптоинформатики.

Декан факультета фотоники и оптоинформатики,
заведующий кафедрой фотоники и оптоинформатики,
доктор физико-математических наук, профессор,
лауреат премии Ленинского комсомола по науке и технике
Козлов Сергей Аркадьевич

Глава 1. Сквозная система курсовых исследовательских работ, научно-технологических практик и выпускной квалификационной работы бакалавра – инновационная технология адаптации студентов к профессиональной деятельности в науке и индустрии фотоники и оптоинформатики.

В 2007 году наш Университет стал победителем всероссийского конкурса инновационных образовательных программ (подробная информация об этом событии размещена на портале Университета). Инновационной программой развития Университета перед факультетом фотоники и оптоинформатики была поставлена задача развития новой формы учебного процесса по модулю дисциплин «Наука и технологии фотоники» в виде технологии ранней адаптации студентов к работе в научных организациях и индустрии фотоники и оптоинформатики Санкт-Петербурга. Эта образовательная технология основана на сквозной и непрерывной (последовательно в рамках дисциплин «Оптическая физика», «Оптическое материаловедение», «Основы фотоники», «Основы оптоинформатики») системе курсовых исследовательских работ, научно-технологических практик и выпускной квалификационной работы бакалавра с индивидуальным кураторством и под руководством ведущих специалистов Университета и других успешных инновационных компаний и фирм Санкт-Петербурга, работающих в области фотоники и оптоинформатики.

Конкретная компания или фирма, на которой выполняется курсовая исследовательская работа и научно-технологические

практики, как правило, подбирается кафедрой с учетом индивидуальных особенностей и пожеланий студента.

1.1. Место курсовых исследовательских работ и научно-технологических практик в учебной программе.

В диплом бакалавра техники и технологий по образовательному направлению 200600 «Фотоника и оптоинформатика» по профилю «Оптические технологии передачи, записи и обработки информации» кафедры фотоники и оптоинформатики за выполнение курсовых исследовательских работ по модулю дисциплин «Наука и технологии фотоники» вносится четыре оценки. В соответствии с рабочей учебной программой междисциплинарная курсовая исследовательская работа выполняется в течение четырех семестров с проставлением оценки в зачетную книжку в каждом семестре.

В четвертом (весеннем) семестре курсовая исследовательская работа выполняется в рамках часов самостоятельной работы студента по дисциплине «Оптическая физика». Семестр заканчивается научно-производственной практикой, которая, как правило, проходит в том же подразделении СПбГУ ИТМО или фирме Санкт-Петербурга, в которой выполняется курсовая работа. Рекомендуется встречаться с научным руководителем раз в неделю в течение всего семестра (это обеспечивает примерно 20 дней работы на фирме, необходимых для зачета практики). В промежутке между встречами следует выполнять конкретное задание научного руководителя.

В пятом (осеннем) семестре курсовая исследовательская работа выполняется в рамках часов самостоятельной работы

студента по дисциплине «Оптическое материаловедение». Рекомендуется встречаться с научным руководителем раз в неделю в течение всего семестра. В промежутке между встречами следует выполнять его конкретное задание.

В шестом (весеннем) семестре курсовая исследовательская работа выполняется в рамках часов самостоятельной работы дисциплины «Основы фотоники». Семестр заканчивается научно-производственной практикой, которая, как правило, проходит в том же подразделении СПбГУ ИТМО или фирме Санкт-Петербурга, в которой выполняется курсовая работа. Рекомендуется встречаться с научным руководителем не реже одного раза в неделю.

В седьмом (осеннем) семестре курсовая исследовательская работа выполняется в рамках дисциплины «Основы оптоинформатики». Рекомендуется встречаться с научным руководителем не реже одного раза в неделю.

Предполагается, что выполненная комплексная, состоящая из четырех частей курсовая исследовательская работа по модулю дисциплин «Наука и технологии фотоники», подкрепленная двумя научно-производственными практиками, явится основой для выпускной квалификационной работы бакалавра, которая выполняется в восьмом семестре, заключительном для бакалаврского образования. Предполагается, что фирма, в которой выполняется работа, может стать будущим местом работы выпускника. Важно, что возможно продолжение этой работы в магистратуре, а затем и в аспирантуре СПбГУ ИТМО.

Таким образом, в четвертом семестре второго курса студенты кафедры фотоники и оптоинформатики начинают обучение более сложного уровня. Под индивидуальным руководством специалиста высокого класса в области фотоники и оптоинформатики они

должны научиться решать конкретные и важные для практики задачи. Полезно отметить, что работа руководителей, как правило, не оплачивается. Их "прибыль" - выполненная совместно со студентами работа в рамках грантов и контрактов, в том числе государственных и международных, или хоздоговоров с различными организациями и фирмами. Задача студентов - научиться решать реальные проблемы в профессиональной области, научиться работать в коллективе, научиться под руководством опытного специалиста выступать с докладами на конференциях, писать статьи, писать и выигрывать гранты и контракты, которые финансово обеспечивают работу исследователя.

1.2. Периодичность получения технических заданий на курсовые исследовательские работы и их образцы.

Техническое задание на проводимую в течение двух лет курсовую исследовательскую работу по модулю дисциплин «Наука и технологии фотоники» выдается каждый семестр. Технические задания сдаются на кафедру.

Техническое задание включает:

1. Название исследовательской курсовой работы.
2. Фамилию, имя, отчество научного руководителя. Место его работы (лаборатория, кафедра, если место работы - СПбГУ ИТМО) и должность. Его научную степень (если имеется).
3. Фамилия, имя, отчество исполнителя (студента), номер его группы.
4. Содержание технического задания с указанием срока его выполнения.
5. Список литературы для ознакомления студентом.

Пример технического задания на первый этап работ по курсовой исследовательской работе, проводимой в научной группе:

Название: Исследование нелинейного отражения импульсов из малого числа колебаний светового поля от диэлектрических сред.
Руководитель: Козлов Сергей Аркадьевич, заведующий кафедрой фотоники и оптоинформатики СПбГУ ИТМО, доктор физико-математических наук.
Исполнитель: Мохнатова Ольга Александровна, студентка группы 2350
Техническое задание на весенний семестр 2005 года:

1. Ознакомление с полевыми и спектральными методами анализа самовоздействия импульсов из малого числа колебаний светового поля.
2. Вывод полевых и спектральных формул для параксиальных световых пучков с широким временным спектром, отраженных от границы раздела линейный - нелинейный диэлектрик при нормальном падении излучения.
3. Численное иллюстрирование нелинейного отражения параксиального излучения из нескольких колебаний светового поля.

Литература:

1. Козлов С.А. Нелинейная оптика импульсов предельно коротких длительностей. – В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики, СПб, 2000, с.12-34.
2. Козлов С.А. Спектральные уравнения в фемтосекундной нелинейной оптике. – В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики, СПб, 2002, с.143-160.

3. Козлов С.А., Шполянский Ю.А., Ястребова Н.В. Нелинейное отражение импульсов из малого числа колебаний светового поля от просветленной границы раздела сред. – Оптический журнал, 2004, т.71, N6, с.78-83.
4. Берковский А.Н., Козлов С.А., Шполянский Ю.А., Самофокусировка волновых пакетов из малого числа колебаний светового поля в диэлектрических средах. – В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики, СПб, 2004, с.170-188.

Пример 2.

Тема: Исследование столкновений встречных импульсов из малого числа колебаний светового поля в нелинейных волноводах.

Руководитель: Козлов Сергей Аркадьевич, заведующий кафедрой фотоники и оптоинформатики СПбГУ ИТМО, доктор физико-математических наук.

Исполнитель: Буяновская Елизавета Михайловна, студентка группы 2350

Техническое задание на весенний семестр 2005 года:

1. Ознакомление с полевыми и спектральными методами анализа столкновений импульсов из малого числа колебаний светового поля в нелинейных средах.
2. Вывод полевых и спектральных уравнений взаимодействия встречных импульсов из малого числа колебаний светового поля в нелинейных диэлектрических волноводах.
3. Нахождение аналитических приближенных решений выведенных уравнений. Численное иллюстрирование полученных решений.

Литература:

1. Козлов С.А. Нелинейная оптика импульсов предельно коротких длительностей. – В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики, СПб, 2000, с.12-34.
2. Козлов С.А. Спектральные уравнения в фемтосекундной нелинейной оптике. – В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики, СПб, 2002, с.143-160.
3. Бахтин М.А. Метод генерации последовательности световых сигналов с тактовой частотой 10 ТГц. – В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики, СПб, 2004, с.203-211.
4. Бахтин М.А., Козлов С.А. Формирование последовательности сверхкоротких сигналов при столкновении импульсов из малого числа колебаний светового поля в нелинейных оптических средах. – Оптика и спектроскопия, 2005, т. 98, № 3, с.425-430

Пример 3.

Тема: Исследование реализации логического вывода на лингвистических шкалах методом Фурье - голографии.

Руководитель: Павлов Александр Владимирович, доцент кафедры фотоники и оптоинформатики СПбГУ ИТМО, кандидат технических наук.

Исполнитель: Алексеев Александр Михайлович, студент группы 2350.

Техническое задание на весенний и осенний семестр 2005 года:

1. Обзор литературы по теме работы.
2. Изучение (теоретическое и экспериментальное) процесса записи Фурье - голограмм.
3. Экспериментальная реализация логического вывода для

двух входных лингвистических переменных и одной выходной.

4. Вывод о правомерности использования в процессе реализации логического вывода на лингвистических шкалах метода Фурье - голограмм.
5. Критический анализ, выявление возможных недочетов и путей дальнейшего совершенствования метода.

Литература:

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.: Мир.
2. Колфилд Г. Оптическая голография, т.1, т.2.
3. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика.
4. Судаков К.В. Голографический принцип системной организации процессов жизнедеятельности. - Успехи физиологических наук. 1997, т.28, №4.
5. Борисюк Г.Н., Борисюк Р.М., Казанович Я.Б., Иваницкий Г.Р. Модели динамики нейронной активности при обработке информации мозгом – итоги десятилетия. - Успехи физических наук, 2002, т.172, с. 1189-1214.
6. Приорам К. Нелокальность и локализация: голографическая гипотеза о функционировании мозга в процессе восприятия и памяти. – В сб.: Синергетика и психология, вып.1, Методологические вопросы". - М.: МГСУ "Союз", 1997.
7. Павлов А.В., Шевченко Я.Ю. Реализация логического вывода на лингвистических шкалах методом Фурье – голографии. – Оптический журнал, 2004, т.71, №7, с.44-51.

В заключение настоящего подраздела отметим, что технические задания на курсовые работы, выполняемые в компаниях и фирмах,

могут иметь существенно более прикладной характер, нежели приведенные выше в качестве примеров, которые выполнялись в научно-производственных группах СПбГУ ИТМО по грантам фундаментальной направленности. Студенты в ходе работ на фирмах должны приобретать навыки практической работы в индустрии фотоники и оптоинформатики. Важно при этом, что результатом двухлетней работы над курсовой работой на фирме должны стать, во-первых, эти навыки, а во-вторых, и подготовленный значительный задел для выпускной квалификационной работы. Требования к выпускной квалификационной работе бакалавра изложены в Главе 2 данного пособия. Подготовка выпускной работы бакалавра предполагается на той же фирме, где выполнялась междисциплинарная курсовая исследовательская работа и проходили научно-производственные практики.

1.3. Периодичность отчетности по курсовым исследовательским работам и практикам и образцы отчетов.

Отчетность по курсовой исследовательской работе осуществляется за каждый семестр, т.е. четыре раза на протяжении двух лет выполнения этой комплексной работы.

Одно - двухстраничный отчет за каждый семестр включает:

1. Название исследовательской курсовой работы.
2. Фамилию, имя, отчество научного руководителя. Место его работы (лаборатория, кафедра, если место работы - СПбГУ ИТМО) и должность. Его научную степень (если имеется).
3. Фамилию, имя, отчество исполнителя (студента), номер его группы.

4. Краткую аннотацию проделанной работы (не более трех-пяти предложений), подобную аннотации к научной статье.
5. Список опубликованных или подготовленных к публикации работ (статей в журналах, трудах конференций и т.п.).
6. Список докладов, посланных или уже представленных на конференциях.
7. В конце отчета должна быть фраза «двадцатидневная практика пройдена» (если в отчетный период выполняется практика). После чего должна стоять оценка руководителя работ, число и его подпись

Таким образом, первый зачет с оценкой за исследования и приобретенные навыки в рамках курсовой работы ставится в зачетку студенту в сессию в конце четвертого семестра. Для большинства студентов эти первые полгода работы над курсовым исследовательским проектом в основном уходят на ознакомление с темой работы и чтение литературы. Но, тем не менее, некоторые из студентов уже успевают получить результаты, достойные представления на научной конференции. Здесь важно отметить, что в поддержку творческой деятельности студентов в рамках курсовых работ и практик на факультете фотоники и оптоинформатики организована еще одна инновационная форма учебного процесса. Для получения первого опыта представления своих научных и научно-технологических результатов на научных форумах высокого уровня, а также для ознакомления с последними достижениями в области науки и технологий фотоники и оптоинформатики студенты имеют возможность участвовать в регулярных (ежегодных) международных школах и конференциях, которые проводятся в стенах нашего Университета. Приведем примеры таких мероприятий в 2007 и 2008 годах:

в 2007 году - 5-я Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика - 2007», 6-я встреча студенческих отделений SPIE,

в 2008 году - 2-я Международная научная конференция «Optical Sensing and Artificial Vision - 2008», 5-й Международный оптический конгресс «ОПТИКА - XXI век», включающий школу молодых ученых и специалистов «Оптика–2008», конференцию «Оптоинформатика–2008», 7-ю встречу студенческих отделений SPIE, конференцию «Фундаментальные проблемы оптики – 2008»;

В следующих пятом, шестом и седьмом семестрах студенты в рамках курсовой работы продолжают начатые исследования. Но в этих семестрах требования к отчетам возрастают. Их форма сохраняется. Но в отчете ожидается краткое изложение первых реальных результатов, подтвержденных фактами апробаций на научных конференциях, статьями, регистрированными программными продуктами, заявками на молодежные гранты и т.п.

Образец отчета (заключительного) за седьмой семестр четвертого курса:

Отчет

по курсовой исследовательской работе

Тема: Реализация логико-лингвистического моделирования методом Фурье-голографии.

Руководитель: Павлов Александр Владимирович, доцент кафедры фотоники и оптоинформатики СПбГУ ИТМО, кандидат технических наук.

Исполнитель: Алексеев Александр Михайлович, студент группы 4350.

Аннотация: Развит подход к реализации логического вывода на лингвистических шкалах методом Фурье-голографии применительно к задаче формирования интегральной оценки по набору входных лингвистических переменных. Теоретически и экспериментально исследована зависимость между интегральной оценкой по набору входных лингвистических переменных и передаточной характеристикой регистрирующей среды, с помощью которой в систему вводится изображение, представляющее паттерн внутренней репрезентации обрабатываемой информации. Показана возможность использования нелинейных свойств передаточных характеристик регистрирующей среды для настройки логики системы «под пользователя».

Список публикаций:

- Alekseev A.M., Pavlov A.V. Linguistic modeling by Fourier-holography technique: implementation of non-monotonic reasoning. - Proceedings of ICO Topical Meeting on Optoinformatics, p. 476, 2006.
- Алексеев А.М., Константинов А.М., Павлов А.В. Реализация немонотонных рассуждений при интеграции логического и образного мышления методом Фурье-голографии. - Известия РАН, серия физическая, 2007, т.71, №2, с.180-184.
- Алексеев А.М., Константинов А.М., Павлов А.В. Использование метода Фурье-голографии для моделирования принципа образности мышления. - Оптический журнал, 2006, т.73, №9, с.77-82.
- Алексеев А.М.. Павлов А.В. Интеграция логического и образного мышления методом Фурье-голографии. – В кн.: Труды десятой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием, 25-28.09.2006, г.

Обнинск, Россия, т.2, с.644.

- Alekseev A.M., Pavlov F.V. Linguistic Modeling by Fourier-holography Technique: Implementation of non-monotonic Semantics. - Proceedings of XI International Conference "Speech and Computer", 25-29 June 2006, St. Petersburg, Russia, p.237-241.

Список апробаций:

- Alekseev A.M., Pavlov A.V. Linguistic modeling by Fourier-holography technique: implementation of non-monotonic reasoning // ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics 2006, September 4-7, 2006, St. Petersburg, Russia.
- Alekseev A.M. SPbSU ITMO SPIE Student Chapter 2006 // V SPIE Student Chapters Meeting, September 5, 2006, St. Petersburg, Russia.

Также Алексеев А.М. принимал участие в подготовке и проведении международной конференции «ICO Topical Meeting on Optoinformatics /Information Photonics Optoinformatics/Photonics'06», включая встречу ячеек SPIE.

Оценка руководителя работы: ОТЛИЧНО

А.В. Павлов подпись

1.4. Образцы писем руководителям компаний и фирм, в которые направляются для выполнения курсовых исследовательских работ и практик студенты кафедры фотоники и оптоинформатики

Генеральному директор
ЗАО «ФТИ-Оптроник»
Ю.В. Ильину
от зав. кафедры ФиОИ
СПбГУ ИТМО
С.А. Козлова

Уважаемый Юрий Валерьевич!

Кафедра фотоники и оптоинформатики предлагает Вам, как потенциальному работодателю, сотрудничество в процессе подготовки специалистов по направлению 200600 «Фотоника и оптоинформатика».

В рамках учебного процесса мы, начиная с весеннего семестра второго курса, реализуем сквозную (до конца обучения) систему курсовых работ и практик, заканчивающихся защитами сначала бакалаврских работ, а затем и магистерских диссертаций. Предполагается, что в течение каждого семестра студент находится на рабочем месте в фирме в среднем один раз в неделю, отчитываясь при этом и за проделанную в течение недели работу дома (обзор литературы, аналитическое и численное моделирование и т.п.). В конце каждого семестра студент получает оценку от работодателя за курсовую работу и зачет за практику, которые мной вносятся в зачетную книжку студента.

Опыт показывает, что лишь в начале работа со студентами является для их научных руководителей чисто затратной. Но уже через полгода практики студенты становятся для них весьма эффективной рабочей силой, принося за несколько студенческих лет, а часто и аспирантских, значительную пользу фирме.

По предварительной договоренности направляем к Вам:

Шкодина Евгения Викторовича, студента второго курса, самостоятельно оплачивающего свое обучение.

Лашкина Даниила Витальевича, студента третьего курса, обучающегося за государственный счет.

Куратор работы студентов на Вашем предприятии - Артемьев Сергей Васильевич, заведующий лабораторией кафедры ФиОИ, моб. тел. 8-921-587-84-08.

Зав. кафедрой ФиОИ,
д.ф.-м.н., профессор С.А. Козлов

Глава 2. Инструкции к подготовке выпускных квалификационных работ бакалавров.

Методические материалы по организации итоговой государственной аттестации выпускников СПбГУ ИТМО можно найти на сайте Управления образовательных программ http://uop.ifmo.ru/stat/1/docs.htm в разделе нормативные документы. Выход на этот сайт возможен также с портала нашего Университета.

2.1. Рекомендации положения об итоговой государственной аттестации выпускников СПбГУ ИТМО.

На упомянутом выше сайте Управления образовательных программ размещен полный текст Положения об итоговой государственной аттестации выпускников СПбГУ ИТМО, принятого на заседании Ученого Совета Университета 24 июня 2004 года. В этом Положении отмечено, что **целью** итоговой государственной аттестации является установление уровня подготовки выпускника СПбГУ ИТМО к выполнению профессиональных задач и соответствия его подготовленности требованиям государственного образовательного стандарта.

К **видам** итоговых аттестационных испытаний выпускников СПбГУ ИТМО относятся:

- защита выпускной квалификационной работы;
- государственный экзамен.

Выпускные квалификационные работы выполняются в формах, соответствующих ступеням высшего профессионального образования:

- для академической степени (квалификации) бакалавр – в форме бакалаврской работы;
- для академической степени (квалификации) магистр – в форме магистерской диссертации.

Конкретные требования к содержанию, структуре, формам представления и объемам выпускных квалификационных работ устанавливаются на уровне методических указаний выпускающими кафедрами, т.е. настоящими методическими рекомендациями.

Темы выпускных квалификационных работ определяются выпускающей кафедрой и утверждаются ректором университета. Для подготовки выпускной квалификационной работы студенту назначается руководитель и, при необходимости, консультанты. Выпускные квалификационные работы подлежат обязательному рецензированию.

Итоговая государственная аттестация бакалавров проводится по завершению теоретического курса обучения после окончания экзаменационной сессии восьмого семестра в течение одной недели, специально выделяемой в учебном плане для проведения аттестационных испытаний.

Прием государственных экзаменов и защита выпускных квалификационных работ (за исключением работ по закрытой тематике) проводятся на открытых заседаниях экзаменационных комиссий с участием не менее двух третей их состава.

Результаты любого итогового аттестационного испытания определяются оценками “отлично”, “хорошо”, “удовлетворительно” и “неудовлетворительно” и объявляются в тот же день после оформления в установленном порядке протоколов заседаний экзаменационных комиссий.

Тема выпускной квалификационной работы и ее руководитель от выпускающей кафедры определяются не позднее, чем за 4 месяца до ее защиты и утверждаются ректором университета.

К защите выпускной квалификационной работы допускается лицо, успешно сдавшее государственный экзамен.

В государственную аттестационную комиссию до начала государственных экзаменов и защиты выпускной квалификационной работы представляются следующие документы:

- справка декана факультета о выполнении студентом учебного плана и полученных им оценках по дисциплинам, курсовым работам и проектам, практикам;
- отзыв руководителя в письменном виде;
- рецензия на выпускную квалификационную работу в письменном виде;
- аннотация на выпускную квалификационную работу в письменном виде.

Выпускная работа с указанными документами представляется в экзаменационную комиссию не менее, чем за 3 дня до назначенного срока защиты.

Дополнительно в государственную аттестационную комиссию могут быть представлены другие материалы, характеризующие научную и практическую ценность выполненной работы – копии статей, тезисов выступлений на конференциях, макеты, программные продукты и т.п.

Перечень вопросов, выносимых для проверки на государственном экзамене (программа государственного экзамена), доводится до сведения студентов не позднее, чем за 4 месяца до даты экзамена.

Итоговый государственный экзамен может проводиться в письменной и (или) устной форме на основе оценки ответов и решений тестовых заданий.

Проведение экзамена предполагает выступление студента перед экзаменационной комиссией в течение 10 – 15 минут по вопросам, сформулированным в билете.

Студент, получивший на государственном экзамене оценку «неудовлетворительно», не допускается к защите выпускной квалификационной работы и отчисляется из университета в соответствии с установленным порядком.

2.2. Рекомендации положения о выпускных квалификационных работах бакалавра.

Положение определяет требования к содержанию, структуре, объему и проведению выпускных квалификационных работ, выполняемых выпускниками университета, на основе Положения об итоговой государственной аттестации выпускников высших учебных заведений, утвержденного Минобразования России от 25.03.2003 г. № 1155.

Выполнение выпускной квалификационной работы (работы бакалавра или магистерской диссертации) является заключительным этапом обучения студента на соответствующей ступени образования и имеет своей целью:

- расширение, закрепление и систематизацию теоретических знаний, и приобретение навыков практического применения этих знаний при решении конкретной научной, технической, производственной, экономической или организационно-управленческой задачи;

- развитие навыков ведения самостоятельных теоретических и экспериментальных исследований, оптимизации проектно-технологических и экономических решений;
- приобретение опыта обработки, анализа и систематизации результатов теоретических и инженерных расчетов, экспериментальных исследований, в оценке их практической значимости и возможной области применения;
- приобретение опыта представления и публичной защиты результатов своей деятельности.

Обязательные требования к содержанию, структуре, формам представления и объемам выпускных работ устанавливаются методическими указаниями, которые разрабатываются выпускающими кафедрами университета, т.е. настоящими методическими рекомендациями.

За актуальность, соответствие тематики выпускной работы профилю направления подготовки, руководство и организацию ее выполнения ответственность несет выпускающая кафедра и непосредственно руководитель работы.

Руководитель выпускной работы:

- выдает задание на выпускную работу;
- оказывает студенту помощь в организации и выполнении работы;
- проводит систематические занятия со студентом и консультирует его;
- проверяет выполнение работы (по частям или в целом);
- дает письменный отзыв о работе.

За все сведения, изложенные в выпускной работе, принятые решения и за правильность всех данных ответственность несет непосредственно студент - автор выпускной работы.

Выпускная квалификационная работа является важнейшим итогом обучения на соответствующей стадии образования, в связи с этим содержание выпускной работы и уровень ее защиты должны учитываться как основной критерий при оценке уровня подготовки выпускника и оценке качества реализации образовательной программы в университете.

Выпускная квалификационная работа бакалавра должна представлять собой самостоятельное и логически завершенное теоретическое или экспериментальное исследование, связанное с разработкой теоретических вопросов, с экспериментальными исследованиями или с решением задач прикладного характера (проектированием элементов приборов и систем), являющихся, как правило, частью научно-исследовательских работ, выполняемых выпускающей кафедрой.

По решению кафедры выпускная работа может быть представлена в виде обобщения курсовых работ, выполняемых студентом по общепрофессиональным и специальным дисциплинам направления подготовки.

Выпускная работа бакалавра выполняется на базе теоретических знаний и практических навыков, полученных студентом в период обучения (4 года). При этом она должна быть преимущественно ориентирована на знания, полученные в процессе изучения дисциплин общепрофессионального цикла и специальных дисциплин.

Темы выпускных работ бакалавра разрабатываются выпускающей кафедрой и утверждаются приказом ректора. Темы бакалаврских работ должны быть по проблематике близки к магистерским программам, реализуемым в университете по данному направлению.

Для руководства выпускной работой по представлению выпускающей кафедры назначается руководитель, как правило, из числа преподавателей и научных сотрудников кафедры. По предложению руководителя выпускной работы кафедре, в случае необходимости, предоставляется право приглашать консультантов по отдельным разделам выпускной работы из числа сотрудников других кафедр вуза. Руководителями выпускной работы могут быть также специалисты из других учреждений и предприятий.

Содержание выпускной квалификационной работы бакалавра должно учитывать требования ГОС ВПО к профессиональной подготовленности студента и включать в себя:

- обоснование выбора предмета и постановку задачи исследования, выполненные на основе обзора научно-технической литературы, в том числе с учетом периодических научных изданий;
- теоретическую и (или) экспериментальную части, включающие методы и средства исследований;
- математические модели;
- расчеты;
- проектно-конструкторскую и (или) технологическую части;
- анализ полученных результатов;
- выводы и рекомендации;
- список использованной литературы.

Оформление и защита выпускной квалификационной бакалаврской работы должны соответствовать определенным требованиям:

- объем пояснительной записки, как правило, не должен превышать 30 страниц текста, исключая таблицы, рисунки, список использованной литературы и оглавление;
- цифровые, табличные и прочие иллюстративные материалы могут быть вынесены в приложения;
- к записке прилагается аннотация, в которой отражаются основные положения работы (смотри параграф 2.3);
- записка должна иметь подписи студента, руководителя работы, консультанта и визу заведующего выпускающей кафедрой;
- защита работы на государственной экзаменационной комиссии осуществляется в форме авторского доклада, на который отводится не более 10 минут.

Завершенная выпускная работа представляется на выпускающую кафедру для предварительной защиты. Руководитель представляет на кафедру письменный отзыв. По результатам этой защиты студент допускается к защите на государственную аттестационную комиссию.

Бакалаврская работа, допущенная к защите, направляются заведующим кафедрой на рецензию. В качестве рецензента могут привлекаться преподаватели или сотрудники смежных кафедр вуза, а также других вузов, научных организаций и др.

Рецензент оценивает выпускную квалификационную работу по предлагаемым критериям (смотри параграф 2.3). Состав рецензентов

утверждается ректором университета по представлению заведующего выпускающей кафедрой.

Порядок защиты выпускной квалификационной работы бакалавра определяется Положением об итоговой государственной аттестации выпускников СПб ГУ ИТМО.

2.3. Методические материалы по организации выполнения выпускных квалификационных работ бакалавра.

Основная задача вуза на заключительном этапе подготовки бакалавра – формирование оценочных средств при анализе соответствия уровня профессиональной подготовленности выпускника требованиям ГОС ВПО по итогам защиты выпускной квалификационной работы. Основным требованием к выбору критериев является способность (готовность) к профессиональной деятельности.

Отзыв руководителя должен содержать как критическую часть, так и краткую характеристику работы, отмечать степень самостоятельности, проявленную соискателем при выполнении работы, характеристику научной (практической деятельности) соискателя, умение организовать свой труд, наличие публикаций и выступлений на конференциях, их перечень, срок работы соискателя по данной теме. Данная часть отзыва составляется по произвольной форме.

Для достижения достаточно объективного уровня оценки ВКР руководитель оценивает ВКР по определенным критериям (см. Приложение 1).

Каждый из представленных критериев характеризует одну из сторон оцениваемой работы. По своему функциональному назначению предлагаемые критерии можно объединить в группы: профессиональная, справочно-информационная, оформительская.

Рецензент по отношению к ВКР выступает в роли стороннего эксперта. В соответствии с этим его отзыв должен содержать более разностороннюю характеристику работы. В отличие от руководителя он дает оценку раскрытия степени актуальности темы работы, соответствие представленного материала техническому заданию, подтверждает наличие публикаций, участие в научно-технических конференциях, награды за участие в конкурсах, на основании наличия копий или оригиналов работ, уровень выполнения ВКР (см. Приложение 2).

ГАК присваивает квалификацию и выставляет итоговую оценку ВКР по результатам выступления претендента. ГАК оценивает грамотность построения речи, степень владения профессиональной терминологией, умение квалифицированно отвечать на вопросы, полноту представления иллюстративных материалов выступления и уровень представления материалов в пояснительной записке, оценивает уровень знания претендента.

При формировании заключения об уровне представленной работы и подготовке специалиста ГАК ориентируется на мнения экспертов ГАК, учитывая мнения руководителя и рецензента.

При выставлении итоговой оценки качества работы и защиты, в отличие от руководителя и рецензента, ГАК более жестко регламентирован по времени. В соответствии с этим критерии ГАК при выставлении итоговой оценки должны быть более

формализованы и согласованы с оценками руководителя работы, рецензента и данными аннотации.

Структурно оценка ГАК ВКР состоит из трех частей:

- показатели оценки ВКР;
- показатели защиты;
- отзывы руководителя и рецензента.

Предлагаемые показатели оценки ВКР включают в себя девять критериев, которые можно так же, как критерии оценки руководителя и рецензента, объединить в три группы, что может способствовать упрощению процесса выставления оценки за счет интегрирования оценки по группе (смотри Приложение 3). Член ГАК может выставить по каждой группе одну интегральную оценку.

Для увеличения достоверности оценки ВКР предлагается включить в структуру аннотации данные по всем основным критериальным оценкам, что позволит экспертам (в первую очередь рецензенту и члену ГАК) более оперативно сопоставлять утверждение студента со своим мнением.

Формализация процедуры оценки уровня ВКР увеличивает однозначность понимания смысла критерия аттестуемым и экспертом, уменьшает время, необходимое эксперту для выставления оценки по каждому критерию, “подсказывает” студенту, на что необходимо обратить внимание при выполнении работы и написании пояснительной записки ВКР.

Предлагаемые группы критериев стимулируют использование информационных технологий и позволяют всесторонне оценить профессионализм молодого специалиста.

Аннотация по ВКР (смотри Приложение 4) должна включать:

- Ф.И.О. студента;
- наименование факультета, кафедры, номер группы, направление подготовки, наименование специальности,
- присуждаемая квалификация (степень),
- наименование темы,
- данные руководителя (Ф.И.О., место работы, должность, ученое звание, степень)
- данные консультанта (Ф.И.О., место работы, должность, ученое звание, степень).

Форма публичного выступления устанавливается выпускающей кафедрой по согласованию с Председателем ГАК. На кафедре фотоники и оптоинформатики представление иллюстративного материала к публичной защите рекомендуется в виде раздаточного материала с иллюстрациями и использованием компьютерной презентации.

Нижепреведенные в данной главе приложения рекомендованы Учебно-методическим советом СПбГУ ИТМО и приняты на заседании Ученого Совета СПбГУ ИТМО 24 июня 2004 года.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

О Т З Ы В Р У К О В О Д И Т Е Л Я В К Р

Студент_____
(Фамилия, И., О.)

Факультет_____

Кафедра_____**Группа**_____

Направление (специальность)_____

Квалификация (степень)_____

Наименование темы:_____

Руководитель_____
(Фамилия, И., О., место работы, должность, ученое звание, степень)

ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

	№	Показатели	Оценка			
			5	4	3	0*
Профессиональная	1	Оригинальность и новизна полученных результатов, научных, конструкторских и технологических решений				
	2	Степень самостоятельного и творческого участия студента в работе				
	3	Корректность формулирования задачи исследования и разработки				
	4	Уровень и корректность использования в работе методов исследований, математического моделирования, инженерных расчетов				
Справочно-Информацио	5	Степень комплексности работы. Применение в ней знаний естественнонаучных, социально-экономических, обще-профессиональных и специальных дисциплин				
	6	Использование информационных ресурсов Internet				
	7	Использование современных пакетов компьютерных программ и технологий				
	8	Наличие публикаций, участие в н.-т. конференциях, награды за участие в конкурсах				
Оформительская	9	Степень полноты обзора состояния вопроса				
	10	Ясность, четкость, последовательность и обоснованность изложения				
	11	Качество оформления пояснительной записки (общий уровень грамотности, стиль изложения, качество иллюстраций, соответствие требованиям стандарта к этим документам)				
	12	Объем и качество выполнения графического материала, его соответствие тексту записки и стандартам				
ИТОГОВАЯ ОЦЕНКА						

* - не оценивается (трудно оценить)

На обороте
Отмеченные достоинства
Отмеченные недостатки
Заключение
Дата, подпись

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

О Т З Ы В Р Е Ц Е Н З Е Н Т А О В К Р

Студента_____
(Фамилия, И., О.)

Факультет_____
Кафедра_____**Группа**_____
Направление (специальность)_____
Квалификация (степень)_____
Наименование темы:_____

Рецензент_____
(Фамилия, И., О., место работы, должность, ученое звание, степень)

	№	Показатели оценки	Оценка				
			5	4	3	2	0*
Справочно-информационная	1	Соответствие представленного материала техническому заданию					
	2	Раскрытие актуальности тематики работы					
	3	Степень полноты обзора состояния вопроса					
	4	Корректность постановки задачи исследования и разработки					
	5	Уровень и корректность использования в работе методов исследований, математического моделирования, инженерных расчетов					
	6	Степень комплексности работы, применение в ней знаний естественнонаучных, социально-экономических, обще профессиональных и специальных дисциплин					
	7	Использование информационных ресурсов Internet					
	8	Использование современных пакетов компьютерных программ и технологий					
	9	Наличие публикаций, участие в н.-т. конференциях, награды за участие в конкурсах, подтвержденных копиями					
Творческая	10	Оригинальность и новизна полученных результатов, научных, конструкторских и технологических решений					
	11	Ясность, четкость, последовательность и обоснованность изложения					
Оформительская	12	Уровень оформления пояснительной записки:					
		- общий уровень грамотности					
		- стиль изложения					
		- качество иллюстраций					
	13	Объем и качество выполнения графического материала, его соответствие тексту записки					
	14	Соответствие требованиям стандарта оформления пояснительной записки и графического материала					
ИТОГОВАЯ ОЦЕНКА							

* - не оценивается (трудно оценить)

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ТАБЛИЦА ЧЛЕНА ГАК

	№	Показатели оценки ВКР	Оценка				
			Дифференцированная				Интегральная
			5	4	3	2	
Группы критериев		**Профессиональная**					
	1	Степень раскрытия актуальности тематики работы					
	2	Степень раскрытия темы ВКР					
	3	Корректность постановки задачи исследования и разработки					
	4	Оригинальность и новизна полученных результатов, научных, конструкторских и технологических решений					
		Справочно-информационная					
	5	Степень комплексности работы, использование в ней знаний дисциплин всех циклов					
	6	Использование информационных ресурсов Internet					
	7	Использование современных пакетов компьютерных программ и технологий					
		Оформительская					
	8	Качество оформления пояснительной записки; ее соответствие требованиям нормативных документов					
	9	Объем и качество выполнения графического материала					
	10	Качество защиты					
	11	Уровень ответов					
Отзывы руководителя и рецензента							
	12	Оценка руководителя					
	13	Оценка рецензента					
ИТОГОВАЯ ОЦЕНКА							

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

А Н Н О Т А Ц И Я В К Р

Студент_____
(Фамилия, И., О.)

Факультет_____

Кафедра_____**Группа**_____

Направление (специальность)_____

Квалификация (степень) _____

Наименование темы:_____

Руководитель_____
(Фамилия, И., О., место работы, должность, ученое звание, степень)

Консультант_____
(Фамилия, И., О., место работы, должность, ученое звание, степень)

ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1 . Вид выпускной квалификационной работы_____
(Работа, проект, магистерская диссертация, бакалаврская работа)

2. Цель исследования _____

3. Число литературных источников, использованных при составлении обзора_____

4. Полное число литературных источников, использованных в работе _____

5. В том числе литературных источников

Отечественных			**Иностранных**		
Последние 5 лет	От 5 до 10 лет	Более 10 лет	Последние 5 лет	От 5 до 10 лет	Более 10 лет

6. Использование информационных ресурсов Internet_____
(Да, нет, число ссылок в списке литературы)

7. Использование современных пакетов компьютерных программ и технологий_____
_____
(Указать какие именно и в каком разделе работы)

8. Наличие публикаций и выступлений на конференциях по теме выпускной работы_____

(Да, нет)

а) 1. _____
(Библиографическое описание публикаций)

б) 1. _____
(Библиографическое описание выступлений на конференциях)

Выпускник_____
(подпись)

Руководитель_____
(подпись)

“_____”_____200__г.

Глава 3. Примеры выпускных квалификационных работ бакалавров по направлению 200600 «Фотоника и оптоинформатика».

1.1. Бакалаврская выпускная квалификационная работа «Взаимодействие встречных импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах».

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВСТРЕЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ ИЗ МАЛОГО ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ В НЕЛИНЕЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Выпускная квалификационная работа на степень бакалавра
Автор: Буяновская Е.М.
Руководитель: д. ф.-м. н., проф. Козлов С.А.

2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ **3**

2. УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ПОЛЯ ВСТРЕЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В НЕЛИНЕЙНОЙ СРЕДЕ **4**

3. ЧАСТНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ СЛУЧАЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВСТРЕЧНЫХ НИЗКО- И ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ИМПУЛЬСОВ **8**

4. ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА КРАТНЫХ ЧАСТОТАХ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ИМПУЛЬСОВ ИЗ МАЛОГО ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ РАЗНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА. **11**

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ **16**

ЛИТЕРАТУРА **18**

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптика импульсов из малого числа колебаний светового поля интересна как с фундаментальной, так и с практической точки зрения. Для таких импульсов теряет свое физическое содержание понятие огибающей, поэтому при теоретическом изучении особенностей их распространения в различных оптических средах обычно анализируют динамику непосредственно поля излучения [1 - 3]. Это поле можно рассматривать весьма сильным, поскольку распространение импульсов из малого числа колебаний без разрушения вещества (по-крайней мере, за длительность импульса) оказалось возможным при гораздно больших интенсивностях, чем для более длительного излучения [4]. К настоящему времени изучены многие явления нелинейной оптики таких предельно коротких (по числу колебаний) импульсов: их временное и спектральное уширение и сжатие, самофокусировка, нелинейное отражение, взаимодействие при попутном распространении [5 - 11]. В данной работе, по-видимому, впервые теоретически рассмотрено взаимодействие в нелинейной среде встречных импульсов из малого числа колебаний.

2. УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ПОЛЯ ВСТРЕЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В НЕЛИНЕЙНОЙ СРЕДЕ

Эволюция поля светового импульса из малого числа колебаний, спектр которых хотя и широк, но лежит в диапазоне прозрачности нелинейной диэлектрической среды, может быть описана уравнением [1,12]:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \frac{N_0^2}{c^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{2N_0}{c}a\frac{\partial^4 E}{\partial t^4} - \frac{2N_0}{c}bE - g\frac{\partial^2 E^3}{\partial t^2} = 0, \qquad (1),$$

где E - напряженность электрического поля излучения, z – направление его распространения, t - время, N_0, a, b - параметры, характеризующие нерезонансную зависимость показателя преломления среды:

$$n^2 = N_0{}^2 + 2cN_0a\omega^2 - 2cN_0\frac{b}{\omega^2} \qquad (2)$$

от частоты ω, $g = \frac{4\pi\chi}{c^2}$ - описывает нелинейность ее поляризационного отклика $P_{нл} = \chi E^3$, χ - нелинейная восприимчивость вещества, c - скорость света в вакууме.

Уравнения динамики поля встречных волн будем искать в виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_+}{\partial z} + \dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_+}{\partial t} - a\dfrac{\partial^3 E_+}{\partial t^3} + b\int\limits_{-\infty}^{t} E_+ dt' + F_+(E_+, E_-) = 0 \\ \dfrac{\partial E_-}{\partial z} - \dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_-}{\partial t} + a\dfrac{\partial^3 E_-}{\partial t^3} - b\int\limits_{-\infty}^{t} E_- dt' - F_-(E_-, E_+) = 0. \end{cases} \qquad (3)$$

Эти уравнения в линеаризированном виде следуют из линеаризированного уравнения (1) [1,12] и описывают эволюцию поля E_+ волны, распространяющейся в положительном направлении оси z, и поля E_- волны, распространяющейся ей навстречу, в среде с показателем преломления:

$$n(\omega) = N_0 + \Delta n_л(\omega),$$
$$\Delta n_л(\omega) = ca\omega^2 - c\frac{b}{\omega^2}. \qquad (4)$$

Дисперсионное соотношение (4) вытекает из (2) в характерном для диэлектриков нерезонансном приближении [1, 10]

$$N_0 >> \Delta n_л. \qquad (5)$$

Неизвестные функционалы $F_+(E_+, E_-)$ и $F_-(E_-, E_+)$, которые мы определим ниже, характеризуют в (3) взаимодействие встречных волн в нелинейной среде.

Продифференцировав уравнения (3) по z, выражая в получаемых слагаемых $\frac{\partial^2 E_+}{\partial t \partial z}$ и $\frac{\partial^2 E_-}{\partial t \partial z}$ производные $\frac{\partial E_+}{\partial z}$ и $\frac{\partial E_-}{\partial z}$ из (3), учитывая (5) и пренебрегая полагаемыми малыми произведениями дисперсионных и нелинейных слагаемых, получаем:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_+}{\partial z^2} - \frac{N_0^2}{c^2}\frac{\partial^2 E_+}{\partial t^2} + \frac{2N_0}{c}a\frac{\partial^4 E_+}{\partial t^4} - \frac{2N_0}{c}bE_+ - \frac{N_0}{c}\frac{\partial F_+}{\partial t} + \frac{\partial F_+}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial^2 E_-}{\partial z^2} - \frac{N_0^2}{c^2}\frac{\partial^2 E_-}{\partial t^2} + \frac{2N_0}{c}a\frac{\partial^4 E_-}{\partial t^4} - \frac{2N_0}{c}bE_- - \frac{N_0}{c}\frac{\partial F_-}{\partial t} - \frac{\partial F_-}{\partial z} = 0. \end{cases} \qquad (6)$$

Складывая уравнения системы (6) и требуя, чтобы результирующее уравнение для суммарного поля $E = E_+ + E_-$ приняло исходный вид (1), для функций F_+ и F_-, которые мы ищем в виде:

$$F_+ = a_1 E_+^2 \frac{\partial E_+}{\partial t} + a_2 E_+^2 \frac{\partial E_-}{\partial t} + a_3 E_+ E_- \frac{\partial E_+}{\partial t} + a_4 E_+ E_- \frac{\partial E_-}{\partial t} + a_5 E_-^2 \frac{\partial E_+}{\partial t} + a_6 E_-^2 \frac{\partial E_-}{\partial t}$$
$$F_- = b_1 E_-^2 \frac{\partial E_-}{\partial t} + b_2 E_-^2 \frac{\partial E_+}{\partial t} + b_3 E_- E_+ \frac{\partial E_-}{\partial t} + b_4 E_- E_+ \frac{\partial E_+}{\partial t} + b_5 E_+^2 \frac{\partial E_-}{\partial t} + b_6 E_+^2 \frac{\partial E_+}{\partial t}, \qquad (7)$$

получаем

$a_1 = \frac{1}{3}a_3 = a_5 = b_1 = \frac{1}{3}b_3 = b_5 = \frac{3cg}{2N_0}$, $2a_2 + b_4 = 2b_2 + a_4 = \frac{6cg}{N_0}$, $a_6 = b_6 = 0$, причем из соображений симметрии $a_2 = b_2$, $a_4 = b_4$.

Таким образом, укороченные уравнения, описывающие динамику поля встречных импульсов, решения которых являются и

решениями полного полевого уравнения (1), могут быть записаны в виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_+}{\partial z}+\dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_+}{\partial t}-a\dfrac{\partial^3 E_+}{\partial t^3}+b\int\limits_{-\infty}^{t}E_+dt'+ \\ +\dfrac{3cg}{2N_0}\left[E_+^2\dfrac{\partial E_+}{\partial t}+mE_+^2\dfrac{\partial E_-}{\partial t}+2E_+E_-\dfrac{\partial E_+}{\partial t}+2(2-m)E_+E_-\dfrac{\partial E_-}{\partial t}+E_-^2\dfrac{\partial E_+}{\partial t}\right]=0 \\ \dfrac{\partial E_-}{\partial z}-\dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_-}{\partial t}+a\dfrac{\partial^3 E_-}{\partial t^3}-b\int\limits_{-\infty}^{t}E_-dt'- \\ -\dfrac{3cg}{2N_0}\left[E_-^2\dfrac{\partial E_-}{\partial t}+mE_-^2\dfrac{\partial E_+}{\partial t}+2E_-E_+\dfrac{\partial E_-}{\partial t}+2(2-m)E_-E_+\dfrac{\partial E_+}{\partial t}+E_+^2\dfrac{\partial E_-}{\partial t}\right]=0, \end{cases} \tag{8}$$

где m - произвольное число.

Далее ограничимся рассмотрением оптических импульсов, полагая, что в ходе взаимодействия они также остаются таковыми. Для оптических импульсов спектральная плотность на нулевой частоте

$$G(0)=\int\limits_{-\infty}^{\infty}Ee^{i0t}dt=\int\limits_{-\infty}^{\infty}Edt=0. \tag{9}$$

Анализ уравнений системы (8) показывает, что соотношение (9) для каждой из встречных волн сохраняется, т.е. выполняются уравнения

$$\begin{aligned} &\frac{d}{dz}\int\limits_{-\infty}^{\infty}E_+dt=0, \\ &\frac{d}{dz}\int\limits_{-\infty}^{\infty}E_-dt=0, \end{aligned} \tag{10}$$

при значении m=1. Таким образом, для импульсов, которые в результате взаимодействия остаются оптическими, уравнения (8) примут вид законов сохранения

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_+}{\partial z}+\dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_+}{\partial t}-a\dfrac{\partial^3 E_+}{\partial t^3}+b\int\limits_{-\infty}^{t}E_+dt'+\dfrac{cg}{2N_0}\dfrac{\partial}{\partial t}\left(E_+^3+3E_+^2E_-+3E_+E_-^2\right)=0 \\ \dfrac{\partial E_-}{\partial z}-\dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_-}{\partial t}+a\dfrac{\partial^3 E_-}{\partial t^3}-b\int\limits_{-\infty}^{t}E_-dt'-\dfrac{cg}{2N_0}\dfrac{\partial}{\partial t}\left(E_-^3+3E_-^2E_++3E_-E_+^2\right)=0, \end{cases} \tag{11}$$

переходящих при интегрировании по времени в (10).

Важно отметить, что подстановка

$$\begin{aligned} E_+(z,t) &= \frac{1}{2}\mathcal{E}_+(z,t)e^{i(\omega_0 t - k_0 z)} + к.с. \\ E_-(z,t) &= \frac{1}{2}\mathcal{E}_-(z,t)e^{i(\omega_0 t + k_0 z)} + к.с., \end{aligned} \qquad (12)$$

где $\mathcal{E}_+$ и $\mathcal{E}_-$ - медленно меняющиеся огибающие встречных квазимонохроматических импульсов с несущей частотой ω_0, $k_0 = \frac{N_0\omega_0}{c}$ - волновое число, при характерных для приближения медленно меняющихся огибающих упрощениях, приводит уравнения (11) к хорошо известным уравнениям вида [13]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \mathcal{E}_+}{\partial z} + \dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial \mathcal{E}_+}{\partial t} + i\dfrac{\beta_2}{2}\dfrac{\partial^2 \mathcal{E}_+}{\partial t^2} = i\gamma\left(\left|\mathcal{E}_+\right|^2 + 2\left|\mathcal{E}_-\right|^2\right) \\ \dfrac{\partial \mathcal{E}_-}{\partial z} - \dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial \mathcal{E}_-}{\partial t} + i\dfrac{\beta_2}{2}\dfrac{\partial^2 \mathcal{E}_-}{\partial t^2} = -i\gamma\left(\left|\mathcal{E}_-\right|^2 + 2\left|\mathcal{E}_+\right|^2\right), \end{cases} \qquad (13)$$

где $\beta_2 = \left(\dfrac{\partial^2 k}{\partial \omega^2}\right)_{\omega_0}$, $k(\omega) = \dfrac{N_0}{c}\omega + a\omega^3 - \dfrac{b}{\omega}$, $\gamma = \dfrac{3\pi g\omega_0}{2N_0 c}$. Т.е. полученная в данной работе система нелинейных уравнений динамики поля встречных волн (11) включает, как частный случай, известную систему уравнений для огибающих взаимодействующих квазимонохроматических импульсов (13).

3. ЧАСТНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ СЛУЧАЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВСТРЕЧНЫХ НИЗКО- И ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ИМПУЛЬСОВ

Выведенные уравнения (11) применим для анализа частного случая взаимодействия полей низко- (E_+) и высокоинтенсивного (E_-) импульсов, для которых уравнения (11) упрощаются и принимают вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_+}{\partial z} + \dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_+}{\partial t} - a\dfrac{\partial^3 E_+}{\partial t^3} + b\int\limits_{-\infty}^{t} E_+ dt' + \dfrac{3cg}{2N_0}\dfrac{\partial}{\partial t}\left(E_-^2 E_+\right) = 0 & \text{(14а)} \\ \dfrac{\partial E_-}{\partial z} - \dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_-}{\partial t} + a\dfrac{\partial^3 E_-}{\partial t^3} - b\int\limits_{-\infty}^{t} E_- dt' - \dfrac{3cg}{2N_0}E_-^2\dfrac{\partial E_-}{\partial t} = 0. & \text{(14б)} \end{cases}$$

Как видно из системы (14), мы предполагаем, что низкоинтенсивная волна не влияет на распространение высокоинтенсивной, а для нее самой нелинейный характер распространения определяется только сильным полем встречной волны.

Решения уравнения (14б), описывающие различные режимы самовоздействия излучения с широким спектром, включая импульсы из малого числа колебаний светового поля, изучались во многих работах (смотри, например, их обзоры в [6,10]). Ниже, при определении решений уравнения (14а) для низкоинтенсивной волны динамику поля высокоинтенсивной волны $E_-(t,z)$ будем полагать известной.

Для анализа решений уравнения (14а) проведем его нормировку. Введем новые переменные $\widetilde{E}_+ = \dfrac{E_+}{E_{+0}}$, $\widetilde{E}_- = \dfrac{E_-}{E_{-0}}$, $\widetilde{z} = a\omega_0^3 z$, $\widetilde{t} = \omega_0 t$, где E_{+0} и E_{-0} - максимальные значения напряженностей полей прямой и встречных волн до их взаимодействия, ω_0 - исходная центральная

частота низкоинтенсивной волны $E_+(z,t)$. В этих переменных уравнение (14а) принимает вид:

$$\frac{\partial \tilde{E}_+}{\partial \tilde{z}} + \frac{1}{V}\frac{\partial \tilde{E}_+}{\partial \tilde{t}} - \frac{\partial \tilde{E}_+}{\partial \tilde{t}^3} + B\int_{-\infty}^{\tilde{t}} \tilde{E}_+ d\tilde{t}' + G\frac{\partial}{\partial \tilde{t}}(\tilde{E}_-^2 \tilde{E}_+) = 0, \qquad (15)$$

где $\frac{1}{V} = \frac{N_0}{\Delta n_д}$; $B = 3\left(\frac{\omega_{кр}}{\omega_0}\right)^4$; $G = 4\frac{\Delta n_{нл}}{\Delta n_д}$; $\Delta n_д = ca\omega_0^3$ характеризует дисперсию показателя преломления оптической среды; $\Delta n_{нл} = \frac{3c^2 g}{8N_0}E_{-0}^2$ имеет смысл нелинейной добавки к ее показателю преломления $\Delta n_{нл} = n_2 I$ (здесь n_2 - коэффициент нелинейного показателя преломления, а I - интенсивность излучения) в поле монохроматической волны с амплитудой E_{-0}; $\omega_{кр} = \left(\frac{b}{3a}\right)^{-4}$ - частота излучения, при которой групповая дисперсия в среде равняется нулю [1].

Отметим, что для введенных параметров задачи выполняются неравенства:

$$\Delta n_д << N_0 \qquad (16а)$$

$$\Delta n_{нл} << N_0 \qquad (16б)$$

первое из которых прямо следует из нерезонансного приближения (5), а второе заложено в исходном уравнении (1), в котором нелинейность поляризованности изотропной среды рассматривается в наинизшем кубичном по полю приближении.

В качестве примера вещества, в котором взаимодействуют два встречных световых импульса, рассмотрим кварцевое стекло с характеристиками $N_0 = 1.45,\ a = 2.74\cdot 10^{-44}\frac{c^3}{см}$, $b = 3.94\frac{1}{c\cdot см}$, $n_2 = 2.9\cdot 10^{-16}\frac{см^2}{Вт}$ [10,11]. При центральной длине волны

низкоинтенсивного излучения $\lambda_0 = 780$ *нм* для него имеем $\Delta n_д = 4.7 \cdot 10^{-3}$. Значение $\Delta n_{нл} = 0.1$, еще вполне удовлетворяющее неравенству (16а), реализуется при интенсивности $I = 3 \cdot 10^{14} \frac{Вт}{см^2}$. Впрочем, при $I > 5 \cdot 10^{13} \frac{Вт}{см^2}$ даже для импульсов из малого числа колебаний возникает необходимость кроме безинерционной кубичной нелинейности учитывать и накапливающуюся плазменную нелинейность диэлектрической среды [4,14].

Ниже ограничимся анлизом решений нормированного уравнения (15) для случая, когда коэффициент при нелинейном слагаемом G существенно больше коэффициентов при дисперсионных слагаемых, т.е., например, для излучения со спектром в области нормальной групповой дисперсии – при G, существенно большим единицы. Для кварцевого стекла в поле излучения с центральной длиной волны $\lambda_0 = 780 нм$ и интенсивностью $I = (1...5) \cdot 10^{13} \frac{Вт}{см^2}$ выполняется оценка $G = 2.5...12.5$.

Когда дисперсионными эффектами по сравнению с нелинейными в процессе взаимодействия встречных волн можно принебречь, уравнение (15) упрощается до вида:

$$\frac{\partial E_+}{\partial z} + \frac{1}{V}\frac{\partial E_+}{\partial t} + G\frac{\partial}{\partial t}(E_-^2 E_+) = 0, \qquad (17)$$

в котором знак «~» опущен. Переходя в сопровождающую систему координат $\tau = t - \frac{1}{V}z,\ z' = z$ и применяя метод последовательных приближений Пикара [15], в первой итерации несложно получить приближенное решение (17) в виде:

$$E_+(z', \tau) = E_л(\tau) + G\int_{z_0}^{z'} \frac{\partial}{\partial \tau}\left[E_-^{\,2}(z'', \tau) E_л(\tau)\right] dz'', \qquad (18)$$

где $E_д(\tau)$ - решение линеаризированного уравнения (17) вида светового импульса, неизменяющегося по форме при распространении в бездисперсионной среде, $E_-(z',\tau)$ - заданное сильное поле встречного импульса, z_0 - координата диэлектрической среды, начиная с которой световые импульсы, распространяющиеся навстречу друг другу, во времени начинают пересекаться (см. рис. 1а).

4. ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА КРАТНЫХ ЧАСТОТАХ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ИМПУЛЬСОВ ИЗ МАЛОГО ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ РАЗНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА.

На рис.1 проиллюстрировано столкновение низкоинтенсивного импульса, имеющего до взаимодействия нормированный вид:

$$E_+(\tau) = \exp(-\frac{\tau^2}{\tau_+^2})\sin(\tau) \qquad (19)$$

и встречного высокоинтенсивного

$$E_+(\tau) = \exp(-\frac{\left(\tau + \frac{2}{V}z'\right)^2}{\tau_-^2})\sin\left(\frac{\omega_-}{\omega_+}\left(\tau + \frac{2}{V}z'\right)\right) \qquad (20)$$

где ω_- - центральная частота высокоинтенсивной волны, $\tau_+ = \omega_+\tau_{+0}, \tau_- = \omega_+\tau_{-0}, \tau_{+0}, \tau_{-0}$ - исходные длительности импульсов, в кварцевом стекле, при $\frac{E_{+0}}{E_{-0}} = 0.2$, G=12.5 ($I_{-0}=1\cdot10^{13}$ Вт/см^2), τ_+=10 фс, τ_-=10 фс, λ_+=780 нм, λ_-=390 нм.

На рис. 2 представлен спектр низкоинтенсивного излучения после взаимодействия с высокоинтенсивным в нелинейной среде. Из рисунка видно, что в этом спектре в результате взаимодействия генерируются кратные $2\omega_- - \omega_+ = 3\omega_+$ и $2\omega_- + \omega_+ = 5\omega_+$ частоты.

На рис. 3а и 3б представлена временная эволюция электрического поля на генерируемых частотах. Как видно из рисунков, длительность импульсов на утроенных и упятеренных частотах составляет 8,3 фс и 9,0 фс соответственно. Отношение их максимальных амплитуд к максимальной амплитуде поля исходного излучения составляет $5{,}3\cdot10^{-3}$ и $8{,}7\cdot10^{-3}$. Отметим, что при выборе слоя среды достаточно тонким (с толщиной порядка области взаимодействия), поглощением в кварцевом стекле излучения

упятеренных частот в используемой выше первой итерации можно пренебречь, а при необходимости учесть его, как и изменение в тонком слое формы высокоинтенсивного импульса, в следующей итерации метода Пикара.

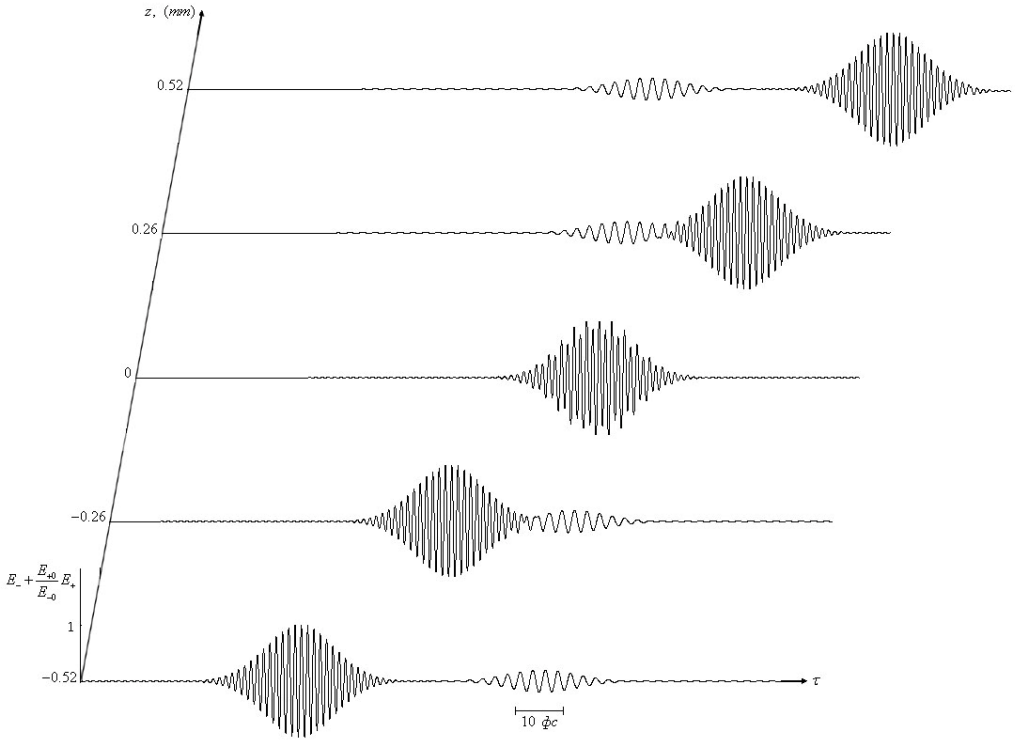


Рис. 1. Столкновение низко- и высокоинтенсивного импульсов в кварцевом стекле. Общая картина.

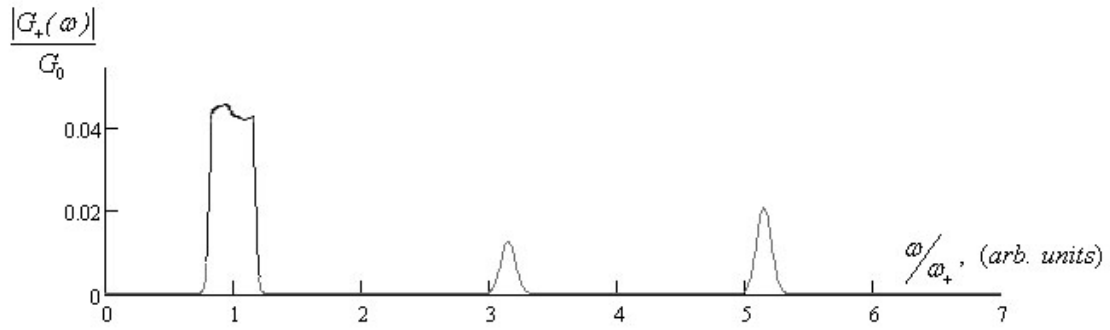
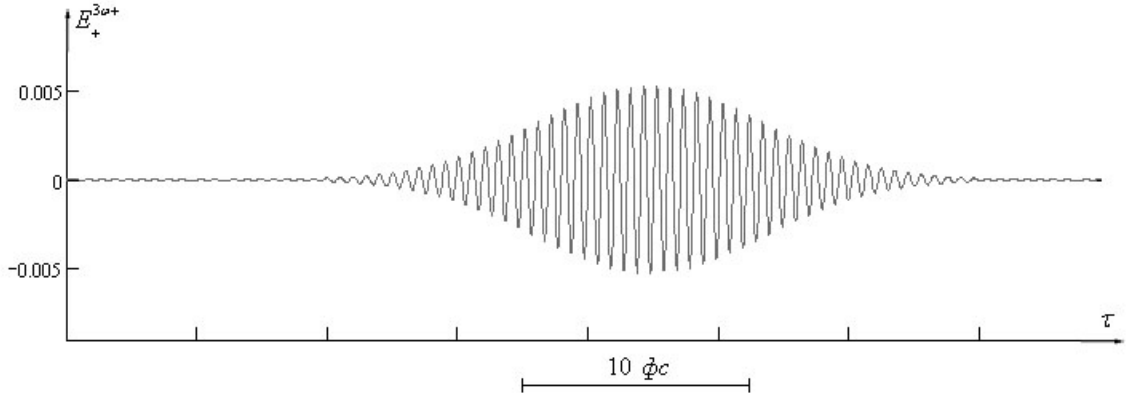
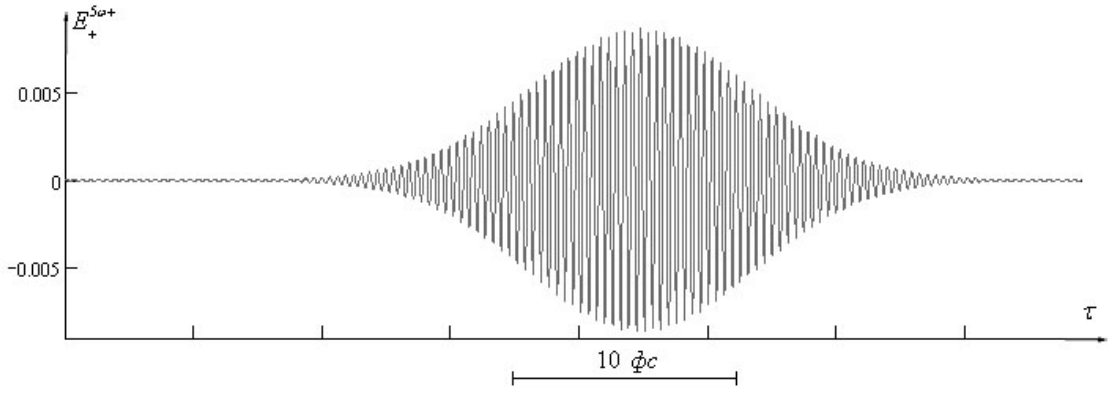


Рис. 2. Спектр низкоинтенсивного импульса после взаимодействия



а)



б)

Рис. 3. Импульсы, сгенерированные в результате взаимодействия на кратных частотах

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе выведены уравнения эволюции поля встречных световых импульсов из малого числа колебаний в диэлектрических нелинейных средах. Показано, что при столкновении импульсов с разным спектральным составом может генерироваться излучение на кратных частотах с длительностью меньшей, чем у исходных импульсов.

Результаты работы апробированы на следующих конференциях:

1. Буяновская Е.М., Козлов С.А. Динамика светового поля встречных импульсов из малого числа колебаний при их взаимодействии в нелинейных диэлектрических средах, IV Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика - 2005», 17-21 октября, 2005, Санкт-Петербург, Россия.
2. Буяновская Е.М., Козлов С.А. Взаимодействие встречных сверхкоротких импульсов с континуумными спектрами в нелинейных диэлектрических средах. XXXV научная и учебно-методическая конференция СПбГУ ИТМО "Достижения ученых, аспирантов и студентов университета в науке и образовании", 31 января – 3 февраля, 2006, Санкт-Петербург, Россия.
3. Буяновская Е.М., Козлов С.А. Генерация утроенных частот при взаимодействии встречных импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах. X Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах», 22-27 мая, 2006, Звенигород, Московская область, Россия.
4. Elizaveta M. Buyanovskaya, Sergei A. Kozlov Interaction of counter-propagating femtosecond pulses with continuum spectra, ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics 2006, September 4-7, 2006, St. Petersburg, Russia.

5. Буяновская Е.М. Динамика светового поля и спектра при взаимодействии встречных импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах, Научная молодежная школа «Оптика - 2006», 16-20 октября, 2006, Санкт-Петербург, Россия.

6. Буяновская Е.М., Козлов С.А. Взаимодействие встречных фемтосекундных спектральных суперконтинуумов в нелинейной диэлектрической среде, XXXVI научная и учебно-методическая конференция профессорско-преподавательского и научного состава СПбГУ ИТМО, 30 января – 2 февраля, 2007, Санкт-Петербург, Россия.

7. E.M. Buyanovskaya, S.A. Kozlov Dynamics of field of two counter-propagating few cycle light pulses in nonlinear dielectric media, ICONO/LAT, May 28-June 1, 2007, Minsk, Belarus.

Результаты работы опубликованы в следующих печатных изданиях:

1. Буяновская Е.М, Козлов С.А. Взаимодействие встречных световых импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах, Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, с.97-101, 2006

2. Буяновская Е.М., Козлов С.А. Динамика полей встречных световых импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах, Письма в ЖЭТФ (в печати)

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов С.А., Сазонов С.В. Нелинейное распространение импульсов длительностью в несколько колебаний светового поля в диэлектрических средах //ЖЭТФ. - 1997. - Т. 111, В. 2. - С. 404-418.
2. Nazarkin A., Korn G. Raman self-conversion of femtosecond laser pulses and generation of single-cycle radiation //Phys. Rev. A. - 1998. - V.58, №1. - P.R61-R64
3. Маймистов А.И. Некоторые модели распространения предельно коротких электромагнитных импульсов в нелинейной среде //Квантовая электроника. - 2000. - Т.30, №4. - С. 287-304.
4. Brabec Th., Krausz F. Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics //Rev. Mod. Phys. - 2000. - V.72, №2. - P. 545-591.
5. Казанцева Е.В., Маймистов А.И. Распространение предельно коротких импульсов в нерезонансной квадратично-нелинейной среде //Квантовая электроника. - 2000. - Т.30, №7. - С.623-628.
6. Shpolyanskiy Y.A., Belov D.L., Bakhtin M.A., Kozlov S.A. Analytic study of continuum spectrum pulse dynamics in optical waveguides //Applied Physics B. - 2003. - V.77, №2-3. - P.349-356.
7. Сазонов С.В., Халяпин В.А. О влиянии дифракции на нелинейное распространение оптических импульсов длительностью в несколько колебаний //Квантовая электроника. - 2004. - Т.34, №11. - С.1057-1063.
8. Ястребова Н.В., Шполянский Ю.А., Козлов С.А. Нелинейное отражение импульсов из малого числа колебаний светового

поля от просветленной границы раздела сред //Оптический журнал. - 2004. - Т. 71, №6. - С.78-83.

9. Белов Д.Л., Козлов С.А., Шполянский Ю.А. О самосжатии спектрального суперконтинуума //Известия РАН, серия физическая. - 2005. - Т.69, №8. - С.1128-1130.
10. Berkovsky A.N., Kozlov S.A., Shpolyanskiy Y.A. Self-focusing of few cycle light pulses in dielectric media //Physical Review A72. - 2005. - 043821 (9 pages).
11. Бахтин М.А., Козлов С.А. Формирование последовательности сверхкоротких сигналов при столкновении импульсов из малого числа колебаний светового поля в нелинейных оптических средах //Оптика и спектроскопия. - 2005. - V.98, N3. - С. 425-430.
12. Bespalov V.G., Kozlov S.A., Shpolyansky Yu.A., Walmsley I.A. Simplified field wave equations for nonlinear propagation of extremely short light pulses //Phys. Rev. A. - 2002. - №666. - 013811 (10 pages)
13. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. - М.: Мир, 1996. - 324 с.
14. Козлов С.А., Королев А.А., Штумпф С.А. //Известия РАН. - сер физ. - 2007.
15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1997. - 831 с.

1.2. Бакалаврская выпускная квалификационная работа «Нелинейное отражение фемтосекундного спектрального суперконтинуума от диэлектрических сред».

НЕЛИНЕЙНОЕ ОТРАЖЕНИЕ
ФЕМТОСЕКУНДНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО
СУПЕРКОНТИНУУМА
ОТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД

Выпускная квалификационная работа на степень бакалавра
Автор: Мохнатова О.А.
Руководитель: д. ф.-м. н., проф. Козлов С.А

2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ **3**

2. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СПЕКТР ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ **5**

3. НЕЛИНЕЙНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ОДИНОЧНОГО ИМПУЛЬСА ИЗ МАЛОГО ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ **8**

4. НЕЛИНЕЙНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ДВУХ ОДНОВРЕМЕННО ПАДАЮЩИХ НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА ИМПУЛЬСОВ ИЗ МАЛОГО ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ С РАЗНЫМИ ЦЕНТРАЛЬНЫМИ ЧАСТОТАМИ **12**

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ **20**

ЛИТЕРАТУРА **23**

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие были созданы и появились во многих научных лабораториях эффективные лазерные системы, генерирующие высокоинтенсивные сверхкороткие световые импульсы фемто- и субфемтосекундного диапазона [1-3]. Распространение фемтосекундного излучения в оптических средах без разрушения вещества (по крайней мере за сверхкороткую длительность импульса) оказалось возможным при гораздо больших интенсивностях, чем для более длинных импульсов [4]. Это привело к возможности свободно наблюдать нелинейные явления, которые в поле импульсов больших длительностей наблюдаются редко. Например, достаточно необычное даже для пикосекундного диапазона явление сверхуширения временного спектра излучения, когда ширина спектра становится соразмерной с его центральной частотой, в поле фемтосекундных импульсов наблюдается практически во всех прозрачных средах [5-7]. Это явление, которое называют также генерацией спектрального суперконтинуума, по-видимому, можно считать универсальным в фемтосекундной нелинейной оптике. Оно сопровождает как самоуширение или самосжатие импульсов в волноводах [6, 8, 9], так и их самофокусировку в объемных средах [10]. В настоящей работе рассмотрено нелинейное отражение фемтосекундных импульсов со сверхшироким временными спектрами.

В работах [11-13] были получены соотношения, связывающие параметры поля отраженного излучения, временной спектр которого может занимать значительную часть диапазона прозрачности диэлектрика, от временной структуры падающего на нелинейный диэлектрик света для случая нормального падения

плоской поперечно однородной волны. В данной работе, по-видимому, впервые получены аналоги формул Френеля для случая отражения от нелинейного диэлектрика неоднородной (параксиальной) волны со сверхуширенным временным спектром. Выведенные формулы использованы для анализа нелинейного отражения различных типов фемтосекундных спектральных суперконтинуумов.

2. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СПЕКТР ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Параксиальная динамика вдоль оси z поля E линейно-поляризованного излучения с временным спектром в диапазоне прозрачности диэлектрической однородной и изотропной среды с электронной нелинейностью может быть описана уравнением [14]

$$\frac{\partial E}{\partial z}+\frac{N_0}{c}\frac{\partial E}{\partial t}-a\frac{\partial^3 E}{\partial t^3}+b\int_{-\infty}^{t}Edt'+gE^2\frac{\partial E}{\partial t}=\frac{c}{2N_0}\Delta_\perp\int_{-\infty}^{t}Edt', \qquad (1)$$

где N_0, a, b – константы, характеризующие нерезонансную дисперсию линейного показателя преломления среды

$$\begin{cases} n(\omega)=N_0+\Delta n(\omega), \\ \Delta n(\omega)=ca\omega^2-c\dfrac{b}{\omega^2}, \end{cases} \qquad (2)$$

$g=\dfrac{6\pi\chi}{cN_0}$ – описывает безынерционную нелинейность ее поляризационного отклика $P_{nl}=\chi E^3$, χ – нелинейная восприимчивость среды, c – скорость света, $\Delta_\perp$ – поперечный лапласиан, t – время.

Граничные условия при падении параксиального излучения на границу раздела диэлектрических сред под малыми углами имеют вид [15]

$$E_{inc}+E_{ref}=E_{tr}, \qquad (3а)$$

$$\frac{\partial E_{inc}}{\partial z}+\frac{\partial E_{ref}}{\partial z}=\frac{\partial E_{tr}}{\partial z}, \qquad (3б)$$

где E_{inc}, E_{ref} и E_{tr} – напряженности электрического поля падающей, отраженной и преломленной волн соответственно.

Будем полагать, что световое излучение падает на границу раздела линейная среда (характеризуемая дисперсионными параметрами N_1,

a_1, b_1) – нелинейная среда (характеризуемая N_2, a_2, b_2 и нелинейным коэффициентом g) вдоль положительного направления оси z из линейной среды. Тогда для падающей, отраженной и преломленной волн выполняется:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_{inc}}{\partial z} + \dfrac{N_1}{c}\dfrac{\partial E_{inc}}{\partial t} - a_1\dfrac{\partial^3 E_{inc}}{\partial t^3} + b_1\int\limits_{-\infty}^{t} E_{inc}dt' = \dfrac{c}{2N_1}\Delta_\perp\int\limits_{-\infty}^{t} E_{inc}dt' \\ \dfrac{\partial E_{ref}}{\partial z} - \dfrac{N_1}{c}\dfrac{\partial E_{ref}}{\partial t} + a_1\dfrac{\partial^3 E_{ref}}{\partial t^3} - b_1\int\limits_{-\infty}^{t} E_{ref}dt' = -\dfrac{c}{2N_1}\Delta_\perp\int\limits_{-\infty}^{t} E_{ref}dt' \\ \dfrac{\partial E_{tr}}{\partial z} + \dfrac{N_2}{c}\dfrac{\partial E_{tr}}{\partial t} - a_2\dfrac{\partial^3 E_{tr}}{\partial t^3} + b_2\int\limits_{-\infty}^{t} E_{tr}dt' + gE_{tr}{}^2\dfrac{\partial E_{tr}}{\partial t} = \dfrac{c}{2N_2}\Delta_\perp\int\limits_{-\infty}^{t} E_{tr}dt'. \end{cases} \quad (4)$$

Используя граничные условия (3), из системы (4) несложно получить связь между полем отраженного и падающего излучения вида

$$\begin{aligned} &\frac{N_1}{c}\frac{\partial E_{inc}}{\partial t} - a_1\frac{\partial^3 E_{inc}}{\partial t^3} + b_1\int\limits_{-\infty}^{t} E_{inc}dt' - \frac{c}{2N_1}\Delta_\perp\int\limits_{-\infty}^{t} E_{inc}dt - \\ &-\frac{N_1}{c}\frac{\partial E_{ref}}{\partial t} + a_1\frac{\partial^3 E_{ref}}{\partial t^3} - b_1\int\limits_{-\infty}^{t} E_{ref}dt' + \frac{c}{2N_1}\Delta_\perp\int\limits_{-\infty}^{t} E_{ref}dt = \\ &= \frac{N_2}{c}\frac{\partial (E_{inc}+E_{ref})}{\partial t} - a_2\frac{\partial^3 (E_{inc}+E_{ref})}{\partial t^3} + b_2\int\limits_{-\infty}^{t}(E_{inc}+E_{ref})dt' + \\ &+ g(E_{inc}+E_{ref})^2\frac{\partial (E_{inc}+E_{ref})}{\partial t} - \frac{c}{2N_2}\Delta_\perp\int\limits_{-\infty}^{t}(E_{inc}+E_{ref})dt. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение (5) для пространственно-временного спектра излучения

$$G(\omega,k_x,k_y) = \int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits\int E(t,x,y)\exp\left[i(\omega t - k_x x - k_y y)\right]dt\,dx\,dy \quad (6)$$

решается в квадратурах и с учетом нерезонансной дисперсии, при которой $\Delta n(\omega) << N_0$ а также малости E_{ref} по сравнению с E_{inc} (характерно для диэлектриков), зависимость спектра отраженного излучения G_{ref} от спектра падающего G_{inc} может быть приведена к виду

$$G_{ref} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\left(1 + \frac{c^2}{n_1 n_2}\frac{k_x^2 + k_y^2}{\omega^2}\right)G_{inc} - \frac{gcS}{3(n_1 + n_2)}, \quad (7)$$

где $n_1(\omega)$ и $n_2(\omega)$ – линейные показатели преломления граничащих сред,

$$S(\omega,k_x,k_y)=\int\limits_{-\infty}^{\infty}\iint E_{inc}^3(t,x,y)e^{i(\omega\cdot t-k_x\cdot x-k_y\cdot y)}dt\,dx\,dy=$$

$$=\frac{1}{(2\pi)^6}\iiint\limits_{-\infty}^{\infty}\iint G_{inc}(\omega-\omega',k_x-k_x',k_y-k_y')\,G_{inc}(\omega'-\omega'',k_x'-k_x'',k_y'-k_y'')\times$$

$$\times G_{inc}(\omega'',k_x'',k_y'')\,d\omega'dk_x'dk_y'\,d\omega''dk_x''dk_y''.$$

Линеаризованное соотношение (7), как несложно проверить, эквивалентно формулам Френеля в приближении параксиального излучения, а в приближении плоской однородной волны переходит в известную нелинейную формулу для спектра, выведенную в [13].

Полезно подчеркнуть, что примененная выше техника вывода нелинейной формулы Френеля (7) позволила получить спектр отраженного излучения в зависимости от параметров спектра падающей волны без решения уравнения динамики поля в нелинейной среде. Это возможно, когда излучение в нелинейной среде априорно является однонаправленным и динамика его поля описывается укороченным уравнением с первой (а не второй) производной по продольной координате, связи которых и фигурируют в граничных условиях (3б). На возможность решения задачи об отражении без определения преломленного поля в нелинейной среде впервые, по-видимому, было указано в работе [16].

3. НЕЛИНЕЙНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ОДИНОЧНОГО ИМПУЛЬСА ИЗ МАЛОГО ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ

Применим выведенную формулу (7) для анализа нелинейного отражения фемтосекундного спектрального суперконтинуума, который сфазирован и сжат во времени до всего нескольких колебаний светового поля [1, 2, 8]. Пусть поле падающего излучения имеет вид:

$$E_{inc}(t,x,y) = E_1 \cdot e^{-2\cdot\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^2} \cdot e^{-2\cdot\left(\frac{x}{\rho_1}\right)^2} \cdot e^{-2\cdot\left(\frac{y}{\rho_1}\right)^2} \cdot \sin(\omega_1 t), \qquad (8)$$

где ρ_1 – поперечный размер пучка, τ_1 – длительность импульса, предполагаемая немногим большей центрального периода колебаний $T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1}$, ω_1 – центральная частота, E_1 – амплитуда.

Соответственно, спектр (6) падающего импульса (8) имеет вид:

$$G_{inc}(\omega,k_x,k_y) = G_1\, e^{\left(-\rho_1{}^2 k_x^2/8\right)} e^{\left(-\rho_1{}^2 k_y^2/8\right)} \left[e^{\left(-\tau_1{}^2(\omega+\omega_1)^2/8\right)} - e^{\left(-\tau_1{}^2(\omega-\omega_1)^2/8\right)}\right], \qquad (9)$$

где $G_1 = \frac{E_1}{2i}\tau_1\rho_1{}^2\left(\frac{\pi}{2}\right)^{3/2}$.

Для иллюстрации основных закономерностей нелинейного отражения соотношения (7-9) удобно нормировать, вводя новые переменные $\widetilde{E} = \frac{E}{E_1};\ \widetilde{t} = \omega_1 t;\ \widetilde{x} = \frac{x}{\rho_1};\ \widetilde{y} = \frac{y}{\rho_1}$ и соответствующие им переменные в спектральной области $\widetilde{G} = \frac{G}{G_1};\ \widetilde{\omega} = \frac{\omega}{\omega_1};\ \widetilde{k}_x = \rho_1 k_x;\ \widetilde{k}_y = \rho_1 k_y$.

После нормировки формула (7) принимает вид (для всех этих новых переменных знак «~» ниже везде опускаем):

$$G_{ref} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\left(1 + \frac{D}{n_1 n_2}\frac{k_x^2 + k_y^2}{\omega^2}\right)G_{inc} - \frac{FS}{n_1 + n_2}, \qquad (10)$$

где $n_i(\omega) = N_i + A_i\omega^2 - \frac{B_i}{\omega^2}$ $\left(A_i = a_i c\omega_1^2,\ B_i = b_i c/\omega_1^2,\ i = 1, 2\right)$ – линейные показатели преломления граничащих сред; $F = \frac{g}{3}cE_1^2 = \frac{2}{3}\Delta n_{nl}$ – описывает нелинейность отражающей среды (здесь $\Delta n_{nl} = n_2 I$ – нелинейное изменение показателя преломления, n_2 – коэффициент нелинейного показателя преломления отражающей среды, I – интенсивность преломленного излучения, предполагаемая близкой интенсивности падающего), $D = \frac{c^2}{\rho_1^2\omega_1^2}$ – характеризует дифракцию пучка.

На рис. 1 приведены иллюстрации изменения структуры электрического поля и пространственно-временного спектра излучения с центральной длиной волны $\lambda_1 = 780$ нм (соответствующей излучению титан-сапфирового лазера), пространственно-временными параметрами $\rho_1 = 10 \cdot \lambda_1$, $\tau_1 = 4.5$ фс и пиковой интенсивностью $I = 5 \cdot 10^{13}$ Вт/см^2 (при таком ее значении еще можно использовать приближение кубичной нелинейности [17]), падающего из воздуха на кварцевое стекло ($N = 1.4508$, $a = 2.7401 \cdot 10^{-44}$ с^3/см, $b = 3.9437 \cdot 10^{17}$ 1/(с · см), $n_2 = 2.9 \cdot 10^{-16}$ см^2/Вт [10]). При указанных параметрах световой волны и характеристиках граничащих сред коэффициенты нормированного уравнения (10) имеют значения $N_1 = 1$, $A_1 = B_1 = 0$, $N_2 = 1.45$, $A_2 = 4.8 \cdot 10^{-3}$, $B_2 = 2.0 \cdot 10^{-3}$, $D = 0.25 \cdot 10^{-3}$, $F = 9.7 \cdot 10^{-3}$.

На рис. 1(а) и рис. 1(б) иллюстрированы зависимости электрического поля E_{inc} падающего излучения от координаты и времени и его спектра G_{inc} от пространственной и временной частот. В связи с цилиндрической симметрией пучка (8) на рисунке дана зависимость поля только от одной пространственной координаты.

На рис. 1(в) и рис. 1(г) представлены электрическое поле E_{ref} и спектр G_{ref} отраженного излучения. Из рис. 1(в) видно, что фаза линейной части отраженного импульса испытывает скачок на π, что обусловлено отражением от более плотной среды. Основным нелинейным эффектом является генерация излучения на утроенной частоте, энергия которого составляет величину порядка 10^{-6} от энергии падающего импульса (рис. 1(г)).

На рис. 1(д) представлена зависимость поля от времени на оси отраженного пучка на основных (1) и утроенных (2) частотах. На рис. 1(е) приведены временные и пространственные спектры излучения на этих же частотах, которые для удобства сопоставления их полуширины нормированы на свои максимальные значения. Из рисунков видно, что импульс на утроенной частоте примерно в $\sqrt{3}$ раз короче импульса на основной частоте по временной длительности (что несложно показать и аналитически из (7) для падающего излучения(8)). И в такое же число раз шире его временной и пространственный спектр.

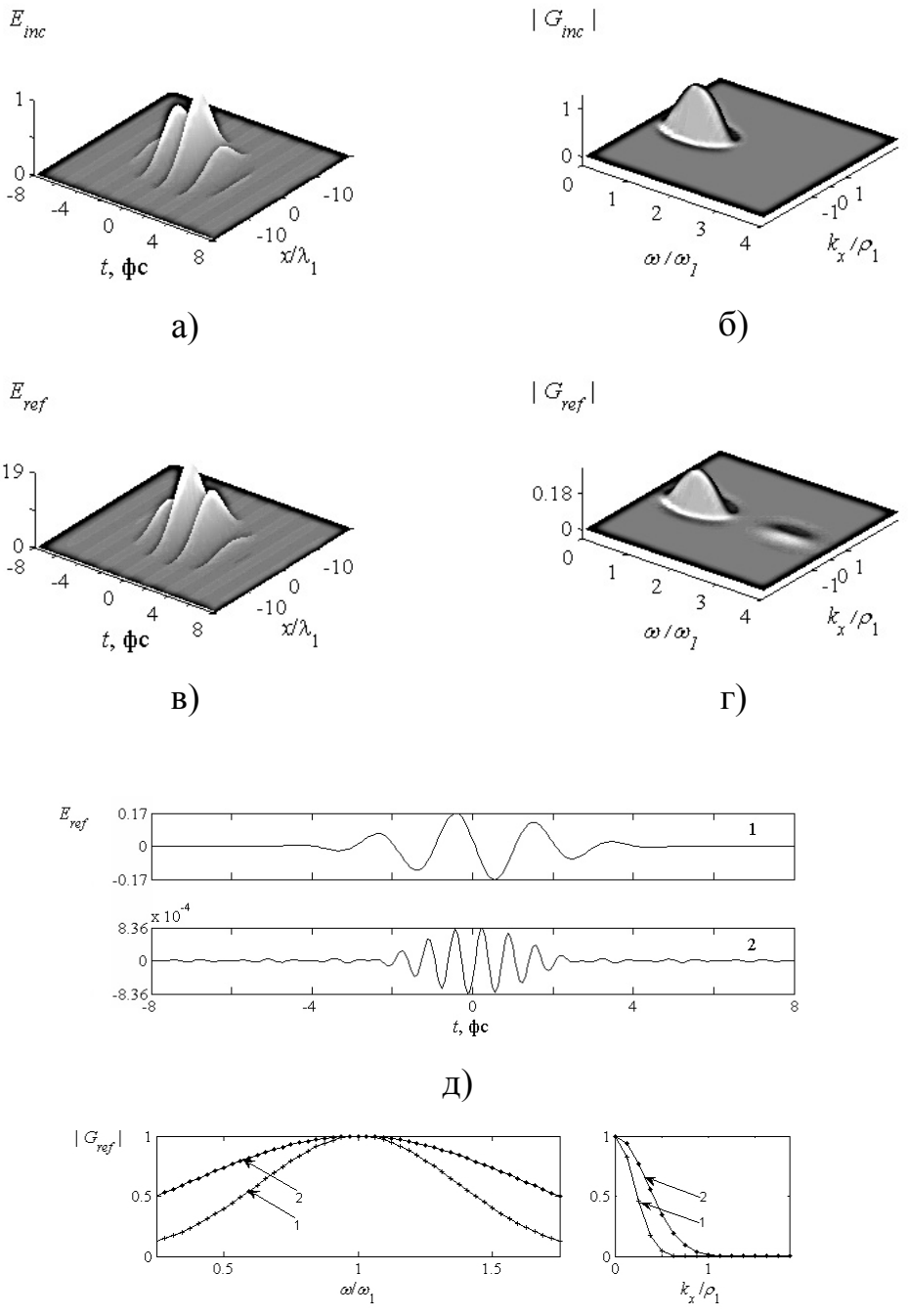


Рис. 1. Нормированные поле E_{inc} (а) и пространственно-временной спектр G_{inc} (б) (логарифмический масштаб) падающего на границу раздела сред одиночного гауссова импульса; нормированные поле E_{ref} (в) и пространственно-временной спектр G_{ref} (г) (логарифмический масштаб) отраженного излучения при падающем на границу раздела воздух – кварцевое стекло одиночного гауссова импульса; нормированные поля (д) и спектры (е) импульсов, отраженных на центральной (1) и утроенной (2) частотах

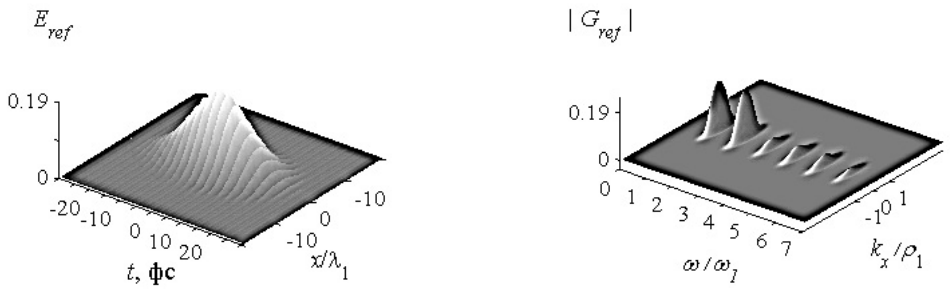
4. НЕЛИНЕЙНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ДВУХ ОДНОВРЕМЕННО ПАДАЮЩИХ НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА ИМПУЛЬСОВ ИЗ МАЛОГО ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ С РАЗНЫМИ ЦЕНТРАЛЬНЫМИ ЧАСТОТАМИ.

В настоящем разделе работы формулу (7) применим для анализа нелинейного отражения суперпозиции двух фемтосекундных гауссовых или супергауссовых импульсов, имеющей нормированный вид:

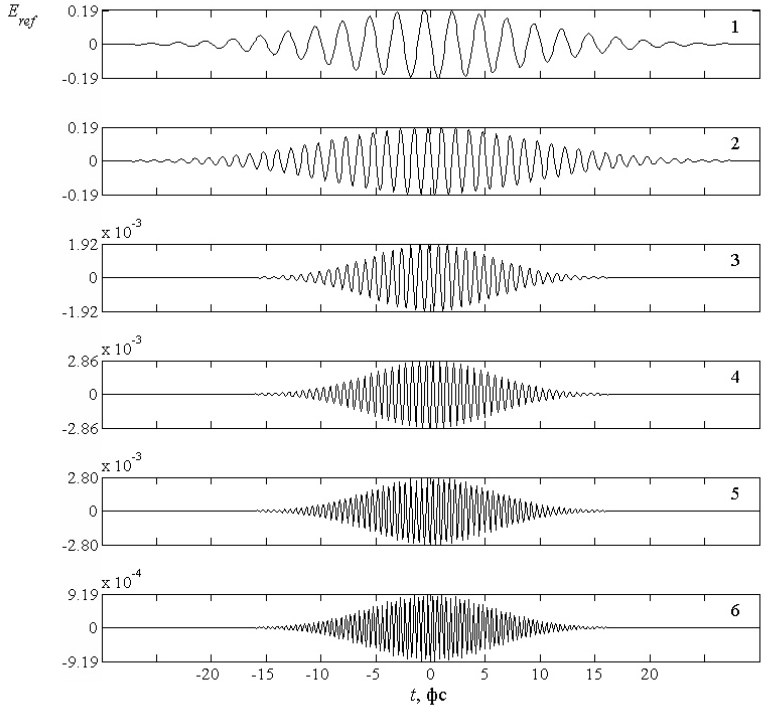
$$E_{inc}(t,x,y) = e^{-2\cdot\left(\frac{t}{\widetilde{\tau}_1}\right)^{2m}} \cdot e^{-2\cdot(x)^{2m}} \cdot e^{-2\cdot(y)^{2m}} \cdot \sin(t) + \\ + \frac{E_2}{E_1} \cdot e^{-2\cdot\left(\frac{t+\Delta\widetilde{t}}{\widetilde{\tau}_2}\right)^{2m}} \cdot e^{-2\cdot\left(\frac{x}{\widetilde{\rho}_2}\right)^{2m}} \cdot e^{-2\cdot\left(\frac{y}{\widetilde{\rho}_2}\right)^{2m}} \cdot \sin\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\left(t+\Delta\widetilde{t}\right)\right), \quad (11)$$

где E_1 и E_2 – амплитуды первого и второго импульсов соответственно, $\widetilde{\tau}_1 = \omega_1\tau_1$ и $\widetilde{\tau}_2 = \omega_1\tau_2$ – их нормированные временные длительности, $\widetilde{\rho}_2 = \rho_2/\rho_1$ – нормированный поперечный размер второго импульса, $\Delta\widetilde{t} = \omega_1 \cdot \Delta t$ – нормированная задержка импульсов по времени, $\omega_1 = 2\pi c/\lambda_1$ и $\omega_2 = 2\pi c/\lambda_2$ – центральные частоты импульсов, λ_1 и λ_2 – их центральные длины волн, Δt – временная задержка импульсов, m – целое число. Далее будем полагать амплитуды и поперечные размеры импульсов равными друг другу ($E_2/E_1 = 1$, $\rho_2/\rho_1 = 1$).

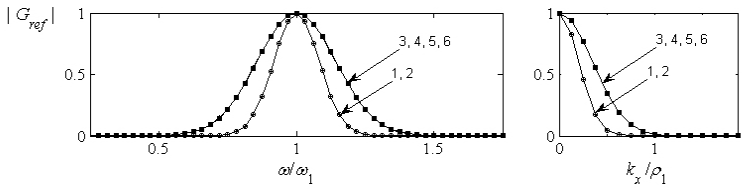
На рис. 2 иллюстрированы изменения структуры электрического поля и пространственно-временного спектра суперпозиции двух гауссовых ($m = 1$) импульсов с центральными длинами волн $\lambda_1 = 780$ нм и $\lambda_2 = 390$ нм, пространственно-временными параметрами $\rho_1 = \rho_2 = 10 \cdot \lambda_1$ ($D = 0.25 \cdot 10^{-3}$) и $\tau_1 = \tau_2 = 20$ фс ($\widetilde{\tau}_1 = \widetilde{\tau}_2 = 48$) и пиковой интенсивностью $I = 5 \cdot 10^{13}$ Вт/см^2 ($F = 9.7 \cdot 10^{-3}$), которые падают из воздуха на кварцевое стекло без временной задержки ($\Delta\widetilde{t} = 0$).



а) б)



в)



г)

Рис. 2. Нормированные поле E_{ref} (а) и пространственно-временной спектр G_{ref} (б) (логарифмический масштаб) отраженного излучения при падающей на границу раздела воздух – кварцевое стекло суперпозиции полей двух гауссовых импульсов одинаковой длительности; нормированные поля (в) и спектры (г) импульсов, отраженных на основных (1, 2) и кратных (3, 4, 5, 6) частотах.

На рис. 2(а) и 2(б) приведены электрическое поле E_{ref} и спектр G_{ref} отраженного излучения. Из рисунков видно, что основным нелинейным эффектом является генерация импульсов на кратных и комбинационных частотах $3\omega_1$(совпадающей с $2\omega_2 - \omega_1$), $2\omega_1 + \omega_2$, $2\omega_2 + \omega_1$ и $3\omega_2$.

На рис. 2(в) иллюстрированы волновые пакеты с разными центральными комбинационными частотами. Из рисунка видно, что импульсы, отраженные на кратных и комбинационных частотах, имеют меньшую длительность по сравнению с импульсами, отраженными на основных частотах ω_1 и ω_2 (примерно в $\sqrt{3}$ раза). Их спектральная полуширина как по временной оси, так и по пространственной (рис. 2(г)) в соответственное число раз больше. Причем с увеличением центральной частоты волновых пакетов на комбинационных частотах полуширина их пространственных спектров не изменяется, что свидетельствует о различии дифракционной расходимости отраженного излучения на разных частотах. Энергия импульсов на кратных и комбинационных частотах составляет величину порядка 10^{-6} от энергии падающего излучения.

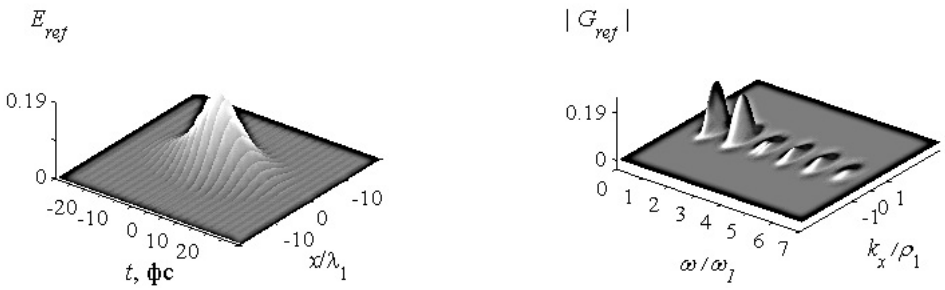
Рассмотрим отражение суперпозиции двух импульсов (11) с теми же параметрами, что и на рис. 2, но с длительностью второго импульса в два раза меньшей τ_2 = 10 фс ($\tilde{\tau}_2 = 24$). Из рис. 3(а) и 3(б), где приведены электрическое поле E_{ref} и спектр G_{ref} отраженного излучения, видно, что неодинаковая длительность импульсов приводит к различию ширин спектров излучения разных комбинационных частот.

На рис. 3(в) и рис. 3(г) представлены временные и пространственные характеристики излучения на комбинационных частотах по отдельности. Из рисунков видно, что длительности

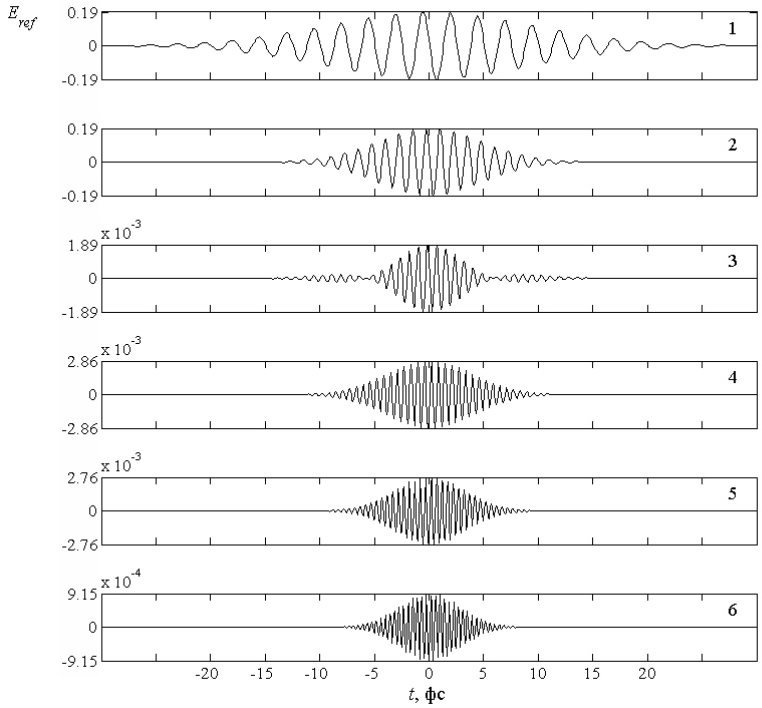
отраженных на этих частотах импульсов, во-первых, как и на рис. 2(в), короче длительности падающих, а, во-вторых, на этот раз не равны между собой (рис. 3(в)). Соответственно, как было упомянуто выше, полуширины временных спектров импульсов на разных частотах тоже отличаются (рис. 3(г)). На кривой 3 наблюдается провал спектральной плотности, который, по-видимому, объясняется наложением комбинационной частоты $2\omega_2 - \omega_1$ на утроенную $3\omega_1$.

Рассмотрим отражение суперпозиции двух импульсов (11) опять почти со всеми теми же параметрами, что и на рис. 2, но на этот раз форму импульсов будем полагать супергауссовой ($m = 2$) и предположим наличие между ними временной задержки $\Delta t = 10$ фс ($\Delta\tilde{t} = 24$).

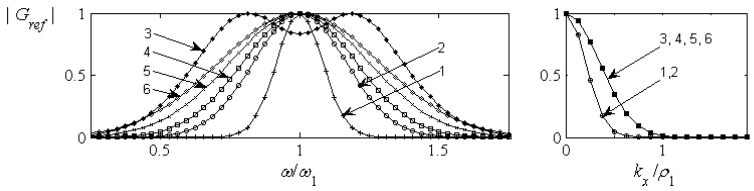
На рис. 4(а) и 4(б) приведены электрическое поле E_{ref} и спектр G_{ref} отраженного излучения. На рис. 4(в) представлены электрические поля импульсов, отраженных на комбинационных и кратных частотах. Из рисунков видно, что из-за совпадения комбинационной частоты $2\omega_2 - \omega_1$ с утроенной $3\omega_1$, отраженное на этой частоте излучение представляет собой два сдвинутых друг относительно друга на 13 фс импульса, причем длительность одного из них примерно в 4 раза меньше длительности падающих импульсов. Длительность и поперечные размеры импульсов, отраженных на других частотах (3, 4, 5, 6), как и в предыдущих случаях, меньше длительности и поперечных размеров импульсов, отраженных на основных частотах (1, 2) (рис. 4(г)).



а) б)



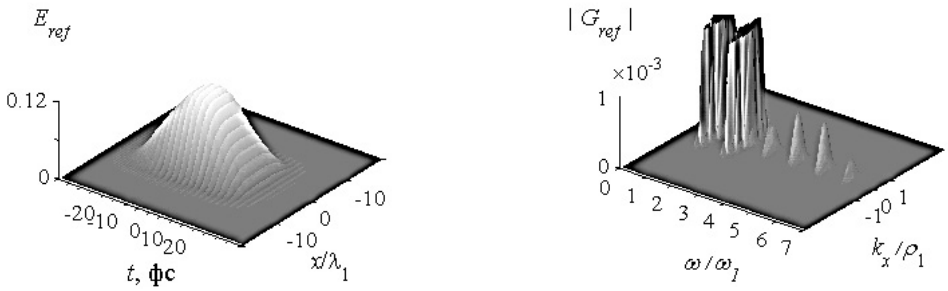
в)



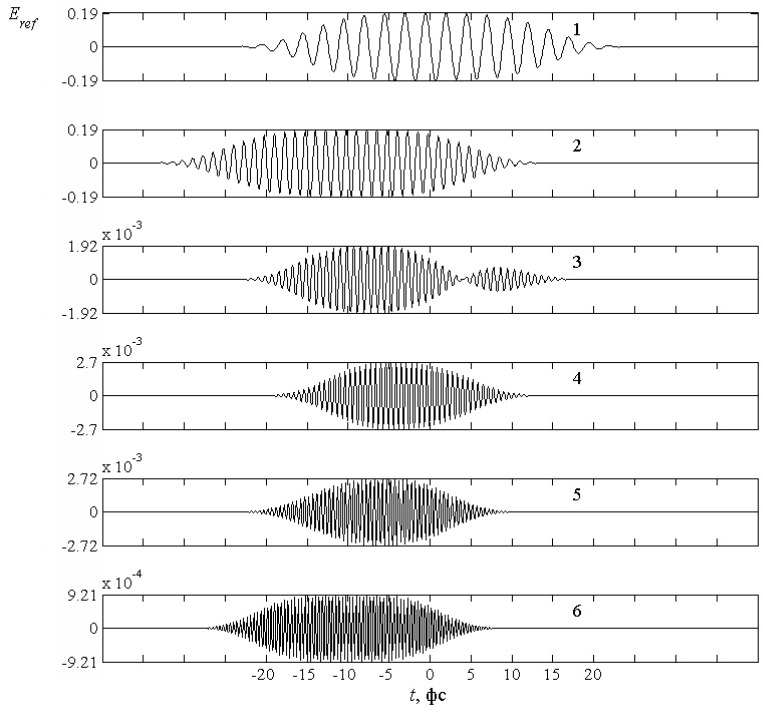
г)

Рис. 3. Нормированные поле E_{ref} (а) и пространственно-временной спектр G_{ref} (б) (логарифмический масштаб) отраженного излучения при падающей на границу раздела воздух – кварцевое стекло суперпозиции полей двух гауссовых импульсов разной длительности; нормированные поля (в) и спектры (г) импульсов, отраженных на основных (1, 2) и кратных (3, 4, 5, 6) частотах.

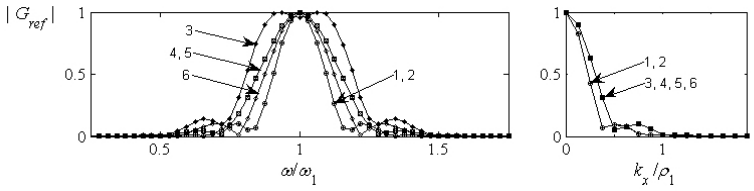
С увеличением задержки Δt время взаимодействия двух импульсов уменьшается, что может приводить к значительному уменьшению длительности и амплитуды импульсов, отраженных на комбинационных частотах. Иллюстрация этого эффекта приведена на рис. 5, на котором по сравнению с рис. 4 временная задержка между импульсами увеличена и составляет $\Delta t = 18$ фс ($\Lambda\tilde{t} = 43$). Как видно из этого рисунка, длительность импульсов, отраженных на комбинационных частотах $2\omega_1 + \omega_2$ и $2\omega_2 + \omega_1$ уменьшилась. Причем спектр этих импульсов имеет форму, близкую гауссовому распределению поля (а не супергауссовому как для кратных частот $3\omega_1$ и $3\omega_2$). Излучение, отраженное на частоте $3\omega_1$, представляет собой два отстоящих друг от друга примерно на 15 фс импульса.



а) б)

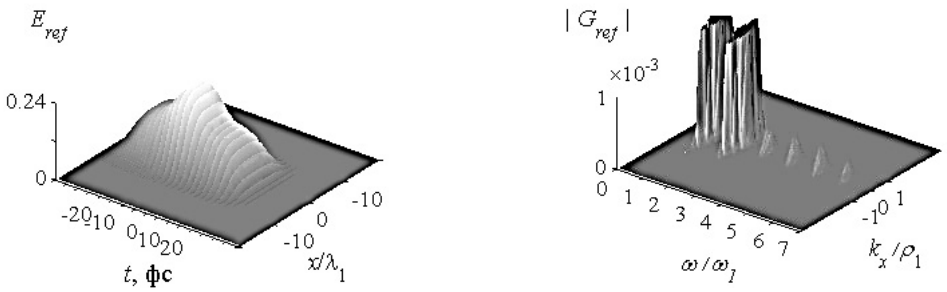


в)

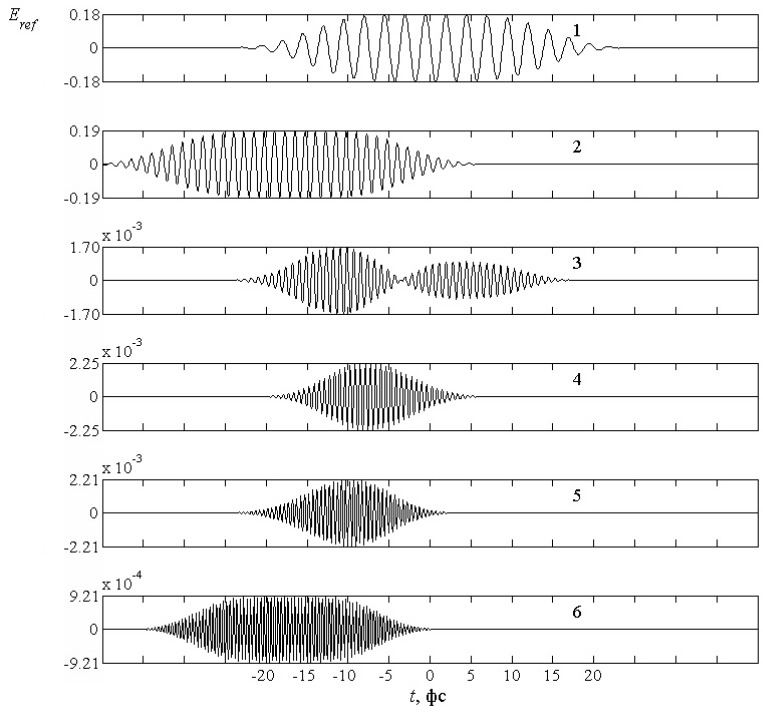


г)

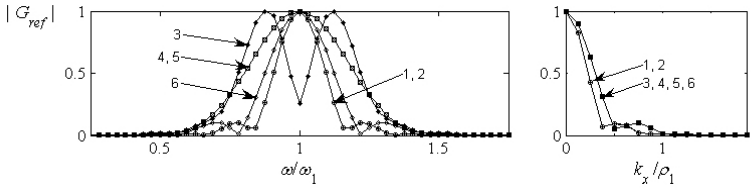
Рис. 4. Нормированные поле E_{ref} (а) и спектр G_{ref} (б) отраженного излучения при падающей на границу раздела воздух – кварцевое стекло суперпозиции полей двух супергауссовых импульсов одинаковой длительности с временной задержкой $\Delta t = 10$ фс; нормированные поля (в) и спектры (г) импульсов, отраженных на основных (1, 2) и кратных (3, 4, 5, 6) частотах.



а) б)



в)



г)

Рис. 5. Нормированные поле E_{ref} (а) и спектр G_{ref} (б) отраженного излучения при падающей на границу раздела воздух – кварцевое стекло суперпозиции полей двух супергауссовых импульсов одинаковой длительности с временной задержкой $\Delta t = 18$ фс; нормированные поля (в) и спектры (г) импульсов, отраженных на основных (1, 2) и кратных (3, 4, 5, 6) частотах.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выведены нелинейные формулы Френеля для отражения световых импульсов с узким пространственным, но сверхшироким временным спектром. Показано, что основным нелинейным эффектом при нормальном отражении параксиальной волны из малого числа колебаний от границы раздела воздух - кварцевое стекло является генерация излучения утроенной частоты, временной и пространственный спектр которого шире спектра падающей волны. В случае, когда на границу раздела сред падают одновременно два импульса с разной центральной частотой в отражении появляются комбинационные частоты, излучение на которых представляет собой высокочастотные импульсы также с меньшими длительностями и поперечными размерами, чем у падающих импульсов. Меняя временную задержку между падающими на границу раздела сред импульсами, можно управлять длительностью и формой импульсов, отраженных на комбинационных и кратных частотах и содержащих лишь несколько колебаний светового поля.

Результаты работы апробированы на следующих конференциях:

1. Мохнатова О.А., Козлов С.А. Изменение пространственно-временных спектров импульсов предельно коротких длительностей при нелинейном параксиальном отражении от диэлектриков. IV Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика 2005» , 17-21 октября, 2005, Санкт-Петербург, Россия.
2. Мохнатова О.А., Берковский А.Н., Козлов С.А. Нелинейное параксиальное отражение от диэлектриков импульсов из малого числа колебаний светового поля, XXXV научная и учебно-методическая конференция СПбГУ ИТМО «Достижения ученых, аспирантов и студентов университета в науке и образовании», 31 января – 3 февраля, 2006, Санкт-Петербург, Россия.
3. Мохнатова О.А., Берковский А.Н., Козлов С.А. Взаимодействие световых импульсов из малого числа колебаний при нелинейном отражении, X Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах», 22-27 мая, 2006, Звенигород, Московская область, Россия.
4. O.A. Mokhnatova, A.N. Berkovsky, S.A. Kozlov Nonlinear paraxial reflection of few-cycle pulses from dielectrics, International seminar «Days on Diffraction», may 29-31, 2006, St. Petersburg, Russia.
5. Мохнатова О.А., Берковский А.Н., Козлов С.А. Генерация кратных частот при нелинейном отражении двух импульсов из малого числа колебаний с разным спектральным составом, Научная молодежная школа «Оптика-2006», 16-20 октября, 2006, Санкт-Петербург, Россия.
6. Мохнатова О.А., Козлов С.А. Отражение фемтосекундного спектрального суперконтинуума от нелинейной диэлектрической среды, XXXVI Научная, образовательная и учебно-методическая

конференция профессорско-преподавательского и научного состава СПбГУ ИТМО, 30 января – 2 февраля, 2007, Санкт-Петербург, Россия.

7. O.A. Mokhnatova, S.A. Kozlov The nonlinear reflection of fields superposition of two few-cycle light pulses, ICONO/LAT, May 28-June 1, 2007, Minsk, Belarus.

Результаты работы опубликованы в следующих изданиях:

1. О.А. Мохнатова, А.Н. Берковский, С.А. Козлов Нелинейное параксиальное отражение от диэлектриков импульсов из малого числа колебаний светового поля, Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, в.34, с.8-13, 2006

2. Мохнатова О.А., Берковский А.Н. Козлов С.А. Взаимодействие импульсов из малого числа колебаний с разным спектральным составом при нелинейном отражении от диэлектриков, В кн.: Сборник статей «Проблемы когерентной и нелинейной оптики» под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова, с.198-202, 2006

3. О.А. Мохнатова, С.А.Козлов Нелинейное отражение фемтосекундного спектрального суперконтинуума, ЖЭТФ, 2007 (в печати)

ЛИТЕРАТУРА

1. Steinmeyer G., Sutter D.H., Gallman L., Matuschek N., Keller U. Frontiers in ultrashort pulse generation: Pushing the limits in linear and nonlinear optics // Science. - 1999. - V.286. - P. 1507-1512.

2. Cerullo G., De Silvestry S., Nisoli M., Sartania S., Stagira S., Svelto O. Few-optical cycle laser pulses: From high peak power to frequency tunability // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. - 2000. - V.6, №6. - P.948-958.

3. Hentschel M., Kienberger R., Spielmann U., Reider G.A., Milosevic N., Brabec T., Corkum P., Heinzmann, Drescher M., Krausz F. Attosecond metrology //Nature. - 2001. - V.414. - P.509.

4. Brabec Th., Krausz F. Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics. // Rev. Mod. Phys. - 2000. - V.72. №2. - P.545-591.

5. Brodeur A. Chin S.L. Ultrafast white-light continuum generation and self-focusing in transparent condensed media // J. Opt. Soc. Am. B. - 1999. - V.16. №4. - P.637-650.

6. Ranka J.K., Windeler R.S., Stenz A.J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 mm //Optics letters. - 2000. - V.25. №1. - P. 25-27.

7. Кандидов В.П., Косарева О.Г., Колтун А.А. Нелинейно-оптическая трансформация мощного фемтосекундного лазерного импульса в воздухе //Квантовая электроника. - 2003. - Т.33. №1. - С.69-75.

8. Беспалов В.Г., Козлов С.А., Сутягин А.Н., Шполянский Ю.А. Сверхуширение спектра интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов и их временное сжатие до одного колебания светового поля //Оптический журнал. - 1998. - Т.65. №10. - С.85-88.

9. Shpolyansky Yu.A., Belov D.L., Bakhtin M.A., Kozlov S.A. Analytic study of continuum spectrum pulse dynamics in optical waveguides. //Appl. Phys. B. - 2003. - V.7. - P.349-355.

10. Berkovsky A.N., Kozlov S.A., Shpolyansky Yu.A. Self-focusing of few-cycle light pulses in dielectric media //Phys. Rev. A 72. - 2005. - V.72. – P.043821.

11. Украинский А.О. Поляризационное самовоздействие импульсов предельно коротких длительностей в диэлектрических средах: Дисс. канд. физ.-мат. наук /СПбГУ ИТМО. - СПб, 2003. - 111 с.

12. Розанов Н.Н. Отражение сверхкоротких импульсов от границы раздела среды Друде-Лоренца //Опт. и спектр. - 2003. - Т.94. №3. - С.449-452.

13. Ястребова Н.В., Шполянский Ю.А., Козлов С.А. Нелинейное отражение импульсов из малого числа колебаний светового поля от просветленной границы раздела сред //Оптический журнал. - 2004. - т. 71, №6. - С.78-83.

14. Козлов С.А., Сазонов С.В. Нелинейное распространение импульсов длительностью в несколько колебаний светового поля в диэлектрических средах //ЖЭТФ. - 1997. - Т.111. В.2. - С.404-418.

15. Мохнатова О.А., Козлов С.А. Изменение пространственно-временных спектров импульсов предельно коротких длительностей при нелинейном параксиальном отражении от диэлектриков //Тр. IV международной конференции молодых ученых и специалистов "Оптика-2005". - 2005. - С.84-85.

16. Altshuler G.B., Ermolaev V.S., Kozlov S.A., Karasev V.B., Krykov K.I. Nonlinear reflection of elliptically polarized light //App. Phys. B. - 1983. - V.32. - P.97-100.

17. Штумпф С.А., Королев А.А., Козлов С.А. //Изв. РАН. - 2007. - сер. физ. Т71. - С.158-161.

Глава 4. Примеры презентаций выпускных квалификационных работ бакалавров

Презентация для
выпускной квалификационной работы на степень бакалавра

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВСТРЕЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ ИЗ МАЛОГО ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ В НЕЛИНЕЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Автор: Буяновская Е.М.
Руководитель: д. ф.-м. н., проф. Козлов С.А.

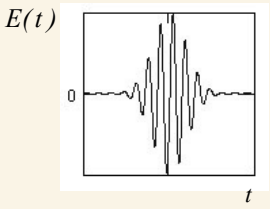
2007

Взаимодействие встречных импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах

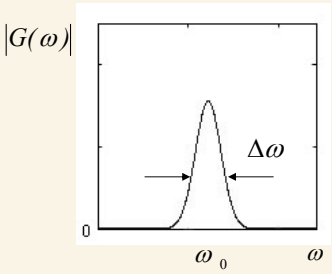
Выпускная квалификационная работа
Автор: Буяновская Е.М.
Руководитель: Козлов С.А., профессор, д.ф.-м.н.

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики
Кафедра Фотоники и Оптоинформатики
2007

Основные понятия



- Предельно короткий (по числу колебаний) импульс



- Континуумный спектр $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \sim 1$

Постановка задачи

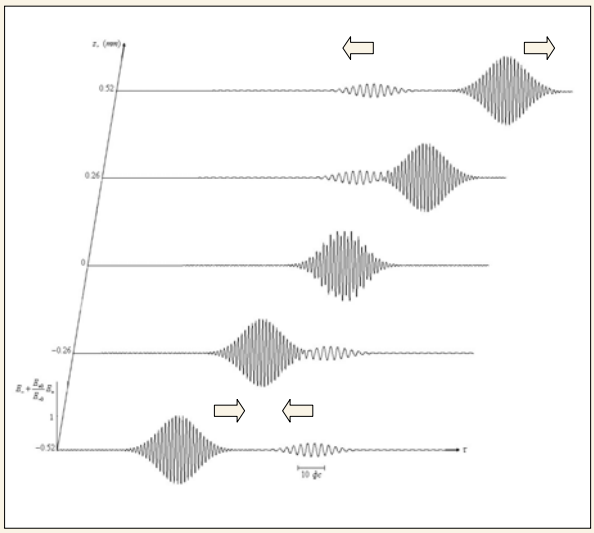


Рис. 1. Столкновение предельно коротких импульсов в кварцевом стекле. Общая картина.

Уравнение, описывающее эволюцию поля фемтосекундных световых импульсов с континуумными спектрами в нелинейных диэлектрических средах

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \frac{N_0^2}{c^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{2N_0}{c}a\frac{\partial^4 E}{\partial t^4} - \frac{2N_0}{c}bE - g\frac{\partial^2 E^3}{\partial t^2} = 0 \qquad (1)$$

где E - напряженность электрического поля излучения, c - скорость света в среде, z – направление его распространения, t - время, N_0 , a, b - параметры, характеризующие нерезонансную зависимость показателя преломления

$$n = N_0 + ca\,\omega^2 - c\frac{b}{\omega^2} \qquad (2)$$

от частоты ω, $g = \frac{4\pi\chi}{c^2}$, χ-нелинейная восприимчивость среды.

1. Козлов С.А., Сазонов С.В., Нелинейное распространение импульсов длительностью в несколько колебаний светового поля в диэлектрических средах. – ЖЭТФ, 1997, т.111 в.2, с.408-418.

Метод вывода уравнений встречных волн

В настоящей работе уравнения встречных волн искали в виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_+}{\partial z} + \dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_+}{\partial t} - a\dfrac{\partial^3 E_+}{\partial t^3} + b\int\limits_{-\infty}^{t} E_+ dt' + F_+(E_+, E_-) = 0 \\ \dfrac{\partial E_-}{\partial z} - \dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_-}{\partial t} + a\dfrac{\partial^3 E_-}{\partial t^3} - b\int\limits_{-\infty}^{t} E_- dt' - F_-(E_-, E_+) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Функции F_+ и F_- определялись путем дифференцирования уравнений (3) по z, руководствуясь тем, что система укороченных уравнений (3) должна являться решением полного волнового уравнения (1) с точностью до малых величин.

Искомые функции

В работе было показано, что функции вида:

$$\begin{aligned} F_+ &= a_1 E_+^2 \frac{\partial E_+}{\partial t} + a_2 E_+^2 \frac{\partial E_-}{\partial t} + a_3 E_+ E_- \frac{\partial E_+}{\partial t} + a_4 E_+ E_- \frac{\partial E_-}{\partial t} + a_5 E_-^2 \frac{\partial E_+}{\partial t} + a_6 E_-^2 \frac{\partial E_-}{\partial t} \\ F_- &= b_1 E_-^2 \frac{\partial E_-}{\partial t} + b_2 E_-^2 \frac{\partial E_+}{\partial t} + b_3 E_- E_+ \frac{\partial E_-}{\partial t} + b_4 E_- E_+ \frac{\partial E_+}{\partial t} + b_5 E_+^2 \frac{\partial E_-}{\partial t} + b_6 E_+^2 \frac{\partial E_+}{\partial t} \end{aligned} \quad (4)$$

в которых

$$\begin{aligned} & a_1 = \frac{1}{2}a_3 = a_5 = b_1 = \frac{1}{2}b_3 = b_5 = \frac{3gc}{2N_0} \\ & 2a_2 + b_4 = 2b_2 + a_4 = \frac{6gc}{N_0} \\ & a_6 = b_6 = 0;\ a_2 = b_2;\ a_4 = b_4 \end{aligned} \quad (5)$$

удовлетворяют поставленной задаче

Уравнения, описывающие динамику поля встречных импульсов

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_+}{\partial z}+\dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_+}{\partial t}-a\dfrac{\partial^3 E_+}{\partial t^3}+b\int\limits_{-\infty}^{t}E_+dt'+ \\ +\dfrac{3cg}{2N_0}\left[E_+^2E_{+t}+mE_+^2E_{-t}+2E_+E_-E_{+t}+2(2-m)E_+E_-E_{-t}+E_-^2E_{+t}\right]=0 \\ \dfrac{\partial E_-}{\partial z}-\dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_-}{\partial t}+a\dfrac{\partial^3 E_-}{\partial t^3}-b\int\limits_{-\infty}^{t}E_-dt'- \\ -\dfrac{3cg}{2N_0}\left[E_-^2E_{-t}+mE_-^2E_{+t}+2E_-E_+E_{-t}+2(2-m)E_-E_+E_{+t}+E_+^2E_{-t}\right]=0, \end{cases} \quad (6)$$

где m – произвольное число

Законы сохранения

Ограничимся рассмотрением оптических импульсов

$$G(0)=\int\limits_{-\infty}^{\infty}Ee^{i0t}dt=\int\limits_{-\infty}^{\infty}Edt=0. \quad (7)$$

Анализ уравнений системы (6) показывает, что соотношение (7) для каждых из встречных волн сохраняется, т.е. выполняются уравнения:

$$\frac{d}{dz}\int\limits_{-\infty}^{\infty}E_+dt=0,$$

при m=1.

$$\frac{d}{dz}\int\limits_{-\infty}^{\infty}E_-dt=0.$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_+}{\partial z}+\dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_+}{\partial t}-a\dfrac{\partial^3 E_+}{\partial t^3}+b\int\limits_{-\infty}^{t}E_+dt'+\dfrac{cg}{2N_0}\dfrac{\partial}{\partial t}\left(E_+^3+3E_+^2E_-+3E_+E_-^2\right)=0 \\ \dfrac{\partial E_-}{\partial z}-\dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_-}{\partial t}+a\dfrac{\partial^3 E_-}{\partial t^3}-b\int\limits_{-\infty}^{t}E_-dt'-\dfrac{cg}{2N_0}\dfrac{\partial}{\partial t}\left(E_-^3+3E_-^2E_++3E_-E_+^2\right)=0, \end{cases} \quad (8)$$

Полевые уравнения в виде законов сохранения

Переход к медленно меняющимся огибающим

Важно отметить, что подстановка $E_+(z,t)=\frac{1}{2}\mathcal{E}_+(z,t)e^{i(\omega_0 t-k_0 z)}+к.с.$

$$E_-(z,t)=\frac{1}{2}\mathcal{E}_-(z,t)e^{i(\omega_0 t+k_0 z)}+к.с.,$$

где $\mathcal{E}_+$ и $\mathcal{E}_-$ - медленно меняющиеся огибающие встречных квазимонохроматических импульсов с несущей частотой ω_0

при характерных для приближения медленно меняющихся огибающих упрощениях, приводит полученную систему к хорошо известным уравнениям вида:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\mathcal{E}_+}{\partial z}+\dfrac{1}{v_g}\dfrac{\partial\mathcal{E}_+}{\partial t}-i\dfrac{\beta_2}{2}\dfrac{\partial^2\mathcal{E}_+}{\partial t^2}=-i\gamma\left(|\mathcal{E}_+|^2+2|\mathcal{E}_-|^2\right)\mathcal{E}_+\\ \dfrac{\partial\mathcal{E}_-}{\partial z}-\dfrac{1}{v_g}\dfrac{\partial\mathcal{E}_-}{\partial t}+i\dfrac{\beta_2}{2}\dfrac{\partial^2\mathcal{E}_-}{\partial t^2}=i\gamma\left(|\mathcal{E}_-|^2+2|\mathcal{E}_+|^2\right)\mathcal{E}_-,\end{cases}$$

$$\beta_2=\left(\frac{\partial^2 k}{\partial\omega^2}\right)_{\omega_0},\quad k(\omega)=\frac{N_0}{c}\omega+a\omega^3-\frac{b}{\omega},\quad \gamma=\frac{3cg\omega_0}{8N_0}.$$

Взаимодействие низко- и высокоинтенсивного встречных импульсов с континуумными спектрами

В случае взаимодействия низко – E_+ и высокоинтенсивного E_- импульсов уравнения (8) упрощаются и приводятся к следующему виду:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial E_+}{\partial z}+\dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_+}{\partial t}-a\dfrac{\partial^3 E_+}{\partial t^3}+b\displaystyle\int_{-\infty}^{t}E_+dt'+\frac{3cg}{2N_0}\frac{\partial}{\partial t}\left(E_-^2E_+\right)=0 & (9a)\\ \dfrac{\partial E_-}{\partial z}-\dfrac{N_0}{c}\dfrac{\partial E_-}{\partial t}+a\dfrac{\partial^3 E_-}{\partial t^3}-b\displaystyle\int_{-\infty}^{t}E_-dt'-\frac{3cg}{2N_0}E_-^2\frac{\partial E_-}{\partial t}=0. & (9b)\end{cases}$$

Нормированные уравнения и оценки

$$\tilde{E}_+ = \frac{E_+}{E_{+0}},\ \tilde{E}_- = \frac{E_-}{E_{-0}},\ \tilde{z} = a\omega_0^3 z,\ \tilde{t} = \omega_0 t,$$

В этих переменных уравнение (9а) принимает вид:

$$\frac{\partial \tilde{E}_+}{\partial \tilde{z}} + \frac{1}{V}\frac{\partial \tilde{E}_+}{\partial \tilde{t}} - \frac{\partial \tilde{E}_+}{\partial \tilde{t}^3} + B\int_{-\infty}^{t} \tilde{E}_+ d\tilde{t}' + G\frac{\partial}{\partial \tilde{t}}(\tilde{E}_-^2 \tilde{E}_+) = 0, \qquad (10)$$

где $\frac{1}{V} = \frac{N_0}{\Delta n_g}$; $B = \frac{b}{a\omega_0^4}$; $G = 4\frac{\Delta n_{нл}}{\Delta n_g}$; $\Delta n_g = ca\omega_0^2$

$$\Delta n_{нл} = \frac{3c^2 g}{8N_0} E_{-0}^2 \qquad \Delta n_{нл} = n_2 I$$

Нормированные уравнения и оценки

В качестве примера рассмотрим кварцевое стекло с характеристиками:

$$N_0 = 1.45,\ a = 2.74\cdot 10^{-44}\frac{c^3}{см},\quad n_2 = 2.9\cdot 10^{-16}\frac{см^2}{Вт}$$

При центральной длине волны излучения $\lambda_0 = 780\,нм$ для него имеем $\Delta n_g = 4.7\cdot 10^{-3}$

ограничимся анализом решений нормированного уравнения (10) для случая, когда коэффициент G существенно больше коэффициентов при дисперсионных слагаемых, т.е., например при G существенно больше единицы.

$$I = (1..5)\cdot 10^{13}\frac{Вт}{см^2} \quad \Longleftrightarrow \quad G = 2.5..12.5$$

Нормированные уравнения и приближенное решение для слабого поля в приближении заданного сильного поля встречной волны

Когда в процессе взаимодействия встречных волн мы можем пренебречь дисперсионными эффектами по сравнению с нелинейными уравнение (10) упрощается и принимает вид:

$$\frac{\partial E_+}{\partial z} + \frac{1}{V}\frac{\partial E_+}{\partial t} + G\frac{\partial}{\partial t}(E_-^2 E_+) = 0 \qquad (11)$$

$$\tau = t - \frac{1}{V}z, \quad z' = z$$

и, используя метод последовательных приближений Пикара, в первой итерации мы получаем приближенное решение (10) в следующей форме:

$$E_+(z',\tau) = E_l(\tau) + G\int_{z_0}^{z'} \frac{\partial}{\partial \tau}\left[E_-^{\,2}(z'',\tau)E_l(\tau)\right]dz'' \qquad (12)$$

Иллюстрации

Проиллюстрируем столкновение низкоинтенсивного импульса:

$$E_+(\tau) = \exp(-\frac{\tau^2}{\tau_+^2})\sin(\tau)$$

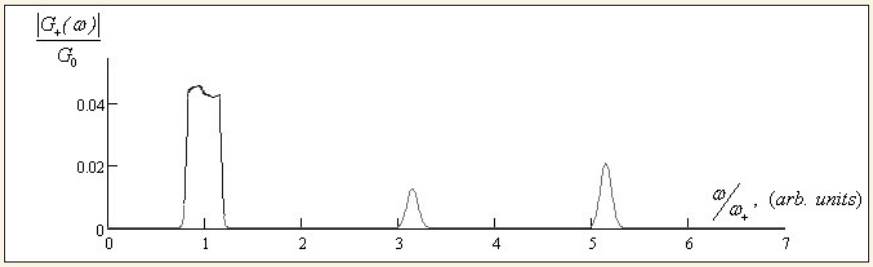
с встречным высокоинтенсивным:

$$E_-(\tau, z') = \exp(-\frac{(\tau + \frac{2}{V}z')^2}{\tau_-^2})\sin(\frac{\omega_-}{\omega_+}(\tau + \frac{2}{V}z'))$$

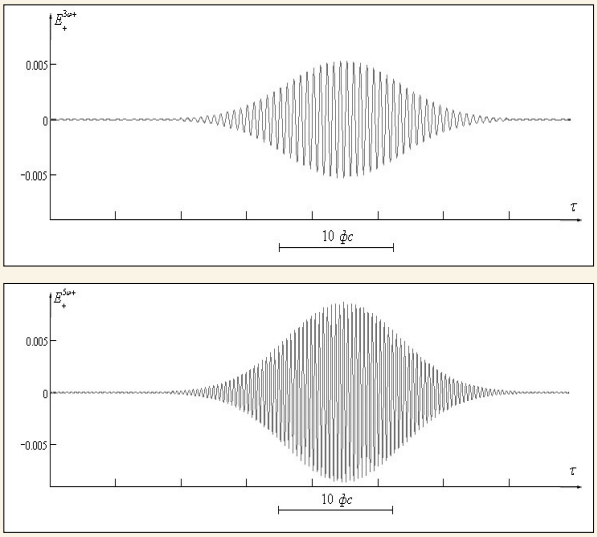
где ω_+ - центральная частота высокоинтенсивного импульса, $\boldsymbol{\tau_+=\omega_+\tau_{+0}}$ $\boldsymbol{\tau_-=\omega_-\tau_{-0}}$, $\boldsymbol{\tau_{+0}}$, $\boldsymbol{\tau_{-0}}$ - исходные длительности импульсов, в кварцевом стекле G=2.5 ($I_{-0}=1\cdot10^{13}$ W/cm^2), $E_{+0}/E_{-0}=0.2$

$$\tau_{+0} = \tau_{-0} = 10\,fs, \quad \lambda_+ = 780nm, \quad \lambda_- = 390nm.$$

Спектр низкоинтенсивного импульса после взаимодействия



Импульсы, сгенерированные в результате взаимодействия на кратных частотах



Заключение

- Выведены уравнения эволюции поля встречных световых импульсов из малого числа колебаний в диэлектрических нелинейных средах
- Показано, что при столкновении импульсов с разным спектральным составом может генерироваться излучение на кратных частотах с длительностью меньшей, чем у исходных импульсов

Апробации и публикации

Результаты работы апробированы на следующих конференциях:

1. Буяновская Е.М., Козлов С.А. Динамика светового поля встречных импульсов из малого числа колебаний при их взаимодействии в нелинейных диэлектрических средах, IV Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика - 2005», 17-21 октября, 2005, Санкт-Петербург, Россия.
2. Буяновская Е.М., Козлов С.А. Взаимодействие встречных сверхкоротких импульсов с континуумными спектрами в нелинейных диэлектрических средах. XXXV научная и учебно-методическая конференция СПбГУ ИТМО "Достижения ученых, аспирантов и студентов университета в науке и образовании", 31 января – 3 февраля, 2006, Санкт-Петербург, Россия.
3. Буяновская Е.М., Козлов С.А. Генерация утроенных частот при взаимодействии встречных импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах. X Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах», 22-27 мая, 2006, Звенигород, Московская область, Россия.
4. Elizaveta M. Buyanovskaya, Sergei A. Kozlov Interaction of counter-propagating femtosecond pulses with continuum spectra, ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics 2006, September 4-7, 2006, St. Petersburg, Russia.
5. Буяновская Е.М. Динамика светового поля и спектра при взаимодействии встречных импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах, Научная молодежная школа «Оптика - 2006», 16-20 октября, 2006, Санкт-Петербург, Россия.
6. Буяновская Е.М., Козлов С.А. Взаимодействие встречных фемтосекундных спектральных суперконтинуумов в нелинейной диэлектрической среде, XXXVI научная и учебно-методическая конференция профессорско-преподавательского и научного состава СПбГУ ИТМО, 30 января – 2 февраля, 2007, Санкт-Петербург, Россия.
7. E.M. Buyanovskaya, S.A. Kozlov Dynamics of field of two counter-propagating few cycle light pulses in nonlinear dielectric media, ICONO/LAT, May 28-June 1, 2007, Minsk, Belarus.

Результаты работы опубликованы в следующих печатных изданиях:

1. Буяновская Е.М, Козлов С.А. Взаимодействие встречных световых импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах, Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, с.97-101, 2006
2. Буяновская Е.М., Козлов С.А. Динамика полей встречных световых импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах, Письма в ЖЭТФ (в печати)

Презентация для
выпускной квалификационной работы на степень бакалавра

НЕЛИНЕЙНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СУПЕРКОНТИНУУМА ОТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД

Автор: Мохнатова О.А.
Руководитель: д. ф.-м. н., проф. Козлов С.А.

2007

НЕЛИНЕЙНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СУПЕРКОНТИНУУМА ОТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД

Выпускная квалификационная работа
на степень бакалавра студентки 4350 гр.
О.А. Мохнатовой,
Научный руководитель
д. ф.-м. н., проф. С.А. Козлов

Санкт-Петербургский Государственный Университет
Информационных Технологий, Механики и Оптики,

Работа поддержана программой
«Развитие научного потенциала высшей школы»
грант РНП.2.1.1.6877 и грантом РФФИ №05-02-16556.

ПЛАН ДОКЛАДА

I. **Постановка задачи.**

II. **Вывод нелинейной формулы Френеля.**

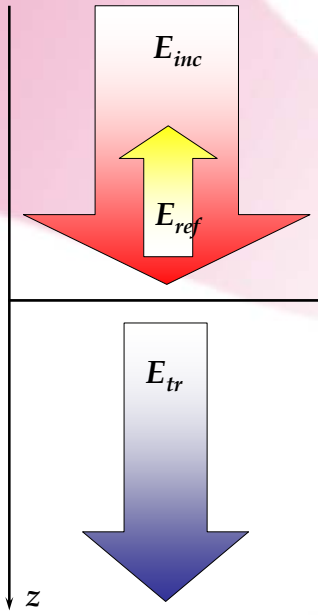
III. **Нормирование полученной зависимости.**

IV. **Численное моделирование отражения**

- **одиночного предельно-короткого импульса**
- **суперпозиции двух фемтосекундных импульсов**

2

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ



ЛИНЕЙНАЯ СРЕДА

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ:

$$E_{inc} + E_{ref} = E_{tr}$$

$$\frac{\partial E_{inc}}{\partial z} + \frac{\partial E_{ref}}{\partial z} = \frac{\partial E_{tr}}{\partial z}$$

НЕЛИНЕЙНАЯ СРЕДА

3

II. УРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ ПОЛЯ[1]

$$\frac{\partial E}{\partial z} + \frac{N_0}{c}\frac{\partial E}{\partial t} - a\frac{\partial^3 E}{\partial t^3} + b\int_{-\infty}^{t} E dt' + gE^2\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{c}{2N_0}\Delta_\perp \int_{-\infty}^{t} E dt'$$

где N_0, a, b – эмпирические константы, характеризующие дисперсию показателя преломления среды

$$\begin{cases} n(\omega) = N_0 + \Delta n(\omega), \\ \Delta n(\omega) = ca\omega^2 - c\dfrac{b}{\omega^2}, \end{cases}$$

$g = \dfrac{2\tilde{n}_2}{c}$ – описывает безынерционную нелинейность ее поляризационного отклика, c – скорость света,

$\tilde{n}_2 = \dfrac{3\pi\chi}{N_0}$ – коэффициент нелинейного показателя преломления среды,

Δ – поперечный лапласиан, t – время.

[1] ***Козлов С.А., Сазонов С.В.*** Нелинейное распространение импульсов длительностью в несколько колебаний светового поля в диэлектрических средах, ЖЭТФ, Т.111, В.2, с.404-418, (1997).

4

II. СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ

Для падающей, отраженной и преломленной волн выполняется:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_{inc}}{\partial z}+\dfrac{N_1}{c}\dfrac{\partial E_{inc}}{\partial t}-a_1\dfrac{\partial^3 E_{inc}}{\partial t^3}+b_1\displaystyle\int_{-\infty}^{t}E_{inc}dt'=\frac{c}{2N_1}\Delta_\perp\int_{-\infty}^{t}E_{inc}dt' \\ \dfrac{\partial E_{ref}}{\partial z}-\dfrac{N_1}{c}\dfrac{\partial E_{ref}}{\partial t}+a_1\dfrac{\partial^3 E_{ref}}{\partial t^3}-b_1\displaystyle\int_{-\infty}^{t}E_{ref}dt'=-\frac{c}{2N_1}\Delta_\perp\int_{-\infty}^{t}E_{ref}dt' \\ \dfrac{\partial E_{tr}}{\partial z}+\dfrac{N_2}{c}\dfrac{\partial E_{tr}}{\partial t}-a_2\dfrac{\partial^3 E_{tr}}{\partial t^3}+b_2\displaystyle\int_{-\infty}^{t}E_{tr}dt'+gE_{tr}^{\,2}\dfrac{\partial E_{tr}}{\partial t}=\frac{c}{2N_2}\Delta_\perp\int_{-\infty}^{t}E_{tr}dt'. \end{cases}$$

Используя граничные условия и полагая E_{ref} малыми по сравнению с E_{inc} и E_{tr} можно получить связь между полем отраженного и падающего излучения вида

$$\frac{N_1}{c}\frac{\partial E_{inc}}{\partial t}-a_1\frac{\partial^3 E_{inc}}{\partial t^3}+b_1\int_{-\infty}^{t}E_{inc}dt'-\frac{c}{2N_1}\Delta_\perp\int_{-\infty}^{t}E_{inc}dt-\frac{N_1}{c}\frac{\partial E_{ref}}{\partial t}+a_1\frac{\partial^3 E_{ref}}{\partial t^3}-b_1\int_{-\infty}^{t}E_{ref}dt'+\frac{c}{2N_1}\Delta_\perp\int_{-\infty}^{t}E_{ref}dt=$$
$$=\frac{N_2}{c}\frac{\partial(E_{inc}+E_{ref})}{\partial t}-a_2\frac{\partial^3(E_{inc}+E_{ref})}{\partial t^3}+b_2\int_{-\infty}^{t}(E_{inc}+E_{ref})dt'+\tilde{g}\frac{\partial(E_{inc}+E_{ref})^3}{\partial t}-\frac{c}{2N_2}\Delta_\perp\int_{-\infty}^{t}(E_{inc}+E_{ref})dt$$

5

II. НЕЛИНЕЙНАЯ ФОРМУЛА ФРЕНЕЛЯ

Для пространственно-временного спектра излучения

$$G(\omega,k_x,k_y)=\iiint E(t,x,y)\exp\left[i(\omega t-k_x x-k_y y)\right]dt\,dx\,dy$$

в параксиальном приближении, полагая, что G_{ref} существенно меньше G_{inc} получаем

$$G_{ref}(\omega,k_x,k_y)=\frac{n_1-n_2}{n_1+n_2}\left(1+\frac{c^2}{n_1n_2}\frac{k_x^2+k_y^2}{\omega^2}\right)G_{inc}(\omega,k_x,k_y)-\frac{gcS(\omega,k_x,k_y)}{3(n_1+n_2)},$$

где

$$S(\omega,k_x,k_y)=\int_{-\infty}^{\infty}\iint E_{inc}^3(t,x,y)e^{i(\omega\cdot t-k_x\cdot x-k_y\cdot y)}dt\,dx\,dy=\frac{1}{(2\pi)^6}\iiint\iiint G_{inc}(\omega-\omega',k_x-k_x',k_y-k_y')\times$$
$$\times G_{inc}(\omega'-\omega'',k_x'-k_x'',k_y'-k_y'')\times$$
$$\times G_{inc}(\omega'',k_x'',k_y'')\,d\omega'dk_x'dk_y'\,d\omega''dk_x''dk_y''.$$

6

III. НОРМИРОВКА

Для целей численного моделирования уравнение динамики поля удобно нормировать, вводя новые переменные

$$\widetilde{E} = \frac{E}{E_0}; \quad \widetilde{t} = \omega_0 t; \quad \widetilde{x} = \frac{x}{\rho_0}; \quad \widetilde{y} = \frac{y}{\rho_0}.$$

После нормировки конечная формула может быть записана в виде

$$G_{ref} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\left(1 + \frac{D}{n_1 n_2}\frac{k_x^2 + k_y^2}{\omega^2}\right)G_{inc} - \frac{FS}{n_1 + n_2}$$

где $n_1(\omega) = N_1 + A_1\omega^2 - \frac{B_1}{\omega^2}$, $A_1 = a_1 c\omega_0^2$, $B_1 = \frac{b_1 c}{\omega_0^2}$,

$n_2(\omega) = N_2 + A_2\omega^2 - \frac{B_2}{\omega^2}$, $A_2 = a_2 c\omega_0^2$, $B_2 = \frac{b_2 c}{\omega_0^2}$,

$D = \frac{c^2}{\rho_0^2\omega_0^2}$, $F = \frac{g}{3}cE_0^2 = \frac{2}{3}\tilde{n}_2 I$,

где I – пиковая интенсивность,
E_0 – амплитуда,
ω_0 – центральная частота,
ρ_0 – поперечный размер падающего излучения

7

IV. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

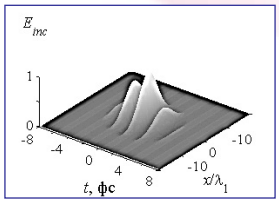
Линейная среда – *воздух*
$N_1 = 1$

Нелинейная среда – *кварцевое стекло*
$N_1 = 1.4508$, $a = 2.7401 \cdot 10^{-44}$ s^3/cm,
$b = 3.9437 \cdot 10^{17}$ 1/(s · cm),
$\tilde{n}_2 = 2.9 \cdot 10^{-16}$ cm^2/W

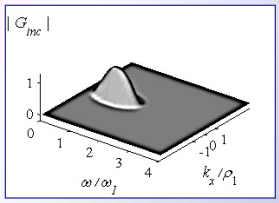
ПАДАЮЩИЙ ОДИНОЧНЫЙ ИМПУЛЬС

Нормированное поле падающего импульса:

$$E_{inc}(t,x,y) = e^{-2\cdot\left(\frac{t}{\tilde{\tau}_1}\right)^2} \cdot e^{-2\cdot(x)^2} \cdot e^{-2\cdot(y)^2} \cdot \sin(t)$$



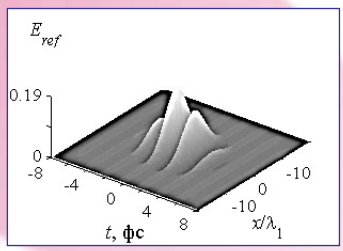
Поле импульса

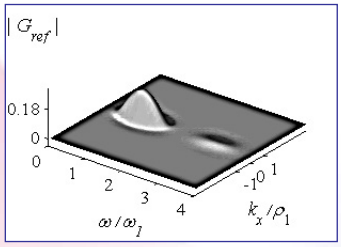


Пространственно-временной спектр импульса

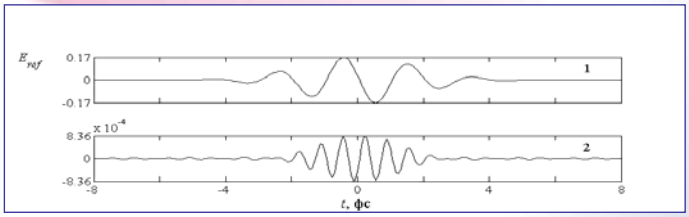
$\tilde{\tau}_1 = \omega_1\tau_1$ – нормированная временная длительность падающего импульса, τ_1 – временная длительность.
$\omega_1 = 2\pi c / \lambda_1$ – центральная частота импульса, λ_1 – его центральная длина волны.

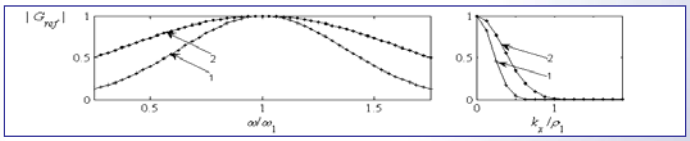
8





ОТРАЖЕННЫЙ ОДИНОЧНЫЙ ИМПУЛЬС





Параметры падающего излучения:

$\lambda_1 = 780$ нм

$\tau_1 = 4.5$ фс

$\rho_1 = 10 \cdot \lambda_1$

$I = 5 \cdot 10^{13}$ Вт/см^2

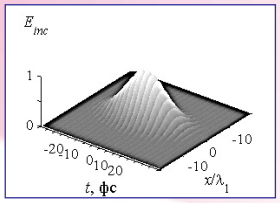
1 – основная частота ω_1
2 – утроенная частота $3\omega_1$

9

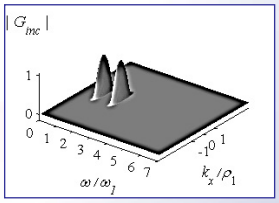
ПАДАЮЩАЯ СУПЕРПОЗИЦИЯ ДВУХ ИМПУЛЬСОВ

Нормированное поле падающего излучения:

$$E_{inc}(t,x,y) = e^{-2\cdot\left(\frac{t}{\tilde{\tau}_1}\right)^{2m}} \cdot e^{-2\cdot(x)^{2m}} \cdot e^{-2\cdot(y)^{2m}} \cdot \sin(t) + \frac{E_2}{E_1} \cdot e^{-2\cdot\left(\frac{t+\Delta\tilde{t}}{\tilde{\tau}_2}\right)^{2m}} \cdot e^{-2\cdot\left(\frac{x}{\tilde{\rho}_2}\right)^{2m}} \cdot e^{-2\cdot\left(\frac{y}{\tilde{\rho}_2}\right)^{2m}} \cdot \sin\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\left(t+\Delta\tilde{t}\right)\right),$$



Поле падающего излучения

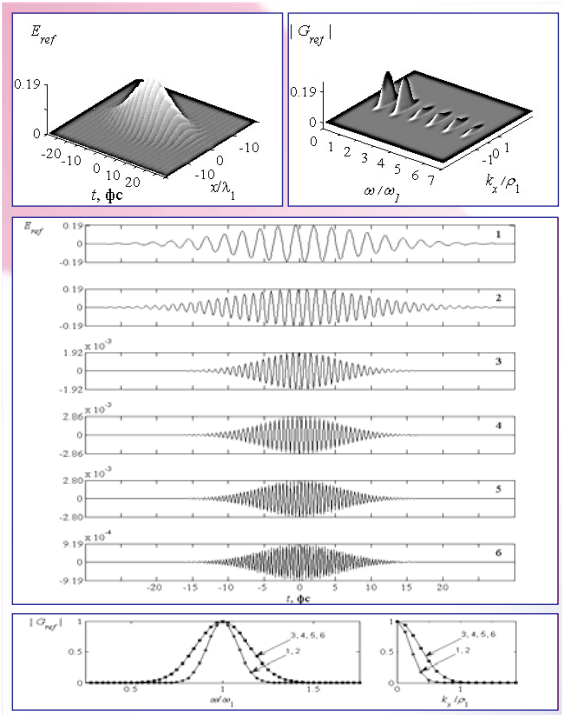


Пространственно-временной спектр падающего излучения

E_1 и E_2 – амплитуды первого и второго импульса соответственно,
$\tilde{\tau}_1 = \omega_1\tau_1$ и $\tilde{\tau}_2 = \omega_1\tau_2$ – нормированная временная длительность падающего импульса,
τ_1 и τ_2 – временная длительность,
$\tilde{\rho}_2 = \rho_2 / \rho_1$ – нормированный поперечный размер второго импульса,
ρ_1 и ρ_2 – поперечные размеры импульсов,
$\Delta\tilde{t} = \omega_1 \cdot \Delta t$ – нормированная временная задержка между двумя импульсами,
Δt – временная задержка,
$\omega_1 = 2\pi c / \lambda_1$ и $\omega_2 = 2\pi c / \lambda_2$ – центральные частоты импульсов,
λ_1 и λ_2 – их центральные длины волн,
m – целое число ($m = 1$ для гауссового импульса, $m = 2$ для супергауссового импульса).

Предположим, $E_2 / E_1 = 1$, $\rho_2 / \rho_1 = 1$.

10



ОТРАЖЕННАЯ СУПЕРПОЗИЦИЯ ДВУХ ГАУССОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ОДИНАКОВОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Параметры падающего излучения

$\lambda_1 = 780$ нм, $\lambda_2 = 390$ нм

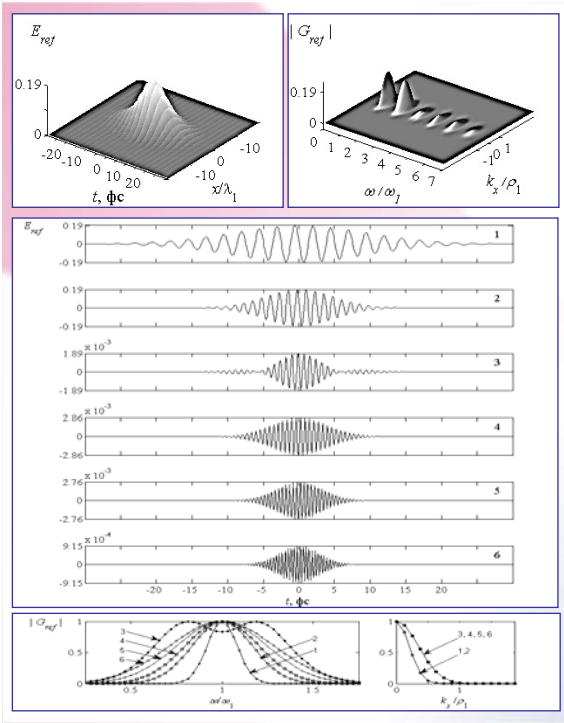
$\tau_1 = \tau_2 = 20$ фс,

$\rho_1 = \rho_2 = 10 \cdot \lambda_1$

$I = 5 \cdot 10^{13}$ Вт/см^2

1 – основная частота ω_1
2 – основная частота ω_2
3 – утр. $3\omega_1$ и комб. $2\omega_2 - \omega_1$
4 – комб. $2\omega_1 + \omega_2$
5 – комб. $2\omega_2 + \omega_1$
6 – утр. $3\omega_2$

11



ОТРАЖЕННАЯ СУПЕРПОЗИЦИЯ ДВУХ ГАУССОВЫХ ИМПУЛЬСОВ НЕОДИНАКОВОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Параметры падающего излучения

$\lambda_1 = 780$ нм, $\lambda_2 = 390$ нм

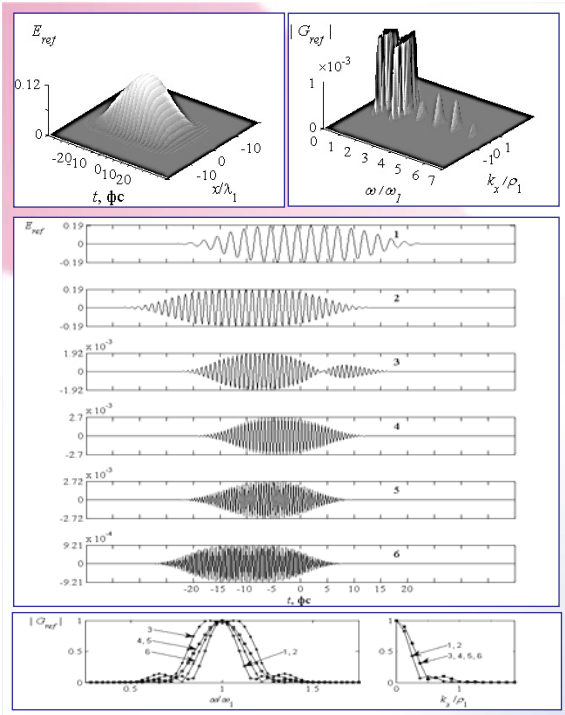
$\tau_1 = 20$ фс, $\tau_2 = 10$ фс

$\rho_1 = \rho_2 = 10 \cdot \lambda_1$

$I = 5 \cdot 10^{13}$ Вт/см^2

1 – основная частота ω_1
2 – основная частота ω_2
3 – утр. $3\omega_1$ и комб. $2\omega_2 - \omega_1$
4 – комб. $2\omega_1 + \omega_2$
5 – комб. $2\omega_2 + \omega_1$
6 – утр. $3\omega_2$

12



ОТРАЖЕННАЯ СУПЕРПОЗИЦИЯ ДВУХ СУПЕРГАУССОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ОДИНАКОВОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ С ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКОЙ

Параметры падающего излучения

$\lambda_1 = 780$ нм, $\lambda_2 = 390$ нм

$\tau_1 = \tau_2 = 20$ фс

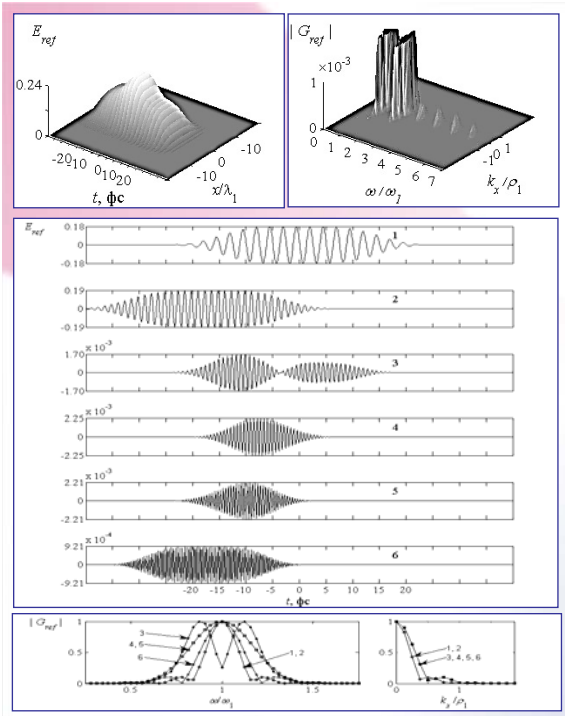
$\rho_1 = \rho_2 = 10 \cdot \lambda_1$

$I = 5 \cdot 10^{13}$ Вт/см^2

$\Delta t = 10$ фс

1 – основная частота ω_1
2 – основная частота ω_2
3 – утр. $3\omega_1$ и комб. $2\omega_2 - \omega_1$
4 – комб. $2\omega_1 + \omega_2$
5 – комб. $2\omega_2 + \omega_1$
6 – утр. $3\omega_2$

13



ОТРАЖЕННАЯ СУПЕРПОЗИЦИЯ ДВУХ СУПЕРГАУССОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ОДИНАКОВОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ С ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКОЙ

Параметры падающего излучения

$\lambda_1 = 780$ нм, $\lambda_2 = 390$ нм

$\tau_1 = \tau_2 = 20$ фс

$\rho_1 = \rho_2 = 10 \cdot \lambda_1$

$I = 5 \cdot 10^{13}$ Вт/см^2

$\Delta t = 18$ фс

1 – основная частота ω_1
2 – основная частота ω_2
3 – утр. $3\omega_1$ и комб. $2\omega_2 - \omega_1$
4 – комб. $2\omega_1 + \omega_2$
5 – комб. $2\omega_2 + \omega_1$
6 – утр. $3\omega_2$

14

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В работе выведены нелинейные формулы Френеля для отражения световых импульсов с узким пространственным, но сверхшироким временным спектром.
- Показано, что основным нелинейным эффектом при нормальном отражении параксиальной волны из малого числа колебаний от границы раздела воздух - кварцевое стекло является генерация излучения утроенной частоты, временной и пространственный спектр которого шире спектра падающей волны.
- В случае, когда на границу раздела сред падают одновременно два импульса с разной центральной частотой в отражении появляются комбинационные частоты, излучение на которых представляет собой высокочастотные импульсы также с меньшими длительностями и поперечными размерами, чем у падающих импульсов.
- Меняя временную задержку между падающими на границу раздела сред импульсами, можно управлять длительностью и формой импульсов, отраженных на комбинационных и кратных частотах и содержащих лишь несколько колебаний светового поля

15

Результаты работы были апробированы на следующих конференциях:

1. Мохнатова О.А., Козлов С.А. Изменение пространственно-временных спектров импульсов предельно коротких длительностей при нелинейном параксиальном отражении от диэлектриков. IV Международная конференция молодых ученых и специалистов «**Оптика 2005**» , 17-21 октября, 2005, Санкт-Петербург, Россия.
2. Мохнатова О.А., Берковский А.Н., Козлов С.А. Нелинейное параксиальное отражение от диэлектриков импульсов из малого числа колебаний светового поля, XXXV научная и учебно-методическая конференция СПбГУ ИТМО «**Достижения ученых, аспирантов и студентов университета в науке и образовании**», 31 января – 3 февраля, 2006, Санкт-Петербург, Россия.
3. Мохнатова О.А., Берковский А.Н., Козлов С.А. Взаимодействие световых импульсов из малого числа колебаний при нелинейном отражении, X Всероссийская школа-семинар «**Волновые явления в неоднородных средах**», 22-27 мая, 2006, Звенигород, Московская область, Россия.
4. O.A. Mokhnatova, A.N. Berkovsky, S.A. Kozlov Nonlinear paraxial reflection of few-cycle pulses from dielectrics, International seminar «**Days on Diffraction**», may 29-31, 2006, St. Petersburg, Russia.
5. Мохнатова О.А., Берковский А.Н., Козлов С.А. Генерация кратных частот при нелинейном отражении двух импульсов из малого числа колебаний с разным спектральным составом, Научная молодежная школа «**Оптика-2006**», 16-20 октября, 2006, Санкт-Петербург, Россия.
6. Мохнатова О.А., Козлов С.А. Отражение фемтосекундного спектрального суперконтинуума от нелинейной диэлектрической среды, XXXVI Научная, образовательная и учебно-методическая конференция **профессорско-преподавательского и научного состава СПбГУ ИТМО**, 30 января – 2 февраля, 2007, Санкт-Петербург, Россия.
7. O.A. Mokhnatova, S.A. Kozlov The nonlinear reflection of fields superposition of two few-cycle light pulses, **ICONO/LAT**, May 28-June 1, 2007, Minsk, Belarus.

Результаты работы были опубликованы в следующих изданиях:

1. О.А. Мохнатова, А.Н. Берковский, С.А. Козлов Нелинейное параксиальное отражение от диэлектриков импульсов из малого числа колебаний светового поля, **Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО**, в.34, с.8-13, 2006
2. О.А. Мохнатова, А.Н. Берковский, С.А. Козлов Взаимодействие импульсов из малого числа колебаний с разным спектральным составом при нелинейном отражении от диэлектриков, В кн.: **Сборник статей «Проблемы когерентной и нелинейной оптики»** под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова, 2006, с.198-202
3. О.А. Мохнатова, С.А. Козлов Нелинейное отражение фемтосекундного спектрального суперконтинуума, **ЖЭТФ** (в печати)

16

Е.М. Буяновская
С.А. Козлов
О.А. Мохнатова

Методические рекомендации по выполнению исследовательских курсовых работ, научно-технологических практик и выпускных квалификационных бакалаврских работ

Методическое пособие

В авторской редакции
Дизайн Е.М. Буяновская
Верстка О.А. Мохнатова
Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.09
Подписано к печати
Заказ №
Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе