

*На правах рукописи*

Дроздов Аркадий Анатольевич

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФАЗОВОЙ САМОМОДУЛЯЦИИ  
И СВЕРХУШИРЕНИЯ СПЕКТРОВ ОПТИЧЕСКИХ  
ИМПУЛЬСОВ ИЗ МАЛОГО ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ  
В НЕЛИНЕЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

Специальность 01.04.05 – оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2013

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Развитие методов сокращения длительностей лазерных импульсов привело к созданию систем, генерирующих оптическое излучение фемтосекундного ( $1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$ ) и ещё более короткого аттосекундного ( $1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$ ) временных диапазонов. К настоящему времени уже обсуждают возможности получения импульсов зептосекундной длительности ( $1 \text{ зс} = 10^{-21} \text{ с}$ ), что соответствует характерным временам для ядерных процессов, и ещё меньшего йоктосекундного диапазона ( $1 \text{ ис} = 10^{-24} \text{ с}$ ).

На сегодняшний день многие научные группы научились устойчиво получать оптические импульсы, содержащие лишь одно-два полных колебания электромагнитного поля. Импульсы, содержащие не более одного десятка колебаний оптического поля, в научной литературе часто называют предельно короткими (ПКИ) и выделяют их среди пико- и фемтосекундных импульсов, состоящих из большого числа колебаний поля, к которым применяют термин “сверхкороткие импульсы”. Под предельно малым подразумевают именно число колебаний оптического поля излучения, а не саму длительность импульса. Импульсы из малого числа колебаний сегодня находят широкое применение в самых разнообразных областях исследований. Например, взаимодействие ПКИ с атомами инертных газов может приводить к генерации высших гармоник основной частоты, область простирается которых до мягкого рентгена. На основе нелинейно-оптических взаимодействий интенсивных предельно-коротких лазерных импульсов стала возможной генерация аттосекундных импульсов ультрафиолетового диапазона спектра, использование которых сегодня позволяет рассмотреть динамику движения электронов в молекулах в масштабе реального времени. Распространение ПКИ в нелинейных средах также приводит к образованию излучения со сверхшироким спектром или генерации спектрального суперконтинуума, которое сегодня уже активно используется в системах сверхбыстрой передачи информации, спектроскопии и медицине. Лауреаты Нобелевской премии 2005 года Джон Холл и Теодор Хенш на основе

лазерных импульсов со сверхширокими спектрами разработали методику для измерения оптических частот излучения с невиданной ранее точностью.

Для адекватного описания процесса взаимодействия ПКИ с веществом методы теоретического анализа продолжают активно развиваться наряду с экспериментальными исследованиями в связи с тем, что традиционно используемый метод медленно изменяющейся огибающей импульса в поле ПКИ становится дискутируемым. Поэтому разработке новых теоретических методов, несвязанных с эволюцией огибающих, и изучению нелинейных явлений, возникающих при распространении интенсивных лазерных импульсов из малого числа колебаний в оптических средах, в последние годы уделяется большое внимание. Фазовая самомодуляция, ведущая к спектральному сверхуширению излучения, среди других эффектов самовоздействия является одним из фундаментальных явлений. Публикаций, посвященных изучению особенностей фазовой самомодуляции и сверхуширения спектров оптических импульсов из малого числа колебаний, на момент начала настоящей работы было немногочисленно. Поэтому комплексное изучение данного нелинейного явления в поле импульсов предельно коротких длительностей, безусловно, является актуальной задачей.

**Цель работы** состояла в теоретическом исследовании основных закономерностей фазовой самомодуляции и сверхуширения спектров параксиальных оптических импульсов из малого числа колебаний при уменьшении этого числа вплоть до одного-двух в однородных изотропных диэлектрических средах с безынерционной кубической нелинейностью.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

1. Выявление основных закономерностей фазовой самомодуляции и генерации утроенных частот в поле оптических импульсов из малого числа колебаний при уменьшении этого числа вплоть до всего одного в однородных изотропных диэлектрических средах с безынерционной кубической нелинейностью.

2. Теоретический анализ изменений в характере спектрального уширения оптических импульсов из-за фазовой самомодуляции при уменьшении в них числа колебаний вплоть до одного-двух в однородных изотропных диэлектрических средах с безынерционной кубической нелинейностью.

3. Выявление особенностей коллимации и фокусировки параксиальных волновых пакетов, которые получаются при дифракции в дальней зоне исходно однопериодных волн.

4. Выявление основных закономерностей самовоздействия сфокусированных однопериодных параксиальных волновых пакетов в однородных изотропных диэлектрических средах с безынерционной кубической нелинейностью.

### **Методы исследования:**

Теоретические задачи, поставленные в рамках настоящей работы, решались на основе нелинейного уравнения динамики непосредственно электрического поля оптической волны, а не её временной и пространственной огибающей. Численное моделирование аналитически полученных итерационных решений уравнения динамики поля оптических волн из малого числа колебаний осуществлялось в программном пакете Matlab. Численное моделирование распространения оптических импульсов в прозрачных линейных и нелинейных диэлектрических средах с нерезонансной дисперсией показателя преломления выполнялось в программном комплексе Lbullet.

### **Защищаемые положения:**

1. При уменьшении числа колебаний в оптическом импульсе на входе в диэлектрическую однородную изотропную среду с безынерционной кубической нелинейностью до всего одного полного колебания спектр излучения, генерируемого в среде на утроенных частотах, и спектр на основной частоте, уширяемый из-за фазовой самомодуляции излучения, перекрываются и на выходе из нелинейной среды формируют единую спектральную структуру. Интерференционный минимум этой структуры и максимум её части в области утроенных частот смещаются в высокочастотную область, причем минимум

спектральной структуры для исходно однопериодной волны может оказаться на третьей гармонике по отношению к центральной частоте входного импульса, а максимум - на её четвертой гармонике.

2. В осциллирующей структуре спектров оптических импульсов, уширенных в диэлектрических однородных изотропных средах с безынерционной кубичной нелинейностью из-за фазовой самомодуляции при неизменном максимальном фазовом набеге, с уменьшением числа колебаний поля в импульсах вплоть до одного-двух глубина модуляции и число пиков в спектрах, находящихся в области нормальной групповой дисперсии, уменьшаются, а находящихся в области аномальной групповой дисперсии - увеличиваются, причем крайние высокочастотные пики основного спектра в последнем случае могут оказаться на второй и более высоких гармониках по отношению к центральной частоте входного импульса.

3. При коллимации параксиального волнового пакета, который получается при дифракции в дальней зоне исходно однопериодной волны, формируется "Ж-образная" полуторапериодная пространственно-временная структура, длительность которой возрастает пропорционально расстоянию от оси пучка, и приосевая её часть движется быстрее периферийной. При фокусировке такого коллимированного излучения с увеличением расстояния от коллимирующего до фокусирующего зеркал волновой пакет в фокусе последнего меняется от полуторапериодной волны до однопериодной волны и снова до полуторапериодной, максимум спектра которой на оси пучка сначала смещается в область высоких частот, а затем обратно в область низких частот. Однопериодная волна в фокусе зеркала получается идентичной исходной волне источника с точностью до фазового сдвига в  $\pi$  для коллимирующего и фокусирующего зеркал с одинаковыми фокусными расстояниями при удалении их друг от друга на двойное фокусное расстояние.

4. При фокусировке однопериодного волнового пакета в диэлектрическую однородную изотропную среду с безынерционной кубичной нелинейностью с увеличением интенсивности излучения происходит увеличение числа колебаний

поля в волне так, что её длительность с увеличением расстояния от оси пучка убывает и её спектр в приосевой части смещается в коротковолновую область, а на периферии пучка - в длинноволновую. При этом в волновом пакете могут формироваться замкнутые поверхности равной фазы. В области утроенных временных частот характерный для однопериодных импульсов минимум спектральной плотности излучения формируется только на низких пространственных частотах, а на высоких - наблюдается максимум в спектре такого излучения, который может смещаться в сторону учетверенных частот.

#### **Апробация основных результатов:**

Результаты диссертационной работы апробировались на 20 Международных и Российских конференциях: XVIII Международной конференции Ultrafast Phenomena (Lausanne, Switzerland, 2012), Международной конференции Days on Diffraction (Санкт-Петербург, 2012), VI International Conference on Laser Optics for Young Scientists and Engineers (Санкт-Петербург, 2012), Международных конференциях "Фундаментальные проблемы оптики" (Санкт-Петербург, 2006, 2010, 2012), Российском семинаре по волоконным лазерам (Новосибирск, 2012), Международных конференциях молодых ученых и специалистов "Оптика" (Санкт-Петербург, 2007, 2009, 2011), Международной конференции "Nonlinear Optics: East-West Reunion" (Суздаль, 2011), Научно-технической конференции - семинаре по фотонике и информационной оптике (Москва, 2011), XI Всероссийской школе-семинаре "Физика и применение микроволн" (г. Звенигород, Московская область, 2007), научных и учебно-методических конференциях СПбГУ ИТМО (Санкт-Петербург, 2008, 2010, 2011), научных и учебно-методических конференциях НИУ ИТМО (Санкт-Петербург, 2012, 2013), Всероссийских межвузовских конференциях молодых учёных (Санкт-Петербург, 2007, 2008).

#### **Публикации:**

Основные результаты диссертации изложены в 18 печатных работах, 4 из них в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

## РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Drozdov A.A., Kozlov S.A., Sukhorukov A.A., Kivshar Yu.S. Self-phase modulation and frequency generation with few-cycle optical pulses in nonlinear dispersive media // *Physical Review A*. 2012. V. 86. N 5. P. 053822-10.
2. Дроздов А.А., Козлов С.А. Фазовая самомодуляция однопериодных оптических волн // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2011. № 2 (72). С. 99-105.
3. Белашенков Н.Р., Дроздов А.А., Козлов С.А., Шполянский Ю.А., Цыпкин А.Н. Фазовая модуляция фемтосекундных световых импульсов, спектры которых сверхуширены в диэлектриках с нормальной групповой дисперсией // *Оптический журнал*. 2008. т. 75. № 10. С. 3 – 8.
4. Дроздов А.А., Цыпкин А.Н. Интерференция фемтосекундных спектральных суперконтинуумов с линейной фазовой модуляцией // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2008. № 7 (52). С. 3 – 10.