

**ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ**

ԵՍԱՅԱՆ ԳԱՐԵԳԻՆ ԼԵՎՈՆԻ

**ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ-ԳԻՍՊԵՐՍԻՈՆ ՍԻՄԻԼԱՐԻՏՈՆՆԵՐԸ ԵՎ ՆՐԱՆՑ
ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԳԵՐԱՐԱԳ ՕՊՏԻԿԱՅՈՒՄ**

**Ա.04.21 «Լազերային ֆիզիկա» մասնագիտությամբ
ֆիզիկա-մաթեմատիկական գիտությունների դոկտորի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության**

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ – 2013

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

ЕСАЯН ГАРЕГИН ЛЕВОНОВИЧ

**НЕЛИНЕЙНО-ДИСПЕРСИОННЫЕ СИМИЛЯРИТОНЫ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В СВЕРХБЫСТРОЙ ОПТИКЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности
01.04.21 – Лазерная физика**

ЕРЕВАН – 2013

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում:

Գիտական խորհրդատու՝ ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր **Լ. Խ. Մուրադյան**

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր **Ռ. Բ. Կոստանյան**
ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր **Գ. Հ. Գրիգորյան**
ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր **Ա. Հ. Գևորգյան**

Առաջատար կազմակերպություն՝ **ՀՀ ԳԱԱ Ռ-ադիոֆիզիկայի և
էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ**

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա «11» մայիսի 2013թ., ժամը 11:00-ին, Երևանի պետական համալսարանի ֆիզիկայի 049 մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցեն՝ 0025, Երևան, Ալեք Մանուկյան 1:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է «10» ապրիլի 2013թ.:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝
ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու **Վ. Պ. Քալանթարյան**



Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете.

Научный консультант: доктор физ.-мат. наук **Л.Х.Мурадян**

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук **Р.Б.Костанян**
доктор физ.-мат. наук **Г. Г. Григорян**
доктор физ.-мат. наук **А.А. Геворгян**

Ведущая организация: Институт радиофизики и электроники
НАН РА

Защита диссертации состоится “11” мая 2013г. в 11:00 часов на заседании специализированного совета по физике 049 Ереванского государственного университета по адресу: 0025, Ереван, ул. Алека Манукяна 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан “10” апреля 2013г.

Ученый секретарь специализированного совета:

кандидат физ.-мат. наук **В. П. Калантарян**



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Прогресс в технологии изготовления кварцевых оптических волоконных световодов привел не только к революции в области волоконно-оптической связи, но и к появлению нового направления в науке – нелинейной волоконной оптики. Хотя кварцевое стекло не является материалом с сильной нелинейностью, однако большие длины волоконных световодов при низких оптических потерях и малые поперечные размеры световодов резко снижают пороги возникновения различных нелинейных явлений. С другой стороны, освоение фемтосекундного диапазона длительностей оптических импульсов привело к возможности распространения в световодах излучения с большой интенсивностью и наблюдения нелинейных явлений, которые в поле импульсов больших длительностей наблюдаются редко. Все это обусловило широкий интерес к нелинейной волоконной оптике, и здесь уже получены многие очень интересные результаты, которые находят применение в оптической связи, лазерной технике, технике обработки информации, оптических вычислительных машинах, оптических датчиках различных физических величин и т.д. Переход к новому фемтосекундному временному диапазону выдвинул новые физические и технические задачи, связанные с самовоздействием и взаимодействием в оптических волокнах мощных импульсов света предельно малой длительности, их синтезом, управлением, транспортировкой-передачей и регистрацией. Для решения этих задач в фемтосекундной временной шкале, в частности, используются методы нелинейной и адаптивной оптики, фурье-оптики и голографии, спектральной интерферометрии. Вместе с тем, волоконно-оптическая компрессия импульсов, основанная на нелинейном процессе фазовой самомодуляции импульсного излучения в волоконном световоде и последующем сжатии импульса в дисперсионной линии задержки, позволила достичь степеней сжатия до 10^3 и формировать предельно короткие для оптического диапазона импульсы, с длительностью в единицы фемтосекунд.

Бурное развитие волоконной оптики и появление целого набора специальных волоконных световодов привело в конце прошлого столетия к созданию волоконных лазеров, которые привлекают внимание как перспективные, надежные, дешевые и компактные источники ультракоротких импульсов. Известным недостатком волоконных лазеров является генерация импульсов относительно малой мощности, однако следует отметить, что в последнее время ведутся активные исследования, направленные на генерацию более мощных импульсов с помощью использования многомодовых волокон, одномодовых волокон с сердцевиной большего радиуса, а также фотонно-кристаллических одномодовых световодов.

Наряду с интенсивными исследованиями процессов солитонобразования и солитонного режима распространения оптических импульсов в световодах, получении оптических импульсов с длительностью в фемтосекундном диапазоне, созданием

волоконных лазеров и др., сформировалось новое направление исследований, нацеленное на решение проблем регистрации параметров сверхкоротких импульсов и управления ими. Процессы самовоздействия и взаимовоздействия оптических импульсов в обычных и усиливающих световодах с различными дисперсионными характеристиками служат основой нового перспективного подхода для задач анализа и синтеза сигнала в фемтосекундном масштабе времен. Так в последнее время, совместно с задачами солитонообразования, большой интерес вызывают явления самоподобия (self-similarity) в оптике, в частности, симиляритоны – импульсы, сохраняющие только свой функциональный вид в отличие от солитонов, которые сохраняют все свои характеристики. Методы подобия нашли широкое применение в различных областях физики, в частности, в гидродинамике, механике, физике плазмы. Интерес к этим методам в оптике в основном стимулирован перспективами применений оптических симиляритонов в задачах анализа и синтеза сигнала в сверхбыстрой оптике. Важным свойством симиляритонов является то, что они формируются в активных волокнах из произвольных импульсов, причем длительность сформированного симиляритона, спектральная ширина и чирп не зависят от формы, длительности и фазы начального импульса и определяются только его энергией и характеристиками волокна. Благодаря этим свойствам, а также параболичности временной и спектральной формы и фазы, параболические симиляритоны представляют большой практический интерес для задач сверхбыстрой оптики и фотоники.

Следует отметить, однако, что на нынешнем этапе исследований в данном направлении существует ряд важных нерешенных задач. В частности, несмотря на большой интерес к задачам формирования и распространения оптических симиляритонов, отсутствует анализ возможностей формирования симиляритонов в обычных кварцевых волоконных световодах. Недостаточно исследовано влияние на свойства симиляритонов таких нелинейных и дисперсионных факторов, как волновая нестационарность, инерция нелинейного отклика, дисперсия высших (выше второго) порядков. Требуется отдельное внимание исследованию потенциала применения симиляритонов в задачах регистрации и измерения характеристик сверхкоротких импульсов, а также при синтезе сигналов в процессах временной и спектральной компрессии. Отметим также, что несмотря на обилие теоретических работ по симиляритонам, в настоящее время число экспериментальных реализаций симиляритонов и их исследований сравнительно мало. Это относится особенно к экспериментам в фемтосекундной области и симиляритонам с широким спектром. Между тем, такие исследования весьма важны с точки зрения применений симиляритонов в фемтосекундной оптике.

Применения многомодовых волоконных световодов в волоконных лазерных системах, в распределенных волоконно-оптических датчиках различных физических величин и в линиях связи, имеющих относительно небольшую протяжённость и обеспечивающих гигабитные скорости передачи данных обуславливают также определен-

ный интерес к исследованию особенностей распространения и модовой структуры излучения в многомодовых световодах.

Важность исследований в данной области и ряд перечисленных выше нерешенных проблем определили тему и **цель диссертационной работы**, включающей в себе ряд актуальных задач:

- Исследование нелинейно-дисперсионного самовоздействия сверхкоротких импульсов в волоконных световодах с целью выявления возможностей генерации симиляритонов в обычных кварцевых световодах без усиления и без распределенной дисперсии и детальное исследование свойств и параметров таких симиляритонов.
- Исследование возможностей генерации симиляритонов с широким спектром (со спектральной шириной в области единиц и десятков терагерц) и их особенностей, обусловленных дисперсионными и нелинейными физическими факторами высших порядков, сопровождающими процесс фазовой самоодуляции.
- Исследование возможностей и особенностей применения симиляритонов для нелинейно-оптических методов характеристики сигнала в сверхбыстрой оптике, в частности, таких как спектральная интерферометрия и спектрально-временное отображение.
- Исследование возможностей и особенностей применения симиляритонов в задачах спектральной и временной компрессии, частотной перестройки сверхкоротких импульсов, направленные на выявление эффективных методов формирования сигналов в сверхбыстрой оптике.
- Исследование особенностей распространения излучения в многомодовых световодах с квадратичным профилем показателя преломления при учете нелинейности, а также влияния на модовую структуру световода различных возмущений, вызванных изгибами его оси или флуктуациями плотности материала.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна диссертационной работы обусловлена рядом оригинальных - впервые полученных результатов:

1. В параксиальном приближении волновой оптики исследовано распространение гауссовых пучков в многомодовых градиентных световодах с квадратичным профилем показателя преломления с произвольной продольной неоднородностью и при учете поглощения или усиления.
2. Теоретически исследован процесс рэлеевского рассеяния в многомодовых градиентных световодах с квадратичным профилем показателя преломления. Получены явные выражения для коэффициентов возбуждения гаусс-эрмитовых мод обратного рассеяния в двух практически важных случаях: возбуждения

световода протяженным некогерентным источником излучения и селективного возбуждения на входе световода различных мод.

3. Выявлено, что нелинейно-дисперсионный характер самовоздействия сверхкоротких лазерных импульсов в одномодовом волоконном световоде без усиления приводит к формированию из импульсов с произвольной начальной формой нелинейно-дисперсионных симиляритонов, имеющих параболический профиль интенсивности в центральной энергонесущей части и параболическую фазу, которая определяется только дисперсионными характеристиками и длиной волоконного световода. Выявлена связь нелинейно-дисперсионных симиляритонов с предшествующими им прямоугольными импульсами.
4. Выявлено простое соотношение между спектральной шириной симиляритона, сформированного в пассивном одномодовом волоконном световоде, длительностью исходного импульса и его мощностью. Показано, что мощность начального импульса определяет спектральную ширину симиляритона и, при данной длине световода, также его длительность.
5. Впервые сгенерированы нелинейно-дисперсионные симиляритоны со спектральной шириной до ~ 50 ТГц (0.3 рад/фс) в пассивных одномодовых волоконных световодах без усиления и выявлены их особенности. Проведенные исследования позволили полностью охарактеризовать такие симиляритоны и обобщить математическое описание для всех типов симиляритонов с широким спектром.
6. Предложено и экспериментально продемонстрировано использование нелинейно-дисперсионных симиляритонов для характеристики сверхкоротких сигналов. Проведено подробное сравнительное исследование методов спектральной интерферометрии и спектрально-временного отображения с использованием в качестве опорного импульса нелинейно-дисперсионного симиляритона, сформированного из части сигнального импульса. Проведенное исследование продемонстрировало взаимное соответствие и высокую точность рассматриваемых методов.
7. Экспериментально продемонстрировано, что применение нелинейно- дисперсионного симиляритона в методе спектральной компрессии посредством генерации импульса суммарной частоты позволяет реализовать безабберационную спектральную компрессию.
8. Впервые метод спектральной интерферометрии применен для экспериментального исследования процесса спектральной компрессии в системе дисперсионная линия задержки – одномодовый волоконный световод.
9. Выявлено, что в оптических волокнах с отрицательной дисперсией может происходить спектральное самосжатие спектрально-ограниченных импульсов в случае, когда дисперсионное распывание импульса происходит быстрее, чем

изменение его спектра из-за фазовой самомодуляции.

10. Показано, что в системе компрессии сверхкоротких импульсов, состоящей из одномодового световода и дисперсионной линии задержки, возможно компенсировать влияние дисперсии третьего порядка путем формирования на входе в световод ассиметричных импульсов.

Практическая ценность диссертационной работы

Результаты диссертационной работы могут служить основой для разработок ряда новых высокотехнологических эффективных методов и устройств для сверхбыстрой оптики, фотоники и лазерной физики, в частности:

- Предложен и экспериментально продемонстрирован метод генерации симиляритонов в пассивных одномодовых волоконных световодах.
- Для полной характеристики фемтосекундного сигнала, предложен и экспериментально продемонстрирован самоопорный метод спектральной интерферометрии с использованием симиляритона.
- Предложен и экспериментально продемонстрирован простой – альтернативный к автокорреляционному метод диагностики фемтосекундных импульсов на основе использования нелинейно-дисперсионного симиляритона.
- Экспериментально продемонстрирована возможность генерации спектральноограниченных прямоугольных импульсов в системе спектральной компрессии.
- Продемонстрировано, что в качестве опорного импульса в методе спектрально-временного отображения может использоваться нелинейно-дисперсионный симиляритон, сгенерированный в пассивном одномодовом волоконном световоде из части сигнального импульса, что позволяет сделать метод самоопорным и достигнуть существенного упрощения экспериментальной установки.
- Предложен и реализован простой способ генерации симиляритонов со спектральной шириной до ~50 ТГц
- На основе полученных результатов исследования распространения светового излучения в области единичных крутых изгибов многомодовых световодов с параболическим профилем показателя преломления, предложено использовать изогнутые волноводы в качестве фильтров мод, работающих в режиме согласования, а также в качестве датчиков с перестраиваемой чувствительностью.
- Показано, что возбуждение на входе волновода различных мод дает возможность по экспериментально определяемым характеристикам обратного рассеяния изучать распределение параметров волновода не только по его длине, но и в поперечном направлении.

На защиту выносятся следующие положения:

1. В среде с кубичной нелинейностью нелинейно-дисперсионный характер самовоздействия субпикосекундных и фемтосекундных оптических импульсов с произвольной начальной формой и фазой приводит к формированию нелинейно-дисперсионных симиляритонов, которые обладают параболической фазой и свойством спектрально-временного подобия.
2. Спектральная фаза нелинейно-дисперсионного симиляритона, сформированного в волоконном световоде, определяется дисперсионными характеристиками и длиной световода и в асимптоте совпадает со спектральной фазой спектрально-ограниченного импульса, распространяющегося в таком же световоде в линейном режиме, как при учете дисперсии второго, так и третьего порядка в случае симметричных импульсов. Длительность нелинейно-дисперсионного симиляритона определяется мощностью начального импульса и параметрами световода.
3. Спектральная фаза “пресимиляритонов” – прямоугольных импульсов предшествующих формированию нелинейно-дисперсионных симиляритонов, в центральной энергонесущей части параболична с коэффициентом, который, как и в случае симиляритона, определяется дисперсией и длиной световода.
4. Спектрально-интерферометрическую характеристику сверхкоротких импульсов, на основе восстановления комплексной временной огибающей поля излучения, можно осуществить путем использования в качестве опорного импульса нелинейно-дисперсионного симиляритона, сформированного из части исследуемого импульса.
5. Применение нелинейно-дисперсионного симиляритона для наведения временной линзы посредством генерации суммарной частоты позволяет реализовать безаберрационные, самоопорные процессы спектрально-временного отображения и спектральной компрессии, со степенью сжатия не зависящей от мощности исходного импульса.
6. Самовоздействие спектрально-ограниченных импульсов в световодах с отрицательной дисперсией приводит к спектральному самосжатию в случае, когда дисперсионное расплывание импульса происходит быстрее, чем изменение его спектра из-за фазовой самомодуляции.
7. В процессе компрессии нелинейно-дисперсионных симиляритонов влияние дисперсии третьего порядка в световоде и в дисперсионной линии задержки можно компенсировать путем управления формой начального импульса.
8. Параметры гауссова пучка в продольно-неоднородной нелинейной среде с квадратичным профилем показателя преломления определяются коэффициентом отражения и фазами прошедшей и отраженной волн для барьера с формой,

задаваемой законом продольного изменения градиентного параметра среды. При наличии поглощения возможен режим стабилизации ширины пучка, в котором потери излучения по краям пучка компенсируют его расплывание, вызванное продольной неоднородностью и нелинейностью световода.

9. При рэлеевском рассеянии в градиентных световодах, в случае селективного возбуждения различных мод, в обратном направлении наиболее эффективно возбуждаются моды с номерами, близкими к номеру возбуждающей моды. В случае возбуждения световода протяженным некогерентным источником, мощность в обратнорассеянных модах уменьшается с увеличением порядкового номера моды, причем тем быстрее, чем больше длина волны возбуждающего излучения.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на международных конференциях Frontiers in Optics, Optical Society of America (OSA FiO; Rochester, NY, USA, 2010, San Jose, CA, USA, 2009, 2007; Rochester, NY, USA, 2008), EOS Annual Meeting (Paris, France, 2008), OSA Nonlinear Photonics (Quebec, 2007, Karlsruhe, 2010), Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL; Алушта, Крым, Украина, 2008), Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO; Long Beach, 2006), The 5th EPS-QEOD EUROPHOTON Conference on Solid-State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources, (Stockholm, Sweden, 2012), Annual Meeting of European Optical Society (EOSAM, Aberdeen, Scotland, UK, 2012), Компьютерная оптика (Москва, 1986,1988), Int. Advanced Research Workshop Modern Problems in Optics & Photonics (MPOP, Yerevan, 2009), Int. Advanced School on Frontiers in Optics & Photonics (FOP, Armenia 2012), на отечественных конференциях Laser Physics (LP; Аштарак, 2006, 2008, 2011), на международных семинарах OSA Young Optician School (YOS; Ереван-Аштарак, 2007), научных семинарах отделов обработки сигналов и волновых явлений Института общей физики АН СССР, кафедры оптики физического факультета ЕГУ.

Публикации

По материалам диссертации опубликованы 42 работы, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 231 листе машинописного текста, содержит 77 рисунков и библиографию, содержащую 254 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен краткий обзор основных результатов, близких к теме диссертации, обсуждается актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, мотивированы ее научная новизна и практическая ценность, сформулированы защищаемые положения. В конце введения приведены структура диссертации, краткое содержание, места апробации и список публикаций по теме работы. Исследования с оригинальными физическими результатами отражены в четырех последующих главах.

Первая глава посвящена рассмотрению особенностей распространения излучения в продольно-неоднородных световодах с квадратичным профилем показателя преломления и кубичной нелинейностью при учете поглощения или усиления. Рассмотрено также рэлеевское рассеяние и распространение светового излучения в области единичных крутых изгибов многомодовых световодов с параболическим профилем показателя преломления.

В §1.1 представлены результаты исследования, в рамках параксиального приближения волновой оптики, влияния продольных неоднородностей на нелинейное распространение гауссова пучка света в среде с параболическим профилем показателя преломления. Показано, что определение параметров гауссова пучка в такой среде в параксиальном приближении сводится к решению уравнения для классического осциллятора с переменной частотой

$$\varphi''(\zeta) + \varpi^2(\zeta)\varphi(\zeta) = 0 \quad (1)$$

для комплексной функции $\varphi(\zeta)$, однозначно определяющей ширину $W(\zeta)$ и радиус кривизны $r(\zeta)$ пучка. В общем случае решение уравнения (1) не может быть записано в известных функциях. Однако анализ решений существенно упрощается, когда градиентный параметр $\varpi(\zeta)$ удовлетворяет условию $\varpi(\pm\infty) = \varpi_{\pm}$. Иными словами, среда на начальном и конечном участках предполагается продольно-однородной с градиентными параметрами ϖ_{-} и ϖ_{+} соответственно. При этом в силу произвольности длин этих продольно-однородных участков данное условие не ограничивает общности получаемых далее результатов.

По аналогии с решением одномерного уравнения Шредингера, асимптотическое решение (1) и, следовательно, поведение пучка при $\zeta \rightarrow +\infty$ полностью характеризуется численными параметрами $0 \leq R \leq 1$, δ_1 и δ_2 , которые можно интерпретировать как коэффициент отражения и амплитуды прошедшей и отраженной волн для

барьера, форма которого задается функцией $\varpi^2(\zeta)$. Таким образом, простым численным перебором значений R , δ_1 и δ_2 можно описать весь класс продольных неоднородностей среды. Для некоторых законов изменения градиентного параметра, в частности, в случае продольно-однородного световода, величина R обращается в нуль (аналогично тому, как в квантовой механике барьер $\varpi^2(\zeta)$ становится прозрачным). В этом случае достигается согласование, при котором продольные неоднородности среды не сказываются на характере поведения пучка. Показано, что при этом, при распространении гауссова пучка света с плоским волновым фронтом и произвольной начальной шириной соответствующим выбором мощности пучка можно добиться того, чтобы его ширина на конечном продольно-однородном участке оставалась постоянной. Случай $R=1$ соответствует полному рассогласованию, при котором вне зависимости от начальных параметров пучка его ширина обращается в бесконечность (вся энергия излучается из световода).

Исследован также модовый состав излучения и получены явные выражения для коэффициентов возбуждения гаусс-эрмитовых мод на выходе из световода.

Получены также уравнения для ширины и радиуса кривизны волнового фронта гауссова пучка при наличии в световоде поглощения или усиления и проведен соответствующий численный анализ. Показано, что продольная неоднородность как действительной, так и мнимой части ϖ , так же, как и нелинейность среды, приводит к осцилляциям ширины пучка. При помощи численных расчетов показано, что в световоде с поглощением возможен режим стабилизации ширины пучка, при котором поглощение излучения по краям пучка компенсирует его расплывание, вызванное продольной неоднородностью и нелинейностью волновода.

В §1.2 в рамках параксиального приближения волновой оптики проведено исследование модового состава обратного рассеяния в многомодовых градиентных продольно-однородных световодах с квадратичным профилем показателя преломления при известном поперечном распределении поля прямого излучения. При этом считается, что для не слишком длинных волноводов модовый состав обратно рассеянного сигнала определяется только поперечным распределением поля прямого излучения и механизмом обратного рассеяния, а влиянием на него других факторов можно пренебречь. Показано, что в случае возбуждения волновода протяженным некогерентным источником мощность в обратнорассеянных модах уменьшается с увеличением порядкового номера моды, причем это уменьшение происходит тем быстрее, чем больше длина волны возбуждающего излучения. В случае селективного возбуждения на входе волновода различных мод в обратном направлении наиболее эффективно воз-

буждаются моды с номерами, близкими к номеру возбуждающей моды. Рассмотрены также коэффициенты связи между прямыми и обратными модами. Показано, что с увеличением параметра P , характеризующего градиент коэффициента рэлеевского рассеяния, коэффициенты связи также увеличиваются. Отмечается возможность применения метода обратного рассеяния для изучения параметров волновода не только в продольном, но и в поперечном направлении путем селективного возбуждения на входе волновода различных мод и селективного детектирования их на выходе.

Рассмотрен также процесс захвата обратнорассеянного излучения в волновод. В двух частных случаях возбуждения волновода (нулевой модой и протяженным некогерентным источником излучения) получены явные выражения для коэффициентов захвата.

В §1.3 представлены результаты исследования распространения светового излучения в одиночных крутых изгибах достаточно многомодовых световодов с квадратичным профилем показателя преломления. С помощью конформного отображения функций комплексного переменного, переводящего изогнутый световод в эквивалентный прямолинейный световод с новым эффективным профилем показателя преломления показано, что рассматриваемая задача сводится к несоосной стыковке световодов с различными градиентными параметрами. В рамках такой модели исследовано распространение излучения в области изгибов световодов и получены выражения для коэффициентов трансформации энергии между модами, дисперсии импульса и потерь энергии на изгибе. Показано, что непрерывное и достаточно медленное ($\partial r/\partial z \ll 1$) изменение радиуса изгиба не вызывает перераспределения энергии между модами. На основе полученных результатов предложено использовать изогнутые волноводы в качестве фильтров мод, работающих в режиме согласования, а также в качестве датчиков с перестраиваемой чувствительностью.

Во второй главе рассмотрена возможность генерации нового вида симиляритонов (импульсов, сохраняющих свою форму при распространении) в пассивных одномодовых волоконных световодах – нелинейно-дисперсионных симиляритонов, которые формируются под комбинированным воздействием дисперсии групповых скоростей и фазовой самомодуляции в дальнем поле дисперсии. Подробно обсуждаются условия формирования нелинейно-дисперсионных симиляритонов и их свойства.

§2.1 посвящен изложению процедур численного и аналитического исследования процесса самовоздействия мощного импульсного излучения в одномодовых волоконных световодах. В частности, рассматривается метод медленно меняющейся амплитуды, который позволяет самовоздействие импульсного излучения в световоде свести к обобщенному нелинейному уравнению Шредингера. Детально

обсуждается роль различных физических факторов, таких как дисперсия различных порядков, фазовая самомодуляция, волновая нестационарность и релаксация нелинейности, при распространении в световоде импульсов пикосекундных и фемтосекундных длительностей. Рассмотрены условия, при которых необходимо учитывать процесс ВКР при распространении сверхкоротких импульсов в кварцевых волоконных световодах.

Во §2.2 проведено качественное аналитическое обсуждение особенностей распространения мощных сверхкоротких лазерных импульсов в пассивных одномодовых волоконных световодах в дальнем поле дисперсии и при помощи численного моделирования исследована возможность генерации в таких световодах симиляритонов, т.е. импульсов, сохраняющих свою форму при распространении. Показано, что в пассивных волоконных световодах возможна генерация имеющих спектральный характер нелинейно-дисперсионных симиляритонов. При распространении по световоду на начальном участке спектр уширяется и формируются прямоугольные импульсы, фаза которых является параболической (линейный чирп) только в центральной энергонесущей части. При дальнейшем распространении чирп линейризуется, а временной и спектральный профили импульса приобретают одинаковую форму, которая при дальнейшем распространении практически не меняется. Ширина спектра после формирования прямоугольного импульса практически не меняется. Однако, в отличие от прямоугольных импульсов, центральная часть сформированного нелинейно-дисперсионного симиляритона стремится приобрести параболическую форму, что обусловлено эффективностью фазовой самомодуляции на крутых фронте и хвосте импульса. При этом с увеличением начальной интенсивности и длины волокна нерегулярности вытесняются к краям импульса и его спектра и все большая часть импульса приобретает параболическую форму.

Проведенные численные исследования показывают, что при длине волокна порядка нескольких $L_D = \tau_0^2 / |k_2|$, где τ_0 – полудлительность импульса на уровне e^{-1} от максимального значения интенсивности и k_2 – коэффициент дисперсии второго порядка, конечный чирп импульса также оказывается линейным. При этом фаза сформированного симиляритона, практически не зависит от интенсивности импульса и определяется только длиной и дисперсионными свойствами световода, практически совпадая с чисто дисперсионной фазой первоначально спектрально-ограниченного импульса, прошедшего такой же участок световода, причем тем точнее, чем больше уширение спектра и длина волокна. Таким образом увеличение интенсивности начального импульса приводит к взаимосвязанному (синхронному) изменению спектра и формы нелинейно-дисперсионного симиляритона таким образом, что величина чирп-

па остается неизменной. Численные исследования проводились для входных импульсов с длительностями ~ 100 фс и интенсивностями со значениями $I_0 \leq 5 \cdot 10^{11}$ Вт/см², а также для начальных импульсов с различными профилями интенсивностей (секанс-гиперболических, супергауссовских и для неколоколообразных импульсов с микро-структурой) и начальными chirпами. Во всех случаях коэффициент chirпа симиляритонов при $I_0 > 5 \cdot 10^{10}$ Вт/см² практически не зависел от интенсивности начального импульса и для его chirпа достаточно хорошо выполнялось условие

$$\gamma = \Delta\omega / \tau \approx (k_2 z)^{-1}. \quad (2)$$

В §2.3 представлены результаты детального экспериментального исследования процесса формирования нелинейно-дисперсионного симиляритона в пассивном одномодовом волоконном световоде, а также обсужденных в предыдущем параграфе спектральных, временных и фазовых особенностей такого симиляритона.

Основным методом исследования являлся метод спектральной интерферометрии. Излучение титан-сапфирового лазера с длительностью импульса на полувысоте $\tau_{1/2} \approx 140$ фс и частотой 76 МГц подавалось на вход интерферометра, одно плечо которого содержало оптическое волокно длиной $z \approx 2.1$ м. Одна реплика начального импульса, пройдя через дисперсионную линию задержки и одномодовый волоконный световод, приобретала фазу $\tilde{\varphi}_f(\omega)$. Другая реплика начального, выходящего из лазера импульса с фазой $\tilde{\varphi}_0(\omega)$ проходила через второе свободное плечо интерферометра. Линия задержки в этом плече служила для выравнивания оптических путей импульсов. На выходе интерферометра регистрировался суммарный интерференционный спектр, получающийся в результате наложения двух реплик. Суммарный спектр промодулирован косинусом от разности фаз $\cos[\tilde{\varphi}_f(\omega) - \tilde{\varphi}_0(\omega)]$, что делает возможным восстановить разность фаз $\tilde{\varphi}_f(\omega) - \tilde{\varphi}_0(\omega)$. При этом фаза начального импульса $\tilde{\varphi}_0(\omega) \approx 0$ в течение измерений оставалась неизменной. Так как спектр нелинейно-дисперсионного симиляритона уширяется и получается в несколько раз шире, чем спектр опорного не измененного лазерного импульса, то определялась фаза симиляритона только в центральной части спектра. Для исследования зависимости разности фаз $\tilde{\varphi}_f(\omega) - \tilde{\varphi}_0(\omega)$ (а следовательно, при условии неизменности фазы опорного импульса $\tilde{\varphi}_0(\omega)$, и $\tilde{\varphi}_f(\omega)$) изменялась мощность вводимого в волокно излучения. Вследствие фазовой самомодуляции спектр импульса уширялся с 7 до 36 нм (средняя мощность $\bar{p} \leq 100$ мВт). В результате, измерения показали, что изменение интенсивности

не приводит к изменению измеряемой разности фаз $\tilde{\varphi}_f(\omega) - \tilde{\varphi}_0(\omega)$, которая в центральной области спектра симиляритона имела параболический вид. Коэффициент параболы ($-\tilde{\varphi}_f''(\omega)$) составлял величину $\approx 9.4 \times 10^{-3} \text{ пс}^2$, что при $k_2 \approx 4.5 \text{ пс}^2/\text{м}$ и $z = 2.1 \text{ м}$ соответствует предсказанному значению $k_2 z / 2$ в соответствии с (2). Для исследования зависимости $\tilde{\varphi}_f(\omega)$ от начального chirpa импульса непосредственно перед волокном устанавливались дисперсионные линии задержки, приводящие к удлинению импульса в 1.4 – 2.2 раза. Однако и в этом случае величина $\tilde{\varphi}_f(\omega) - \tilde{\varphi}_0(\omega)$ оставалась неизменной (в пределах ошибки эксперимента $\sim 4\%$). При этом, с учетом $\tilde{\varphi}_0(\omega) \approx 0$, достаточно хорошо выполняется и соотношение (2).

Для полной характеристики нелинейно-дисперсионных симиляритонов был использован модифицированный метод спектральной интерферометрии. Излучение лазера Coherent Verdi V10-Mira 900F с длительностью импульсов на полувысоте 100 фс и частотой повторения 76 МГц подавалось на вход интерферометра Маха–Цендера, где разделялось на две части. Часть излучения с меньшей мощностью служила в качестве опорного импульса. Во втором плече интерферометра излучение сначала проходило через систему формирования импульсов, в котором первоначальный спектр с шириной $\Delta\lambda = 11 \text{ нм}$ обрезался до $\Delta\lambda = 2 \text{ нм}$ и формировались импульсы различной формы, и далее вводился в одномодовый волоконный световод. Средняя мощность излучения в световоде составляла величину до $\bar{p} \approx 10 \text{ мВт}$. В эксперименте использовались стандартные сохраняющие поляризацию волокна Newport F-SPF @820 нм и ThorLabs HP @780 нм с длинами 1 м, 9 м и 36 м. На выходе интерферометра регистрировался суммарный интерференционный спектр, из которого определялась спектральная фаза сформированного в волоконном световоде симиляритона. Хотя в световоде спектр импульса уширялся, тем не менее, не превосходил ширину спектра опорного импульса, что позволяло измерять спектральную фазу исследуемого импульса по всему спектру. Далее, имея спектральную амплитуду и фазу импульса, при помощи преобразования Фурье восстанавливался его временной профиль. При этом параболичность фазы (линейность chirpa) приводит к спектрально-временному подобию, при котором временная форма импульса повторяет его спектр, причем с тем большей точностью, чем больше длина световода (рис.1). Проведенные исследования полностью подтвердили результаты численного анализа относительно условий генерации, фазовых свойств и спектрально-временного подобия нелинейно-дисперсионного симиляритона.

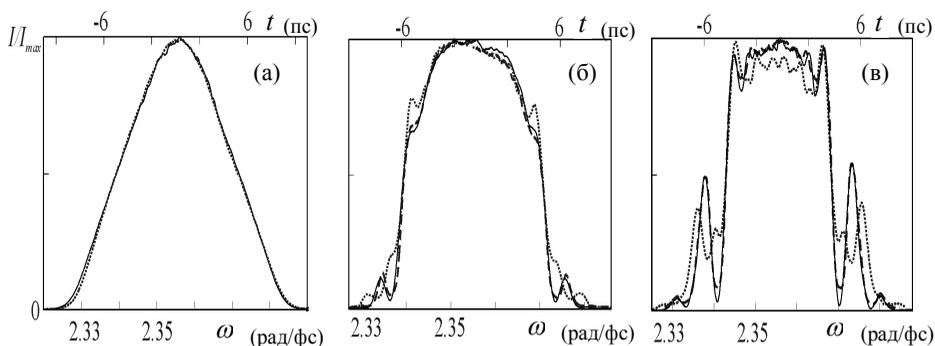


Рис.1. Спектрально-временное подобие нелинейно-дисперсионных симляритонов, сформированных из колоколообразного импульса (а), двухпикового импульса (б) и двухпикового импульса с большим расстоянием между пиками (в). Сплошными линиями представлены спектры, а точками соответствующие временные профили при длине световода $z = 9$ м. Пунктирные линии соответствуют временным профилям симляритонов при длине световода $4z$.

Для выявления связи между свойствами прямоугольных импульсов, которые формируются в световоде до симляритонов, и нелинейно-дисперсионных симляритонов было проведено также спектрально-интерферометрическое исследование импульсов сформированных в одномодовом волоконном световоде меньшей длины. Показано, что спектральная ширина симляритона практически не отличается от спектральной ширины предшествующего прямоугольного импульса. При этом спектральная фаза прямоугольных импульсов параболична в центральной энергонесущей части с коэффициентом, который, как и в случае нелинейно-дисперсионного симляритона, определяется только дисперсией и длиной световода и удовлетворяет (2).

§2.4 посвящен исследованию спектральной ширины и длительности нелинейно-дисперсионного симляритона и определению чирпа симляритона путем простого измерения его спектра и автокорреляционной длительности.

Параболичность фазы и спектрально-временное подобие нелинейно-дисперсионного симляритона позволяют измерить значение его чирпа простым способом, суть которого заключается в том, что для измерения коэффициента чирпа ширину рассчитанной автокорреляционной функции измеренного спектра симляритона необходимо разделить на длительность временной автокорреляционной функции. В эксперименте нелинейно-дисперсионный симляритон формировался из исходного лазерного импульса с длительностью на полувысоте $\tau_{1/2} \approx 100$ фс и спектральной шириной $\Delta\lambda_0 = 11$ нм (центральная длина волны $\lambda_0 = 800$ нм) в одномодовых волоконных световодах длиной $z = 33$ см (Newport F-SPF @820 нм) и $z = 95$ см (ThorLabs HP

@780 нм). Для измерения временной автокорреляционной функции использовался автокоррелятор APE PulseCheck. Проведенные исследования позволили определить коэффициенты чирпов сформированных симиляритонов, ширина спектра которых варьировалась в пределах от $\Delta\lambda_s \approx 50$ нм до $\Delta\lambda_s \approx 100$ нм и продемонстрировать факт независимости их фазы от интенсивности и чирпа исходного импульса. Также при помощи численных и экспериментальных исследований выявлено простое соотношение между спектральной шириной симиляритона, сформированного в одномодовом волоконном световоде без усиления, длительностью исходного импульса и его мощностью. Показано, что мощность начального импульса полностью определяет спектральную ширину и, при данной длине световода, также длительность симиляритона.

В третьей главе рассматриваются возможности и перспективы применения описанного в предыдущей главе нелинейно-дисперсионного симиляритона в методах диагностики сверхкоротких оптических импульсов. Показано, что применение симиляритонов в методах характеристики сверхкоротких импульсов, в которых требуется опорный импульс, в частности, в методах спектральной интерферометрии и спектрально-временного отображения позволяет существенно улучшить эти методы, сделав их самоопорными, расширив область их применения и упростив экспериментальную реализацию метода.

В §3.1 описан метод спектральной интерферометрии и рассмотрены особенности его применения. Эта техника является линейной и позволяет полностью охарактеризовать сверхкороткие оптические импульсы путем измерения их спектральных амплитуды и фазы. Если спектр импульса можно непосредственно измерить с помощью спектрометра, то спектральную фазу можно восстановить из измеренного суммарного спектра опорного импульса с известной фазой и характеризуемого импульса. Если $\tilde{A}_R(\omega) = |\tilde{A}_R(\omega)| \exp\{i\tilde{\varphi}_R(\omega)\}$ и $\tilde{A}(\omega) = |\tilde{A}(\omega)| \exp\{i\tilde{\varphi}(\omega)\}$ являются фурье-образами комплексных амплитуд соответственно опорного и характеризуемого импульсов, то фурье-образ комплексной амплитуды суммарного поля $\tilde{A}_S(\omega) = A_R(\omega) + \tilde{A}(\omega)$, а спектр

$$S_S(\omega) = S_R(\omega) + S(\omega) + 2\sqrt{S_R(\omega)S(\omega)} \cos[\tilde{\varphi}_R(\omega) - \tilde{\varphi}(\omega)]. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, суммарный спектр промодулирован членом с $\cos[\tilde{\varphi}_R(\omega) - \tilde{\varphi}(\omega)]$, что делает возможным восстановить разность фаз $\tilde{\varphi}_R(\omega) - \tilde{\varphi}(\omega)$. Тогда, с учетом того, что $\tilde{\varphi}_R(\omega)$ - известная фаза опорного импульса, можно рассчитать $\tilde{\varphi}_R(\omega)$ и с помощью отдельно измеренной спектральной амплитуды $\sqrt{S(\omega)}$ путем фурье-преобразования полностью охарактеризовать исследуемый импульс как в спектральном, так и во временном представлении.

В §3.2 предложен и экспериментально продемонстрирован новый спектрально-интерферометрический метод полной характеристики параметров фемтосекундных и субпикосекундных импульсов. Предлагаемый метод совмещает в себе преимущества классической спектральной интерферометрии и интерферометрии спектрального сдвига (методы SIDER, SPIRIT и их модификации), сочетая простоту принципа и конфигурации метода с самоопорной реализацией. Метод основан на том, что при распространении произвольных мощных сверхкоротких импульсов в одномодовом волоконном световоде формируются нелинейно-дисперсионные симиляритоны с квадратичной фазой (линейным чирпом), которая определяется только дисперсионными характеристиками волоконного световода и не зависит от временной амплитуды, фазы и интенсивности начального импульса. Это позволяет в методе спектральной интерферометрии исследуемый импульс с неизвестной спектральной фазой $\phi_0(\omega)$ разделить на две реплики, одна из которых, проходя через волокно, преобразуется в такой симиляритон. В дальнейшем этот импульс, используемый в качестве опорного, накладывается на другую (сигнальную) реплику и измеряется полученный таким образом суммарный интерференционный спектр. Полученная спектральная картина зависит от разности спектральных фаз опорного и сигнального импульсов, что позволяет, зная дисперсионные характеристики используемого волокна, восстановить спектральную фазу сигнального (начального) импульса $\phi_0(\omega)$. Отдельное измерение спектра сигнального импульса вместе с восстановленной спектральной фазой полностью характеризует исследуемый импульс как в спектральной, так и во временной области.

Предлагаемый метод был апробирован как для простых колоколообразных импульсов, так и для более сложных импульсов с микроструктурой. Во всех случаях проводилось сравнение результатов измерений, проведенных предлагаемым методом спектральной интерферометрии, использующей в качестве опорного импульса симиляритоны, с соответствующими автокорреляционными измерениями и теоретическими расчетами. В тех случаях, когда ширина спектра сформированного сигнального импульса не превосходила ширину спектра начального лазерного импульса, применялся также метод классической спектральной интерферометрии, когда в качестве опорного импульса используется непосредственно лазерный импульс с известными характеристиками. На рис.2 представлены типичные экспериментальные результаты восстановления фазы и временных профилей начальных двухпиковых импульсов. На рисунках показаны спектры опорных импульсов – сформированных в волоконном световоде нелинейно-дисперсионных симиляритонов, восстановленные спектральные фазы и измеренные спектры сигнальных импульсов, а также восстановленные временные профили и измеренные автокорреляционные функции. Для сравнения рассчитаны также автокорреляционные функции восстановленных импульсов.

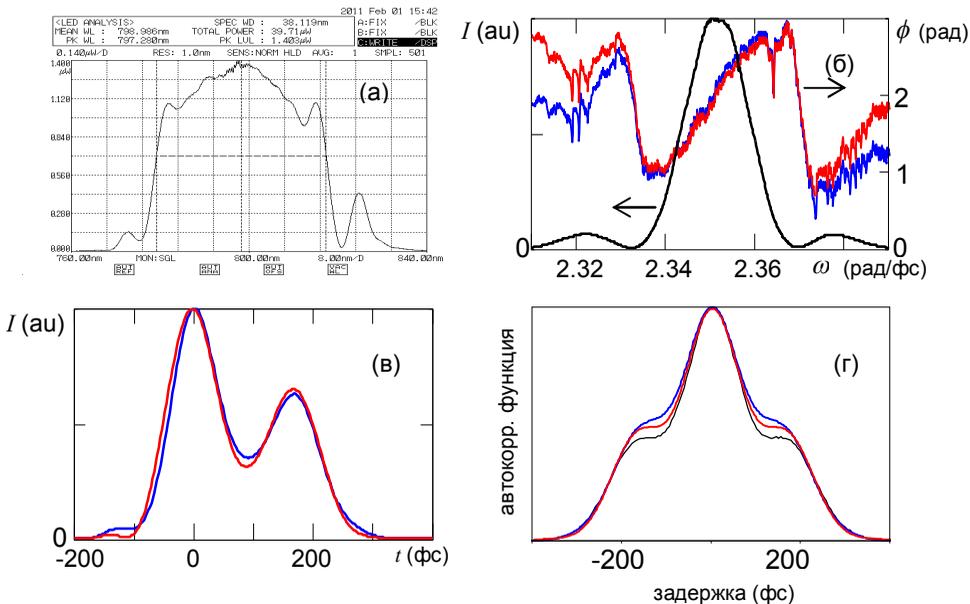


Рис.2. Реконструкция двухпикового импульса. (а) – спектры нелинейно-дисперсионных симилиритонов; (б) – спектры и восстановленные спектральные фазы сигнальных импульсов; (в) – восстановленные профили интенсивности; (г) – автокорреляционные функции. Серые кривые соответствуют $\alpha = 2.1 \times 10^4$ фс² и $\alpha = 1.995 \times 10^4$ фс² (5% разница), черная линия на (г) – измеренная автокорреляционная функция.

Серые сплошные и пунктирные кривые соответствуют различающимся на несколько процентов значениям коэффициента параболической фазы симилиритона α . Видно, что малое (в пределах 5%) изменение α не приводит к существенным искажениям в фазе и форме восстановленных импульсов, что свидетельствует о стабильности и точности предлагаемого метода.

Продемонстрирована также возможность применения в качестве опорных импульсов в методе спектральной интерферометрии “прямоугольных” импульсов, которые формируются в более коротком световоде в режиме, предшествующем формированию симилиритонов. Такая возможность обусловлена тем обстоятельством, что, как показано во второй главе, спектральная фаза таких “прямоугольных” импульсов в центральной части совпадает с фазой нелинейно-дисперсионных симилиритонов и также не зависит от свойств входного импульса.

В §3.3 представлены результаты численных и экспериментальных исследований возможностей применения нелинейно-дисперсионных симиляритонов и предшествующих им прямоугольных импульсов в процессе Фурье-преобразования время-спектр в случае, когда параболическая временная линза индуцируется нелинейно-дисперсионными симиляритонами, а также предшествующими им прямоугольными импульсами. Такой подход позволяет генерировать индуцирующий временную линзу опорный импульс из части сигнала, что делает самоопорным развитый ранее на основе Фурье-конверсии метод спектрально-временного отображения для прямой регистрации сверхкоротких импульсов. С другой стороны параболичность фазы и временной формы (в центральной части) симиляритона практически обеспечивает отсутствие aberrаций. Как известно, в методе спектрально-временного отображения необходимо выполнение двух условий: условие компенсации фаз (индуцированная дисперсией фаза сигнала в дисперсионной линии задержки должна гаситься фазой опорного импульса), а также условие постоянности опорного импульса в течении удлиненного сигнала. В результате исследований было продемонстрировано, что нелинейно-дисперсионные симиляритоны, сформированные из части сигнальных импульсов с разными формами и длительностями (100-400фс), хорошо удовлетворяли необходимым условиям, обеспечивая высокую точность Фурье-конверсии.

Показано также, что в качестве опорного импульса в методе спектрально-временного отображения могут использоваться импульсы, сформированные из исследуемого импульса в режиме, предшествующем формированию симиляритонов. В §2.3 было показано, что спектральная фаза таких импульсов в центральной энергонесущей части, как и в случае симиляритона, не зависит от параметров начального импульса и имеет параболический вид. При помощи численного моделирования показано, что при этом выполняется также условие постоянства опорного импульса в течении сигнала, причем как для простых колоколообразных импульсов, так и для более сложных импульсов с несколькими пиками. Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали хорошее количественное соответствие автокорреляционной функции начального импульса, измеренной на входе в систему, и автокорреляционной функции спектрального образа, полученного в результате нелинейного взаимодействия сигнального и опорного импульсов в нелинейном кристалле.

Было проведено подробное сравнительное экспериментальное исследование методов спектральной интерферометрии и спектрально-временного отображения на основе симиляритона, результаты которого сравнивались с соответствующими численными расчетами. Проведенное исследование продемонстрировало взаимное соответствие и высокую точность рассматриваемых методов. При этом в то время, как в случае спектральной интерферометрии необходимы только независимость фазы и достаточная ширина спектра симиляритона, метод спектрально-временного отобра-

жения требует выполнения более строгих условий. Во всех случаях результаты измерений, проведенных методом спектральной интерферометрии практически были тождественны результатам соответствующих численных расчетов. Что касается метода спектрально-временного отображения, то для получения столь же точных результатов в этом случае требовалось сгенерировать симиляритон с наибольшей возможной спектральной шириной для выполнения условия постоянства опорного импульса в течении сигнала.

В §3.4 предложен и экспериментально апробирован альтернативный к автокорреляционному и простой в реализации метод определения длительности фемтосекундных лазерных импульсов, основанный на генерации нелинейно-дисперсионного симиляритона в пассивном волоконном световоде (без усиления), и измерении его спектральной ширины или длительности, задающейся мощностью исходного импульса. Предложенным методом были проведены измерения предварительно chirпированных импульсов с длительностью $\Delta t_0 = 100\text{--}300\text{фс}$ (как с положительными, так и с отрицательными chirпами) и получено хорошее соответствие результатов измерений к заранее известными значениями длительностей начальных импульсов.

Четвертая глава посвящена изучению особенностей нелинейно-дисперсионных симиляритонов со спектральной шириной порядка несколько десятков ТГц, с учетом дисперсионных и нелинейных эффектов высших порядков. Рассмотрено также применение таких симиляритонов в задачах спектральной и временной компрессии сверхкоротких оптических импульсов.

В §4.1 представлены результаты исследований, направленных на генерацию и выявление особенностей нелинейно-дисперсионного симиляритона с широким спектром. Сначала свойства такого симиляритона рассмотрены на основе численного моделирования с учетом таких дисперсионных и нелинейных эффектов высших порядков, как дисперсия третьего порядков, волновая нестационарность и релаксация нелинейности. Далее приведены результаты экспериментальных исследований, в ходе которых в пассивном одномодовом волоконном световоде был сгенерирован и полностью охарактеризован нелинейно-дисперсионный симиляритон со спектральной шириной $\Delta \nu \approx 50\text{ ТГц}$.

Численное моделирование основано на обобщенном нелинейном уравнении Шредингера для медленно меняющейся амплитуды поля с учетом дисперсии третьего порядка, волновой нестационарности и нестационарности нелинейного отклика. Исследования при этих условиях показали, что нелинейные эффекты высшего порядка, т.е. волновая нестационарность и нестационарность нелинейного не влияют на процесс формирования и свойства симиляритона в то время как дисперсия третьего порядка играет заметную роль. При этом фаза нелинейно-дисперсионного симиляритона

с широким спектром также определяется только дисперсией световода и равна фазе, наведенной при чисто дисперсионном распространении импульса. При этом влияние дисперсии третьего порядка на фазу симиляритона проявляется аддитивным образом, т.е. в качестве добавки к спектральной фазе.

Для экспериментальных исследований свойств нелинейно-дисперсионного симиляритона с широким спектром был сгенерирован симиляритон со спектральной шириной 50 ТГц и проведена его полная характеристика путем измерения фазы (чирпа) симиляритона с использованием техники частотной перестройки и спектральной компрессии. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили результаты численного моделирования и показали наличие в спектральной фазе нелинейно-дисперсионного симиляритона наличие кубичной компоненты, величина которой определяется коэффициентом дисперсии третьего порядка используемого волоконного световода. Отметим также, что отклонение фазы симиляритона от параболической аппроксимации составляет величину $\sim 1\%$, что не может оказать существенное влияние на точность рассмотренных в главе III методов диагностики фемтосекундных импульсов на основе нелинейно-дисперсионного симиляритона – спектральной интерферометрии и спектрально-временного отображения. Причем, если в методе спектрально-временного отображения такая малая нелинейность чирпа симиляритона приведет к незначительному искажению спектрального образа, то в спектральной интерферометрии при определении фазы сигнала можно просто учесть кубичный член в фазе симиляритона.

В §4.2 рассмотрены возможности временной компрессии нелинейно-дисперсионных симиляритонов и влияние на нее нелинейных и дисперсионных эффектов высших порядков. Одним из наиболее интересных и практически важных применений симиляритонов является временная компрессия оптических импульсов, при которой, полученная благодаря фазовой самомодуляции в волоконном световоде, положительная фаза компенсируется в дисперсионной линии задержки с отрицательной дисперсией. В световоде спектральная ширина импульса увеличивается и компенсация полученной при этом фазы в дисперсионной среде приводит к формированию более короткого импульса. Компрессия импульсов до нескольких десятков или единиц фемтосекунд представляет наибольший практический интерес с точки зрения их применения в науке, инженерии, медицине и т.д. Для получения таких коротких импульсов требуется сгенерировать в световоде симиляритон со спектральной шириной в несколько десятков ТГц. В предыдущем параграфе показано, что для симиляритонов с таким широким спектром заметную роль начинает играть дисперсия третьего порядка, что может привести к ограничению эффективности сжатия. Показано, что хотя дисперсия третьего порядка, фактически, блокирует сжатие симиляритона со спектром $\Delta\nu \approx 50$ ТГц., однако, в силу того, что коэффициенты дисперсии третьего

порядка в призмном компрессоре и кварцевом световоде имеют разные знаки, подбор значений параметров системы компрессии (расстояния между призмами в дисперсионной линии задержки и длины световода) позволяет частично компенсировать дисперсию третьего порядка, достигая более эффективной компрессии. В проведенных экспериментах максимальная компрессия была достигнута при уширении спектра до 77нм с длительностью автокорреляционной функции сжатого импульса 25 фс, что соответствует длительности на полувысоте для гауссовских импульсов 17 фс.

Рассмотрена также возможность оптимизации компрессии путем формирования на входе в световод асимметричных импульсов. В процессе фазовой самомодуляции асимметрия начального импульса также, как и дисперсия третьего порядка, может приводить к асимметрии фазы импульса. Это обстоятельство дает возможность управлять величиной кубичного члена в фазе импульса в волоконном световоде путем управления асимметрией начального импульса. При помощи численного моделирования показано, что путем формирования на входе в световод асимметричных импульсов возможно компенсировать влияние дисперсии третьего порядка в световоде и в призмной дисперсионной линии задержки, достигая, таким образом, эффективной компрессии импульса со степенью компрессии, определяемой степенью уширения спектра.

В §4.3 представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований особенностей спектральной компрессии фемтосекундных импульсов в процессе генерации суммарной частоты, с формированием из части сигнала нелинейно-дисперсионного симиляритона, в качестве опорного импульса.

Применение нелинейно-дисперсионного симиляритона в методе спектральной компрессии посредством генерации импульса суммарной частоты позволило реализовать безабберационную спектральную компрессию, при которой не требуется дополнительный опорный импульс, таким образом превращая рассматриваемый метод в самоопорный. Очень важными свойствами симиляритона при этом является линейность чирпа и его независимость от мощности импульса на входе в световод. Это приводит к практически важной особенности метода – независимости степени спектральной компрессии от мощности импульса, в отличие от традиционного метода спектральной компрессии, в котором даже малое изменение мощности при неизменных длинах световода и дисперсионной линии задержки приводит к существенному снижению степени компрессии.

Также экспериментально продемонстрирована генерация спектрально-ограниченных прямоугольных импульсов в традиционной системе спектральной компрессии. Показано, что формирование прямоугольных импульсов не зависит

от абсолютных величин длин дисперсионной линии задержки и волоконного световода, и зависит только их соотношения.

В §4.3 на основе численных исследований показано, что при распространении спектрально-ограниченных оптических импульсов в волокнах с отрицательной дисперсией происходит спектральное сжатие импульса, в случае, когда дисперсионное расплывание импульса происходит быстрее, чем изменение его спектра из-за фазовой самомодуляции. Это явление является аналогом солитонного сжатия импульса, которое происходит при $R \equiv L_D/L_{NL} > 1$, где L_D и L_{NL} - характерные дисперсионная и нелинейная длины световода, на которых проявляются соответственно дисперсионные и нелинейные эффекты. В рассматриваемом случае, при $R < 1$, на начальном этапе распространения дисперсия второго порядка приводит к удлинению импульса. Полученный отрицательный чирп при дальнейшем распространении гасится фазовой самомодуляцией, что приводит к сжатию спектра импульса (рис.3). Численные исследования показали, что максимально достижимая степень сжатия как для гауссовских, так и для секанс-гиперболических импульсов приблизительно равна 7. При дальнейшем распространении все большая часть энергии импульса переходит в спектральные сателлиты и его спектр практически распадается на отдельные компоненты.

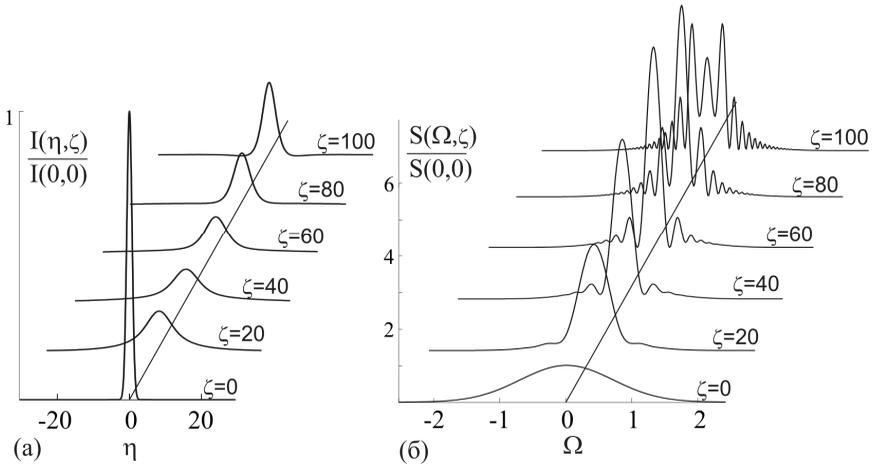


Рис.3. Изменение формы гауссовского импульса (а) и его спектра (б) с расстоянием при $R = 0.6$. Расстояние $\zeta = z/L_D$ и время $\eta = (t - z/u)/\tau_0$ нормированы на дисперсионную длину L_D и начальную длительность импульса τ_0 соответственно, u - групповая скорость.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показано, что нелинейно- дисперсионный характер самовоздействия фемтосекундных и субпикосекундных лазерных импульсов в одномодовом волоконном световоде без усиления, приводит к формированию симиляритонов из произвольных импульсов. Такие симиляритоны обладают линейным чирпом (параболической фазой), а профиль интенсивности в центральной энергонесущей части стремится к параболической форме независимо от параметров исходного импульса.
2. При больших мощностях импульса спектральная фаза симиляритона определяется только дисперсионными характеристиками и длиной световода и совпадает со спектральной фазой спектрально-ограниченного импульса, распространяющегося в линейном режиме. Нелинейно-дисперсионный характер самовоздействия приводит к спектрально-временному подобию симиляритона.
3. Показано, что спектральная ширина нелинейно-дисперсионного симиляритона практически не отличается от спектральной ширины предшествующего прямоугольного импульса. При этом, спектральная фаза прямоугольных импульсов параболична в центральной энергонесущей части с коэффициентом, который, как и в случае симиляритона, определяется только дисперсией и длиной световода.
4. Показано, что мощность начального импульса определяет спектральную ширину и, при данной длине световода, также длительность нелинейно-дисперсионного симиляритона. На этой основе предложен и экспериментально апробирован простой в реализации метод определения длительности фемтосекундных импульсов, основанный на измерении спектральной ширины сформированных из них симиляритонов.
5. Предложен и экспериментально продемонстрирован новый метод полной характеристики фемтосекундных импульсов, основанный на спектральной интерферометрии, в которой в качестве опорного импульса используется нелинейно-дисперсионный симиляритон, сформированный из части исследуемого импульса. Продемонстрирована также возможность применения в методе спектральной интерферометрии, в качестве опорных импульсов, “прямоугольных” импульсов, предшествующих формированию симиляритонов.
6. Показано, что нелинейно-дисперсионный симиляритон может использоваться в качестве опорного импульса в методе спектрально-временного отображения. Использование симиляритона, сформированного из исследуемого импульса, делает метод самоопорным. Показано также, что в качестве опорного импульса могут использоваться “прямоугольные” импульсы, предшествующие формированию

симиляритонов. С помощью сравнительного исследования методов спектральной интерферометрии и спектрально-временного отображения с использованием в качестве опорного импульса нелинейно-дисперсионного симиляритона, сформированного из части сигнального импульса, продемонстрировано взаимное соответствие и высокая точность рассматриваемых методов.

7. Сгенерирован симиляритон со спектральной шириной 50 ТГц и проведена его полная характеристика путем измерения его фазы (чирпа) с использованием техники частотной перестройки и спектральной компрессии. Показано, что фаза нелинейно-дисперсионного симиляритона с широким спектром также определяется только дисперсией световода и равна фазе, наведенной при чисто дисперсионном распространении импульса, как при учете дисперсии второго, так и третьего порядка в случае симметричных импульсов.
8. Показано, что путем формирования на входе в световод ассиметричных импульсов можно компенсировать влияние дисперсии третьего порядка в световоде и в дисперсионной линии задержки, достигая, таким образом, эффективной компрессии симиляритонов со степенью компрессии, определяемой степенью уширения спектра.
9. Показано, что применение нелинейно-дисперсионного симиляритона в методе спектральной компрессии посредством генерации импульса суммарной частоты позволяет реализовать безаберрационную спектральную компрессию, и превращает метод в самоопорный. Показана также возможность спектрального сжатия в отсутствие фазовой самомодуляции.
10. Экспериментально продемонстрирована генерация спектрально-ограниченных прямоугольных импульсов в системе спектральной компрессии. Показано, что формирование прямоугольных импульсов происходит в области максимальной спектральной компрессии при определенном соотношении длин дисперсионной линии задержки и волоконного световода вне зависимости от их абсолютных значений.
11. На основе численных исследований показано, что в световодах с отрицательной дисперсией может происходить спектральное самосжатие спектрально-ограниченных импульсов в случае, когда дисперсионное расплывание импульса происходит быстрее, чем изменение его спектра из-за фазовой самомодуляции. Для колоколообразных импульсов гауссовской и секанс-гиперболической формы максимальная степень сжатия достигает величины ~ 7 .
12. В параксиальном приближении волновой оптики исследовано распространение гауссова пучка в продольно-неоднородной нелинейной среде с квадратичным

профилем показателя преломления и получены явные выражения для его ширины и радиуса кривизны волнового фронта. Проанализировано влияние продольных неоднородностей и параметров излучения на коэффициенты возбуждения гаусс-эрмитовых мод на выходе из световода. Показано, что при учете поглощения в таком волноводе возможен режим стабилизации ширины пучка, при котором поглощение излучения по краям пучка компенсирует его расплывание, вызванное продольной неоднородностью и нелинейностью волновода.

13. С помощью теоретического исследования процесса рэлеевского рассеяния в световодах с параболическим профилем показателя преломления показано, что в случае селективного возбуждения на входе волновода различных мод в обратном направлении наиболее эффективно возбуждаются моды с номерами, близкими к номеру возбуждающей моды. В случае возбуждения световода протяженным некогерентным источником мощность в обратнорассеянных модах уменьшается с увеличением порядкового номера моды, причем тем быстрее, чем больше длина волны возбуждающего излучения.
14. Проанализировано влияние единичных круглых изгибов многомодовых световодов с параболическим профилем показателя преломления на модовый состав излучения, дисперсию импульса и потери энергии в области изгиба.

Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих публикациях:

1. Г.Л. Есаян, С.Г. Кривошлыков. Управление параметрами излучения в продольно-неоднородной нелинейной среде с параболическим профилем показателя преломления. - Квантовая электроника, 1989, т.16, N 8, с.1691-1696.
2. Г.Л. Есаян, С.Г. Кривошлыков, И.Н. Сисакян. Влияние круглых изгибов градиентных волноводов на модовый состав излучения. - ЖТФ, 1989, т.59, вып.3, с.1-8.
3. Г.Л. Есаян, С.Г. Кривошлыков. Влияние рэлеевского обратного рассеяния на модовый состав излучения в многомодовых градиентных волноводах с квадратичным профилем показателя преломления. - Квантовая электроника, 1989, т.16, N 8, с.1735-1740
4. Г.Л. Есаян, С.Г. Кривошлыков. Формирование волновых фронтов в градиентных волноводах с изгибами малых радиусов. - Компьютерная оптика, 1987, N 1, с.102-108
5. Г.Л. Есаян. "Распространение гауссовых световых пучков в продольно-неоднородных нелинейных градиентных волноводах с поглощением или усилением", Известия НАН Армении, Физика, , т.36, N 3 с.168-173 (2001)

6. А.А.Кутузян, Г.С.Манукян, Г.Л.Есаян, Л.Х.Мурадян “Роль дисперсии в процессе спектральной компрессии” Изв. НАН Армении, Физика, т.39 (5), с.310-314 (2004).
7. Т.Г.Мансурян, Г.Л.Есаян, К.А.Паланджян, А.С.Зейтунян, М.А.Калашян, А.А.Киракосян, Л.Х.Мурадян, “Применение субпараболических импульсов для характеристики УКИ с помощью спектральной интерферометрии” Сб. трудов "Лазерная физика-2006", изд. "Гитутюн" НАН РА, с. 197-200 (2007).
8. Г.Л.Есаян, К.А.Паланджян, Т.Г.Мансурян, А.С.Зейтунян, М.А.Калашян, А.А.Кутузян, Л.Мурадян, “Субпараболические импульсы в одномодовом волокне без усиления” Сб. трудов "Лазерная физика-2006", изд. "Гитутюн" НАН РА, с. 193-196 (2007).
9. P.Kockaert, L.Mouradian, G.Yesayan, Ph.Emplit "Generation of similaritons in a nonlinear dispersive optical fibre without gain" Proc. of Symposium IEEE / LEOS Benelux Chapter, Brussels, LEOS 2007, paper s07p039, pp.39-42 (2007).
10. Г.Л. Есаян, К.А. Паланджян, Т.Г. Мансурян, А.С. Зейтунян, Л.Х. Мурадян “Характер симиляритона, сформированного в одномодовом волокне без усиления” Известия НАН Армении, Физика, т.43, №1, с.35-41 (2008).
11. T.Mansuryan, A.Zeytunyan, M.Kalashyan, G.Yesayan, L.Mouradian, F.Louradour, A.Barthélémy “Parabolic temporal lensing and spectrotemporal imaging: a femtosecond optical oscilloscope” J. Opt. Soc. Am. B 25, A101-A110 (2008).
12. А.А.Кутузян, Т.Г.Мансурян, Г.Л.Есаян, Р.С.Акопян, Л.Х.Мурадян "Дисперсионный режим спектральной компрессии"- Квант. электроника, т.38, N4, 383-387 (2008)
13. K.Palanjyan, M.Kalashyan, G.Yesayan, L.Mouradian “Spectral Interferometric Characterization of Spectral Compression: Dispersive Regime”, Proc. CAOL2008 (4th Int. Conf. on Advanced Optoelectronics & Lasers Alushta, Crimea, Ukraine, September 29-October 4) p.428-431 (2008).
14. M.Kalashyan, T.Mansuryan, A.Zeytunyan, G.Yesayan, L.Mouradian, F.Louradour, A.Barthélémy, “Pulse Measurement by Time-to-Frequency Conversion with a Quadratic Nonlinearity,” Proc. CAOL2008 4th Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers, (2008) p.159-161.
15. A.Zeytunyan, G.Yesayan, L.Mouradian, P.Kockaert, P.Emplit, F.Louradour, A.Barthélémy “Spectral-Interferometric Characterization of Nonlinear-Dispersive Similariton” in Frontiers in Optics, Rochester, NY, USA, Oct.19-24, OSA Tech. Digest, paper FW15 (2008).
16. A.Zeytunyan, G.Yesayan, L.Mouradian, P.Kockaert, Ph.Emplit, F.Louradour, A.Barthélémy “Self-spectrotemporal imaging of nonlinear-dispersive similariton” Annual Meeting of European Optical Society (EOS AM-2008), TOM6, Paris, Sept. 29 - Oct. 2, 2008), ISBN 978-3-00-024188-8.

17. К.Паланджян, Т.Мансурян, Г.Есяян, Л.Мурадян “Спектрально-интерферометрический метод восстановления огибающей фемтосекундных импульсов” Изв. НАН Армении, Физика, т.42, N 2, 106-112 (2009).
18. A.Zeytunyan, G.Yesayan, L.Mouradian, P.Kockaert, P.Emplit, F.Louradour, A.Barthélémy, “Nonlinear-dispersive similariton of passive fiber” J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public. 09009, Vol 4 (2009).
19. М.А.Калашян, К.А.Паланджян, Т.Дж.Хачикян, Т.Г.Мансурян, Г.Л.Есяян, Л.Х.Мурадян "Призмочно-линзовая дисперсионная линия задержки"-Письма в ЖТФ, т.**35**, No.5 стр.29-35 (2009).
20. K.Palanjyan, G.Yesayan, L.Mouradian, "Spectral self-compression in fibers with negative dispersion" Proc. Conf. Laser Physics-2009, 93-96(2010).
21. А.С. Зейтунян, А.Р.Мадатян, Г.Л.Есяян, Л.Х.Мурадян. “Диагностика фемтосекундных лазерных импульсов на основе генерации нелинейно-дисперсионного симиляритона” Изв. НАН Армении, Физика, **45**, 260-264 (2010).
22. А.С. Зейтунян, К.А. Паланджян, Г.Л. Есяян, Л.Х. Мурадян “Спектрально-интерферометрическое исследование нелинейно-спектрального симиляритона” Изв. НАН Армении, Физика, **45**, 97-105 (2010).
23. М.А. Калашян, К.А. Паланджян, Г.Л. Есяян, Л.Х. Мурадян “Генерация спектрально-ограниченных прямоугольных импульсов в спектральном компрессоре” Квант. электрон. **40** (10), 868-872 (2010).
24. A.Zeytunyan, A.Muradyan, G.Yesayan, L.Mouradian, “Broadband similariton” Laser Physics **20**, No. 8, 1729-1732 (2010).
25. А.С.Зейтунян, К.А.Паланджян, Г.Л.Есяян, Л.Х.Мурадян, “Нелинейно-дисперсионный симиляритон: спектрально-интерферометрическое исследование” Квант. электроника, **40** (4), 327-328 (2010).
26. A.Zeytunyan, A.Muradyan, G.Yesayan, L.Mouradian, F.Louradour, A.Barthélémy “Measuring of Broadband Similariton Chirp” in Nonlinear Photonics (June 21-24, Karlsruhe, Germany), OSA Tech. Digest, paper NME46 (2010).
27. A.Zeytunyan, G.Yesayan, L.Mouradian, F. Louradour, A.Barthélémy “Similariton-referencing novel methods for femtosecond signal analysis: spectral interferometry and spectrotemporal imaging” Modern Optics and Photonics, edited by G.Yu. Kruchkyan G.G.Gurzadyan and A.V.Papoyan (Word Scientific, Singapore),73-78 (2010).
28. A.Zeytunyan, A.Muradyan, G.Yesayan, L.Mouradian, F.Louradour, A.Barthelemy “Broadband similariton: features and applications” Modern Optics and Photonics, edited by G.Yu. Kruchkyan G.G.Gurzadyan and A.V.Papoyan (Word Scientific, Singapore), 339-354 (2010).
29. L.Mouradian, A.Zeytunyan, A.Muradyan, G.Yesayan, F.Louradour, A.Barthelemy, “Similariton for Femtosecond Optics,” in Proc. ECOC 2010 (19-23 September, 2010), Torino, Italy, paper Mo.2.E.5 (2010).

30. A.Zeytunyan, A.Muradyan, G.Yesayan, L.Mouradian, F.Louradour, A.Barthélémy, “Generation and characterization of broadband similariton” *Frontiers in Optics* (Oct. 24-28, Rochester, NY, USA), OSA Tech. Digest, paper FTuD4 (2010).
31. A.Zeytunyan, M.Kalashyan, G.Yesayan, L.Mouradian, F.Louradour, A.Barthélémy “Similariton-Based Spectral Interferometry for Femtosecond Signal Characterization”*ECOC’2011*, 18-22 Sep. 2011, Geneva, Switzerland, OSA Tech.Digest, paper We.10.P1.18 (2011).
32. A.Zeytunyan,A.Muradyan, G.Yesayan, L.Mouradian, F.Louradour, A.Barthélémy “Generation of broadband similaritons for complete characterization of femtosecond pulses” *Optics Communications* v. 284 (15), pp. 3742–3747 (2011).
33. K.Palanjyan, A.Muradyan, A.Zeytunyan, G.Yesayan, L.Mouradian “Pulse compression down to 17 femtoseconds by generating broadband similariton” *Proc.SPIE*, v.7998, 79980N; CCC code: 0277-786X/11/\$18 · doi: 10.1117/12. 890868 (2011).
34. A.Zeytunyan, A.Muradyan, G.Yesayan, L.Mouradian, “Broadband similariton for ultrafast optics and photonics” *Proc. SPIE Vol. 7998, 79980M*; CCC code: 0277-786X/11/\$18; doi: 10.1117/12.890507 (2011).
35. L.Mouradian, A.Zeytunyan, G.Yesayan, “Similariton-based spectral interferometry for signal analysis on femtosecond time scale”, Ch. V in book “*Interferometry - Research and Applications in Science and Technology*”, pp. 99–124, Ed.Dr Ivan Padron, ISBN: 978-953-51-0403-2, InTech (2012).
36. L.Mouradian, A.Zeytunyan, G.Yesayan, “Similariton for femtosecond signal analysis”, *J. Physics: Conf. Series* 350, 012029 (2012).
37. Г.Л.Есаян. “Спектральное самосжатие сверхкоротких импульсов” *Изв. НАН Армении, Физика*, т.47, N 5, 342-346 (2012).
38. G.Yesayan, “Spectrotemporal imaging with “pre-similariton” reference pulse”, *Arm. J. Phys.* 5 (3), 141–145 (2012).
39. A.Grigoryan, G.Yesayan, A.Zeytunyan, L.Mouradian, “Optimization of femtosecond pulse compression by pulse asymmetry management”, *Int. J. Modern Phys.: Conf. Series* 15, World Scientific Publishing Company, 179–183 (2012).
40. G.Yesayan, “Modern methods of spectral interferometry for femtosecond signal characterization”, *Book of Abstracts of Int. Advanced School Frontiers in Optics & Photonics*, Yerevan – Ashtarak, Armenia, 2-7 July, 2012, , pp. 38–39.
41. L.Kh.Mouradian, A.S.Zeytunyan, G.L.Yesayan, F.Louradour, A.Barthélémy, R.Zadoyan, “Nonlinear-dispersive similariton for ultrafast photonics”, in *TOM 6 - Nonlinear Photonics*, EOS Annual Meeting 2012, Aberdeen, Scotland, UK, 25-28 September, 2012, paper 5968.
42. Г.Л.Есаян. “Особенности спектральной компрессии на основе генерации суммарной частоты ” *Изв. НАН Армении, Физика*, т.48, N 3, 186-192 (2013).

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ատենախոսությունը նվիրված է գերկարճ իմպուլսների ոչգծային – դիսպերսիոն ինքնազդեցության ուսումնասիրությանը մանրաթելային լուսատարերում՝ նպատակ ունենալով առանց ուժեղացման և առանց դիսպերսիայի բաշխվածության լուսատարերում սիմիլարիտոնների գեներացման հնարավորության բացահայտումը և այդպիսի սիմիլարիտոնների հատկությունների ուսումնասիրությունը, ինչպես նաև նրանց կիրառման հնարավորությունը գերարագ օպտիկայում ազդանշանների անալիզի և սինթեզի խնդիրներում:

Ցույց է տրվել, որ ֆեմտովայրկյանային և սուբպիկովայրկյանային լազերային իմպուլսների ինքնազդեցության ոչգծային – դիսպերսիոն բնույթը առանց ուժեղացման միամոդ մանրաթելային լուսատարերում բերում է կամայական սկզբնական տեսքի իմպուլսներից սիմիլարիտոնների ձևավորմանը: Ձևավորված սիմիլարիտոնները ունեն գծային չիրպ (պարաբոլիկ փուլ), որը որոշվում է միայն լուսատարի երկարությամբ և դիսպերսիայով: Այդպիսի ոչգծային – դիսպերսիոն սիմիլարիտոնի սպեկտրալ լայնությունը գործնականում չի տարբերվում նրան նախորդող ուղղանկյուն իմպուլսի սպեկտրալ լայնությունից: Ընդ որում ուղղանկյուն իմպուլսների սպեկտրալ փուլը կենտրոնական էներգատար մասում պարաբոլիկ է և նույնպես որոշվում է միայն լուսատարի հատկություններով:

Առաջարկվել է փորձնականորեն իրականացվել է ֆեմտովայրկյանային իմպուլսների ամբողջական բնութագրման համար սպեկտրալ ինտերֆերոմետրիայի վրա հիմնված նոր մեթոդ, որտեղ որպես նեցուկ իմպուլս կիրառվում է ոչգծային-դիսպերսիոն սիմիլարիտոն՝ ձևավորված հետազոտվող իմպուլսի մի մասից: Ցույց է տրվել, որ ոչգծային-դիսպերսիոն սիմիլարիտոն-ները որպես նեցուկ իմպուլս կարող են կիրառվել նաև սպեկտրալ ժամանակային արտապատկերման մեթոդում: Ցույց է տրվել նաև, որ այս մեթոդներում որպես նեցուկ իմպուլս կարող են օգտագործվել նաև ուղղանկյուն իմպուլսները, որոնք նախորդում են սիմիլարիտոնների ձևավորմանը: Կատարվել են սպեկտրալ ինտերֆերոմետրիայի և սպեկտրալ ժամանակային արտապատկերման մեթոդների համեմատական հետազոտություններ՝ որպես նեցուկ իմպուլս կիրառելով ազդանշանային իմպուլսի մի մասից ձևավորված ոչգծային-դիսպերսիոն սիմիլարիտոնը: Հետազոտությունների արդյունքում ցույց է տրվել նշված մեթոդների փոխադարձ համապատասխանությունը և բարձր ճշտությունը:

Գեներացվել է 50ՏՀց սպեկտրալ լայնությամբ սիմիլարիտոն և կատարվել է նրա ամբողջական բնութագրում սիմիլարիտոնի փուլի (չիրպի) չափման միջոցով: Ցույց է տրվել, որ լայն սպեկտրով ոչգծային-դիսպերսիոն սիմիլարիտոնի փուլը

նույնպես որոշվում է միայն լուսատարի դիսպերսիայով և հավասար է այն փուլին, որը ստանում է իմպուլսը մաքուր դիսպերսիոն տարածման դեպքում:

Ցույց է տրվել, որ լուսատարի մուտքում ասիմետրիկ իմպուլսների ձևավորմամբ հնարավոր է կոմպենսացնել լուսատարում և դիսպերսիոն հապաղման գծում դիսպերսիայի երրորդ կարգի ազդեցությունը և արդյունքում ունենալ սիմիլարիտոնների արդյունավետ սեղմում՝ սպեկտրի լայնացմամբ որոշվող սեղմման աստիճանով:

Ցույց է տրվել, որ գումարային հաճախությամբ իմպուլսի գեներացման վրա հիմնված սպեկտրալ սեղմման մեթոդում ոչգծային-դիսպերսիոն սիմիլարիտոնի կիրառումը թույլ է տալիս իրականացնել առանց աբերացիաների սպեկտրալ սեղմում և մեթոդը դարձնել ինքնանեցուկ: Ցույց է տրվել, սպեկտրալ սեղմման հնարավորությունը՝ փուլային ինքնամոդուլյացիայի բացակայության դեպքում:

Փորձնականորեն իրականացվել է սպեկտրալ-սահմանափակ ուղղանկյուն իմպուլսների գեներացումը սպեկտրալ սեղմման համակարգում: Ցույց է տրվել, որ ուղղանկյուն իմպուլսների ձևավորումը տեղի է ունենում մաքսիմալ սպեկտրալ սեղմման տիրույթում՝ դիսպերսիոն հապաղման գծի և մանրաթելային լուսատարի երկարությունների որոշակի հարաբերության դեպքում և անկախ է նրանց բացարձակ արժեքներից:

Թվային հետազոտությունների արդյունքում ցույց է տրվել, որ բացասական դիսպերսիայով լուսատարերում կարող է տեղի ունենալ սպեկտրալ-սահմանափակ իմպուլսների սպեկտրալ ինքնասեղմում, երբ իմպուլսի դիսպերսիոն ճապաղումը տեղի է ունենում ավելի արագ, քան նրա ոչգծային ինքնամոդուլյացիայով պայմանավորված սպեկտրի փոփոխությունը: Ջանգալանման իմպուլսների համար մասնավորապես՝ գաուսյան և սեկանս-հիպերբոլական տեսքի, սեղմման մաքսիմալ աստիճանը հասնում է մինչև ~ 7 արժեքը:

Դիտարկվել է նաև լուսատարերում լազերային ճառագայթման տարածման և ոչգծային ինքնազդեցության որոշ տարածական էֆեկտներ: Մասնավորապես՝ դիտարկվել է բեկման ցուցիչի քառակուսային տեսքով և խորանարդային ոչգծայնությամբ, երկայանական անհամասեռություններով օժտված լուսատարերում ճառագայթման տարածման առանձնահատկությունները՝ հաշվի առնելով կլանումը կամ ուժեղացումը: Ուսումնասիրվել է նաև լուսային ճառագայթման տարածումը և ռելեյան ցրումը բեկման ցուցիչի պարաբոլիկ տեսքով բազմամոդ լուսատարերի միավոր կտրուկ կորությունների տիրույթում:

SUMMARY

The thesis is devoted to the study of nonlinear-dispersive self-interaction of ultrashort pulses in optical fibers, with the aim to reveal opportunities for generating similaritons in conventional silica fibers without gain and distributed dispersion, and to study the properties of such similaritons and their application possibilities for the analysis and synthesis of signals in ultrafast optics.

It is shown that the nonlinear-dispersive nature of the self-interaction of femtosecond and sub-picosecond laser pulses in a single-mode optical fiber without gain leads to the shaping of similaritons with a linear chirp (parabolic phase) from pulses of arbitrary initial shape, and the intensity profile of such a similariton tends to a parabolic shape at its central energy-carrying part independently of the initial pulse. The spectral bandwidth of nonlinear-dispersive similariton is practically identical to the spectral bandwidth of the preceding flat-top pulse. The spectral phase of flat-top pulse is parabolic at the central energy-carrying part of the spectrum with a coefficient, which, as in the case of similariton, is defined only by the dispersion and length of the fiber. It is shown that the initial pulse power determines the spectral bandwidth and, for a given fiber length, the duration of nonlinear-dispersive similariton.

A new method for the complete characterization of femtosecond pulses based on spectral interferometry is proposed and experimentally demonstrated, in which a nonlinear-dispersive similariton shaped from a part of the signal pulse is used as a reference pulse.

It is shown that the nonlinear-dispersive similariton can be used as a reference pulse in the method of spectrotemporal imaging. It is also shown that the "rectangular" pulse preceding the similariton shaping can be used as a reference pulse in this method. Through a comparative study of the methods of spectral interferometry and spectrotemporal imaging using the nonlinear-dispersive similariton as a reference pulse shaped from a part of the signal pulse it is demonstrated the mutual agreement and high precision of the methods under consideration.

A similariton with a spectral bandwidth of 50 THz is generated and completely characterized by measuring its phase (chirp), using the technique of frequency tuning and spectral compression. It is shown that the phase of broadband nonlinear-dispersive similariton is also defined only by the dispersion of the fiber and is identical to the phase induced during the pure dispersive propagation of the pulse.

It is shown that the shaping of asymmetric pulses at the fiber input can compensate the impact of third-order dispersion in the fiber and dispersive delay line, thus reaching effective compression of similaritons with a degree of compression defined by the degree of spectral broadening.

It is shown that the use of nonlinear-dispersive similariton in the method of spectral compression by sum-frequency pulse generation allows for an aberration-free spectral compression and makes the method a self-referencing one. It is also shown the possibility of spectral compression in the absence of self-phase modulation, when the durations and spectral bandwidths of the reference and signal pulses are equal.

The generation of transform-limited “rectangular” pulses in the spectral compression system is experimentally demonstrated. It is shown that the “rectangular” pulse shaping occurs in the region of maximal spectral compression in case of certain ratio of the dispersive delay line and fiber lengths, regardless of their absolute values.

Based on numerical studies it is shown that in fibers with negative dispersion it is possible spectral self-compression of initially transform-limited pulses, in the case when the pulse dispersive stretching is faster than the change in its spectrum due to self-phase modulation. For bell-shaped pulses of Gaussian and secant-hyperbolic shapes the maximum compression ratio reaches the value of ~ 7 .

Several spatial effects of the propagation and nonlinear self-interaction of laser radiation in optical fibers are also considered. In particular, the features of the propagation of radiation in longitudinally inhomogeneous fibers with a quadratic refractive index profile and cubic nonlinearity are studied, considering absorption or amplification. The Rayleigh scattering during the propagation of light radiation in the region of single sharp bends of multi-mode optical fibers with a parabolic refractive index profile is also considered.

