

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՔԱԼԱՇՅԱՆ ՄԵՐԻ ԱՇՈՏԻ

ՖԵՏՏՈՎԱՅՐԿՅԱՆԱՅԻՆ ՍԱՆԴՂԱԿՈՒՄ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ՀԱՂՈՐԴՄԱՆ ԵՎ
ՄՇԱԿՄԱՆ ՆՈՐ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՄԵԹՈՂՆԵՐ

Ա.04.21 «Լազերային ֆիզիկա» և Ա.04.05 «Օպտիկա» մասնագիտություններով
ֆիզիկա-մաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

Մ Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ – 2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

КАЛАШЯН МЕРИ АШОТОВНА

НОВЫЕ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ И
ОБРАБОТКИ СИГНАЛА В ФЕМТОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальностям
01.04.21 – Лазерная физика и 01.04.05 – Оптика

ЕРЕВАН – 2012

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում:

Գիտական ղեկավարներ՝ դոկտոր Ֆ. Լուրադուր
ֆիզ-մաթ. գիտ. դոկտոր Լ. Խ. Մուրադյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆիզ-մաթ. գիտ. դոկտոր Ա. Վ. Պապոյան
դոկտոր Ռ. Ս. Ջաղոյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ռ-ադիոֆիզիկայի և
էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա «24» նոյեմբերի, 2012թ., ժամը 12:00-ին, Երևանի պետական համալսարանում (0025, Երևան, Ալեք Մանուկյան 1) ֆիզիկայի 049 մասնագիտական խորհրդի նիստում:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:
Մեղմագիրն առաքված է «23» հոկտեմբերի 2012թ.:

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

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете.

Научные руководители: доктор Ф. Лурадур
доктор физ-мат. наук Л. Х. Мурадян
Официальные оппоненты: доктор физ-мат. наук А. В. Папоян
доктор Р. С. Задоян

Ведущая организация: Институт радиофизики и электроники
НАН РА

Защита диссертации состоится «24» ноября 2012г. в 12:00 часов на заседании специализированного совета по физике 049 в Ереванском государственном университете (0025, Ереван, ул. Алека Манукяна 1).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.
Автореферат разослан «23» октября 2012г.

Ученый секретарь
специализированного совета  канд. физ-мат. наук
В. П. Калантарян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Прогресс в сверхбыстрой лазерной физике и оптике, и освоение фемтосекундного диапазона длительностей [1,2], открыли новый этап исследований во многих областях современной науки и техники, таких как спектроскопия сверхбыстрых явлений, оптическая связь и т.п., и породили новые исследовательские направления, такие как фемтобиология, фемтохимия, сверхбыстрая фотоника. Ключевая проблема освоения фемтосекундного временного диапазона выдвинула новые задачи, связанные со сверхбыстрой регистрацией и управлением сигнала (анализ и синтез сверхкоротких импульсов).

В фемтосекундной шкале, совместно с задачами анализа и синтеза сверхкоротких импульсов (СКИ), в последнее время все больший интерес вызывают задачи связанные с передачей СКИ посредством волоконных световодов (fiber delivery) [3, 4], и в частности, исследования, направленные на разработку и создание новых эффективных эндоскопических устройств. В современных системах волоконной передачи импульсного излучения особенно перспективным представляется подход предварительного chirпирования СКИ, с целью получения сжатого импульса на выходе системы, основанный на решении обратной задачи нелинейно-дисперсионного самовоздействия СКИ в световоде, и разработка эффективных методов и устройств фазового управления излучения на входе в систему [5].

Достигнут существенный прогресс также в исследованиях, направленных на управление и регистрацию параметров СКИ. Тем не менее, следует отметить, что нынешний этап развития сверхбыстрой оптики и лазерных технологий предъявляет новые, повышенные требования к методам обработки и передачи сигнала. Это стимулирует интенсивные исследования в указанных направлениях с целью разработок новых физических подходов к современным проблемам лазерной физики. На нынешнем этапе исследований в данных направлениях существуют ряд важных нерешенных задач, в частности:

- Среди существующих систем волоконной передачи, отсутствуют таковые с компактным и недорогим решением для компенсации дисперсии.
- Широкий спектр применений методов спектральной интерферометрии, требует новых физических подходов и решений, направленных на упрощение соответствующих схем и устройств, повышение чувствительности и точности измерений.
- С достижением предельно коротких импульсов (длительностью в несколько фемтосекунд) возникла необходимость разработки новых эффективных методов комплексной характеристики сигнала в этом временном масштабе.

Важность исследований в данной области и ряд перечисленных выше нерешенных проблем определили тему и *цель диссертационной работы*, включающей в себя ряд актуальных задач, связанных с синтезом, транспортировкой и анализом сигнала в фемтосекундном временном масштабе, в частности:

- Экспериментальные исследования нелинейно-дисперсионного самовоздействия предварительно chirпированных импульсов с перспективой формирования спектрально-ограниченных прямоугольных импульсов.

- Спектральные интерферометрические исследования для полной характеристики импульсов, сформированных в дисперсионной линии задержки (ДЛЗ) по стандартной схеме спектрометра.
 - Исследования новых схем волоконной передачи СКИ, основанных на предварительном chirпировании входных импульсов с помощью ДЛЗ на основе гризм (дисперсионных призм в контакте с дифракционными решетками).
 - Исследования в области спектральной интерферометрии направленные на разработку новых, эффективных методов комплексной характеристики предельно-коротких оптических импульсов.
 - Исследования, направленные на формирование фемтосекундных импульсов с помощью новых программируемых пространственных модуляторов света.
- В работе основным методом исследований служил эксперимент в сопряжении с численным моделированием.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна работы определяется серией оригинальных (впервые полученных) экспериментальных результатов:

- Экспериментально продемонстрирована новая компактная ДЛЗ для формирования СКИ, с возможностью управления величиной и знаком дисперсии.
- Экспериментально продемонстрирован эффективный дисперсионный режим спектральной компрессии, при котором максимальная компрессия сопровождается формированием спектрально-ограниченных прямоугольных импульсов. Сформированные импульсы полностью охарактеризованы с помощью метода спектральной интерферометрии.
- Экспериментально продемонстрирована новая эффективная система волоконной передачи фемтосекундных импульсов, основанная на предварительном chirпировании СКИ, и состоящая из пары гризм и световода с широкой модой (large mode area; LMA).
- Экспериментально продемонстрирован новый пространственно-временной формирователь фемтосекундных импульсов на основе пространственного программируемого жидкокристаллического фазового модулятора.
- На основе исследований интерферометрии спектрального смещения с временной разверткой (SPIRIT), экспериментально, для импульсов длительностью 8 фс, продемонстрирован новый метод – широкополосный SPIRIT (WB-SPIRIT), позволяющий полностью характеризовать импульсы во временном масштабе в несколько фемтосекунд. Также продемонстрирована возможность записи характеристик излучения в виде сонограмм (“чирпограмм”) отображающих временные распределения интенсивности и мгновенной частоты.

Практическая ценность диссертационной работы

Исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, расширяют представления о физических процессах нелинейно-дисперсионного самовоздействия СКИ в фемтосекундном масштабе времен. Экспериментальные исследования

послужили основой для разработки новых эффективных методов и устройств анализа и синтеза сигнала в фемтосекундной оптике, в частности:

- Для характеристики дисперсионных параметров устройств и сред, а также процессов типа спектральной амплитудно-фазовой фильтрации и компрессии СКИ, продемонстрирован метод спектральной интерферометрии.
- Для задач передачи СКИ, и в частности для эндоскопии, предложен и продемонстрирован метод передачи и сжатия фемтосекундных импульсов, в устройстве состоящем из пары призмы, в качестве ДЛЗ, и оптического световода LMA.
- Для управления параметрами импульсного излучения в пико-фемтосекундном масштабе времен, предложен и продемонстрирован программируемый пространственно-временной формирователь импульсов заданной формы с использованием фазовых жидкокристаллических пространственных модуляторов света.
- Для измерения импульсов длительностью в несколько фемтосекунд, предложен и продемонстрирован новый метод спектральной интерферометрии - WB-SPIRIT.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Соответствующее chirpирование импульсов на входе в световод LMA, путем управления дисперсией призматической ДЛЗ, приводит к достижению импульсов длительностью 18 фс на выходе системы передачи призматической линией задержки – световод LMA.
2. В жидкокристаллическом модуляторе, тангенциальная модуляция пучка излучения, отраженного от дифракционной решетки в условии Литрова, приводит к временной модуляции импульсов (пространственно-временное преобразование) в пико-фемтосекундном масштабе времен.
3. Самовоздействие предварительно отрицательно chirpированных субпикосекундных импульсов в световодах с нормальной дисперсией приводит к формированию спектрально-ограниченных прямоугольных импульсов длительностью ~100фс, вследствие совместного воздействия Керровской нелинейности и дисперсии групповых скоростей (второго порядка).
4. Спектрально-интерферометрическая информация, полученная с помощью метода WB-SPIRIT, позволяет полностью характеризовать предельно короткие оптические импульсы и, следовательно, проводить временные измерения в масштабе в несколько фемтосекунд.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на конференциях Laser Physics (LP; Аштарак, 2006, 2008), OSA Nonlinear Photonics (Quebec, 2007), OSA Young Optician School (YOS; Аштарак, 2007), OSA Frontiers in Optics (FiO; San Jose, CA, USA, 2007), Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL; Алушта, Украина,

2008), Euro-American Workshop on Information Optics (WIO; Spain, 2010, 2011), VIII Харківська конференція молодих науковців (Харковь, 2008), Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Europe, Munich, 2011, CLEO/USA, Baltimore, 2011) и на научных семинарах кафедры оптики физического факультета ЕГУ.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 14 работ, список которых приведен в конце автореферата. Работы выполнены в рамках международного проекта “Наука во имя Мира” Sfr 978027 и совместного проекта CNRS (Франция) – ГКН (Армения) # IE007.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения (включающего в себя обзор соответствующей литературы), трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 117 страниц, включая 52 рисунков и библиографию, содержащую 148 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении освещено современное состояние исследований в областях анализа и синтеза СКИ, а также состояние исследований, направленных на создание новых систем для предварительного chirпирования сигналов с целью разработки новых более эффективных и стабильных эндоскопических устройств на основе волоконных систем передачи СКИ. Обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы. В конце введения приведена структура диссертации, ее краткое содержание, научная новизна, практическая ценность, защищаемые положения, места апробации и список публикаций работ по теме.

В первой главе представлены исследования направленные на разработки новых методов синтеза фемтосекундных импульсов.

В §1.1 предложена и экспериментально продемонстрирована новая призмочно-линзовая ДЛЗ, основанная на прямом управлении спектральной фазой излучения. В сравнении с традиционными ДЛЗ, в предложенной схеме знак и величину chirпа можно менять без изменения хода лучей в системе и, возникающей в этой связи, необходимости коррекции (подъюстировки) экспериментальной установки. Величина и знак наведенного дисперсией chirпа задаются оптической силой линзы, входящей в систему (и тем самым не зависят непосредственно от размеров устройства). Следовательно еще одним важным достоинством устройства является компактный дизайн. Система апробировано для импульсов стандартного фемтосекундного лазера. Предложенное устройство состоит из дисперсионной призмы с линзой в качестве простейшего спектрометра и высокоотражающего зеркала. Дисперсионная призма и фазовая маска расположены вблизи фокальной плоскости линзы. Дисперсионная призма осуществляет разложение частотного спектра по углам. С помощью линзы, у зеркала имеем разложение спектральных компонент по поперечной пространственной координате, что дает возможность с помощью пространственной фазовой маски управлять спектральной фазой излучения. В эксперименте, в качестве фазовой маски, использовались линзы разной оптической силы. Чтобы передать импульсу отрицательный и положительный chirп, использовались соответственно собирающие и рассеивающие линзы. В ходе эксперимента записывались

корреляционные функции интенсивности на входе и на выходе предложенной системы. Для этого использовался коррелятор APE PulseCheck. Чтобы убедиться, что с помощью линз импульсу передавались параболические фазы, записывались спектральные интерферограммы, получающиеся путем наложения входного и выходного импульсов. Для этого излучение титан-сапфирового лазера разделялось на две части. Одна часть направлялась в апробируемую ДЛЗ, а вторая часть служила опорной. Для записи интерференционных картин использовался оптический спектральный анализатор Ando AQ6315. Спектральные интерферограммы позволяют восстановить спектральную фазу тестируемого излучения. Из полученных результатов видно, что восстановленные спектральные фазы параболически во всей энергонесущей части спектра.

В §1.2 экспериментально продемонстрирована генерация спектрально-ограниченных прямоугольных импульсов в спектральном компрессоре. Исследования проведены для 100-фемтосекундных импульсов в дисперсионном режиме спектральной компрессии. Временные профили сгенерированных прямоугольных импульсов восстановлены с помощью метода спектральной интерферометрии. Экспериментально показано, что спектрально-ограниченные СКИ с прямоугольной огибающей могут формироваться в спектральном компрессоре, состоящем из ДЛЗ и одномодового волоконного световода (ОВС), где достигается эффективный дисперсионный режим спектральной компрессии (СК). Исследования показали, что формирование прямоугольных импульсов не зависит от абсолютных величин ДЛЗ и ОВС, и зависит только от соотношения расстояния между призмами и длиной ОВС. Показано, что прямоугольные СКИ формируются при соотношении длин ДЛЗ и ОВС ~ 1.6 , в области максимальной СК. Для оптимизации параметров спектрального компрессора и выработки практических рекомендаций к эксперименту были проведены численные исследования. При численном моделировании использовалось нелинейное уравнение Шредингера с членами, описывающими керровскую нелинейность и дисперсию второго порядка, в соответствии с областью длительностей СКИ > 50 фс [1, 2]. Для экспериментальной демонстрации формирования прямоугольных СКИ была собрана установка, состоящая из титан сапфирового фемтосекундного лазера (Coherent Verdi10-Mira 900F), спектрального компрессора и оптического спектрального анализатора (Ando AQ6315). Излучение лазера подавалось на вход интерферометра Маха-Цендера, где с помощью полупрозрачного зеркала разделялось на две реплики. Сигнальный импульс проходил через спектральный компрессор, который состоял из ДЛЗ и ОВС. В качестве ДЛЗ использовалась пара SF11 дисперсионных призм с возвращающим зеркалом. В ДЛЗ с аномальной дисперсией импульс удлиняется и приобретает отрицательный чирп. После прохождения через ДЛЗ это излучение с помощью микрообъектива вводилось в ОВС (Newport F-SE @780 нм), где в результате фазовой самомодуляции происходит гашение чирпа и спектральное сжатие импульса. Другая реплика начального импульса проходила через второе плечо интерферометра, которое служило для выравнивания оптических путей и не меняло параметров импульса. Этот импульс, использовался в качестве опорного и накладывался на сигнальный импульс с помощью второго полупрозрачного зеркала. Полученная спектрально-интерференционная картина численно обрабатывалась с помощью компьютера и позволяла восстановить спектральную фазу исследуемого импульса прошедшего через систему СК. Измерение спектра сигнального импульса

вместе с восстановленной спектральной фазой дает возможность путем фурье-преобразования полностью характеризовать исследуемый импульс. На рис.1 показаны измеренный спектр (а), восстановленная спектральная фаза (б), восстановленный временной профиль (в) и чирп (г) импульса. Сжатый спектр с небольшими спутниками является *sinc*-образной функцией, представляющей из себя фурье-образ прямоугольной функции (рис. 1(а)). Степень спектральной компрессия СКИ на выходе из такой системы составляла 2.8, т.е. ширина спектра в этом случае получалась 3.7 нм. Пунктирная кривая на рис.1(в) показывает результат численного моделирования при соответствующих параметрах излучения и системы СК. Из рисунка видно, что полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с результатами численного моделирования. Отметим, что полученные прямоугольные импульсы практически являются спектрально-ограниченными. Для подтверждения факта о том, что прямоугольность сформированного импульса зависит только от соотношения параметров ДЛЗ и ОВС, также была исследована СК при соотношении длин ДЛЗ и ОВС ~ 1 . В этом случае временные профили импульсов, как и следовало ожидать, не имели прямоугольную форму. В данном режиме дисперсия в ОВС практически блокирует СК.

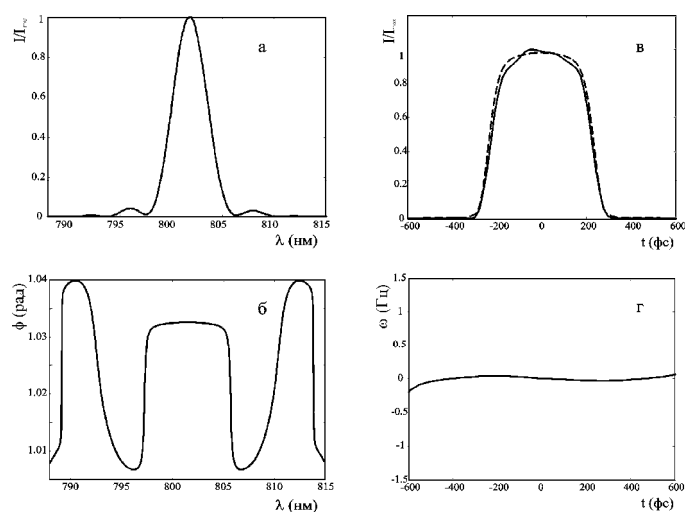


Рис.1. Восстановленный прямоугольный импульс при длинах ДЛЗ – 90см и ОВС – 22см: (а) - измеренный спектр, (б) - спектральная фаза прямоугольного импульса, (в) - восстановленный временной профиль, (г) - чирп импульса. Пунктирная кривая показывает временной профиль импульса, полученный в численном эксперименте.

В §1.3 впервые предложен и экспериментально продемонстрирован упрощенный и компактный, пространственно-временной формирователь фемтосекундных импульсов, на основе программируемого жидкокристаллического пространственно-го модулятора света, без дополнительной маски и дифракционной решетки. Жидко-

кристаллический модулятор действует в роли удлинителя импульса (stretcher) и амплитудно-фазового модулятора. Продемонстрирован точный контроль амплитуды и фазы. Возможность амплитудной модуляции проверена с помощью формирования различных дублетов импульса. Временное окно предложенной системы составляет 1.62 пс (рис.3(а)). Были синтезированы дублеты имеющие различные амплитуды и / или различные длительности (рис.3(б) и 3(в), соответственно). Рис.3(г) иллюстрирует последовательность пяти эквидистантных импульсов. Для демонстрации возможности фазовой модуляции был использован фазовый сдвиг приблизительно на 3π . Преимуществом предложенной схемы является быстрое управление формой импульса, а также возможность непосредственного наблюдения за ним на мониторе в реальном времени.

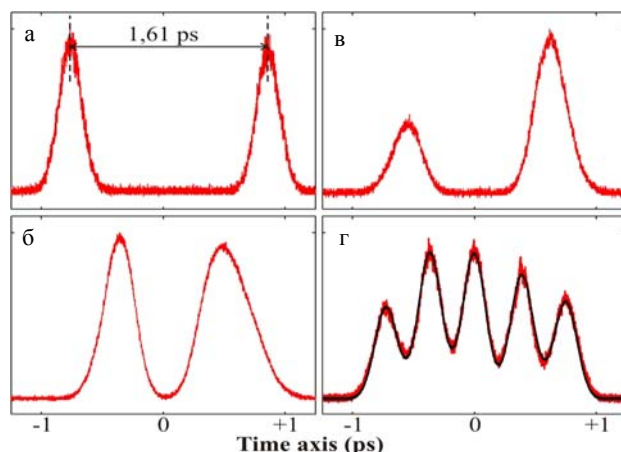


Рис. 2. Кросс-корреляции сигналов, измеренных на выходе формирователя в случае амплитудной модуляции. (а) дублеты с максимальным разделением времени. Временное окно формирователя составил до 1.6 пс. (б) Двойной импульс с разной длительностью. (в) Двойной импульс с разными амплитудами. (г) последовательность пяти эквидистантных импульсов: измеренная кросс-корреляция и рассчитанная кросс-корреляция, разница между кривыми составляет 2,6%.

Полученные результаты могут быть полезны в задачах управления, передачи и регистрации оптических сигналов.

Во второй главе представлены экспериментальные исследования, направленные на разработку новых эффективных систем для транспортировки СКИ посредством оптических волокон.

В §2.1 обсуждаются теория, принцип действия и проводится численное моделирование предложенной системы передачи, состоящей из гризменной ДЛЗ и световода LMA.

В §2.2 экспериментально продемонстрирована новая эффективная схема волоконной передачи фемтосекундных импульсов, основанная на предварительном chirпировании СКИ в гризменной ДЛЗ. В эксперименте в качестве источника импульсов использовалась излучение титан-сапфирового лазера (MICRA-5, COHERENT).

Излучение лазера подавалось на вход предложенного устройства, состоящего из гризменной ДЛЗ и световода LMA. Гризменная ДЛЗ состоит из двух идентичных гризм, каждая из которых представляет из себя совокупность дифракционной решетки в контакте с дисперсионной призмой. Такая ДЛЗ позволяет управлять дисперсиями второго и третьего порядка, с помощью изменения расстояния между парой гризм и угла падения излучения. В гризменной линии существует достаточно геометрических степеней свободы для одновременной регулировки дисперсий второго и третьего порядка, и обеспечения, таким образом, условий для компенсации дисперсии световода LMA. Обычно, пара призм или решеток не позволяют реализовать такое управление дисперсией. Энергетическая эффективность гризменной ДЛЗ достигала 36 % (при 78% эффективности для каждой гризмы). После предварительного chirpирования в гризменной ДЛЗ излучение вводилось в 2,7м световод LMA, с эффективностью ввода в 80%. На рис. 3 представлены экспериментально зарегистрированные корреляционные функции интенсивности на выходе из предложенной системы. Представленные корреляционные функции подтверждают передачу суб-20фс импульсов с энергией в 1нДж непосредственно на выходе из 2,7м световода LMA. В ходе эксперимента проводилось также сравнение между световодами LMA и обычного ОВС. Сравнение этих волокон показывает, что в случае использования обычного ОВС, на выходе из системы можно получить импульсы с длительностью 28фс, т.е. также можно передать короткие и мощные импульсы, несмотря на повышенную нелинейность волокна. Таким образом в зависимости от цели поставленной задачи, обычные ОВС могут быть более предпочтительными чем LMA, так как световоды LMA требуют специальной процедуры обработки, они более чувствительны к изгибам, пучок имеет большой диаметр, а это означает, что процесс доставки требует специальной оптики и, наконец, они намного дороже чем ОВС.

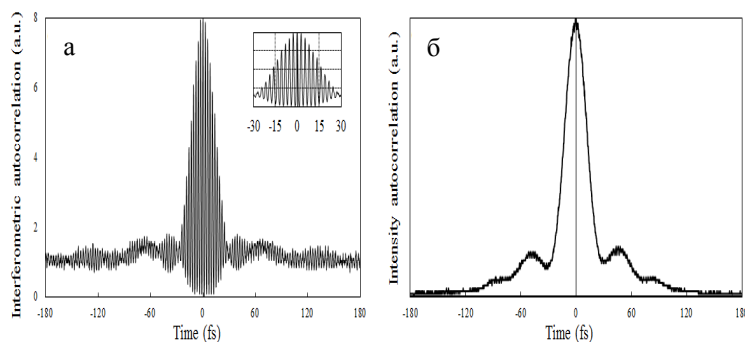


Рис. 3. (а) - интерферометрическая корреляционная функция (представлена также центральная часть корреляционной функции), и (б) - интенсивностическая корреляционная функция импульсов на выходе из световода LMA. В обоих случаях получились суб-20фс импульсы (17.8фс и 19.9фс соответственно).

В § 2.3 продемонстрирована возможность сжатия и формирования различных импульсов на основе программируемого жидкокристаллического пространственно-

го модулятора света. Также продемонстрирована возможность применения жидкокристаллического модулятора для синтеза импульсов произвольной формы.

Третья глава посвящена методам характеристики фемтосекундных СКИ, в частности экспериментальным исследованиям возможностей спектральной интерферометрии спектрального смещения с временной разверткой для задач регистрации фемтосекундных СКИ в несколько оптических циклов.

В §3.1 приведены экспериментальные исследования по безабрационному методу спектрально-временного отображения (СВО) фемтосекундных импульсов. В эксперименте источником фемтосекундных импульсов служит титан-сапфировый лазер Coherent Mira-900, накачиваемый непрерывным лазером Coherent Verdi-10. Излучение делится на две части: часть с большей мощностью (80%) направляется в световод, где формируется субпараболический опорный импульс, а остальная часть проходит через ДЛЗ. Нелинейно-спектральный характер опорного импульса делает его чирп линейным и независимым от начальных характеристик импульса. Только дисперсия волокна определяет величину чирпа. Таким образом, происходит самоформирование опорного импульса. Так как в обоих плечах установки импульсы линейно чирпированы, их временные профили повторяют спектральные распределения, т.е. имеет место СВО этих импульсов. Далее эти два импульса направляются в нелинейный кристалл. Гашение чирпов, при условии неизменности опорного импульса в течении сигнала приводит к СВО. Для тестирования СВО, были сформированы разные импульсы, измерены их спектрально-временные образы и сравнены автокорреляционные функции образов с измеренными. Предложенный метод СВО имеет следующие преимущества: метод является безабрационным и “самоопорным”, не требует дифференциации сигнального и опорного излучений.

В §3.2, на основе исследований интерферометрии спектрального смещения с временной разверткой, предложен и апробирован новый метод характеристики фемтосекундных СКИ: WB-SPIRIT. Экспериментально продемонстрирована комплексная характеристика импульсов в несколько оптических циклов предложенным методом. Принцип метода SPIRIT состоит в следующем. Исследуемое излучение делится на сигнальный и строб-импульсы. Сигнальный импульс в свою очередь делится на две части, которые подаются на вход интерферометра Маха-Цендера, где получают временную задержку и небольшое угловое смещение друг относительно друга, и затем направляются на дисперсионный элемент, в результате чего имеет место пространственное смещение спектральных компонент этих двух импульсов. Интерференция между спектрами этих импульсов создает пространственно-временные биения. Быстродействие обычных детекторов не позволяет регистрировать такие биения, и, для этого используется часть начального фемтосекундного СКИ, которая играет роль стробирующего импульса, позволяющего зарегистрировать часть нестационарной картины путем размещения нелинейного кристалла в Фурье плоскости дисперсионного элемента. В расположенном на выходе спектрометра тонком кристалле для генерации суммарной частоты строб-импульс смешивается с излучением несущим картину биений. Далее следует компьютерная обработка интерференционной картины в режиме реального времени. Полученная спектрально-интерферометрическая информация, позволяет полностью характеризовать импульсы в несколько оптических циклов и проводить временные измерения в масштабе единиц фемтосекунд (рис. 4).

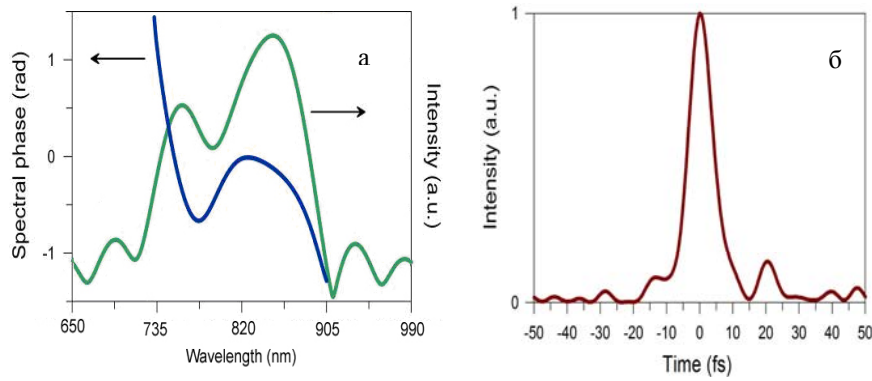


Рис. 4. Характеризация 8фс импульсов с энергией в 0.25 нДж: (а) - спектр и спектральная фаза импульса, (б) - восстановленный временной профиль.

Следует отметить, что простое сканирование временной задержки строб-импульса, при использовании только одного луча вместо совместного интерферометрического сигнала, предоставляет возможность непосредственной регистрации чирпа импульса. Такая “сонограмма” обеспечивает информацию как о величине чирпа, так и о его знаке. На рис. 5, в качестве примера, приведена одна из измеренных сонограмм-“чирпограмм”.

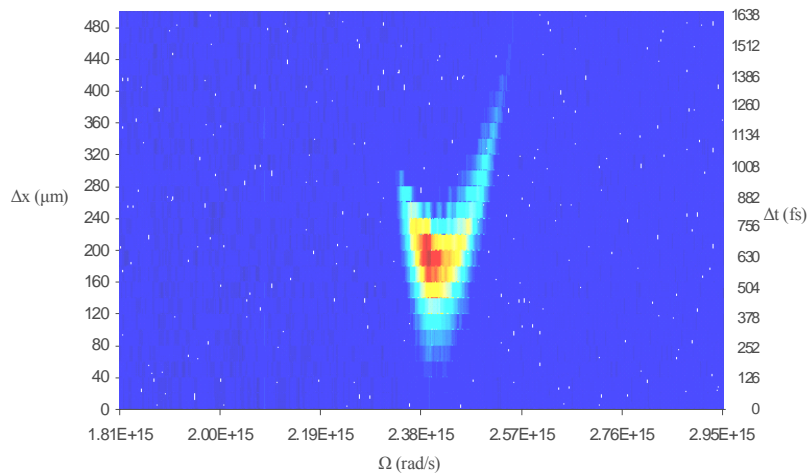


Рис. 5. Сонограмма дисперсии третьего порядка: спектральный чирп, полученный путем сканирования строб-импульса.

Предложенный метод был также использован для характеристики 30-фс импульсов на выходе из волоконной схемы передачи СКИ.

Цитируемая литература

1. С.А.Ахманов, В.А.Выслоух, А.С.Чиркин. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов, М. Наука (1988).
2. G.P.Agrawal. Nonlinear Fiber Optics, 4th Edition, Academic Press, Boston (2007).
3. T.Le, G.Tempea, Z.Cheng, M.Hofer, A.Stingl, "Routes to fiber delivery of ultrashort laser pulses in the 25 fs regime", Opt. Express 17, 1240 (2009).
4. C.Lefort, T.Mansuryan, F.Louradour, A.Barthelemy, "Pulse compression and fiber delivery of 45 fs Fourier transform limited pulses at 830 nm", Opt.Lett.36, 292(2011).
5. P.Tournois, "New diffraction grating pair with very linear dispersion for laser pulse compression", Electron. Lett. 29, 1414 (1993).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена и экспериментально продемонстрирована новая дисперсионная линия задержки (ДЛЗ), состоящая из призмы с линзой, в качестве классического спектрометра, и дополнительной линзы, в качестве фазовой маски. В данном устройстве знак и сила дисперсии задаются оптической силой линзы – фазовой маски. Предложенная ДЛЗ апробирована в фемто-субпикосекундном диапазоне.
2. Экспериментально исследовано формирование спектрально-ограниченных прямоугольных импульсов в дисперсионном режиме спектральной компрессии. Показано что наряду с фазовой самомодуляцией, в световоде существенную роль играет также фактор дисперсии групповых скоростей. Влияние дисперсии групповых скоростей зависит от параметров системы, а именно от соотношения между длинами световода и ДЛЗ, измеренными в дисперсионных длинах. При длинах ДЛЗ, меньших длины световода, рекомпрессия СКИ в световоде блокирует спектральную компрессию. При длинах ДЛЗ, сравнимых с двойной длиной световода, достигается эффективный дисперсионный режим спектральной компрессии, при котором в области максимальной спектральной компрессии формируются спектрально-ограниченные импульсы с прямоугольной огибающей. Для полной характеристики сформированных спектрально-ограниченных прямоугольных импульсов использовался метод спектральной интерферометрии.
3. Экспериментально, в сопряжении с численным моделированием, продемонстрирована новая система волоконной передачи фемтосекундных импульсов, с высокоэффективной гризменной дисперсионной линией задержки. Показано, что компактная система, состоящая из гризменной дисперсионной линии задержки и световода LMA, может служить эффективным устройством передачи фемтосекундных импульсов. Экспериментально продемонстрирована передача суб-30фс импульсов с энергией 1нДж через 2,7м световод. Предлагаемое устройство, предоставляет возможность перестройки длины волны в диапазоне 100нм. Сравнительные экспериментальные исследования проведенные для систем на основе стандартных одномодовых и LMA световодов показали, что световоды LMA более предпочтительны, однако стандартные одномодовые световоды, несмотря на их сравнительно высокую нелинейность, также могут служить для обеспечения передачи коротких и мощных импульсов.

4. Предложен и экспериментально продемонстрирован новый – пространственно-временной формирователь фемтосекундных импульсов, на основе программируемого жидкокристаллического пространственного модулятора света. Продемонстрирована возможность точного и одновременного контроля амплитуды и фазы. Возможность амплитудной модуляции проверена с помощью формирования дублетов импульса, имеющих различные амплитуды и / или различные длительности.
5. Для управления спектральной фазой фемтосекундных импульсов с целью получения сжатых импульсов длительностью < 18 фс, экспериментально исследована система волоконной передачи излучения на основе программируемого жидкокристаллического пространственного модулятора света и световода LMA. Исследования показали необходимость повышения спектрального разрешения устройств и снижения или компенсации влияния пространственной дисперсии. Продемонстрирована возможность применения жидкокристаллического пространственного модулятора для синтеза импульсов произвольной формы.
6. Проведены экспериментальные исследования по беззабарационному методу спектрально-временного отображения фемтосекундных импульсов, основанного на генерации суммарной частоты. Метод не требует дифференциации сигнального и опорного излучений и позволяет характеризовать фемтосекундные импульсы в режиме “реального времени”. В результате взаимодействия опорного и сигнального импульсов в нелинейном кристалле, спектральный профиль излучения на суммарной частоте повторяет временной профиль первоначального импульса. Реализовано спектрально-временное отображение импульсов с различными амплитудными и фазовыми модуляциями.
7. Предложен и апробирован новый метод характеристики фемтосекундных СКИ: WB-SPIRIT. Экспериментально показано, что предложенный метод позволяет полностью характеризовать импульсы в несколько оптических циклов и проводить временные измерения в масштабе в нескольких фемтосекунд. Метод позволяет непосредственно регистрировать чирп импульса простым сканированием временной задержки строб-импульса. Предложенный метод использован для характеристики 30фс импульсов на выходе из волоконной схемы передачи СКИ.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. M.A.Kalashyan, K.H.Palanjyan, T.J.Khachikyan, T.G.Mansuryan, G.L.Yesayan, L.Kh.Mouradian, "Prism-Lense Dispersive Delay Line", Tech. Phys. Lett. 35 (3), 211-213 (2009).
2. М.Калашян, К.Паланджян, Г.Есян, Л.Мурадян “Дисперсионная линия задержки на основе фурье синтеза” VIII Харківська конференція молодих науковців «Радіофізика та електроніка, біофізика» 25-27.11.2008, 117, (2008).
3. M.A.Kalashyan, K.A.Palandzhyan, G.L.Esayan, L.Kh.Muradyan, "Generation of transform-limited rectangular pulses in a spectral compressor" Quantum Electron. 40 (10), 868-872 (2010).

4. K.Palanjyan, M.Kalashyan, G.Yesayan, L.Mouradian "Synthesis of Fourier Transform Rectangular Pulses in the Process of Spectral Compression"- Proc. Conf. Laser Physics-2008, 150-153 (2009).
5. K.Palanjyan, M.Kalashyan, G.Yesayan, L.Mouradian "Spectral Interferometric Characterization of Spectral Compression: Dispersive Regime," Proc. 4th Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers 2008 (CAOL-2008), 428-430 (2008).
6. T.Mansuryan, M.Kalashyan, J.Lhermite, V.Kermene, A.Barthelemy, F.Louradour "Compact direct space-to-time pulse shaping with a phase-only spatial light modulator", Optics Letters, 36 (9), 1635 (2011).
7. T.Mansuryan, M.Kalashyan, J.Lhermite, A.Barthélémy, V.Kermene, F.Louradour "Direct Space-to-Time Femtosecond Pulse Shaping based on 2D Phase-Only Spatial Light Modulator", CLEO/Europe-EQEC 2011, paper CF.P.26 (2011).
8. C.Lefort, M.Kalashyan, D.Peyrot, T.Mansuryan, L.Mouradian, F.Louradour, A.Barthélémy "Pulse Compression and Fiber Delivery of Sub-30 fs Nanojoule Pulses at 830 nm" CLEO/USA 2011, CWR4 Ultrafast Pulse Generation II session (2011). / "Dispersion Compensation with a Grism-based Dispersive Line for Fiber Delivery of Sub-30 fs Pulses at 830 nm", CLEO / Europe-EQEC 2011, CD.P.4 (2011). / M.Kalashyan, C.Lefort, L.Martinez-Leon, T.Mansuryan, L.Mouradian, F.Louradour "Ultrashort pulse fiber delivery with optimized dispersion control by reflection gratings at 800 nm", Opt. Express 20, ID 172150 (2012).
9. 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).
10. A.Zeytunyan, M.Kalashyan, G.Yesayan, L.Mouradian, F.Louradour, A.Barthélémy, "Similariton-based spectral interferometry for femtosecond signal characterization", European Conference on Optical Communication 2011 (ECOC'11), 978-1-4577-1918-9 (2011).
11. M.A.Kalashyan "Wideband SPIRIT for characterization of few-cycle femtosecond pulses", Armenian Journal of Physics 5/2, 81-85 (2012).
12. L.Martínez-León, T.Mansuryan, M.Kalashyan, J.Lhermite, F.Louradour, Ch.Hazera, S.Petit, E.Cormier, A.Barthélémy "Complete Measurement of 8 fs Pulses with Wideband SPIRIT", CLEO/Europe-EQEC 2011, paper CF.P.17 (2011). / "Characterization of 8 fs pulses through wideband SPIRIT", 10th Euro-American Workshop on Information Optics, 10.1109/WIO.2011.5981475 (2011).
13. Լ.Մուրադյան, Տ.Մանուրյան, Ա.Զեյթունյան, Մ.Քալաշյան, Գ.Եսայան, Ֆ.Լուրադուր, Ա.Բարթելենի, «Գերարագ օպտիկական օսցիլոգրաֆ», ՀՀ արտոնագրի հայտ No. AM2009044, G01 D 5/26 (2009):
14. Ա.Ա.Կիրակոսյան, Ք.Հ.Փալանջյան, Մ.Ա.Քալաշյան, Ա.Ս.Զեյթունյան, Գ.Լ.Եսայան, Լ.Խ.Մուրադյան "Դիսպերսային հապաղման գիծ"- AM N. 2178 A2, G02F 1/01, G02B 5/00 (2008):

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ֆեմտովայրկյանային ժամանակային տիրույթի նվաճումը հիմք հանդիսացավ գիտության և տեխնիկայի բազմաթիվ նոր ճյուղերի բուռն զարգացման համար: Ֆեմտովայրկյանային լազերային աղբյուրներն այժմ լայն տարածում են գտել գերաբազ էրևոյթների սպեկտրաչափության, ոչ գծային օպտիկայի, լազերային կենսաֆիզիկայի, ֆոտոքիմիայի և այլ ոլորտներում: Ֆեմտովայրկյանային ժամանակային սանդղակի յուրացման հիմնախնդիրն առաջադրեց նոր ֆիզիկական խնդիրներ՝ կապված ժամանակային նոր սանդղակում լազերային իմպուլսների կառավարման, հաղորդման և գրանցման հետ: Այս ոլորտներում ուսումնասիրությունների կարևորությունը և բազմաթիվ չլուծված խնդիրները պայմանավորել են ատենախոսական աշխատանքի նպատակը, հետազոտությունների առարկան և խնդիրները: Աշխատանքում իրականացված հետազոտությունների հիմնական արդյունքները ներկայացված են ստորև.

1. Առաջարկվել է ֆեմտովայրկյանային իմպուլսների ձևավորման նոր դիսպերսիոն հապաղման գիծ: Առաջարկված համակարգը, ի տարբերություն դասականի, ընձեռում է հետևյալ հնարավորությունները. դիսպերսիայի նշանի կառավարում և տարբեր տեսքի իմպուլսների ձևավորում: Համակարգը փորձարկված է ֆեմտո-սուբպիկովայրկյանային ժամանակային տիրույթում:
2. Փորձարարական եղանակով ցույց է տրվել, որ խմբային արագությունների դիսպերսիան Կեռի ոչ գծայնության հետ միասին կարևոր դեր է խաղում սպեկտրալ սեղմման երևույթում: Խմբային արագությունների դիսպերսիայի ներդրումը կառավարելի է և այն կարող է խոչընդոտել ալիքատարում իմպուլսի սպեկտրալ սեղմմանը և կամ բերել արդյունավետ սպեկտրալ սեղմման ռեժիմի, երբ մաքսիմալ սպեկտրալ սեղմմանը զուգընթաց ձևավորվում են սպեկտրալ սահմանափակ ուղղանկյուն իմպուլսներ: Պրոցեսի փորձարարական բնութագրումն իրականացվել է սպեկտրալ ինտերֆերաչափության եղանակով՝ համակցված թվային մոդելավորմամբ:
3. Փորձարարական և թվային հետազոտությունների միջոցով առաջարկվել է ֆեմտովայրկյանային իմպուլսների ալիքատարային հաղորդման նոր համակարգ՝ հիմնված բարձր էֆեկտիվություն ունեցող գրիզմերից բաղկացած դիսպերսիոն հապաղման գծի օգտագործման վրա: Ցույց է տրվել, որ գրիզմերից բաղկացած դիսպերսիոն հապաղման գիծը և լայնամոդ ալիքատարը (LMA) կարող են ծառայել որպես ֆեմտովայրկյանային իմպուլսների հաղորդման արդյունավետ համակարգ: Փորձարարական եղանակով իրականացվել է 30ֆլ տևողությամբ և 16Ջ էներգիայով իմպուլսների հաղորդում 2.7մ երկարություն ունեցող լայնամոդ ալիքատարով: Առաջարկվող համակարգը հնարավորություն է ընձեռում իրականացնել ալիքի երկարության վերալարում 100նմ տիրույթում: Միամոդ և լայնամոդ ալիքատարերով հաղորդման համակարգերի համեմատական փորձարարական հետազոտությունները ցույց են տվել, որ միամոդ ալիքատարները ևս, չնայած նրանց ուժեղ ոչ գծայնությանը, կարող են ապահովել կարճ և հզոր իմպուլսների հաղորդում:
4. Առաջարկվել է նոր, համակարգչային կառավարմամբ, գերկարճ իմպուլսների տարածաժամանակային ձևավորիչ (space-to-time shaper)՝ հիմնված համա-

կարգչով ղեկավարվող հեղուկ բյուրեղային մոդուլատորի օգտագործման վրա, պարզ և կոմպակտ իրագործման սարքավորմամբ: Փորձարարական եղանակով ցույց է տրվել առաջարկվող նոր ձևավորիչի միջոցով գերկարճ իմպուլսների փուլային և ամպլիտուդային կառավարում իրագործելու հնարավորությունը:

5. Ֆեմտովայրկյանային իմպուլսների սպեկտրալ փուլի կառավարման համար՝ լայնամոդ ալիքատարի ելքում < 18 ֆվ տևողությամբ սեղմված իմպուլսներ ստանալու նպատակով, առաջարկվել և ուսումնասիրվել է հեղուկ բյուրեղային տարածական մոդուլատորի վրա հիմնված գերկարճ իմպուլսների ալիքատարային հաղորդման համակարգ: Փորձարարական հետազոտությունների միջոցով ցույց է տրվել համակարգի սպեկտրալ լուծողունակության բարելավման և տարածական դիսպերսիայի ազդեցության նվազեցման կամ կոմպենսացիայի անհրաժեշտությունը: Ցույց է տրվել նաև հեղուկ բյուրեղային տարածական մոդուլատորի կիրառմամբ տարբեր տեսքի իմպուլսներ ձևավորելու հնարավորությունները՝ ամպլիտուդային մոդուլացման միջոցով:
6. Իրականացվել են ժամանակային ուսպնյակի մակածման վրա հիմնված ժամանակ-հաճախություն փոխակերպման եղանակի փորձարարական հետազոտություններ: Այսպիսի ժամանակ-հաճախություն արտապատկերումը հնարավորություն է ընձեռում «իրական ժամանակում» կատարել իմպուլսների ուղիղ բնութագրում՝ ֆեմտովայրկյանային սանդղակում: Արտապատկերումն ապահովում է բարձր ժամանակային լուծողունակություն և զերծ է նաև ազդանշանային և նեցուկ ճառագայթումերն իրարից տարանջատելու պահանջից: Փորձարարական եղանակով հետազոտված է տարբեր տեսքի իմպուլսների սպեկտրալ ժամանակային արտապատկերումը: Այսպիսի սպեկտրալ ժամանակային արտապատկերումը հնարավորություն է ընձեռում որակապես ստուգել և կառավարել դիսպերսիոն և ոչ զծային-դիսպերսիոն երևույթները սխեմայի յուրաքանչյուր կետում՝ հետևելով միայն սպեկտրների պահվածքին:
7. Օպտիկական տիրույթի համար սահմանայնորեն կարճ իմպուլսների բնութագրման համար առաջարկվել, փորձարկվել և իրականացվել է լայն սպեկտրով իմպուլսների բնութագրման լայնաշերտ WB-SPIRIT եղանակը՝ հիմնված սպեկտրալ ինտերֆերաչափության սկզբունքի վրա: Փորձարարական արդյունքները ցույց են տալիս WB-SPIRIT եղանակի միջոցով մի քանի օպտիկական պարբերությամբ իմպուլսների բնութագրման հնարավորությունը. իրականացվել է 8ֆվ տևողությամբ, 0.25նՋ էներգիայով իմպուլսների համալիր բնութագրում: WB-SPIRIT եղանակը օգտագործվել է նաև ալիքատարային հաղորդման համակարգի ելքում ստացված 30ֆվ տևողությամբ իմպուլսների բնութագրման համար: Ցույց է տրվել լայնաշերտ WB-SPIRIT եղանակի հնարավորությունները՝ ճառագայթման բնութագրերը «սոնոգրամի» («չիրպոգրամի») տեսքով արտապատկերման համար՝ ինտենսիվության սպեկտրալ ժամանակային բաշխման ներկայացմամբ:

Աշխատանքի արդյունքները կարող են հիմք հանդիսանալ ֆեմտովայրկյանային օպտիկայում ազդանշանի կառավարման, հաղորդման և գրանցման նոր արդյունավետ սարքերի մշակման համար:

SUMMARY

During the past decade, continuous progress in the field of ultrashort pulse generation has led to the generation of few-cycle pulses in the visible and near-infrared spectral range, making the control, delivery and characterization of these pulses a demanding task. Ultrashort pulse is an important tool to probe the dynamics of physical systems at very short timescales, allowing for improved understanding of the performance of many devices and phenomena used in science, technology, and medicine. In addition ultrashort pulses also provide high peak intensity and a broad optical spectrum, which opens even more applications such as material processing, nonlinear optics, attosecond science, and metrology. Recently the researches directed to the management, control and registration of parameters of pulses are essentially advanced. However the current stage of development of ultrafast optics and laser technologies imposes new, high requirements to the methods of signal processing and delivery. It stimulates intensive studies in the mentioned above directions with the purpose of research of the new physical approaches to the problems of high laser technologies. There are numerous of the important unsolved problems at the present stage of researches in these directions. The importance and practical significance of researches in these directions, together with the unsolved problems, have defined the purpose of the work, with the following new and original results:

1. We propose and experimentally demonstrate an alternative dispersive delay line for ultrashort pulse shaping with the following advantages:
 - compact and simple design, independent to dispersive force;
 - possibility to induce both of negative and positive dispersion;
 - easy tunable/changeable dispersion;
 - possibility to shape pulses with different temporal profiles
 - applicable for picosecond pulses due to compact design.

Obtained results are in good accordance with the numerical simulation.

2. Experimentally demonstrated that the fiber group velocity dispersion together with the principal factor of Kerr nonlinearity becomes important for spectral compression. The group velocity dispersion impact is controllable, it can:
 - block spectral compression by temporal recompression of pulse in the fiber;
 - reveal an effective dispersive regime of spectral compression when rectangular Fourier transform pulses are formed along with the achievement of maximal spectral compression ratio.

These pulses are Fourier transform limited, in contrast with the well known rectangular pulses generated in the fiber due to combined impacts of self-phase modulation and dispersion. Our results of pulse complete characterization obtained by spectral interferometry are in a good agreement with the numerical simulations.

3. We have numerically and experimentally demonstrated an efficient femtosecond fiber delivery setup with improved fiber dispersion precompensation thanks to a high throughput grism-pair stretcher. Sub-30-fs-duration 1-nJ-energy pulses were compressed at the direct exit of 2.7-meters-long large mode area fiber. The proposed device that involves only readily available commercial components is compact in

addition of being wavelength tunable over a 100-nm-bandwidth around 800 nm. Large mode area fibers gave the best performances in terms of pulse shortness and brightness. But surprisingly standard single mode fibers also gave short and powerful pulses despite their increased nonlinearity.

4. A new programmable direct space-to-time femtosecond pulse shaper using phase-only liquid crystal spatial light modulators has been demonstrated. The experimental setup is very simple and compact. The flexibility of the shaper for amplitude and phase control has been demonstrated by the generation of various pulse sequences with tailored intensity and phase (in the range of π).
5. Evolution of the stretcher-compressor system was experimentally tested. We introduced a spatial light modulator in the grisms stretcher. The goal is to obtain more compressed pulses at the output of the LMA PM fiber. Unfortunately this solution was unsuccessful, and we have identified causes of this failure. To go further, it would be necessary to improve the system to have access to the complex phase by removing the limitations, which were related mainly to the low spectral resolution of the devices and the existence of spatial dispersion effect. The capability of the SLM for pulse shaping was demonstrated by amplitude modulation.
6. Experimental studies on the method of non-aberrative time-to-frequency conversion through temporal lensing by wave mixing process are demonstrated. This all-optical time-to-frequency imaging allows direct, real-time pulse characterization in femtosecond time-scale. Reference and signal pulses interact with each other in nonlinear crystal. The spectral profile of non-collinear sum-frequency generation repeats the initial pulse temporal profile. Experiments on simple and complex femtosecond pulses imaging by our technique show a good agreement between measured and calculated correlation tracks. Using a non-collinear interaction of signal and reference pulses in nonlinear crystal allows background-free registrations. The separated D-line and NL+D medium in spectral compressor allow us to follow up and control the pulse imaging criterions by spectro-temporal images of the pulses passed through.
7. Wideband SPIRIT, a method for the measurement of a few optical cycle pulses based on spectral shearing interferometry has been demonstrated. Experimental results demonstrate the capabilities of the method for the complete characterization of 0.25 nJ 8 fs pulses. Furthermore, Wideband SPIRIT easily provides data as a sonogram, which enables an intuitive representation of the pulse's dispersion. TOD measurement has been possible with our scheme. Chirpogram not only provides an intuitive representation of the chirp but furthermore, it is sensitive to its sign. Sub-30-fs pulse characterization at the exit of fiber delivery scheme performed through Wideband SPIRIT.

Obtained results can be useful for development of new effective devices for ultrafast optics and laser physics.

