

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Савицкий Илья Владимирович

**Формирование однопериодных фазостабильных импульсов
ближнего инфракрасного диапазона для сверхбыстрой
нелинейной спектроскопии**

1.3.19. Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- | | |
|--------------------------|---|
| Научный
руководитель | – Федотов Андрей Борисович ,
кандидат физико-математических наук |
| Официальные
оппоненты | – Головань Леонид Анатольевич ,
доктор физико-математических наук, доцент
Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова
кафедра общей физики и молекулярной
электроники, профессор
Стрелков Василий Вячеславович ,
доктор физико-математических наук,
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
отделение квантовой радиофизики,
высококвалифицированный ведущий научный
сотрудник
Дормидонов Александр Евгеньевич ,
кандидат физико-математических наук,
Всероссийский научно-исследовательский
институт автоматики им. Н.Л. Духова,
отдел разработки лазеров, лазерно-оптических
систем и изделий микроэлектроники, начальник
научно-исследовательского отдела |

Защита диссертации состоится «18» июня 2025 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.01.13.4 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С. А. Ахманова.

E-mail: diss.sov.31@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3452>

Автореферат разослан «___» мая 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.013.4
кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Интенсивное развитие лазерной физики привело к возникновению обширного направления исследований – оптики сверхкоротких лазерных импульсов [1–3]. Использование сверхкоротких импульсов позволяет исследовать нестационарные процессы с фемтосекундным разрешением [4], а высокая пиковая мощность делает их удобным инструментом для исследования и применения нелинейно-оптических явлений [5]. Уже к началу 20 века развитие лазерных технологий позволило получать излучение с напряженностью на несколько порядков превышающую внутриатомное поле, что открывает возможность наблюдать высоконелинейные процессы в релятивистском режиме [6]. С другой стороны, продолжается разработка методов получения предельно коротких импульсов, длительность которых составляет всего несколько периодов поля [7]. Однопериодные лазерные импульсы, помимо высокой пиковой мощности за счёт малой длительности, открывают новые возможности исследования сверхбыстрых процессов с субфемтосекундным разрешением.

При переходе к предельно малой длительности импульса существенную роль начинает играть фаза поля относительно огибающей импульса, сильно влияющая в этом случае на пиковую интенсивность излучения. Поэтому формирование однопериодных импульсов со стабильной и контролируемой фазой открывает новые возможности в задаче управления сверхбыстрыми процессами, связанными с взаимодействием сильных световых полей с веществом. Первые исследования таких явлений были направлены на изучение генерации гармоник высокого порядка в газах [8,9], возникающих в результате туннельной фотоионизации вещества. Использование предельно короткого излучения для наблюдения этих эффектов позволило получить одиночные импульсы аттосекундной длительности [10], что дало возможность исследования динамики протекания электронных процессов в веществе [11]. В последнее десятилетие большое внимание исследователей привлекает возможность наблюдения и управления процессами фотоионизации и генерации гармоник высокого порядка в диэлектриках и полупроводниках [12,13]. В отличие от газов, в твердых телах на протекание сверхбыстрых электронных процессов сильно влияет дисперсия валентной зоны и зоны проводимости вещества, поэтому с помощью спектроскопии на основе генерации гармоник высокого порядка можно восстановить зонную структуру кристаллического материала [14,15]. Также активно исследуются методы управления электронной динамикой в твердых телах с помощью фазостабильных предельно коротких импульсов [16–23]. Контроль

фотоиндуцированных электронных токов уже находит применение для характеристики электрического поля лазерного импульса [21]. Кроме того, исследования субфемтосекундных электронных процессов в веществе нацелены на создание оптоэлектронных устройств, способных работать на петагерцовой частоте [24–26]. В основе всех этих современных направлений лежит задача получения предельно коротких импульсов со стабильной фазой.

Степень разработанности темы исследования

Первые источники однопериодных импульсов были продемонстрированы уже в 90-ые годы прошлого века [27]. С получением излучения предельно короткой длительности связана задача стабилизации фазы поля относительно огибающей импульса, над которой велись работы в то же время [8]. С тех пор методы генерации и компрессии импульсов непрерывно развиваются. В настоящее время формирование однопериодных импульсов может осуществляться напрямую в оптическом резонаторе при использовании активной среды с широкой полосой усиления и точного подбора дисперсионных элементов для компенсации нелинейной фазы [28,29]. Для получения предельно коротких импульсов высокой мощности используются широкополосные оптические параметрические усилители [30,31] и синтез сложных волновых форм с помощью когерентного сложения предельно коротких импульсов в разных спектральных диапазонах [32]. Наиболее распространенными являются методы, основанные на уширении спектра в результате фазовой самомодуляции. В качестве нелинейной среды использовались твердые тела [33], благородные газы для осуществления режима филаментации [34], а также оптические волокна с твердотельной [35] и полый [36] сердцевиной. Большую роль в данном направлении применения волокон сыграло развитие микроструктурированных волноводов [37]. В задаче компрессии импульсов преимущество использования полых волноводов, заполненных газом под давлением, заключается в возможности преобразования импульсов с высокой энергией и обеспечения высокого качества пространственной моды выходного пучка. Кроме того, управление давлением газа и структурой оболочки волокна позволяет получить отрицательную дисперсию групповых скоростей [38] и реализовать режим солитонной самокомпрессии импульсов при распространении в волноводе [39]. В настоящее время активно исследуются возможности полых антирезонансных волокон, в которых волноводные свойства обеспечиваются многолучевым отражением на тонких стенках микроструктуры оболочки [40,41]. Такие волноводы могут обеспечивать широкую полосу низких потерь и отрицательной дисперсии групповых скоростей в инфракрасном диапазоне, что делает их удобным инструментом для сжатия сверхкоротких лазерных инфракрасных (ИК) импульсов в режиме солитонной самокомпрессии [42,43].

Данный режим распространения позволяет получать импульсы однопериодной длительности без использования дополнительных оптических элементов для компенсации дисперсии. В ряде работ теоретически предполагается возможность получения импульсов субпериодной длительности в результате солитонной самокомпрессии [44,45], однако корректное измерение спектральной фазы генерируемого многооктавного суперконтинуума является технически сложной задачей. В представленных в диссертационной работе исследованиях демонстрируется преимущество антирезонансных волокон однокольцевого типа для компрессии импульсов и впервые экспериментально показывается возможность получения импульсов субпериодной длительности в режиме солитонной самокомпрессии.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы является развитие методов формирования предельно коротких фазостабильных инфракрасных лазерных импульсов с длительностью порядка одного и менее цикла поля и их применение в задачах сверхбыстрой фазочувствительной нелинейной спектроскопии и интерферометрии. Достижение целей исследования требует решения ряда задач:

- Реализация метода пассивной стабилизации фазы поля относительно огибающей фемтосекундных импульсов холостой волны в оптическом параметрическом усилителе.
- Создание схемы для характеристики спектральных и временных характеристик излучения с многооктавным спектром на основе интерференционного метода восстановления спектральной фазы импульсов X-SEA-F-SPIDER.
- Исследование динамики солитонной самокомпрессии импульсов в полом заполненном аргоном антирезонансном волноводе, в том числе с помощью анализа широкополосной f - $3f$ интерференции в видимой части спектра суперконтинуума.
- Экспериментальный и теоретический анализ фазочувствительной фотоионизации широкозонного полупроводника с помощью однопериодного фазостабильного импульса.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования диссертационной работы являются предельно короткие фазостабильные лазерные импульсы и индуцированные ими нелинейные сверхбыстрые процессы. **Предметом исследования** являются экспериментальные методы генерации и характеристики фазостабильного однопериодного импульса, формируемого в режиме солитонной самокомпрессии излучения в полом заполненном аргоном антирезонансном

волноводе, а также физические механизмы фазовой чувствительности многооктавного суперконтинуума на выходе из волокна и отклика полупроводника на воздействие мощного однопериодного импульса.

Научная новизна

В диссертационной работе показано, что структура полых антирезонансных световодов револьверного типа (диаметр полый сердцевины 70 мкм, толщина стенок внутренних капилляров оболочки порядка 590 нм), обеспечивающая наличие широких полос пропускания и отрицательную дисперсию групповых скоростей в инфракрасном диапазоне, дает возможность распространения фемтосекундных фазостабильных импульсов накачки ближнего инфракрасного диапазона в области 2 мкм в режиме солитонной самокомпрессии.

Реализована генерация многооктавного суперконтинуума в полном антирезонансном волноводе, заполненном аргоном под давлением. В результате нелинейно-оптических преобразований, возникающих при распространении импульса с длительностью 55 фс, длиной волны 2.1 мкм и энергией порядка 20 мкДж, формируется излучение со спектром, лежащим в диапазоне от 0.2 до 3.2 мкм. Показано, что инфракрасная часть излучения формируется в основной LP_{01} моде, а в видимом диапазоне часть излучения перетекает в высшие моды сердцевины и моды капилляров за счет резонансов структуры или выполнения условий синхронизма генерации третьей гармоники в высших волноводных модах.

Продемонстрировано формирование однопериодных лазерных импульсов со стабильной фазой в режиме солитонной самокомпрессии в полых антирезонансных световодах. Восстановленная с помощью техники X-SEA-F-SPIDER спектральная фаза инфракрасной части импульса (> 1.0 мкм) показывает компрессию импульса до длительности 6.6 фс, что соответствует одному периоду колебания поля на центральной длине волны 1.9 мкм. Энергия центрального предельно короткого пика составила $E_s \approx 9.8$ мкДж, что соответствует пиковой мощности ≈ 1.5 ГВт. Показано, что фаза поля относительно огибающей однопериодного импульса стабильна (среднеквадратичное отклонение $RMS = 146$ мрад) и управляется с помощью системы подстройки фазы с обратной связью.

Показано, что в видимой части спектра суперконтинуума, формируемого в полном волноводе, наблюдается чувствительная к фазе входного импульса широкополосная спектральная f - $3f$ интерференция синего крыла суперконтинуума и третьей гармоники инфракрасной части излучения. Анализ интерференционной картины позволяет восстановить спектральную

фазу импульса на выходе из волновода в видимой области, что, совместно с использованием техники X-F-SEA-SPIDER, дало возможность впервые экспериментально подтвердить самокомпрессию импульса до субпериодной длительности в полом антирезонансном световоде. Предложенный оригинальный метод позволил оценить длительность импульса с многократным спектром значением 2.5 фс (0.4 периода поля на длине волны 1.8 мкм), что при энергии 10 мкДж в основном пике соответствует мощности 2.1 ГВт.

Реализован метод нестационарной спектроскопии в схеме накачка-зондирование образцов селенида цинка различной толщины с применением однопериодных импульсов. Показано, что образование плазмы интенсивным инфракрасным импульсом накачки в объемных образцах (толщина $l \geq 200$ мкм) приводит к подавлению спектра пробного импульса в видимом диапазоне на $\approx 95\%$ за счёт плазменного поглощения и рефракции. С помощью этого эффекта восстановлен профиль дисперсии показателя преломления селенида цинка вблизи края запрещенной зоны диэлектрика. Показано, что фотоионизация тонкой пленки селенида цинка толщиной 1 мкм приводит к чувствительной к фазе импульса накачки генерации новых спектральных компонент. Теоретический анализ показал, что новые фазочувствительные спектральные компоненты генерируются за счёт плазменной нелинейной добавки к показателю преломления и нелинейного плазменного поглощения, что демонстрирует возможность управления электронной динамикой в твердом теле с помощью предельно коротких импульсов с контролируемой фазой. Кроме того, наблюдение данного эффекта позволяет получить информацию об абсолютном значении фазы поля относительно огибающей импульса.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы состоит в разработке методов формирования фазостабильных инфракрасных импульсов длительностью около одного периода поля с центральной длиной волны в области 2 мкм с пиковой мощностью порядка ГВт с помощью полых антирезонансных волноводов револьверного типа, заполненных благородным газом под давлением. Такие источники предельно короткого излучения необходимы для широкого класса актуальных задач лазерной физики, в том числе для сверхбыстрого управления динамикой фотоиндуцированных токов в диэлектриках и полупроводниках, а также для развития сверхбыстрой оптоэлектроники.

Методология и методы исследования

Представленные в диссертационной работе исследования опираются на экспериментальные результаты и теоретические методы анализа нелинейно-

оптических процессов. Экспериментальный подход основывается на полной характеристике пространственных, спектральных и временных свойств используемого излучения с помощью оптимально подходящих коммерческих или оригинальных методов и инструментов. Исследование динамики солитонной самокомпрессии производилось при различных параметрах мощности входного импульса и давления аргона для демонстрации полной физической картины преобразований, обеспечивающих формирование фазостабильных однопериодных импульсов. Теоретический анализ результатов экспериментов производился с помощью численного моделирования распространения излучения в нелинейной среде, что позволило определить природу явлений, приводящих к влиянию фазы поля относительно огибающей импульса на спектральные характеристики излучения. Основным критерием справедливости теоретического описания является совпадение результатов моделирования с данными, полученными в ходе экспериментальной работы.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Ширина и положение полос пропускания полого антирезонансного волновода, определяемые толщиной стенок внутренних полых капилляров револьверной структуры (≈ 590 нм), обеспечивают возможность генерации многооктавного суперконтинуума в области 200 - 3200 нм от фемтосекундных инфракрасных импульсов микроджоулевого уровня энергии, преимущественно в основной волноводной моде. Наличие резонансов волноводной структуры приводит к перетеканию части излучения в высшие волоконные моды в видимой области спектра.
2. Широкополосная аномальная дисперсия групповых скоростей в инфракрасном диапазоне (>1250 нм) полых антирезонансных волноводов, заполненных инертным газом (аргоном) при давлении в несколько атмосфер, обеспечивает условия для солитонной самокомпрессии фемтосекундных импульсов с длиной волны около 2 мкм и энергией 20 мкДж до длительности порядка одного периода поля, что позволяет формировать гигаваттные однопериодные импульсы со стабильной (≈ 150 мрад) и управляемой фазой поля относительно огибающей.
3. Чувствительная к фазе входного фемтосекундного излучения широкополосная $f-3f$ интерференция в видимой области суперконтинуума, является следствием образования субпериодного импульса в ходе солитонной самокомпрессии излучения в волноводе. Характер зависимости спектра от фазы позволяет восстановить спектральную фазу солитона в октавном диапазоне интерференции, тем

самым демонстрируя генерацию субпериодного импульса с длительностью около половины периода поля на центральной длине волны около 1.8 мкм и пиковой мощностью более 2 ГВт.

4. Управление значением фазы однопериодного инфракрасного импульса, позволяет варьировать его мгновенную интенсивность от $\approx 1.5 \text{ ТВт/см}^2$ до $\approx 4 \text{ ТВт/см}^2$, что дает возможность влиять на сверхбыструю электронную динамику фотоионизации полупроводника. Фазочувствительная зависимость ионизации проявляется в схеме «накачка-зондирование» в виде генерации новых компонент в спектре зондирующего импульса, обусловленной наведенной импульсом накачки плазменной нелинейностью.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности результатов диссертационной работы обеспечивается высоким современным уровнем использованного научно-технического оборудования, воспроизводимостью результатов при проведении повторных измерений и их соответствием существующим литературным данным. Основные результаты диссертационной работы были представлены лично Савицким И.В. или в соавторстве с ним в 15-ти докладах на российских и международных научных конференциях. Материалы диссертационной работы опубликованы в 7 печатных работах в рецензируемых научных журналах, входящих в базы данных Web of Science, Scopus, RSCI и Перечень изданий МГУ, в том числе ACS Photonics, Optics Letters, Письма в "ЖЭТФ" и Квантовая электроника.

Личный вклад автора

Содержание диссертационной работы и основные защищаемые положения отражают определяющий личный вклад автора в проведение экспериментальных исследований. Подготовка к публикации полученных результатов осуществлялась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Часть теоретического анализа и численного моделирования, использованного для анализа оригинальных экспериментальных результатов, была выполнена совместно с сотрудниками лаборатории фотоники и нелинейной спектроскопии кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения со списком литературы. В конце каждой главы сформулированы краткие итоги. Объем работы составляет 123 страницы, включая 54 рисунка и список цитируемой литературы, содержащий 194 наименования.

Содержание работы

Первая глава представляет собой обзор литературы по теме диссертационной работы. Глава состоит из трёх параграфов. Первый параграф обзора призван дать общее представление о методах решения задачи формирования однопериодных импульсов и многооктавного суперконтинуума. В нем рассматриваются различные методы получения предельно коротких импульсов в лазерном генераторе, широкополосном оптическом параметрическом усилителе, с помощью синтезаторов сложных волновых форм или при уширении спектра за счет фазовой модуляции в нелинейной среде. Акцент сделан на самокомпрессии импульса в солитонном режиме в полых антирезонансных волноводах, заполненных газом под давлением. Во втором параграфе описываются подходы к стабилизации фазы поля относительно огибающей (carrier-envelope phase, CEP) лазерных импульсов с помощью активной подстройки дисперсии резонатора и пассивного вычитания фазы в процессе параметрического усиления, что часто используется при работе с мощными инфракрасными импульсами. В третьем параграфе обсуждаются особенности и преимущества применения фазостабильных однопериодных импульсов для актуальных задач сверхбыстрой нелинейной спектроскопии. Особенно выделяются применения такого излучения для исследования сверхбыстрой электронной динамики в твердых телах ввиду активного развития этого направления в настоящее время.

Вторая глава посвящена демонстрации экспериментальной техники, применяемой и созданной для достижения целей диссертационной работы. Глава состоит из трёх параграфов. Первый параграф содержит описание фемтосекундного лазерного комплекса, служившего источником сверхкоротких инфракрасных импульсов, которые использовались в экспериментальных исследованиях. Данный комплекс состоит из титан-сапфировой лазерной системы с модернизированным в ходе работы параметрическим усилителем, позволяющим получать фемтосекундные импульсы холостой волны в диапазоне 1.8-2.2 мкм с энергией порядка 200 мкДж. Это излучение обладает стабильной фазой поля относительно огибающей за счет пассивной стабилизации в процессе оптического параметрического усиления. Техника измерения флуктуаций CEP от импульса к импульсу описана во втором параграфе, в котором исследуется стабильность фазы холостой волны и возможность управлять её значением. В последнем параграфе рассмотрен экспериментальный метод характеристики однопериодных импульсов с многооктавным спектром в ближнем и среднем

ИК диапазоне. Используемый подход основан на модификации метода прямого восстановления поля методом спектральной интерферометрии (SPIDER), в котором информация о спектральной фазе кодируется с помощью пространственной, а не частотной карты спектральной интерференции (X-SEA-F-SPIDER).

В третьей главе демонстрируются экспериментальные результаты исследования солитонной динамики импульса при его распространении в полом антирезонансном волноводе, заполненном аргоном под давлением. В главе демонстрируется возможность использования такого режима компрессии сверхкоротких импульсов для получения однопериодных инфракрасных импульсов с многооктавным спектром и со стабильной СЕР. В главе обсуждается применение новых антирезонансных волноводов револьверного типа для осуществления солитонной самокомпрессии импульсов ближнего инфракрасного диапазона (с центральной длиной волны около 2 мкм). Рассматриваются аналитические критерии описания данного режима распространения, а также экспериментальное наблюдение сопутствующих эффектов, возникающих при распространении мощных сверхкоротких лазерных импульсов в полом антирезонансном волокне.

Третья глава состоит из пяти параграфов. В первом параграфе рассматриваются основы описания распространения импульса в режиме солитонной самокомпрессии, в котором нелинейный положительный набег фазы, вызванный эффектом фазовой самомодуляции (ФСМ), компенсируется отрицательной дисперсией групповых скоростей среды. В результате, динамика распространения излучения характеризуется уширением спектра импульса за счет нелинейности среды и его компрессии во временном представлении за счет компенсации спектральной фазы. В параграфе представлены аналитические параметры, такие как солитонное число и характерные длины, которые используются для определения условий эксперимента, необходимых для компрессии импульса до предельно малой длительности. В то же время подчеркивается, что для полноценного описания динамики распространения импульса необходимо применять более сложные численные модели, учитывающие основные эффекты: дисперсию высших порядков, керровскую нелинейность и генерацию третьей гармоники, самоукручение заднего фронта импульса, а также эффекты, связанные с образованием плазмы.

Второй параграф посвящен описанию полого антирезонансного волновода,

используемого во всех экспериментах, представленных в данной работе. Данное волокно имеет револьверную структуру поперечного сечения (Рис. 1а), состоящую из шести тонкостенных капилляров, окружающих полую сердцевину, в которой распространяется излучение. Диаметр сердцевины используемого в работе волокна составляет $D = 70$ мкм, диаметры капилляров $d = 36$ мкм, а толщина стенки капилляра $t \approx 590$ нм. Условия волноводного распространения света в сердцевине можно качественно описать в терминах многолучевой интерференции на тонких стенках капилляров Рис. 1б. При выполнении резонансного условия $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0 = 2\pi k$, наложенного на разность фаз между прошедшим и дважды отразившимся излучением, свет эффективно проходит сквозь стенку капилляра, что приводит к большим волноводным потерям. С другой стороны, выполнение антирезонансного условия $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0 = (2k + 1)\pi$ обеспечивает отражение излучения от стенок капилляров и сохранение его в сердцевине волновода. Такое качественное описание позволяет с хорошей точностью определить положения резонансов структуры, однако для более глубокого анализа потерь и дисперсионных свойств волновода необходимо применить модель, способную дать информацию о комплексном эффективном показателе преломления $n(\omega)$ подобной волноводной структуры [45]. Результаты такого анализа, показанные на Рис. 1в, демонстрируют, что при $\lambda > 1.3$ мкм выбранный волновод имеет малые потери (эксперимент – черная кривая, теория – затенение) и отрицательную дисперсию групповых скоростей (красная пунктирная линия). Таким образом, данный волновод является перспективным инструментом для реализации солитонной самокомпрессии мощных импульсов ближнего и среднего ИК-диапазона, в том числе импульсов холостой волны с центральной длиной волны около 2 мкм.

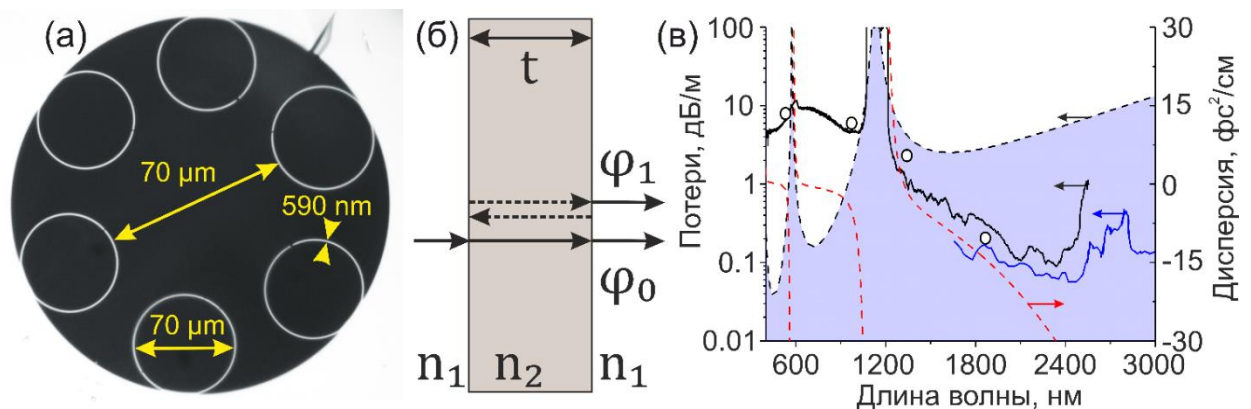


Рис. 1. (а) Изображение поперечного сечения полого антирезонансного световода; (б) Схема многолучевой интерференции на тонкой стенке капилляра; (в) Зависимость потерь и дисперсии групповых скоростей от длины волны.

В третьем параграфе представлены результаты экспериментального исследования распространения излучения в полном антирезонансном волноводе, заполненном аргоном под давлением. В эксперименте исследовались временные и спектральные параметры излучения на выходе из волокна длиной $L = 21$ см, при различных значениях энергии импульсов на входе и различных значениях давления газа в волокне. Центральная длина волны входных импульсов составляла $\lambda_0 \approx 2.1$ мкм, а длительность $\tau_0 \approx 55$ фс. Результаты экспериментов, полученные при увеличении энергии импульсов на входе в волновод при различных значениях давления аргона, изображены на Рис. 2. Для всех значений давления эксперимент демонстрирует качественно одинаковую зависимость – на первом этапе удлинение импульса (Рис. 2а) и сужение спектра (Рис. 2б) при увеличении входной энергии, а впоследствии уширение спектра и компрессия импульса вплоть до предельно малой длительности. Обужение спектра при малых значениях энергии объясняется эффектом спектральной компрессии, возникающей из-за отрицательного чирпа (≈ -950 фс²) импульсов на входе в волновод. Действие фазовой самомодуляции на отрицательно чирпированный импульс приводит к обужению спектра и удлинению импульса одновременно с компенсацией фазы. После достижения спектрально ограниченного импульса, с более узким спектром, распространение излучения продолжается по стандартному сценарию солитонной самокомпрессии, в котором спектр импульса уширяется за счет ФСМ, а длительность уменьшается за счет отрицательной дисперсии групповых скоростей волновода, заполненного аргоном.

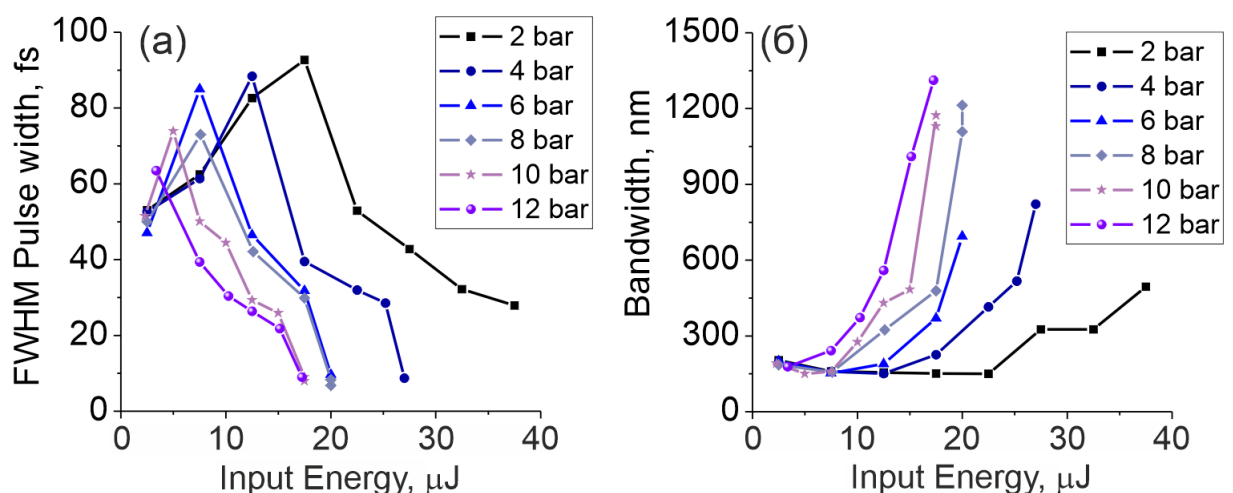


Рис. 2. Длительность (а) и ширина спектра (б) импульса на выходе полого антирезонансного волновода с $L \approx 21$ см в зависимости от энергии входного импульса с $\lambda_0 \approx 2.1$ мкм, $\tau_0 \approx 55$ фс при давлении аргона, указанном на панелях.

Так как нелинейность среды прямо пропорциональна давлению газа, эффект фазовой самомодуляции, приводящий к компрессии импульса, с ростом давления начинает проявляться при меньших значениях энергии на входе E_0 . Так, минимальная длительность импульса была достигнута при $E_0 \approx 17$ мкДж в случае давления в 12 бар и при $E_0 \approx 29$ мкДж при давлении 4 бар. При давлении аргона в 2 бара не удалось наблюдать компрессии импульса до предельно малой длительности и настолько значительного уширения спектра, поскольку при $E_0 \geq 40$ мкДж доля энергии, не заводящаяся в волновод, оказалась достаточной, чтобы повреждать тонкие капилляры на переднем торце волокна. При всех остальных значениях p наблюдалось характерное для солитонной самокомпрессии резкое уменьшение длительности импульса до предельно малых значений.

В четвертом параграфе описывается полная характеристика импульса с минимальной измеренной длительностью, который был получен в экспериментах с полым антирезонансным волокном длиной $L \approx 21$ см, заполненным аргоном при давлении газа $p \approx 8$ бар и накачиваемым лазерными импульсами с центральной длиной волны $\lambda_0 \approx 2.1$ мкм, длительностью $\tau_0 \approx 55$ фс и с энергией импульса $E_0 \approx 21$ мкДж. Импульс на выходе из волновода был охарактеризован методом X-SEA-F-SPIDER, а на Рис. 3а изображена его интерферограмма. С помощью этого метода удалось измерить спектр импульса в инфракрасной области ($\lambda > 1.1$ мкм, затенение на Рис. 3б) и восстановить его спектральную фазу (красная линия на Рис. 3б). Это позволяет охарактеризовать временную форму импульса и определить длительность импульса на выходе из волновода величиной $\tau_s \approx 6.6$ фс. С учетом центральной длины волны, оцениваемой как $\lambda_s \approx 1.9$ мкм, длительность импульса соответствует приблизительно одному периоду колебания поля $T_s \approx 6.3$ фс. Учитывая, что энергия центрального предельно короткого пика составила $E_s \approx 9.8$ мкДж, его пиковая мощность достигает гигаваттного значения $P_s \approx 1.5$ ГВт. Флуктуации СЕР импульсов, измеренные с помощью f-2f интерферометра на выходе из волновода, ограничиваются значением $\text{RMS} \approx 146$ мрад (Рис. 3д), а абсолютное значение фазы может управляться с помощью системы подстройки с обратной связью. Таким образом, в данном параграфе продемонстрирована возможность получения однопериодных гигаваттных инфракрасных импульсов со стабильной фазой поля относительно огибающей, которые могут быть использованы для исследования фазочувствительных сверхбыстрых процессов в газах, жидкостях и твердых телах.

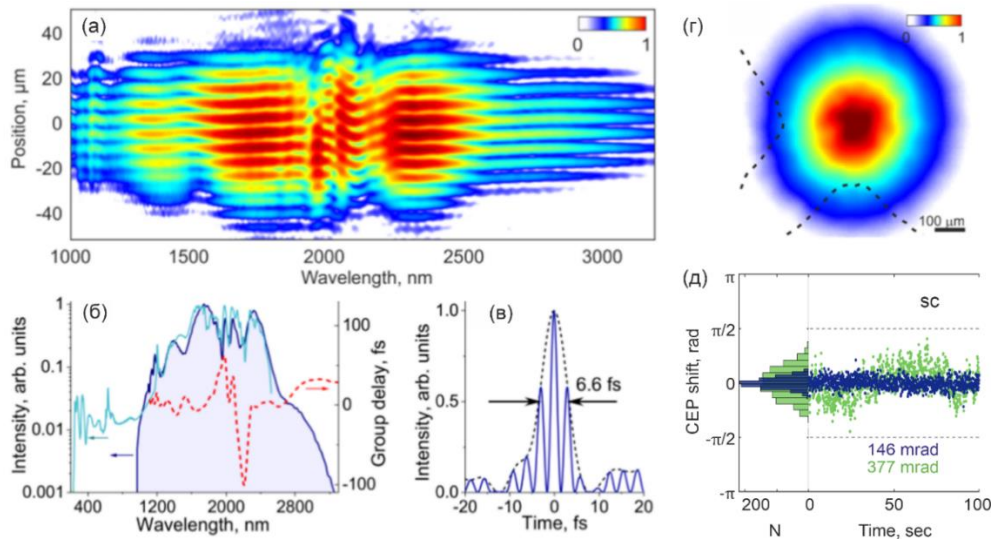


Рис. 3. Характеризация импульса на выходе из полого волокна с $L \approx 21$ см и $p \approx 8$ бар, накачиваемого импульсами с $\lambda_0 \approx 2.1$ мкм, $\tau_0 \approx 55$ фс и $E_0 \approx 21$ мкДж. (а) Интерферограмма X-SEA-F-SPIDER выходного сигнала суперконтинуума в ИК диапазоне; (б) Спектральная интенсивность, измеренная с помощью спектрометров (голубая линия) и полученная из измерений X-SEA-SPIDER (синяя линия с затенением), вместе со спектральной фазой (красная линия) и (в) поле импульса при $\phi_{\text{CEP}} = 0$ (синяя линия) вместе с его огибающей (черная линия). (г) Профиль пучка суперконтинуума на выходе из полого антирезонансного волновода во всем спектральном диапазоне. (д) Флуктуации CEP излучения суперконтинуума от импульса к импульсу без медленной активной стабилизации (синие точки) и с медленной подстройкой (зеленые точки)

Интерференционный метод X-SEA-F-SPIDER позволяет получать информацию о спектральных и временных характеристиках излучения в инфракрасном диапазоне. Измерение профиля пучка с помощью пироэлектрической камеры в этом диапазоне показывает, что суперконтинуум распространяется преимущественно в фундаментальной волоконной моде LP_{01} (Рис. 3г). В то же время, с помощью спектрометра можно показать, что часть излучения преобразуется в ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазон (Рис. 3в, голубая линия). Подробный анализ с использованием набора узкополосных спектральных фильтров, описанный в пятом параграфе, выявил особенности модового состава в этой части суперконтинуума (Рис. 4). Различные спектральные области были выделены с помощью узкополосных фильтров на длинах волн 245 нм, 355 нм, 445 нм, 620 нм, 700 нм, 850 нм и 1064 нм. Такой набор фильтров позволил выделить спектральные области, в которых проявляются различные пространственные свойства излучения: области дисперсионной волны (Рис. 4, фиолетовая область), резонансов волновода (Рис. 4, синяя, голубая и зеленая области), спектральной интерференции с высокой видностью (Рис. 4, желтая область),

малых потерь волновода (Рис. 4, оранжевая и красная области). Каждому из диапазонов поставлено в соответствие изображение поперечного сечения излучения на выходе из волновода. Видно, что часть излучения перетекает в высшие волоконные моды в области резонансов волноводной структуры. Кроме того, было обнаружено, что в видимой части суперконтинуума выполняются условия фазового согласования, приводящие к генерации третьей гармоники в высших волноводных модах и модах капилляров вблизи 620 нм. Также было показано, что излучение третьей гармоники, генерирующееся в условиях фазового синхронизма на длине волны 700 нм может быть использовано для измерения флуктуаций фазы поля относительно огибающей импульсов на выходе из волновода с помощью f-3f интерферометрии.

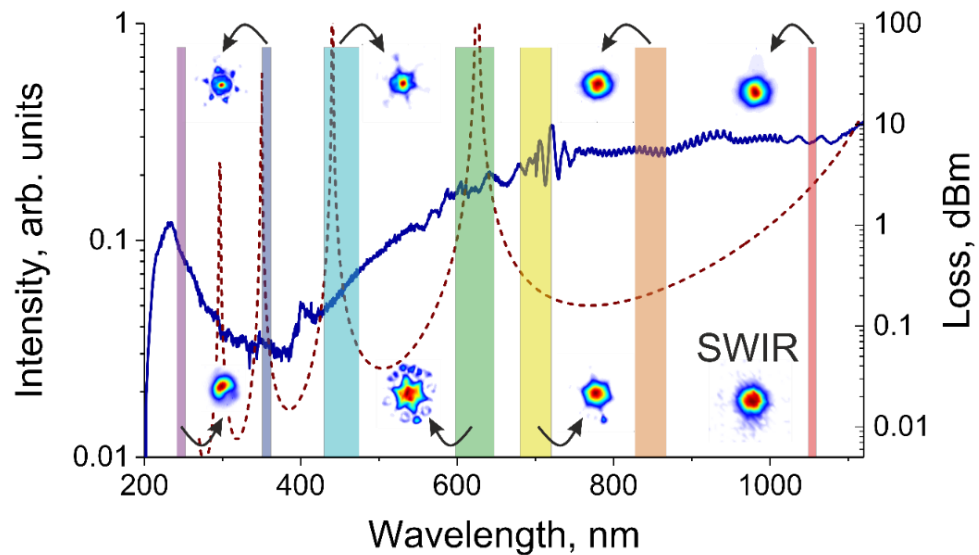


Рис. 4. Спектр видимой и ближней инфракрасной части многооктавного суперконтинуума на выходе из волновода (синяя линия) и рассчитанные с помощью аналитической модели потери волновода в фундаментальной моде (красная пунктирная линия). Во вставках, поперечные моды, соответствующие выделенным спектральным диапазонам.

В **четвертой** главе представлены результаты экспериментальных и численных исследований эффектов, чувствительных к фазе поля относительно огибающей импульса. В главе проведен численный анализ на основе обобщенного нелинейного уравнения Шрёдингера (ОНУШ), с помощью которого исследуется природа зависимости спектра видимой части многооктавного суперконтинуума от фазы импульса на входе в волновод. Кроме этого, в главе показаны результаты спектроскопии фотоионизации селенида цинка в схеме накачка-зондирование. Продемонстрировано, что образование плазмы мощным инфракрасным импульсом накачки в толстых

образцах ($l \geq 200$ мкм) ZnSe приводит к подавлению спектра пробного импульса в видимом диапазоне на $\approx 95\%$ за счёт плазменного поглощения и рефракции. Показано, что ионизация тонкой пленки ZnSe толщиной 1 мкм приводит к спектральному уширению, чувствительному к СЕР импульса накачки. Численный анализ показывает, что новые фазочувствительные спектральные компоненты генерируются за счёт плазменной нелинейной добавки к показателю преломления и нелинейного плазменного поглощения, что демонстрирует возможность управления электронной динамикой в твердом теле с помощью СЕР, а также возможность получения абсолютного значения фазы. Глава состоит из трех параграфов.

В первом параграфе представлено теоретическое описание распространения сверхкороткого импульса в нелинейной среде с помощью обобщенного нелинейного уравнения Шрёдингера для электрического поля. В данной модели учитывается влияние дисперсии высших порядков, фазовой само- и кроссмодуляции, генерации третьей гармоники, эффекта самоукручения заднего фронта импульса и плазменных эффектов. Так как уравнение записано для поля, а не для комплексной амплитуды, оно позволяет исследовать процессы, чувствительные к СЕР. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными производится с помощью спектрального анализа нелинейного преобразования сверхкоротких импульсов в полном волноводе (Рис. 5). Для этого был измерен спектр излучения на выходе из волновода в зависимости от входной энергии импульса при давлении аргона в волноводе равном 4 бар. В данном эксперименте импульсы холостой волны на входе в волновод имели длительность $\tau_0 \approx 62$ фс на центральной длине волны $\lambda_0 \approx 2$ мкм (Рис. 5а,б). Такие импульсы также использовались в качестве начального в численном моделировании. Экспериментальные (Рис. 5в) и численные (Рис. 5г) результаты демонстрируют динамику спектрального уширения импульса в режиме солитонной самокомпрессии, дополненной эффектом самоукручения заднего фронта импульса и параметрической генерацией четырехволновых компонент на синем крыле спектра сжимающегося солитона. На Рис. 5д изображены выходные спектры при энергии импульсов холостой волны ≈ 21.8 мкДж полученные в эксперименте (красная линия) и с помощью численного моделирования (голубое затенение). Как можно заметить, полученный численно спектр повторяет основные особенности формы экспериментального многооктавного суперконтинуума, а также предсказывает усиление ультрафиолетовой дисперсионной волны.

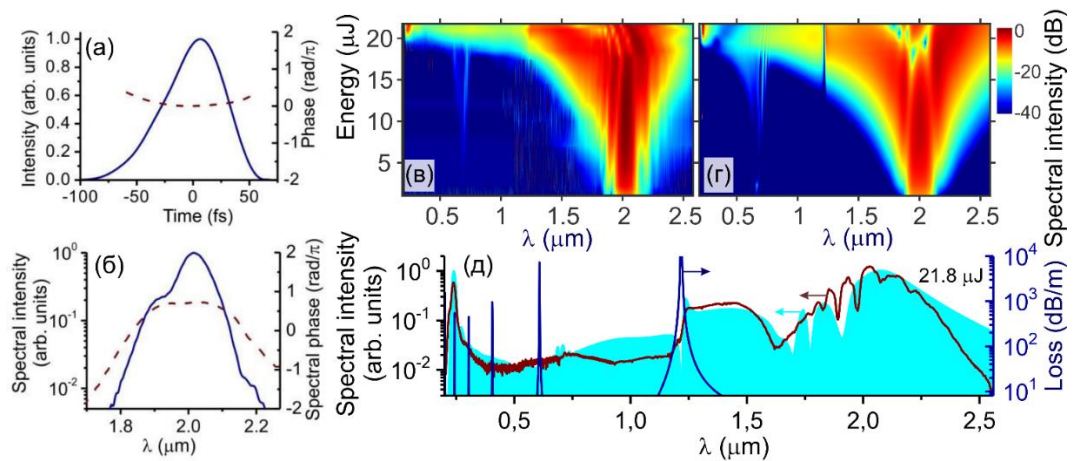


Рис. 5. (а) Временная огибающая (синяя линия) и фаза (красная линия); (б) спектр (синяя линия) и спектральная фаза (красная линия) импульса на входе в волновод. (в, г) Генерация суперконтинуума в полом антирезонансном волноводe как функция энергии входного излучения, полученная (в) экспериментально и (г) с помощью решения уравнения распространения (4.1). (д) Экспериментальный (красная линия) и полученный численно (голубое затенение) спектр суперконтинуума на выходе из волновода при входной энергии импульса равной 21.8 мкДж. Синие линии показывают потери волновода вблизи резонансных длин волн.

Во втором параграфе исследуется чувствительность видимой части суперконтинуума на выходе из волновода к значению СЕР входных импульсов. Как видно из экспериментальной спектрально-фазовой диаграммы Рис. 6а, осцилляции с периодом π спектральной интенсивности при изменении СЕР наблюдаются в диапазоне ≈ 400 - 800 нм. С помощью численного анализа (Рис. 6б), подтверждающего эту зависимость, в работе показано, что флуктуации спектра с периодом π возникают за счёт спектральной f-3f интерференции, которая вносит основной вклад в наблюдаемую в эксперименте чувствительность к фазе. Решение ОНУШ позволяет исследовать спектральную и временную эволюцию импульса на протяжении волновода. На начальной стадии распространения, наблюдается постепенное уширение спектра и генерация излучения третьей гармоники одновременно с уменьшением длительности импульса. По мере компрессии импульса эффект фазовой самомодуляции усиливается, и, при прохождении расстояния ≈ 20 см, происходит резкое уширение спектра в высокочастотную область за счёт самоукручения волнового фронта, вызванного формированием импульса с длительностью менее одного периода поля. Одновременно с уширением спектра происходит генерация широкополосной третьей гармоники от инфракрасной части предельно короткого солитона. Интерференция синего крыла солитона и третьей гармоники от его инфракрасной части дает наблюдаемые флуктуации спектра с периодом π .

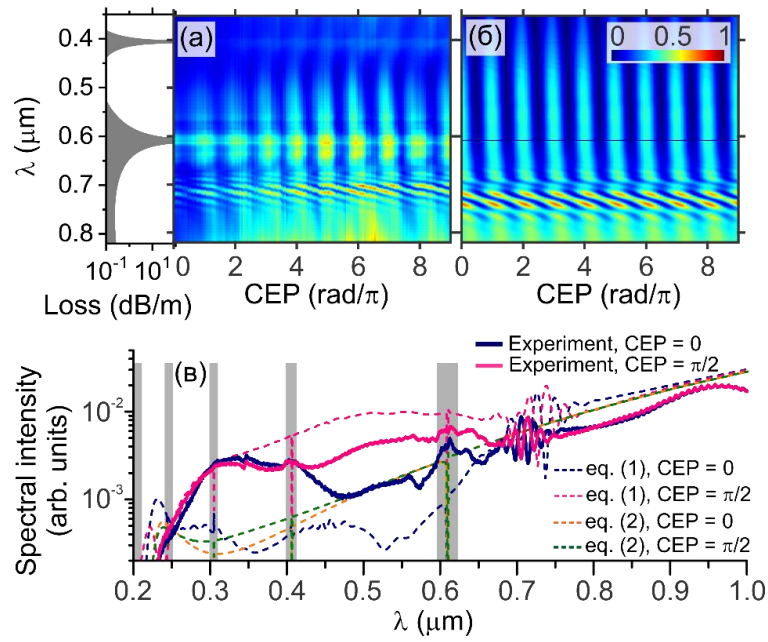


Рис. 6. (а) Экспериментальные и (б) расчётные спектрально-фазовые диаграммы для импульсов с входной энергией 19,5 мкДж, при давлении аргона 4 бар; расчётные потери волновода показаны слева. (с) Экспериментальные (сплошные линии) и численные (штриховые линии) спектры видимого и ближнего ИК-излучения суперконтинуума с CEP импульса накачки, равным нулю (синие и оранжевая линии) и $\pi/2$ (розовые и зеленая линии). Спектры, рассчитанные без учета третьей гармоники, показаны зеленой и оранжевой линиями. Резонансные длины волн волокна обозначены вертикальными серыми линиями.

Наблюдаемая в эксперименте в виде вертикальных полос (Рис. 6а,б) сфазированность третьей гармоники в широком диапазоне является следствием и индикатором малой длительности импульса, получаемого в результате самокомпрессии солитона в волноводе. Она не только свидетельствует о близкой к постоянной спектральной фазе солитона на основной частоте, но также и позволяет оценить спектральную фазу излучения в диапазоне третьей гармоники с помощью анализа фазовой картины из Рис. 6а. С помощью Фурье-анализа можно восстановить разность фаз солитона $\phi_s(\omega)$ и третьей гармоники $\phi_{TH}(\omega)$: $\phi_{dif}(\omega) = \phi_s(\omega) - \phi_{TH}(\omega)$. Значение $\phi_{TH}(\omega)$ можно оценить с помощью известной фазы солитона в инфракрасной области (>1060 нм), полученной экспериментально методом X-SEA-F-SPIDER (кривая 1 Рис. 7а). Таким образом, используя экспериментально полученные значения $\phi_{dif}(\omega)$ и $\phi_{TH}(\omega)$, можно вычислить $\phi_s(\omega) = \phi_{dif}(\omega) + \phi_{TH}(\omega)$ (кривые 2 и 6 на Рис. 7а) в почти октавном спектральном диапазоне от 390 нм до 670 нм. Спектральная фаза в диапазоне 670-1050 нм берется из численного расчёта, ввиду хорошего совпадения эксперимента с теорией. Используя восстановленную описанным выше методом спектральную фазу и измеренную спектральную интенсивность (Рис. 7б), можно получить временные характеристики импульса с многооктавным спектром (от ≈ 390 нм

до ≈ 2600 нм). На Рис. 7в изображен временной профиль интенсивности полученного субпериодного импульса. Его длительность составляет около ≈ 2.5 фс, что соответствует ≈ 0.42 периодам поля на его центральной длине волны ≈ 1.8 мкм. Полная энергия импульса на выходе из антирезонансного волновода составила ≈ 17.5 мкДж, а энергия, содержащаяся в основном пике длительностью ≈ 2.5 фс можно оценить в ≈ 10 мкДж, что соответствует пиковой мощности ≈ 2.1 ГВт.

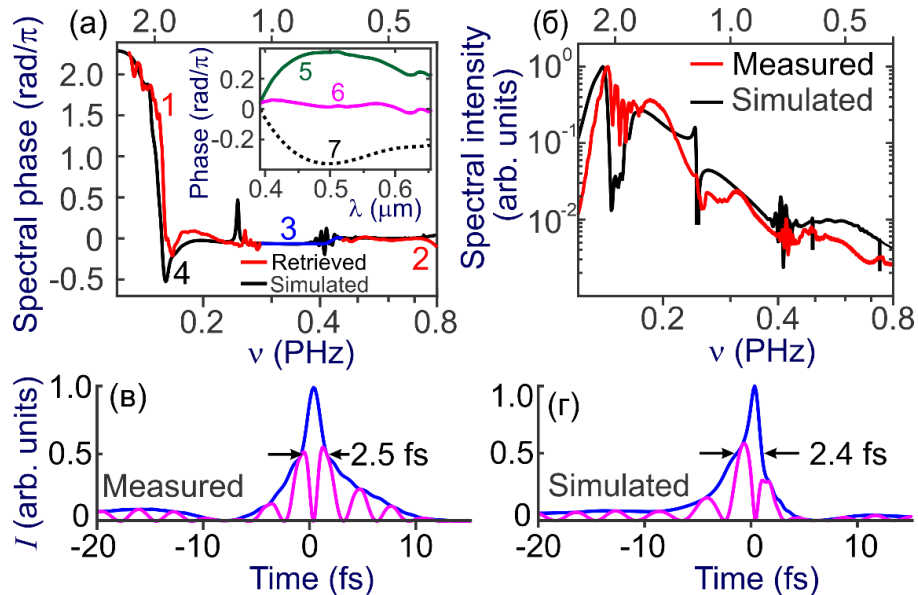


Рис. 7. (а) Спектральная фаза импульса на выходе из волновода, восстановленная с помощью X-SEA-F-SPIDER (кривая 1), с помощью карт Рис. 6 (кривая 2), экстраполированная (кривая 3) и смоделированная (кривая 4). На вставке показана спектральная фаза третьей гармоники $\varphi_{TH}(\omega)$ (кривая 5), полученная спектральная фаза солитона (кривая 6) и разность фаз $\varphi_{dif}(\omega)$ (кривая 7). (б) Экспериментальный (красная линия) и смоделированный (черная линия) спектр импульса. (в) Экспериментально и (г) численно полученная интенсивность субпериодного импульса и его огибающая интенсивности.

В третьем параграфе показано использование однопериодных фазостабильных импульсов для исследования высоконелинейных сверхбыстрых процессов и управления такими явлениями с помощью нестационарной и фазочувствительной спектроскопии селенида цинка (ZnSe) в схеме накачка-зондирование. Импульсы накачки в данных экспериментах имели длительность $\tau_p \approx 8.3$ фс, что при центральной длине волны $\lambda_p \approx 1720$ нм составляет ≈ 1.45 периода поля. Зондирующие импульсы были получены с помощью ап-конверсии этого излучения в видимый диапазон (460-600 нм) с сохранением длительности $\tau_{pr} \approx 8.3$ фс. На Рис. 8 представлена зависимость спектра зондирующего импульса, прошедшего через пластинку ZnSe толщиной 2 мм, от задержки между ним и импульсом накачки. Пересечение

импульсов в образце во времени характеризуется подавлением спектральных компонент зондирующего импульса, достигающим 95% и объясняемым плазменной рефракцией, возникающей за счёт образования градиента показателя преломления, рассеивающего зондирующее излучение. Характерная зависимость подавления от задержки между отметками T_1 и T_3 с хорошей точностью объясняется дисперсией ZnSe, благодаря которой короткий инфракрасный импульс постепенно догоняет удлиняющийся пробный, подавляя спектральные компоненты, с которыми успел провзаимодействовать до выходного торца образца. Анализ картины на Рис. 8 позволяет восстановить дисперсию селенида цинка в спектральном диапазоне зондирующего импульса вблизи границы запрещенной области.

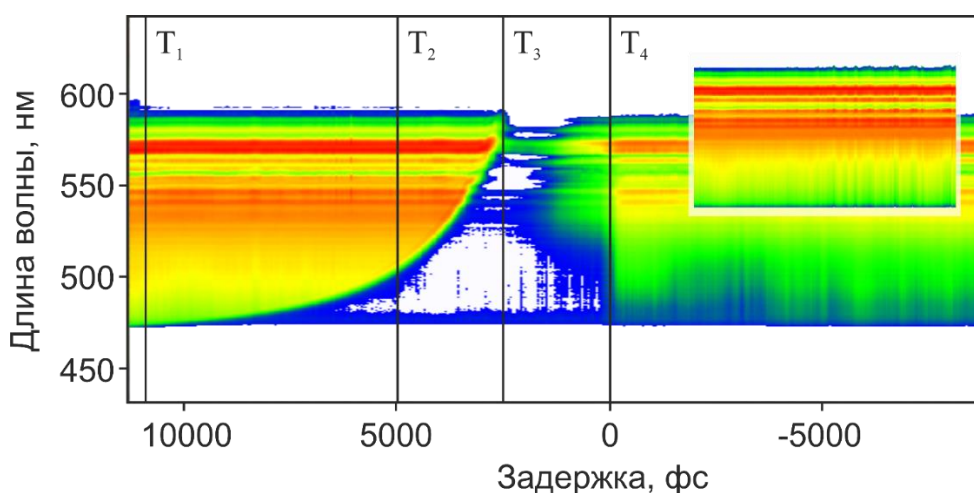


Рис. 8. Зависимость спектра пробного импульса от задержки между ним и импульсом накачки при прохождении пластинки из ZnSe толщиной 2 мм. Во вставке та же зависимость в отсутствие образца.

В параграфе также показан эксперимент, произведенный с помощью схемы накачка-зондирование, в котором образцом является пленка ZnSe толщиной 1 мкм, напыленная на подложку из CaF_2 . В этом случае дисперсия материала вносит пренебрежимо малый вклад в спектральную фазу импульса, поэтому становится возможным исследовать нелинейный отклик вещества на воздействие инфракрасного импульса накачки предельно малой длительности. На Рис. 9а-е показаны длинноволновый и коротковолновый края спектра зондирующего импульса после прохождения сквозь образец. В случае максимального пересечения импульсов в образце (Рис. 9в, д) отчетливо наблюдается генерация новых спектральных компонент как на длинноволновом, так и на коротковолновом краях спектра зондирующего импульса, причем наблюдается осцилляция спектральной интенсивности новых компонент с периодом π при изменении фазы $\phi_{\text{СЕР}}$. Результаты

эксперимента подтверждаются численным решением ОНУШ для пробного импульса с учетом фотоионизации, наводимой импульсом накачки. Мгновенная интенсивность импульса накачки зависит от фазы поля относительно огибающей ϕ_{CEP} и достигает максимума при $\phi_{CEP} = 0.4$, составляя $\approx 4 \text{ ТВт/см}^2$, и минимума при $\phi_{CEP} = 2.4$, составляя $\approx 1.5 \text{ ТВт/см}^2$ (Рис. 9ж). Это приводит к варьированию электронной плотности $\rho(z, t)$ от $0.1 \cdot 10^{20}$ до $1.5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ при изменении ϕ_{CEP} от 0.4 до 2.4 радиан (Рис. 9з). Для сравнения, критическая плотность плазмы на длине волны 1.7 мкм составляет $\rho_c = \omega_{pu}^2 m_e \epsilon_0 / e^2 \approx 3.8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, где e – заряд электрона. Таким образом, отношение ρ/ρ_c колеблется от 0.03 до 0.4. Временной профиль электронной плотности приводит к зависимым от ϕ_{CEP} нелинейной плазменной добавке к показателю преломления $\delta n_{pl}(z, t, \phi_{CEP}) \approx -\rho(z, t, \phi_{CEP})/(2n_{pr}\rho_c)$ и нелинейному плазменному поглощению $\alpha_{pl}(z, t, \phi_{CEP}) \approx \sigma(\omega_{pr})\rho(z, t, \phi_{CEP})/2$, на которых рассеивается поле зондирующего импульса, генерируя по бокам спектра новые, зависящие от фазы компоненты. Этот результат демонстрирует возможность управления электронной динамикой в твердом с помощью CEP, а также позволяет измерить абсолютное значение фазы поля относительно огибающей импульса накачки в момент прохождения через образец.

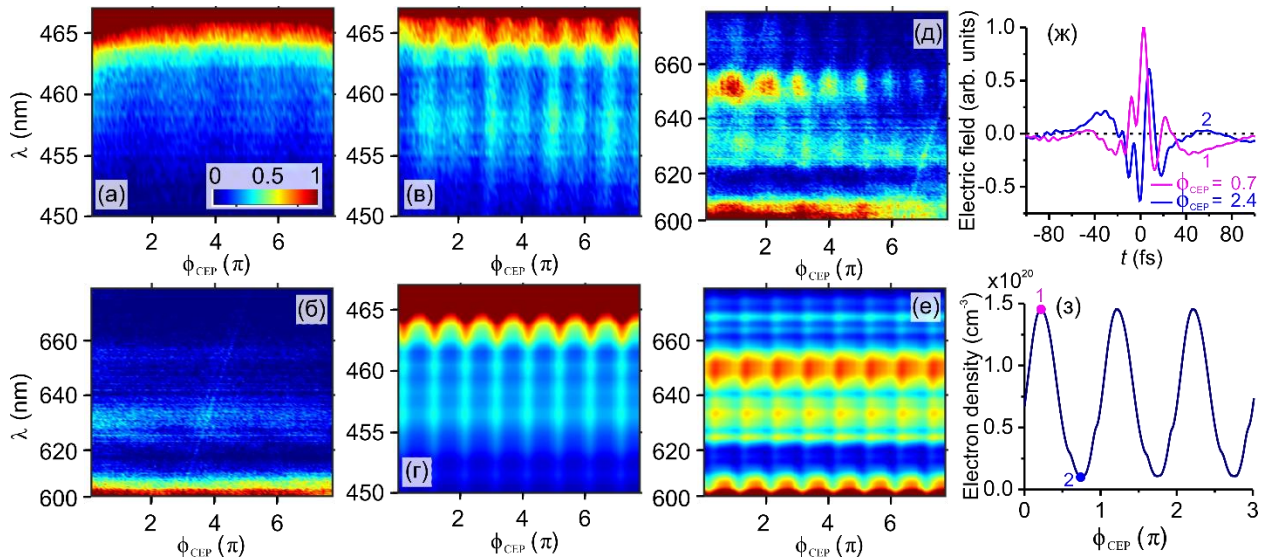


Рис. 9. Зависимости выходного спектра зондирующего импульса от фазы несущей относительно огибающей импульса накачки после прохождения тонкой пленки ZnSe толщиной 1 мкм. Задержка была настроена на большое отставание импульса накачки без его пересечения с зондирующим импульсом (а, б) и на максимальное пересечение импульсов в образце (в - е). На панелях (г, е) показаны результаты моделирования. (ж) Поле импульса накачки при двух значениях фазы несущей относительно огибающей $\phi_{CEP} = 0.78 \text{ рад}$ (1) и $\phi_{CEP} = 2.4 \text{ рад}$ (2). (з) Расчётная зависимость электронной плотности на заднем фронте импульса накачки от фазы ϕ_{CEP} несущей относительно огибающей импульса накачки.

Заключение

В работе продемонстрирована генерация многооктавного суперконтинуума в полном антирезонансном волноводе револьверного типа, заполненным аргоном под давлением. В результате нелинейно-оптических преобразований, возникающих при распространении импульса с длительностью 55 фс и длиной волны 2.1 мкм и энергией порядка 20 мкДж, формируется излучение со спектром, лежащим в диапазоне от 0.2 до 3.2 мкм. Показано, что инфракрасная часть излучения формируется в основной LP_{01} волноводной моде, а в видимом диапазоне часть излучения преобразуется в высшие моды сердцевин и моды капилляров за счет резонансов структуры или выполнения условий синхронизма генерации третьей гармоники в высших модах.

Показана возможность формирования фазостабильных однопериодных лазерных импульсов в режиме солитонной самокомпрессии в полых антирезонансных световодах. Восстановленная с помощью техники X-SEA-F-SPIDER спектральная фаза инфракрасной части импульса (> 1.0 мкм), демонстрирует компрессию импульса до длительности 6.6 фс, что соответствует одному периоду колебания поля на центральной длине волны импульса 1.9 мкм. Энергия центрального предельно короткого пика составила $E_s \approx 9.8$ мкДж, при этом его пиковая мощность достигает ≈ 1.5 ГВт. Показано, что фаза поля относительно огибающей однопериодного импульса стабильна ($RMS = 146$ мрад) и управляется с помощью системы подстройки с обратной связью.

В видимой части спектра суперконтинуума, формируемого в полном волноводе, продемонстрирована чувствительная к фазе входного импульса широкополосная спектральная f - $3f$ интерференция синего крыла суперконтинуума и третьей гармоники инфракрасной части излучения. Анализ интерференционной картины позволяет восстановить спектральную фазу импульса на выходе из волновода в видимой области, что, совместно с использованием техники X-SEA-F-SPIDER, дало возможность впервые экспериментально подтвердить самокомпрессию импульса до субпериодной длительности в полном антирезонансном световоде. Предложенный оригинальный метод позволил оценить длительность импульса с многооктавным спектром значением 2.5 фс (0.4 периода поля на длине волны 1.8 мкм), что при энергии 10 мкДж в основном пике соответствует мощности 2.1 ГВт.

Реализован метод нестационарной спектроскопии в схеме накачка-

широкозонного полупроводника (селенида цинка) с применением однопериодных импульсов. Показано, что образование плазмы интенсивным инфракрасным импульсом накачки в объемных образцах (толщина $l \geq 200$ мкм) приводит к подавлению спектра пробного импульса в видимом диапазоне на $\approx 95\%$ за счёт плазменного поглощения и рефракции. С помощью этого эффекта восстановлен профиль дисперсии показателя преломления селенида цинка вблизи края запрещенной зоны. Показано, что фотоионизация тонкой пленки селенида цинка толщиной 1 мкм приводит к чувствительной к фазе импульса накачки генерации новых спектральных компонент. Численный анализ показал, что новые фазочувствительные спектральные компоненты генерируются за счёт плазменной нелинейной добавки к показателю преломления и нелинейного плазменного поглощения, что демонстрирует возможность управления электронной динамикой в твердом теле с помощью предельно коротких импульсов с контролируемой фазой. Кроме того, анализ данного эффекта позволяет получить информацию об абсолютном значении фазы поля относительно огибающей импульса.

Список публикаций по теме диссертации, входящих в базы данных Web of Science, Scopus, RSCI и Перечень изданий МГУ

1. **Савицкий И.В.**, Глек П.Б., Алиев Р.М., Степанов Е.А., Воронин А.А., Ланин А.А., Федотов А.Б., Метод измерения дисперсии и группового индекса диэлектриков вблизи края запрещенной зоны сверхкороткими лазерными импульсами // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия. – 2024. – Т. 79. – №. 5. – С. 1-7. – IF = 0.459 (РИНЦ) / 0.44 п.л. / Вклад соискателя – 25%.
2. **Савицкий И.В.**, Глек П.Б., Алиев Р.М., Степанов Е.А., Воронин А.А., Ланин А.А., Федотов А.Б., Фазочувствительная плазменная нелинейность, управляемая предельно короткими импульсами // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2024. – Т. 120. – №. 1. – С. 5–10. – IF = 0.396 (РИНЦ) / 0.32 п.л. / Вклад соискателя – 30%.
3. **Савицкий И.В.**, Воронин А.А., Степанов Е.А., Ланин А.А., Федотов А.Б., Влияние фазы несущей относительно огибающей на генерацию мультиоктавного суперконтинуума и предельно коротких импульсов в полых антирезонансных световодах // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2023. – Т. 118. - №. 7. – С. 493–501. – IF = 0.396 (РИНЦ) / 0.5 п.л. / Вклад соискателя – 40%.
4. **Savitsky I.V.**, Voronin A.A., Stepanov E.A., Lanin A.A., Fedotov A.B., Sub-cycle pulse revealed with carrier-envelope phase control of soliton self-

- compression in anti-resonant hollow-core fiber // Optics Letters. – 2023. – V. 48. -№. 17. – P. 4468-4471. – JIF = 3.1 (WoS) / 0.25 п.л. / Вклад соискателя – 40%.
5. **Савицкий И.В.**, Степанов Е.А., Ланин А.А., Федотов А.Б., Модовый состав излучения суперконтинуума предельно коротких импульсов в полых антирезонансных волноводах // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2023. – Т. 117. - №. 3-4. – С. 285–291. - IF = 0.396 (РИНЦ) / 0.38 п.л. / Вклад соискателя – 30%.
 6. **Savitsky I.V.**, Stepanov E.A., Lanin A.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M., Single-Cycle, Multigigawatt Carrier–Envelope-Phase-Tailored Near-to-Mid-Infrared Driver for Strong-Field Nonlinear Optics // ACS Photonics. – 2022. – V. 9. – №. 5. – P. 1679-1690. – JIF = 6.5 (WoS) / 1 п.л. / Вклад соискателя – 30%.
 7. **Савицкий И.В.**, Степанов Е.А., Ланин А.А., Воронин А.А., Серебрянников Е.Е., Иванов А.А., Ху М., Ли Я., Федотов А.Б., Желтиков А.М., Измерение временной структуры поля и фазы несущей однопериодных импульсов ближнего и среднего инфракрасного диапазона // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, - 2022. – Т. 115. – №. 7. – С. 437–443. – IF = 0.396 (РИНЦ) / 0.38 п.л. / Вклад соискателя – 25%.

Список использованной литературы

1. Ахманов С.А., Высоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. Москва: Наука, 1988. 312 p.
2. Brabec T., Krausz F. Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics // Rev. Mod. Phys. American Physical Society, 2000. Vol. 72, № 2. P. 545–591.
3. Желтиков А.М. Сверхкороткие импульсы и методы нелинейной оптики. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 296 p.
4. Hannaford P. Femtosecond Laser Spectroscopy. Springer Science & Business Media, 2004. 368 p.
5. Boyd R.W. Nonlinear Optics. Elsevier, 2008. 635 p.
6. Mourou G.A., Tajima T., Bulanov S.V. Optics in the relativistic regime // Rev. Mod. Phys. American Physical Society, 2006. Vol. 78, № 2. P. 309–371.
7. Kärtner F.X. Few-Cycle Laser Pulse Generation and Its Applications. Springer Science & Business Media, 2004. 472 p.
8. Baltuška A. et al. Attosecond control of electronic processes by intense light fields // Nature. Nature Publishing Group, 2003. Vol. 421, № 6923. P. 611–615.
9. Krause J.L., Schafer K.J., Kulander K.C. High-order harmonic generation from atoms and ions in the high intensity regime // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 1992. Vol. 68, № 24. P. 3535–3538.
10. Sansone G. et al. Isolated Single-Cycle Attosecond Pulses // Science. American Association for the Advancement of Science, 2006.

11. Corkum P.B., Krausz F. Attosecond science // *Nat. Phys.* Nature Publishing Group, 2007. Vol. 3, № 6. P. 381–387.
12. Ghimire S. et al. Observation of high-order harmonic generation in a bulk crystal: 2 // *Nat. Phys.* Nature Publishing Group, 2011. Vol. 7, № 2. P. 138–141.
13. Ghimire S., Reis D.A. High-harmonic generation from solids // *Nat. Phys.* Nature Publishing Group, 2019. Vol. 15, № 1. P. 10–16.
14. Vampa G. et al. All-Optical Reconstruction of Crystal Band Structure // *Phys. Rev. Lett.* American Physical Society, 2015. Vol. 115, № 19. P. 193603.
15. Lanin A.A. et al. Mapping the electron band structure by intraband high-harmonic generation in solids // *Optica*. Optica Publishing Group, 2017. Vol. 4, № 5. P. 516–519.
16. Schiffrin A. et al. Optical-field-induced current in dielectrics // *Nature*. Nature Publishing Group, 2013. Vol. 493, № 7430. P. 70–74.
17. Schultze M. et al. Controlling dielectrics with the electric field of light // *Nature*. Nature Publishing Group, 2013. Vol. 493, № 7430. P. 75–78.
18. Schubert O. et al. Sub-cycle control of terahertz high-harmonic generation by dynamical Bloch oscillations // *Nat. Photonics*. Nature Publishing Group, 2014. Vol. 8, № 2. P. 119–123.
19. Vampa G. et al. Linking high harmonics from gases and solids // *Nature*. Nature Publishing Group, 2015. Vol. 522, № 7557. P. 462–464.
20. Higuchi T. et al. Light-field-driven currents in graphene // *Nature*. Nature Publishing Group, 2017. Vol. 550, № 7675. P. 224–228.
21. Sederberg S. et al. Attosecond optoelectronic field measurement in solids // *Nat. Commun.* Nature Publishing Group, 2020. Vol. 11, № 1. P. 430.
22. Hanus V. et al. Light-field-driven current control in solids with pJ-level laser pulses at 80 MHz repetition rate // *Optica*. Optica Publishing Group, 2021. Vol. 8, № 4. P. 570–576.
23. Inzani G. et al. Field-driven attosecond charge dynamics in germanium // *Nat. Photonics*. Nature Publishing Group, 2023. Vol. 17, № 12. P. 1059–1065.
24. Borsch M. et al. Lightwave electronics in condensed matter // *Nat. Rev. Mater.* Nature Publishing Group, 2023. Vol. 8, № 10. P. 668–687.
25. Heide C., Keathley P.D., Kling M.F. Petahertz electronics // *Nat. Rev. Phys.* Nature Publishing Group, 2024. Vol. 6, № 11. P. 648–662.
26. Hassan M.Th. Lightwave Electronics: Attosecond Optical Switching // *ACS Photonics*. American Chemical Society, 2024. Vol. 11, № 2. P. 334–338.
27. Baltuska A. et al. All-solid-state cavity-dumped sub-5-fs laser // *Appl. Phys. B-Lasers Opt.* 1997. Vol. 65, № 2. P. 175–188.
28. Ell R. et al. Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser // *Opt. Lett.* Optica Publishing Group, 2001. Vol. 26, № 6. P. 373–375.
29. Schibli T.R. et al. Toward single-cycle laser systems // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2003. Vol. 9, № 4. P. 990–1001.
30. Brida D. et al. Few-optical-cycle pulses tunable from the visible to the mid-infrared by optical parametric amplifiers // *J. Opt.* 2009. Vol. 12, № 1. P. 013001.

31. Dubietis A., Matijošius A., Laser Research Center, Vilnius University, Saulėtekio Avenue 10, LT-10223 Vilnius, Lithuania. Table-top optical parametric chirped pulse amplifiers: past and present // *Opto-Electron. Adv.* 2023. Vol. 6, № 3. P. 220046–220046.
32. Manzoni C. et al. Coherent pulse synthesis: towards sub-cycle optical waveforms // *Laser Photonics Rev.* 2015. Vol. 9, № 2. P. 129–171.
33. Stepanov E.A. et al. Solid-State Source of Subcycle Pulses in the Midinfrared // *Phys. Rev. Lett.* American Physical Society, 2016. Vol. 117, № 4. P. 043901.
34. Couairon * A. et al. Self-compression of ultra-short laser pulses down to one optical cycle by filamentation // *J. Mod. Opt.* Taylor & Francis, 2006. Vol. 53, № 1–2. P. 75–85.
35. Amorim A.A. et al. Sub-two-cycle pulses by soliton self-compression in highly nonlinear photonic crystal fibers // *Opt. Lett.* 2009. Vol. 34, № 24. P. 3851.
36. Nisoli M. et al. Compression of high-energy laser pulses below 5 fs // *Opt. Lett.* 1997. Vol. 22, № 8. P. 522.
37. Travers J.C. et al. Ultrafast nonlinear optics in gas-filled hollow-core photonic crystal fibers [Invited] // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2011. Vol. 28, № 12. P. A11.
38. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics*. Sixth edition. London San Diego, CA: Academic Press, 2019. 1 p.
39. Benabid F. et al. Stimulated Raman Scattering in Hydrogen-Filled Hollow-Core Photonic Crystal Fiber // *Science*. American Association for the Advancement of Science, 2002.
40. Pryamikov A.D. et al. Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow - core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region $\geq 3.5 \mu\text{m}$ // *Opt. Express*. Optical Society of America, 2011. Vol. 19, № 2. P. 1441–1448.
41. Balciunas T. et al. A strong-field driver in the single-cycle regime based on self-compression in a kagome fibre // *Nat. Commun.* Nature Publishing Group, 2015. Vol. 6, № 1. P. 6117.
42. Elu U. et al. High average power and single-cycle pulses from a mid-IR optical parametric chirped pulse amplifier // *Optica*. Optica Publishing Group, 2017. Vol. 4, № 9. P. 1024–1029.
43. Elu U. et al. Seven-octave high-brightness and carrier-envelope-phase-stable light source // *Nat. Photonics*. Nature Publishing Group, 2021. Vol. 15, № 4. P. 277–280.
44. Stepanov E.A. et al. Multioctave supercontinua from shock-coupled soliton self-compression // *Phys. Rev. A*. American Physical Society, 2019. Vol. 99, № 3. P. 033855.
45. Zeisberger M., Schmidt M.A. Analytic model for the complex effective index of the leaky modes of tube-type anti-resonant hollow core fibers // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7, № 1. P. 11761.