

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

СТЕПАНОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ
СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА
ОСНОВЕ ГЕНЕРАЦИИ ВЫСШИХ ОПТИЧЕСКИХ ГАРМОНИК**

01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

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,
Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова
доцент кафедры общей физики и волновых
процессов
- Официальные оппоненты – **Головань Леонид Анатольевич**,
доктор физико-математических наук, доцент
Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова
профессор кафедры общей физики и
молекулярной электроники
- Селезнёв Леонид Владимирович**,
доктор физико-математических наук, доцент
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
ведущий научный сотрудник
- Компанец Виктор Олегович**,
кандидат физико-математических наук,
Институт спектроскопии РАН
старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «29» июня 2022 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.01.13 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 сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/457395685/>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.01.13
кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

Общая характеристика работы

Актуальность работы

С момента начала «лазерной эры» одной из основных тенденции ее развития стало уменьшение длительности лазерных импульсов [1,2], что обеспечивает достижение более высоких пиковых мощностей и открывает возможность использования лазерных источников для изучения всё более быстрых процессов и явлений в практически необъятном спектре задач науки и технологий. Использование сверхкоротких лазерных импульсов стало одним из основных направлений развития нелинейно-оптической спектроскопии [3,4], давая возможность реализации высоких эффективностей преобразования и беспрецедентно высокого временного разрешения. При этом в задачах спектроскопии обычно требуются импульсы с умеренными уровнями энергий от нано- до сотен микроджоулей. С другой стороны, современные лазерные технологии позволяют эффективно усиливать сверхкороткие лазерные импульсы, создавая электромагнитные поля с напряженностью на 5-6 порядков превосходящей внутриатомное поле, что обеспечивает беспрецедентное расширение экспериментальных горизонтов физики высоких энергий и релятивистской электродинамики [5].

Одной из основных современных тенденций развития оптики сверхкоротких импульсов является расширение диапазона их генерации относительно ближнего инфракрасного диапазона (где присутствуют высокотехнологичные Ti:Sapphire системы с центральной длиной волны 800 нм) как в более коротковолновую, так и в длинноволновую области. Предельно короткие импульсы среднего инфракрасного диапазона (с центральной длиной волны 2-10 мкм) с длительностью порядка и менее одного периода поля представляют собой важнейший инструмент исследования сверхбыстрых процессов [6–8]. Благодаря тому, что энергия фотона в этом диапазоне частот меньше ширины запрещённой зоны большинства технологически значимых твёрдых полупроводниковых материалов, такие предельно короткие импульсы дают возможность регистрировать и управлять сверхбыстрой динамикой электронов не только на поверхности, но и в объеме полупроводника, открывая путь к прецизионному управлению физическими процессами в твёрдых телах [9–20], что определяет мощный импульс к развитию сверхбыстрой (петагерцовой) оптоэлектроники [21–25]. Квадратичная зависимость пондеромоторной энергии электрона в

поле электромагнитного импульса от центральной длины волны приводит к возникновению более мощных фотоиндуцированных токов носителей заряда, и, следовательно, к более сильному и широкополосному нелинейному оптическому отклику как в газах, так и в твёрдых телах [14–17]. Импульсы среднего инфракрасного диапазона позволяют сформировать излучение оптических гармоник в газах необычайно высокого порядка [26], и далее с их помощью возможна реализация прецизионного анализа сверхбыстрой динамики электронных волновых пакетов в разнообразных физических, химических и биологических системах [11,12,15,16,18,25]. Благодаря тому, что интенсивность излучения, необходимая для достижения релятивистского режима взаимодействия поля с веществом в базовом приближении [26] обратно пропорциональна квадрату длины волны, мощные предельно короткие импульсы среднего инфракрасного диапазона открывают пути к развитию сверхбыстрой фотоиндуцированной релятивистской электродинамики [27,28].

Степень разработанности темы исследования

Генерация импульсов длительностью около одного периода поля на центральной длине волны накладывает, в соответствии с теоремой Фурье, высокие требования на спектральную ширину излучения и возможность точного управления фазой всех спектральных компонент. Уже в конце 1980-х годов была показана возможность генерации спектрально ограниченных импульсов длительностью в несколько периодов поля в видимом диапазоне частот [29], а к настоящему времени развиты и широко применяются различные методы формирования предельно коротких импульсов длительностью порядка одного или нескольких периодов поля в ближнем инфракрасном диапазоне, включающие в себя непосредственную генерацию в осцилляторе [30,31], спектральное уширение в волноводной геометрии с последующей компенсацией фазового набега [32–34], спектрально-временное преобразование в режиме самокомпрессии в процессе филаментации в благородных газах [35–38], генерацию предельно коротких импульсов в процессе широкополосного оптического параметрического усиления [39,40], когерентный синтез предельно коротких волновых форм из нескольких импульсов различных спектральных диапазонов [41]. Распространение методов генерации и компрессии предельно коротких импульсов в области более длинных волн, в частности в средний инфракрасный спектральный диапазон, до сих пор остаётся актуальной задачей, для решения которой требуется реализация новых идей и решений - прямая генерация ограничена

отсутствием подходящих широкополосных лазерных материалов, а волноводные устройства должны обладать уникальной комбинацией свойств, объединяя в себе предельно низкие потери, определённый специфичный дисперсионный профиль и высокую оптическую нелинейность. Примерами волоконных структур, обладающих такой уникальной комбинацией свойств и позволяющих получать предельно короткие импульсы среднего инфракрасного диапазона с энергиями до сотен микроджоулей, являются полые фотонно-кристаллические волокна с оболочкой в форме решётки кагоме [42,43], а также антирезонансные волокна с оболочкой в виде одного кольца капилляров [44,45]. Для эффективной нелинейно-оптической компрессии импульсов, обладающих меньшей энергией (до десятка микроджоулей), реализуются иные подходы, связанные с применением материалов, обладающих большей нелинейностью по сравнению с газами. Поэтому начиная с пионерской работы [46], в настоящее время активно развиваются методики нелинейного преобразования и компрессии сверхкоротких импульсов среднего инфракрасного диапазона в твердых телах. При этом основные трудности в масштабировании по энергии и длине волны относительно газовых сред связаны со сложной пространственно-временной солитонной динамикой волновых пакетов в твердых телах. Изложенные современные тенденции развития методов генерации и перспективы использования предельно коротких импульсов среднего инфракрасного диапазона определили направление выполненных и представленных в диссертационной работе исследований.

Цели и задачи диссертационной работы

Развитие существующих и реализация новых методов формирования лазерных импульсов длительностью порядка одного периода поля в среднем и ближнем инфракрасном диапазоне (2 – 8 мкм) с энергиями от единиц до нескольких десятков микроджоулей. Эти методы включают использование нелинейно-оптических преобразований фемтосекундных импульсов в твердотельных и газовых средах, в том числе с применением волоконных технологий на основе широкополосных полых фотонно-кристаллических световодов. Получаемые импульсы используются для реализации новых методик нелинейной спектроскопии на основе генерации высших оптических гармоник для зондирования сверхбыстрой электронной динамики и энергетической структуры полупроводников и диэлектриков, а также реализации двумерной инфракрасной Фурье-спектроскопии.

Научная новизна

Найдены новые режимы компрессии фемтосекундных импульсов в диапазоне 4 – 8 мкм в полупроводниковом кристалле арсенид галлия, позволяющие формировать предельно короткие импульсы с длительностью порядка одного периода поля на центральной длине волны. В условиях нормальной (4 – 6.8 мкм) и аномальной (6.8 – 8 мкм) дисперсии групповых скоростей материала были получены импульсы менее двух периодов поля. При преобразовании импульсов накачки вблизи нуля дисперсии групповых скоростей в области 6.8 мкм происходит эффективная генерация суперконтинуума и формирование импульсов длительностью менее одного периода поля на центральной длине волны 6.8 мкм с пиковой мощностью около 50 МВт.

Впервые экспериментально продемонстрирована возможность генерации мультиоктавного суперконтинуума, простирающегося от 0.3 до 4.2 мкм, при нелинейном распространении 200-фс импульса накачки на центральной длине волны 3.2 мкм в полном антирезонансном фотонно-кристаллическом волноводе, заполненном аргоном при давлении в несколько атмосфер. Проведенный анализ показал, что основным фактором, позволяющим получить столь протяженный спектр и сформировать импульсы с длительностью менее половины цикла поля, является солитонная самокомпрессии. Методика прямого измерения светового поля X-SEA-F-SPIDER позволила измерить спектрально-временную структуру импульсов, формируемых в этом режиме импульсов на центральной длине волны 2.1 мкм. Их длительность составляет 6.6 фс по полувысоте, что соответствует одному колебанию поля, а пиковая мощность импульса достигает 1.5 ГВт.

Реализован полностью оптический метод зондирования зонной структуры полупроводника на основе генерации высших оптических гармоник от сверхкоротких лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона. При зондировании селенида цинка импульсами с центральной длиной волны 5.0 – 6.7 мкм обнаружено, что при интенсивностях поля накачки выше 0.1 ТВт/см² реализуется механизм генерации четных и нечетных оптических гармоник, не описываемой стандартной теорией возмущений. Взаимодействие поля с носителями заряда в полупроводнике в таком режиме позволило различить внутри- и межзонные механизмы генерации гармоник, а также восстановить профиль зоны проводимости селенида цинка вдоль направления ГЛ, обладающего наибольшей нелинейностью. Продемонстрировано, что

поляризационные карты гармоник высшего порядка позволяют полностью охарактеризовать анизотропные свойства петагерцовых фотоиндуцированных токов, возникающих в монокристаллическом полупроводниковом материале (селенида цинка) под действием сверхкоротких импульсов накачки среднего инфракрасного диапазона.

Зарегистрирован спектр высших оптических гармоник вплоть до 16-го порядка от импульсов накачки среднего инфракрасного диапазона с длинами волн от 5.0 до 6.7 мкм, сгенерированным в поликристаллическом образце селенида цинка и простирающимся в диапазоне 250 - 400 нм, что соответствует энергии фотона больше ширины запрещённой зоны ($\Delta_0 \approx 2.8$ эВ).

Научная и практическая значимость работы состоит в разработке новых методов формирования предельно коротких импульсов среднего инфракрасного диапазона длительностью около одного периода поля на центральной длине волны 3.2 мкм с энергией порядка 10-100 мкДж, а также в диапазоне длин волн 4-8 мкм с энергией порядка единиц микроджоулей для широкого класса актуальных задач лазерной физики, в том числе для сверхбыстрого анализа и управления динамикой носителей заряда в твёрдых телах и развития петагерцовой электроники.

Методология и методы исследования

В диссертационной работе используются экспериментальный и теоретический подход к исследованию нелинейно-оптических процессов, приводящих к формированию предельно коротких импульсов среднего инфракрасного диапазона, и генерации оптических гармоник высшего порядка в твёрдых телах под действием таких импульсов. Экспериментальный метод заключался во всестороннем анализе спектральных, временных и пространственных характеристик исследуемого излучения при помощи инструментов, в том числе и оригинальных, описанных в тексте диссертации. Измерения проводились при различных параметрах нелинейно-оптической среды и исходного импульса накачки. Для теоретического анализа полученных в эксперименте результатов применялось численное моделирование, позволившее определить вклад отдельных процессов и явлений в общую картину пространственно-временной эволюции исходного излучения, приводящей к формированию предельно коротких импульсов среднего инфракрасного диапазона, и генерации высших оптических гармоник в полупроводниковом материале.

Защищаемые положения

1. Спектрально временная эволюция фемтосекундных импульсов накачки среднего инфракрасного диапазона в кристалле арсенида галлия в условиях нормальной (4 - 6.8 мкм) и аномальной (6.8 - 8 мкм) дисперсии групповых скоростей материала позволяет сформировать предельно короткие импульсы с длительностью менее двух периодов поля.

2. Режим нелинейно-оптического преобразования от импульсов накачки в области 6.8 мкм в условиях сверхширокого фазового синхронизма вблизи нуля дисперсии групповых скоростей кристаллов арсенида галлия приводит к генерации суперконтинуума, индуцированного четырёхволновым процессом, связывающим вызванных ионизацией высокочастотные спектральные компоненты с длинноволновой частью спектра импульсов, что обеспечивает возможность формирования импульса длительностью менее одного периода поля с пиковой мощностью до 50 МВт.

3. Сочетание параметров структуры полого антирезонансного фотонно-кристаллического волновода и давления газа внутри него позволяет обеспечить широкополосную аномальную дисперсию при волноводном распространении импульсов накачки среднего и ближнего инфракрасного диапазона с энергиями до несколько сотен микроджоулей, что приводит к эффективной генерации мультиоктавного суперконтинуума в режиме солитонной самокомпрессии и сжатия импульсов до длительностей одного и менее периода оптического поля, что соответствует гигаваттному уровню пиковой мощности.

4. Методика генерации высших оптических гармоник от сверхкоротких лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона позволяет осуществить полностью оптическое зондирование зонной структуры и динамики носителей заряда в полупроводниковых материалах. Генерация четных и нечетных оптических гармоник в селениде цинка от микроджоулевых импульсов с центральной длиной волны 5.0 – 6.7 мкм при интенсивностях выше 0.1 ТВт/см² проходит в не описываемым теорией возмущений режиме. Высокая напряженность поля 0.1 В/Å, реализуемая в таком непертурбативном режиме, возбуждает нелинейную колебательную динамику электрона в пределах всей зоны Бриллюэна, что позволяет разделить внутри- и межзонные механизмы генерации гармоник высоких порядков и получить информацию о топологии зонной структуры полупроводника.

Апробация результатов и публикации

Основные результаты диссертационной работы были представлены аспирантом на научных семинарах кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, а также на российских и международных научных конференциях. Материалы диссертационной работы опубликованы в 13 печатных работах в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science, Scopus, RSCI и Перечень изданий МГУ, в том числе Scientific Reports, Physical Review Letters, Optica, Optics Letters, Physical Review A, Успехи физических наук, Письма в "ЖЭТФ" и Квантовая электроника.

Личный вклад автора

Содержание диссертационной работы и основные защищаемые положения отражают личный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов осуществлялась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Часть теоретического анализа и численного моделирования, использованного для сравнения с оригинальными экспериментальными результатами, 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, пяти глав и заключения, приложения со списком используемых аббревиатур и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 135 страниц, включая 51 рисунок и 2 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 168 наименований.

Содержание работы

Первая глава содержит обзор литературы по теме диссертационной работы и состоит из трёх параграфов. В первом параграфе рассматриваются наиболее распространённые на сегодняшний день параметрические методы формирования фемтосекундных импульсов среднего инфракрасного диапазона на длинах волн 3-10 мкм. Анализируются свойства основных нелинейно-оптических кристаллов, применяемых в этом диапазоне длин волн. Дано описание ключевых экспериментальных реализаций источников сверхкоротких импульсов среднего инфракрасного диапазона, показано, что параметрические процессы в кристаллах с квадратичной нелинейностью широко используются для генерации сверхкоротких импульсов во всём среднем инфракрасном диапазоне длительностью в несколько периодов с различными средней и пиковой мощностями. Зачастую в одной лазерной системе используют комбинацию нескольких нелинейно-оптических явлений для достижения большей энергии и меньшей длительности импульса, а совместно с дополнительными техниками компрессии и самокомпрессии импульсов в твёрдых телах и волноводах удаётся получить предельно короткие импульсы длительностью порядка или менее одного периода поля.

Во втором параграфе представлен обзор некоторых работ, где за счёт точного согласования настройки параметров лазерной системы и нелинейно-оптических процессов получены предельно короткие длительности импульсов среднего инфракрасного диапазона, а также показано место оригинальных экспериментальных результатов, представленных к защите, в контексте мирового уровня исследований. В обзоре сделан акцент на методы характеристики импульсов, позволившие экспериментально зарегистрировать предельно малые длительности. Показано, что формирование импульсов длительностью порядка одного периода поля в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах до сих пор не является рутинной процедурой, требуя применения наиболее современных техник генерации, спектрального уширения и временной компрессии, с точно согласованными параметрами исходного излучения и свойств используемых нелинейно-оптических материалов.

Третий параграф первой главы посвящён обзору методов теоретического и экспериментального анализа динамики носителей заряда в диэлектриках и полупроводниках под действием сверхкоротких лазерных импульсов. Показано, что адаптация методов аттосекундной метрологии для наблюдения и контроля быстрой электронной динамики в известных твердых телах и

новых квантовых материалах является очень перспективным инструментом исследований для изучения коррелированной электронной динамики на атомарных пространственных масштабах и субфемтосекундных временных масштабах, тем самым оказывая сильное влияние на перспективные оптоэлектронные технологии, такие как петагерцовая электронная обработка сигналов или сильнополюсная оптоэлектроника. Отмечается роль явления генерации гармоник высокого порядка как удобного полностью оптического сенсора непертурбативных нелинейно-оптических процессов, происходящих на петагерцовой несущей частоте.

Вторая глава содержит описание источников лазерного излучения и измерительных схем, при помощи которых были получены экспериментальные результаты, представленные в диссертационной работе. Глава состоит из трёх параграфов. Первый параграф посвящён описанию перестраиваемого источника фемтосекундных лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона микроджоулевого уровня энергии на основе титан-сапфирового лазерной системы. Во втором параграфе представлена иттербиевая килогерцовая лазерная система, формирующая сверхкороткие импульсы на центральной длине волны 3.1 - 3.7 мкм с энергией около 100 мкДж. Также в этой главе в третьем параграфе рассмотрены экспериментальные подходы для полной характеристики сверхкоротких импульсов среднего и ближнего инфракрасного диапазонов, использовавшиеся в настоящей работе для восстановления параметров предельно коротких импульсов ближнего и среднего инфракрасного диапазона и мультиоктавного суперконтинуума. Эти методы основаны на стробировании исследуемого излучения с разрешением по частоте с применением различных нелинейных процессов (SHG FROG, FWM XFROG), а также на одном из вариантов техники прямого восстановления поля методом спектральной интерферометрии (SPIDER), в котором информация о фазе поля кодируется с помощью пространственной, а не частотной карты спектральной интерференции (X-SEA-F-SPIDER).

В **третьей главе** представлены результаты, впервые демонстрирующие метод генерации микроджоулевых импульсов длительностью порядка одного периода поля в среднем инфракрасном спектральном диапазоне на длине волны 4 – 8 мкм в полностью «твердотельном» формате. Описанный подход заключается в использовании последовательности точно согласованных этапов нелинейно-оптического преобразования фемтосекундных импульсов – оптического параметрического усиления, генерации разностной частоты,

спектрального уширения в полупроводниковых кристаллах (в частности, в арсениде галлия) и компенсации остаточной фазовой модуляции импульсов. Рассмотрены различные режимы спектрально-временной эволюции исходных фемтосекундных импульсов накачки, приводящие к формированию предельно коротких импульсов длительностью порядка одного периода поля, включающие в себя совместное действие таких нелинейно-оптических эффектов как фазовая самомодуляция, самофокусировка, сверхбыстрая ионизация, широкополосное четырёхволновое взаимодействие, самоукручение фронта огибающей. Третья глава состоит из трёх параграфов. В первом параграфе представлены результаты по генерации перестраиваемых сверхкоротких импульсов и формированию суперконтинуума в режимах нормальной и аномальной дисперсии полупроводникового кристалла арсенида галлия. Излучение килогерцовой Ti:Sapphire лазерной системы фокусировалось в 7 мм пластинку арсенида галлия, где происходило нелинейно-оптическое преобразование, приводящее к спектральному уширению и изменению огибающей импульса. Результат такого преобразования оказывается в высокой степени чувствительным к взаимному соотношению спектра ИК-импульса накачки и дисперсионного профиля нелинейного материала. Для импульсов накачки на центральной длине волны менее 6.8 мкм, попадающих в область нормальной дисперсии групповых скоростей арсенида галлия, компрессия осуществлялась при помощи компенсации набега фазы в компрессоре, состоящем из оптических элементов с аномальной дисперсией. В результате экспериментов существенное уменьшение длительности импульсов было получено в диапазоне длин волн от 4 до 6.8 мкм, причём в спектральном диапазоне 5.9 – 6.3 мкм получено сжатие до длительностей менее 2 периодов поля на центральной длине волны.

В режиме аномальной дисперсии групповых скоростей арсенида галлия, то есть для импульсов на центральной длине волны более 6.8 мкм, генерация суперконтинуума сопровождается самокомпрессией импульса. За счёт уменьшения длительности импульса, а также из-за влияния самофокусировки пучка, на протяжении всего процесса распространения излучения в материале поддерживается высокая интенсивность, и для эффективного преобразования требуются меньшая длина материала. В этом режиме в экспериментах использовался кристалл арсенида галлия толщиной 5 мм. Временные огибающие сигнала суперконтинуума, восстановленные по спектрограммам XFROG, показывают, что в широком диапазоне длин волн от 7 до 8.5 мкм достижимы значения коэффициентов временной компрессии, превышающие

значение 3 (Рис.1). Конкретно, выходное излучение разностной частоты среднего инфракрасного диапазона с параметрами $\tau_0 \approx 150$ фс, $\lambda_0 \approx 7.9$ мкм, $W_0 \approx 2$ мкДж испытывает спектральное уширение и самокомпрессию в пластинке арсенида галлия толщиной 5 мм, преобразуясь в импульс с длительностью $\tau_0 \approx 45$ фс после кристалла (Рис.1f). Такой импульс имеет длительность лишь 1.2 периода колебания электромагнитного поля на центральной длине волны $\lambda_0 \approx 7.9$ мкм.

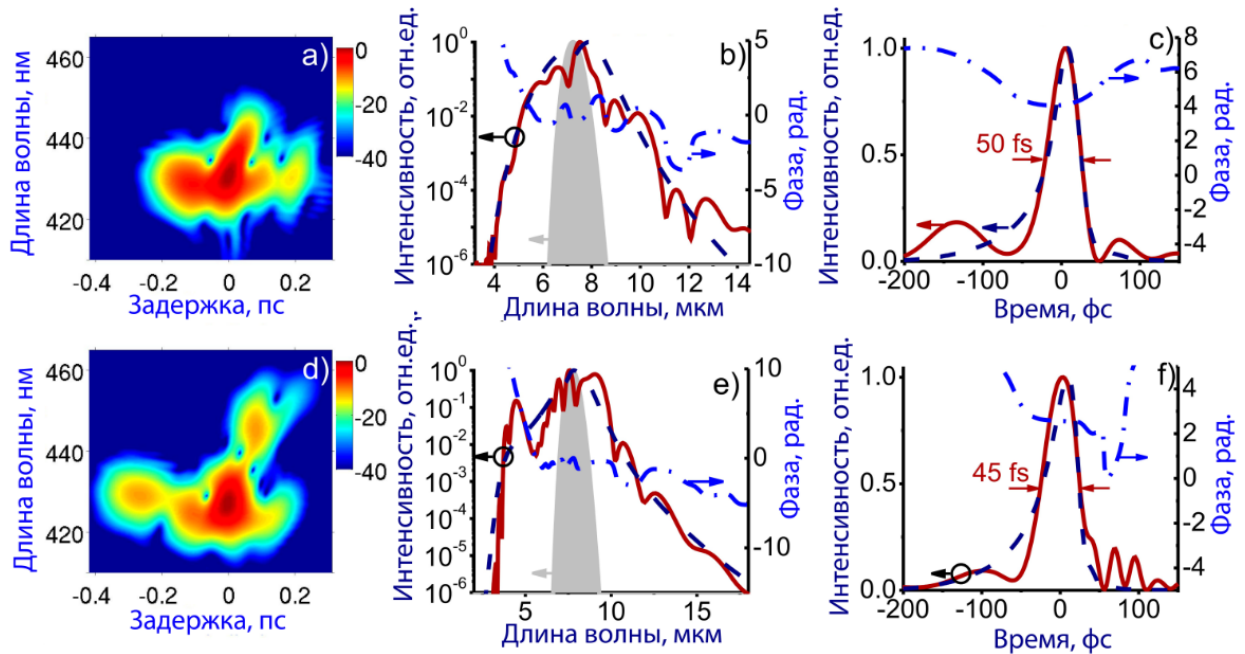


Рис.1. FWM XFROG карты (a,d) и восстановленные по ним огибающие (c,f) спектры (b,e) импульсов с начальной длительностью 150 фс на центральной длине волны 7.1 мкм (a-c) и 7.9 мкм (d-f) с мощностью 2 мкДж полученных в результате нелинейно-оптического преобразования в кристалле GaAs толщиной 5 мм.

Во втором параграфе описывается особый с точки зрения спектрального уширения и эффективной компрессии импульса режим нелинейно-оптического преобразования, в котором центральная длина волны излучения накачки попадает в область нуля дисперсии групповых скоростей материала. Именно этой длине волны было уделено особое внимание в наших экспериментах, позволивших в результате точного согласования всех параметров импульса накачки и условий взаимодействия с полупроводниковым материалом достичь замечательных результатов и впервые продемонстрировать полностью твердотельный источник предельно коротких импульсов длительностью около одного периода поля на центральной длине волны около 7 мкм. Особенностью данного режима оказывается выполнение в широком спектральном диапазоне условий фазового синхронизма для множественного каскадного процесса

четырёхволнового смешения, приводящего к параметрической перекачке энергии из центральной части спектра в стоксову и антистоксову области, что радикально повышает эффективность спектрального уширения. На Рис.2а изображена длина когерентности $l_c = \pi/|2\delta k|$, где $\delta k = 2k_0 - k_s - k_a$, для процессов четырёхволнового смешения вида $2\omega_0 = \omega_s + \omega_a$, за счёт которого осуществляется перенос энергии от импульса накачки на частоте ω_0 с волновым вектором k_0 , к стоксовым и антистоксовым компонентам с частотами ω_s и ω_a и волновыми векторами k_s и k_a , соответственно. Расчёты выполнены для дисперсионного профиля полупроводникового кристалла арсенида галлия. Наиболее важной особенностью представленной зависимости является наличие узкой спектральной области вблизи нуля дисперсии групповых скоростей ($\lambda_z \approx 6.8$ мкм для GaAs), в которой достигается сверхширокий фазовый синхронизм для процесса $2\omega_0 = \omega_s + \omega_a$, приводящий к радикальному увеличению эффективности генерации суперконтинуума.

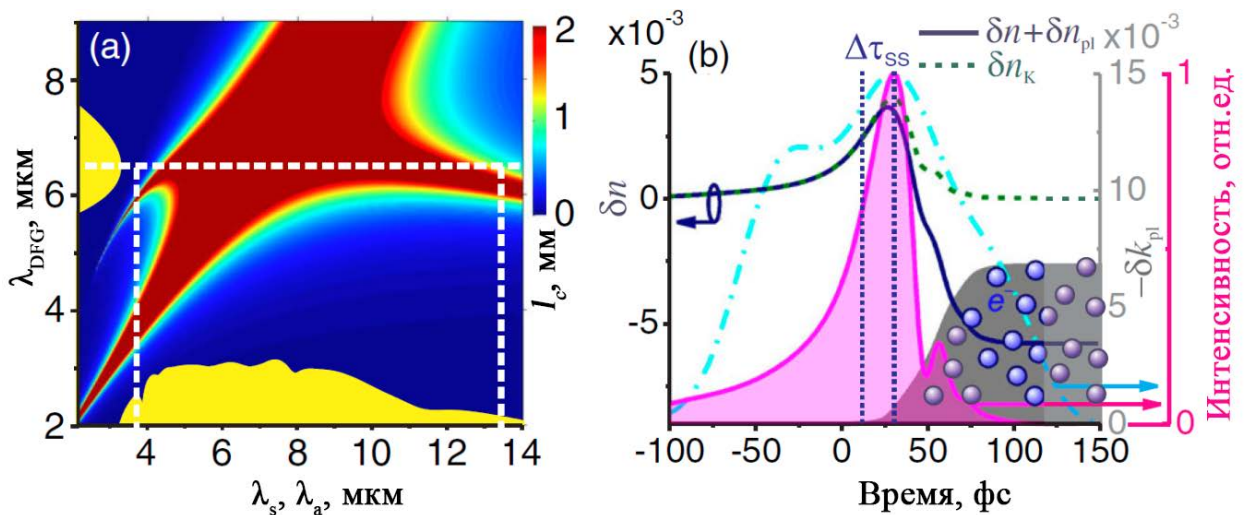


Рис.2. (а) Зависимость длины когерентности $l_c = \pi/|2\delta k|$ процессов четырёхволнового смешения вида $2\omega_0 = \omega_s + \omega_a$ в арсениде галлия от длин волн $\lambda_s = 2\pi c/\omega_s$ и $\lambda_a = 2\pi c/\omega_a$ стоксовой и антистоксовой компонент. Центральная длина волны исходного импульса показана горизонтальной пунктирной линией. (б) Временной профиль изменения коэффициента преломления, вызванного эффектом Керра $\delta n_k = n_2 I(t)$ (пунктирная линия) и полная нелинейная часть коэффициента преломления $\delta n_{nl} = \delta n_{pl} + \delta n_k$ (сплошная линия). Модуль мнимой части плазменной добавки к показателю преломления $|\delta n_{pl}|$ показан серой заливкой. Розовая сплошная линия с заливкой отображает временной профиль импульса на расстоянии $z = 5$ мм. Голубая штрих-пунктирная линия показывает временной профиль импульса среднего ИК-диапазона на расстоянии $z = 0$ мм. Смещение во времени пика импульса $\Delta\tau_{SS}$, вызванного самоукручением импульса, показано вертикальными пунктирными линиями.

Широкополосное излучение в среднем ИК-диапазоне, получаемое на выходе из пластинки GaAs имеет спектр протяжённостью более одной октавы по уровню 10% от максимума, и простирается от 4.0 до 9.4 мкм (Рис.3с). Временная огибающая такого импульса, полученная в результате восстановления XFROG-спектрохронограмм (Рис.3а), имеет короткий центральный пик шириной 29 фс по полувысоте и пред-импульс (Рис.3б), спадающий до уровня $1/e$ на протяжении 31 фс и содержащий порядка 35% от всей энергии ИК импульса. Это излучение имеет остаточную фазовую модуляцию, показанную пунктирной линией на Рис.3б,с, которую можно частично скомпенсировать при помощи материала с аномальной дисперсией групповых скоростей. Действительно, при помощи пластинки из фторида бария толщиной 0.5 мм удалось компрессировать импульс до длительности в 20 фс по полувысоте и подавить энергию предимпульса до 10% от полной энергии импульса (Рис.3е). С учётом того, что спектр полученного импульса располагается на центральной длине волны 6.8 мкм (Рис.3ф), длительность импульса в 20 фс соответствует около 0.9 периодов оптического поля. Энергия центрального 20-фс импульса оценивается в 1 мкДж, что соответствует пиковой мощности около 50 МВт. В таком оптимальном режиме распространения импульса суммарные потери энергии из-за плазмы в арсениде галлия не превысили 13%.

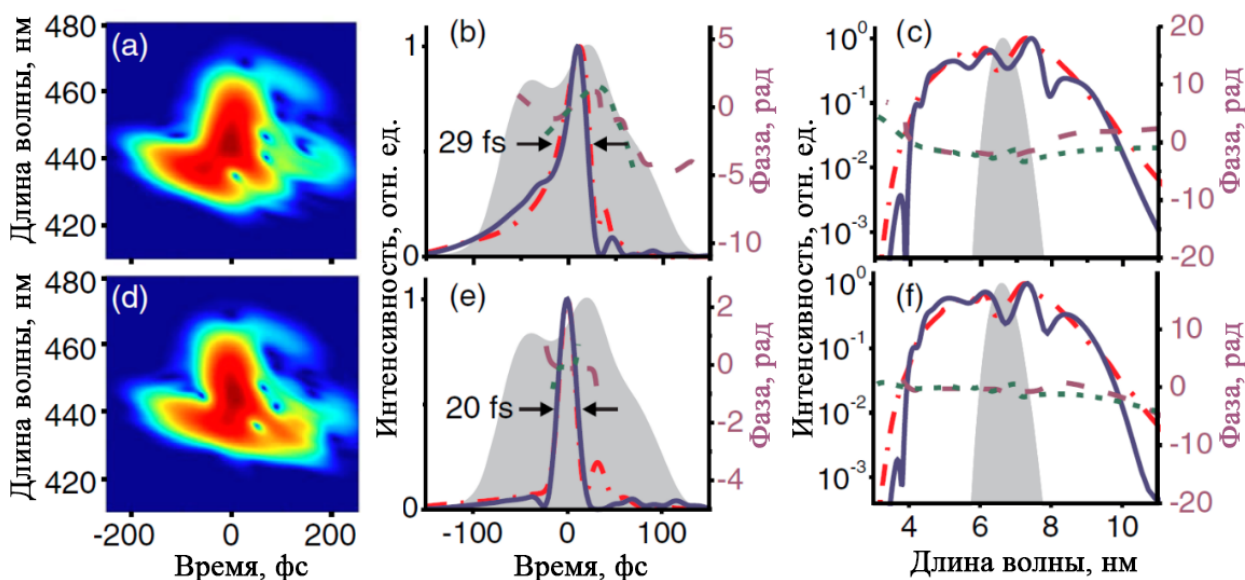


Рис.3. (a,d) FWM XFROG-спектрохронограммы импульсов среднего ИК-диапазона (a) на выходе из пластинки GaAs и (d) после дополнительной компенсации чирпа в пластинке фторида бария, толщиной 0.5 мм. (b,e) Временная огибающая и фаза, (c,f) спектр и спектральная фаза, восстановленные из FWM XFROG-спектрохронограмм и полученные в результате численного моделирования для ИК-импульса (b,c) на выходе из пластинки арсенида галлия и (e,f) после дополнительной компенсации чирпа в пластинке фторида бария толщиной 0.5 мм.

Четвёртая глава посвящена описанию реализации источника мультиоктавного суперконтинуума и предельно коротких импульсов гигаваттного уровня мощности в среднем и ближнем инфракрасном диапазоне на основе заполненных инертными газами полых антирезонансных фотонно-кристаллических волокон. За счет подбора параметров структуры полого антирезонансного фотонно-кристаллического волновода, контроля давления газа и фемтосекундных импульсов накачки ближнего (около 2 мкм) и среднего (около 3.2 мкм) инфракрасного диапазона с энергией до 100 мкДж показана возможность достижения специфических режимов их нелинейно-оптического преобразования, приводящих к генерации мультиоктавного суперконтинуума, а также солитонной самокомпрессии импульсов и их сжатия до длительностей порядка одного периода поля на центральной длине волны. Четвёртая глава состоит из двух параграфов. В первом параграфе представлены результаты экспериментов по генерации мультиоктавного суперконтинуума с использованием холостой волны килогерцовой иттербиевой системы, импульсы которой на центральной длине волны 3.2 мкм имеют энергию до 100 мкДж (Рис. 4).

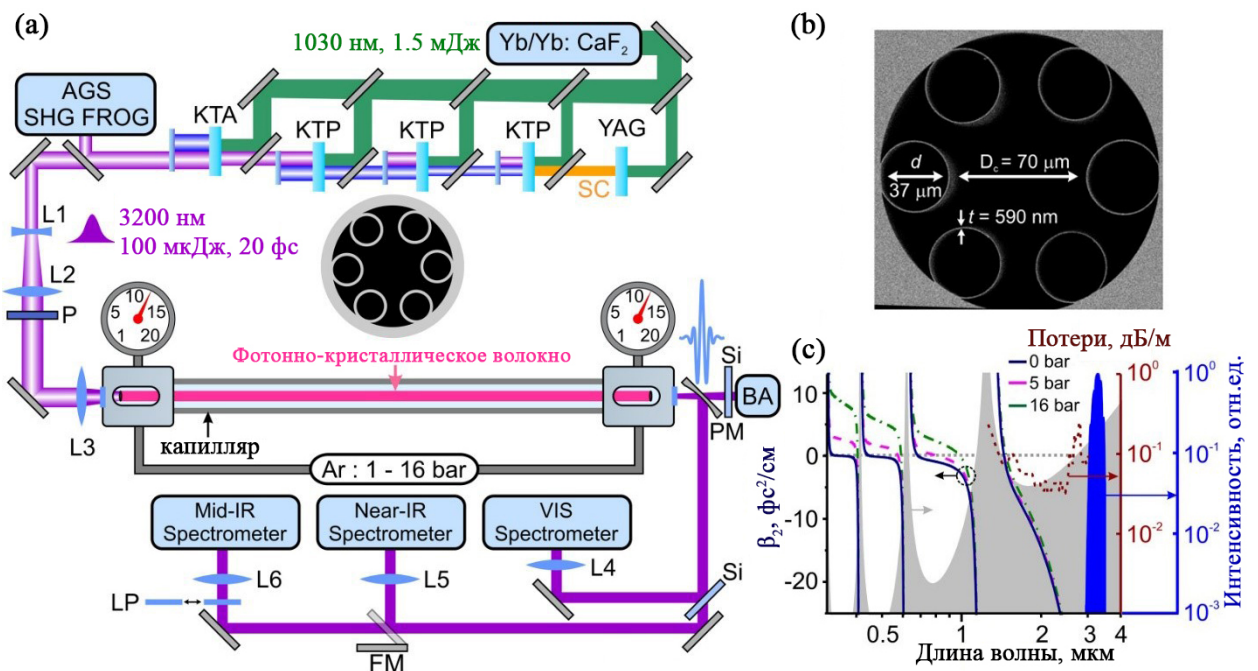


Рис. 4. (a) Схема экспериментальной установки. (b) Изображение поперечного сечения ФК волновода, полученное при помощи сканирующего электронного микроскопа. (c) Зависимость дисперсии групповых скоростей волновода, заполненного аргоном под давлением 0 (сплошная синяя кривая), 5 (пунктирная розовая кривая) и 16 (зелёная штрихпунктирная кривая) атмосфер. Также на графике показаны спектр потерь в волокне (коричневая пунктирная линия – эксперимент, серая заливка – расчёт) и спектр исходного импульса накачки (синяя заливка).

На Рис.5а представлен один из вариантов спектра такого суперконтинуума, измеренный на выходе ФК волокна длиной 31 см для начальной энергии импульса $W_0 \approx 35$ мкДж и $p \approx 16$ атм. Измеренный поперечный профиль пучка суперконтинуума на выходе волокна (Рис.5b) демонстрирует гладкое распределение интенсивности. В соответствии с выполненным моделированием, включающем в себя численное решение обобщенного нелинейного уравнения Шредингера, в процессе спектрально-временной эволюции поля, ответственной за генерацию мультиоктавного суперконтинуума (Рис.5d,e), происходит эффективная самокомпрессия импульса накачки, приводящая к формированию на расстоянии $z=31$ см от входного торца волокна предельно короткого лазерного импульса, полная ширина на полувысоте которого составляет всего 2.2 фс (Рис.5с), что соответствует примерно 0.31 периода поля на центральной длине волны $\lambda_c = 2.1$ мкм. Энергия такого импульса, длительностью 2.2 фс составила около 5 мкДж ($\approx 30\%$ от полной энергии на выходе волокна длиной 31 см), что соответствует пиковой мощности порядка 1.2 ГВт.

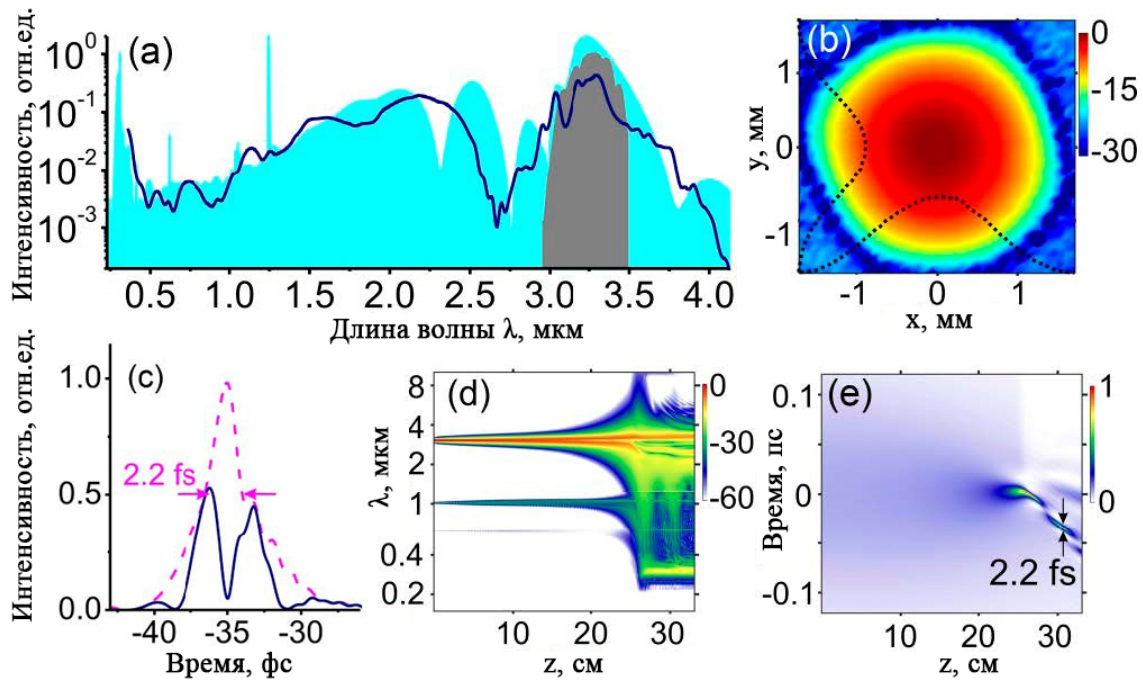


Рис.5. (а) Спектр излучения на выходе ($z = 31$ см) фотонно-кристаллического волокна, заполненного аргоном под давлением $p \approx 16$ атм. для начальной энергии импульса накачки $W_0 \approx 35$ мкДж: (сплошная линия) эксперимент, (голубая заливка) моделирование. Исходный спектр импульса накачки показан серой заливкой. (b) Профиль пучка на выходе волновода, измеренный в дальней зоне, одномерные сечения профиля вдоль двух координат изображены на рисунке пунктирными линиями. (c) Моделирование временного профиля сжатого импульса на выходе из волновода для $p \approx 16$ атм и $W_0 \approx 35$ мкДж. (d,e) Двумерные карты спектрального (d) и временного (e) преобразования импульса среднего ИК диапазона в полном ФК волноводе, заполненном газом.

Характеризация формирующегося предельно короткого импульса на основе четырёхволнового взаимодействия в газе требует для достижения необходимого временного разрешения дополнительного источника сверхкоротких опорных импульсов с длительностью одного порядка с исследуемым излучением. Это существенно усложняет экспериментальную схему и тем самым ограничивает его применимость. Поэтому для подтверждения полученных результатов и оценок, связанных с формированием в результате солитонной самокомпрессии сверхкоротких импульсов длительностью порядка одного периода поля, в работе была реализована одна из разновидностей техники прямого восстановления поля методом спектральной интерферометрии, описанная во втором параграфе. Эксперименты проводились с титан-сапфировой лазерной системой, оптическая накачка полого анти-резонансного фотонно-кристаллического волокна осуществлялась импульсами холостой волны из оптического параметрического усилителя титан-сапфировой лазерной системы на центральной длине волны в области 1.8 - 2.1 мкм с энергией до 180 мкДж и длительностью около 55 фс. Высокая скорость регистрации и обработки спектральных карт в режиме реального времени, регистрируемых методом X-SEA-F-SPIDER, позволила провести серию измерений в широком диапазоне начальных энергий импульса и давлений газа в волноводе. Минимальную длительность выходных импульсов, соответствующей максимальному уширению, удалось наблюдать при энергии импульсов 21 мкДж при давлении аргона 8 атмосфер. Длительность получаемых в этом режиме импульсов составляет 6.6 фс по полувывоте, что соответствует примерно одному колебанию поля. При этом в центральном пике по нашим оценкам содержится около 9.8 мкДж, то есть примерно 35% энергии импульса (Рис. 6), а пиковая мощность достигает 1.5 ГВт.

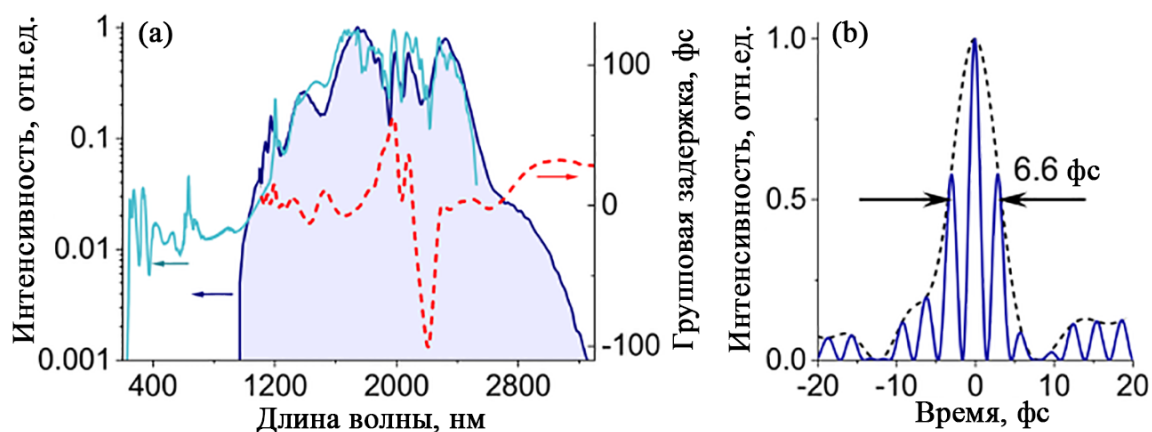


Рис. 6. Спектр и спектральная фаза наиболее короткого импульса на выходе полого фотонно-кристаллического волновода измеренная методом X-SEA-F-SPIDER (a) и восстановленная по нему огибающая поля (b).

В пятой главе развиваются методы нелинейно-оптической спектроскопии зонной структуры и сверхбыстрой электронной динамики полупроводниковых материалов на основе явления генерации высших оптических гармоник сверхкороткими импульсами среднего инфракрасного диапазона. Пятая глава состоит из двух параграфов. В первом параграфе представлены результаты реализации этой методики в поликристаллическом образце селенида цинка. При зондировании его фемтосекундными микроджоулевыми импульсами на центральной длине волны в диапазоне от 5.0 до 6.7 мкм с пиковой интенсивностью $I_0 > 0.1$ ТВт/см² была зарегистрирована генерация четных и нечетных оптических гармоник в режиме, в котором зависимость их мощности от пиковой интенсивности импульса накачки, значительно отличаются от степенной зависимости I_0^N , указывая на сильно непертурбативный режим взаимодействия светового поля с веществом (Рис. 7а). В этом режиме вынужденная колебательная динамика электронов позволяет получать информацию о зонной структуре вещества.

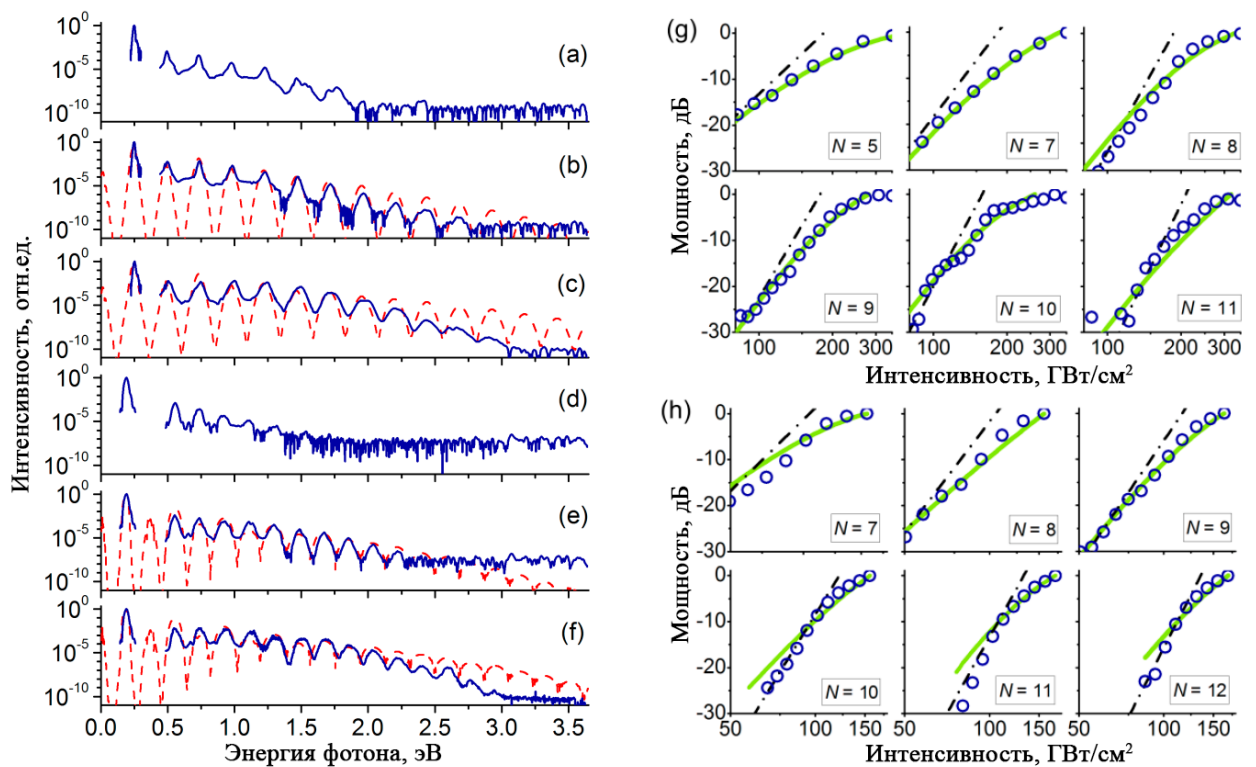


Рис. 7. Измеренные (синие линии) и рассчитанные (красные) спектры высших оптических гармоник из поликристаллического кристалла ZnSe толщиной 2 мм, при накачке импульсами на длине волны 5.0 мкм (а – с) и 6.7 мкм (d – f). Интенсивность накачки оставляла 0.04 ТВт/см² (а), 0.17 ТВт/см² (b), 0.32 ТВт/см² (c), 0.04 ТВт/см² (d), 0.13 ТВт/см² (e), 0.19 ТВт/см² (f). (g, h) Зависимости мощности гармоник с номерами N от интенсивности накачки на длине волны 5.0 мкм (g) и 6.7 мкм (h), соответственно. Штрихпунктирными линиями показаны степенные зависимости. Зеленые линии показывает теоретический расчет квазибаллистической модели.

Анализ энергетической эффективности генерации высоких гармоник 5 – 12 порядка в непертурбативном режиме позволил определить внутри- и межзонные механизмы генерации гармоник, и точно восстановить профиль зоны проводимости селенида цинка вдоль направления ГЛ, обладающего наибольшей нелинейностью. В наших экспериментах впервые был зарегистрирован спектр высших оптических гармоник вплоть до 16-го порядка от импульсов накачки среднего инфракрасного диапазона с длинами волн от 5.0 до 6.7 мкм, сгенерированным в поликристаллическом образце селенида цинка и простирающимся в диапазоне 250 - 400 нм, что соответствует энергии фотона больше ширины запрещённой зоны ($\Delta_0 \approx 2.8$ эВ).

Для полного трёхмерного анализа зонной структуры материала необходимо использовать относительно тонкие монокристаллические образцы, что позволяет реализовать точный контроль ориентации кристаллической решётки относительно вектора напряжённости электрического поля импульса накачки. Поэтому во втором параграфе представлены эксперименты, в которых в качестве образца для исследования генерации гармоник была взята монокристаллическая квадратная пластинка селенида цинка размером 10x10 мм толщиной 200 мкм с гранецентрированной кубической кристаллической решёткой, направление [1,1,1] которой совпадает с нормалью к поверхности пластинки. Эксперименты были проведены на иттербиевой килогерцовой лазерной системе, позволяющей получить импульсы среднего инфракрасного диапазона с большей энергией, что в свою очередь снижает требования к фокусировке излучения в образец и приводит к увеличению мощности генерируемых оптических гармоник при той же пиковой интенсивности накачки. Спектрально-ограниченные импульсы накачки длительностью менее 200 фс на центральной длине волны 3.6 мкм с энергией до 100 мкДж фокусировались в область перед образцом линзой из фторида кальция с фокусным расстоянием 40 мм, излучение гармоник коллимировалось линзой с фокусным расстоянием 50 мм и затем фокусировалось на входные щели спектрометров видимого и ИК диапазонов. Направление кристалла [1,1,1] было коллинеарно волновому вектору \mathbf{k} импульса накачки, таким образом, вектор напряженности E_0 составлял варьируемый угол ψ с направлением ГКХ в зависимости от поворота кристалла вокруг вектора \mathbf{k} . Спектры высоких оптических гармоник, зарегистрированные в экспериментах при относительно высоких интенсивностях инфракрасного импульса накачки $I_0 > 0.10-0.15$ ТВт/см², демонстрируют наличие ярко выраженного плато, что свидетельствует о сильно непертурбативном режиме взаимодействия.

В работе предложено разложение фотоиндуцированных токов в полупроводниковом материале в виде суммы трёх вкладов, что позволило аппроксимировать экспериментальные поляризационные карты высших оптических гармоник с высокой точностью (Рис. 8) и определить особую роль направлений ΓL и $\Gamma K X$ зонной структуры селенида цинка в процессе генерации высших оптических гармоник.

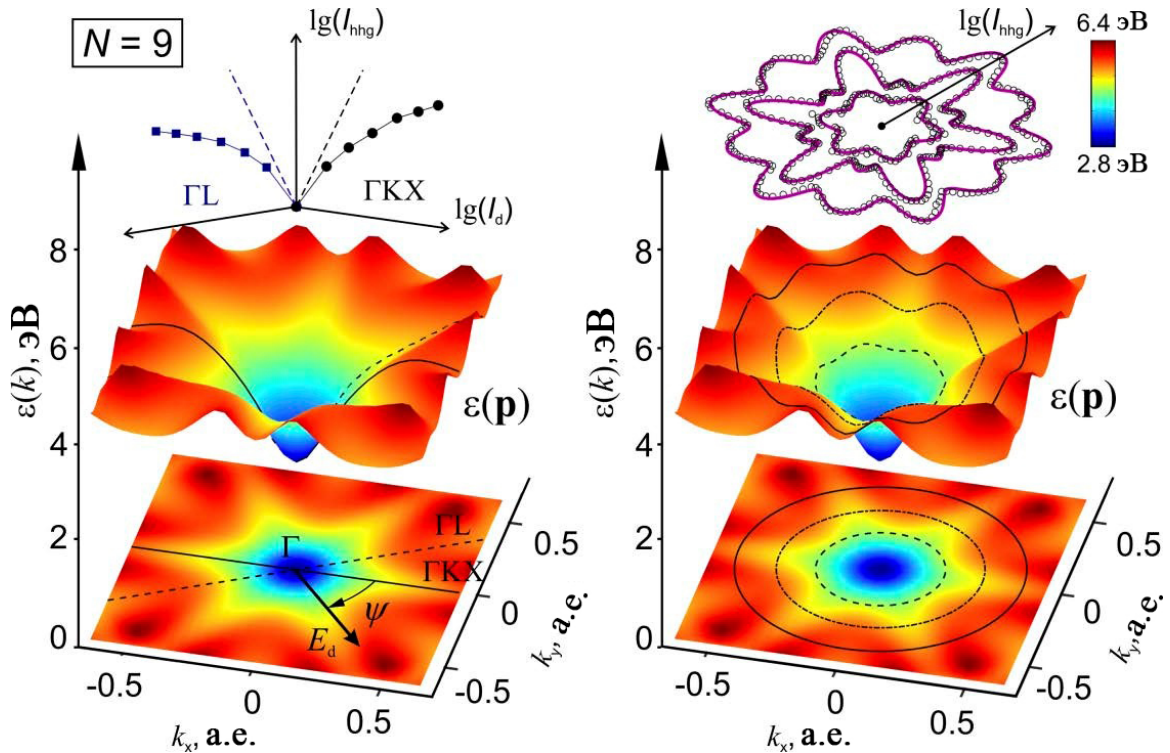


Рис. 8. Верхний ряд: интенсивность девятой гармоники как функция пиковой интенсивности импульса накачки, напряжённость поля которого ориентирована вдоль направлений ΓL и $\Gamma K X$ (слева), и как функция угла ψ для нескольких интенсивностей накачки (справа). Средний ряд: двумерная карта ландшафта энергетической структуры электронов в зоне проводимости и его сечения плоскостями $\psi = \psi_0$ (слева) и сферами $p = p_0$ (справа). Нижний ряд: проекции поверхности $\epsilon(\mathbf{p})$ на плоскость $k_x k_y$.

Результаты экспериментов и численного моделирования показали, что поляризационные карты гармоник высшего порядка позволяют полностью охарактеризовать анизотропные свойства петагерцовых фотоиндуцированных токов, возникающих в монокристаллическом полупроводниковом материале под действием сверхкоротких импульсов накачки среднего инфракрасного диапазона. Анализ энергетического ландшафта зонной структуры полупроводникового материала позволяет выявить особые направления, которые могут служить наиболее удобным базисом для описания анизотропных свойств гармоник высшего порядка в рамках модели внутризонной генерации гармоник фотоиндуцированными токами.

Заключение

В работе была продемонстрирована реализация полностью твердотельного источника микроджоулевых субпериодных импульсов среднего ИК диапазона за счет компрессии фемтосекундных импульсов в диапазоне 4 - 8 мкм в полупроводниковом кристалле арсенид галлия. В условиях нормальной (4 - 6.8 мкм) и аномальной (6.8 - 8 мкм) дисперсии групповых скоростей материала были получены импульсы менее двух периодов поля. При преобразовании импульсов накачки вблизи нуля дисперсии групповых скоростей в области 6.8 мкм происходит эффективная генерация суперконтинуума и формирование импульсов длительностью менее одного периода поля на центральной длине волны 6.8 мкм с пиковой мощностью около 50 МВт.

Продемонстрирована возможность генерации мультиоктавного суперконтинуума, простирающегося от 0.3 до 4.2 мкм, при нелинейном распространении 200-фс импульса накачки на центральной длине волны 3.2 мкм в полом антирезонансном фотонно-кристаллическом волноводе, заполненном аргоном при давлении в несколько атмосфер. Проведенный анализ показал, что основным фактором, позволяющим получить столь протяженный спектр и сформировать импульсы с длительностью менее половины цикла поля, является солитонная самокомпрессия. Методика прямого измерения светового поля X-SEA-F-SPIDER позволила измерить спектрально-временную структуру импульсов, формируемых в этом режиме импульсов на центральной длине волны 2.1 мкм. Их длительность составляет 6.6 фс по полувысоте, что соответствует одному колебанию поля, а пиковая мощность импульса достигает 1.5 ГВт.

Реализован полностью оптический метод зондирования зонной структуры полупроводника на основе генерации высших оптических гармоник от сверхкоротких лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона. При зондировании селенида цинка импульсами с центральной длиной волны 5.0 – 6.7 мкм обнаружено, что при интенсивностях поля накачки выше 0.1 ТВт/см² реализуется механизм генерации четных и нечетных оптических гармоник, не описываемой стандартной теорией возмущений. Взаимодействие поля с носителями заряда в полупроводнике в таком режиме позволило различить внутри- и межзонные механизмы генерации гармоник, а также восстановить профиль зоны проводимости селенида цинка вдоль направления ГЛ, обладающего наибольшей нелинейностью. Продемонстрировано, что поляризационные карты гармоник высшего порядка позволяют полностью

охарактеризовать анизотропные свойства петагерцовых фотоиндуцированных токов, возникающих в монокристаллическом полупроводниковом материале (селенида цинка) под действием сверхкоротких импульсов накачки среднего инфракрасного диапазона. Анализ энергетического ландшафта зонной структуры полупроводникового материала позволяет выявить особые направления, которые могут служить наиболее удобным базисом для описания анизотропных свойств гармоник высшего порядка в рамках модели внутризонной генерации гармоник фотоиндуцированными токами.

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

1. И.В.Савицкий, **Е.А.Степанов**, А.А.Ланин, А.А.Воронин, Е.Е.Серебрянников, А.А.Иванов, М. Ху., Я.Ли, А.Б.Федотов, А.М.Желтиков, «Измерение временной структуры поля и фазы несущей однопериодных импульсов ближнего и среднего инфракрасного диапазона», *Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики"*, **115(7)**:437–443 (2022). *Impact Factor WoS* – 1.532
2. **Е.А. Stepanov**, A.A. Voronin, F. Meng, A.V. Mitrofanov, D.A. Sidorov-Biryukov, M.V. Rozhko, P.B. Glek, Y. Li, A.B. Fedotov, A. Pugžlys, A. Baltuška, B. Liu, S. Gao, Y. Wang, Pu Wang, M. Hu, A.M. Zheltikov, «Multioctave supercontinua from shock-coupled soliton self-compression», *Physical Review A*, **99**:033855 (2019). *Impact Factor WoS* – 3.14
3. A.A. Lanin, **Е.А. Stepanov**, A.V. Mitrofanov, D.A. Sidorov-Biryukov, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov, «High-order harmonic analysis of anisotropic petahertz photocurrents in solids», *Optics Letters*, **44(8)**:1888–1891 (2019). *Impact Factor WoS* – 3.776
4. **Е.А. Степанов**, А.Н. Жданов, И.В. Савицкий, П.Б. Глек, А.А. Ланин, А.Б. Федотов, А.М. Желтиков, «Широкополосная двумерная спектрохронография с использованием сверхкоротких импульсов среднего инфракрасного диапазона», *Квантовая электроника*, **52(3)**:227-232 (2022). *Impact Factor WoS* – 1.022
5. A.V. Mitrofanov, D.A. Sidorov-Biryukov, P.B. Glek, M.V. Rozhko, **Е.А. Stepanov**, A.D. Shutov, S.V. Ryabchuk, A.A. Voronin, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov, «Chirp-controlled high-harmonic and attosecond-pulse generation via coherent-wake plasma emission driven by mid-infrared laser pulses», *Optics Letters*, **45(3)**:750–753 (2020). *Impact Factor WoS* – 3.776

6. A.V. Mitrofanov, A.A. Voronin, D. A. Sidorov-Biryukov, M.V. Rozhko, **E. A. Stepanov**, A. B. Fedotov, V. Shumakova, S. Ališauskas, A. Pugžlys, A. Baltuška, A. M. Zheltikov, «Mapping anomalous dispersion of air with ultrashort mid-infrared pulses», *Scientific reports*, **7**:2103–2103 (2017). *Impact Factor WoS* – 4.38
7. A.A. Lanin, **E.A. Stepanov**, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov, «Mapping the electron band structure by intraband high-harmonic generation in solids», *Optica*, **4**(5):516–519 (2017). *Impact Factor WoS* – 11.104
8. **E.A. Stepanov**, A.A. Lanin, A.A. Voronin, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov, «Solid-state source of subcycle pulses in the midinfrared», *Physical Review Letters*, **117**(4):043901(1)–043901(5) (2016). *Impact Factor WoS* – 9.161
9. A. V. Mitrofanov, A. A. Voronin, D. A. Sidorov-Biryukov, A. Pugžlys, **E. A. Stepanov**, G. Andriukaitis, S. Ališauskas, T. Flöry, A. B. Fedotov, A. Baltuška, A. M. Zheltikov, «Mid-infrared laser filaments in the atmosphere», *Scientific reports*, **5**:8368 (2015). *Impact Factor WoS* – 4.38
10. A. V. Mitrofanov, A. A. Voronin, S. I. Mitryukovskiy, D. A. Sidorov-Biryukov, A. Pugžlys, G. Andriukaitis, T. Flöry, **E. A. Stepanov**, A. B. Fedotov, A. Baltuška, A. M. Zheltikov, «Mid-infrared-to-mid-ultraviolet supercontinuum enhanced by third-to-fifteenth odd harmonics», *Optics Letters*, **40**(9):2068–2071, (2015). *Impact Factor WoS* – 3.776
11. A.A. Lanin, A.A. Voronin, **E.A. Stepanov**, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov, «Multioctave, 3–18 μm sub-two-cycle supercontinua from self-compressing, self-focusing soliton transients in a solid», *Optics Letters*, **40**(6):974–977 (2015). *Impact Factor WoS* – 3.776
12. А.В. Митрофанов, Д.А. Сидоров-Бирюков, А.А. Воронин, А.Пугжлис, Г.Андрюкайтис, **Е.А. Степанов**, С.И. Алишаускас, Т. Флёри, А.Б. Федотов, В.Я. Панченко, А.Балтушка, А.М. Жёлтиков, «Субтераваттные фемтосекундные импульсы среднего инфракрасного диапазона: новые эффекты пространственно-временной динамики мощных электромагнитных полей», *Успехи физических наук*, **185**(1):97–103 (2015). *Impact Factor WoS* – 3.361
13. A.A. Lanin, A.A. Voronin, **E.A. Stepanov**, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov, «Frequency-tunable sub-two-cycle 60-mw-peak-power free-space waveforms in the mid-infrared», *Optics Letters*, **39**(22):6430–6433 (2014). *Impact Factor WoS* – 3.776

Список использованной литературы

1. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. Москва: Наука, 1988. 312 p.
2. Желтиков А.М. Сверхкороткие импульсы и методы нелинейной оптики. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 296 p.
3. Ахманов С.А., Коротеев Н.И. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. Наука. Москва, 1981. 544 p.
4. Shen Y.R. The Principles of Nonlinear Optics. Wiley, 2003. 596 p.
5. 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.
6. Krogen P. et al. Generation and multi-octave shaping of mid-infrared intense single-cycle pulses: 4 // Nat. Photonics. Nature Publishing Group, 2017. Vol. 11, № 4. P. 222–226.
7. Balciunas T. et al. A strong-field driver in the single-cycle regime based on self-compression in a kagome fibre // Nat. Commun. 2015. Vol. 6. P. 6117.
8. Zheltikov A. Multioctave supercontinua and subcycle lightwave electronics [Invited] // JOSA B. Optica Publishing Group, 2019. Vol. 36, № 2. P. A168–A182.
9. 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.
10. Schubert O. et al. Sub-cycle control of terahertz high-harmonic generation by dynamical Bloch oscillations // Nat. Photonics. 2014. Vol. 8, № 2. P. 119–123.
11. Hohenleutner M. et al. Real-time observation of interfering crystal electrons in high-harmonic generation: 7562 // Nature. Nature Publishing Group, 2015. Vol. 523, № 7562. P. 572–575.
12. Vampa G. et al. Linking high harmonics from gases and solids: 7557 // Nature. Nature Publishing Group, 2015. Vol. 522, № 7557. P. 462–464.
13. Luu T.T. et al. Extreme ultraviolet high-harmonic spectroscopy of solids: 7553 // Nature. Nature Publishing Group, 2015. Vol. 521, № 7553. P. 498–502.
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. Langer F. et al. Lightwave-driven quasiparticle collisions on a subcycle timescale: 7602 // Nature. Nature Publishing Group, 2016. Vol. 533, № 7602. P. 225–229.
17. You Y.S., Reis D.A., Ghimire S. Anisotropic high-harmonic generation in bulk

- crystals: 4 // Nat. Phys. Nature Publishing Group, 2017. Vol. 13, № 4. P. 345–349.
18. Langer F. et al. Lightwave valleytronics in a monolayer of tungsten diselenide: 7703 // Nature. Nature Publishing Group, 2018. Vol. 557, № 7703. P. 76–80.
 19. Lanin A.A. et al. High-order harmonic analysis of anisotropic petahertz photocurrents in solids // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 2019. Vol. 44, № 8. P. 1888–1891.
 20. Schiffrin A. et al. Optical-field-induced current in dielectrics: 7430 // Nature. Nature Publishing Group, 2013. Vol. 493, № 7430. P. 70–74.
 21. Schultze M. et al. Controlling dielectrics with the electric field of light: 7430 // Nature. Nature Publishing Group, 2013. Vol. 493, № 7430. P. 75–78.
 22. Kim K.T. et al. Petahertz optical oscilloscope: 12 // Nat. Photonics. Nature Publishing Group, 2013. Vol. 7, № 12. P. 958–962.
 23. Krausz F., Stockman M.I. Attosecond metrology: from electron capture to future signal processing: 3 // Nat. Photonics. Nature Publishing Group, 2014. Vol. 8, № 3. P. 205–213.
 24. Garg M. et al. Multi-petahertz electronic metrology: 7625 // Nature. Nature Publishing Group, 2016. Vol. 538, № 7625. P. 359–363.
 25. Mashiko H. et al. Petahertz optical drive with wide-bandgap semiconductor: 8 // Nat. Phys. Nature Publishing Group, 2016. Vol. 12, № 8. P. 741–745.
 26. Popmintchev T. et al. Bright Coherent Ultrahigh Harmonics in the keV X-ray Regime from Mid-Infrared Femtosecond Lasers // Science. 2012. Vol. 336, № 6086. P. 1287–1291.
 27. Woodbury D. et al. Laser wakefield acceleration with mid-IR laser pulses // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 2018. Vol. 43, № 5. P. 1131–1134.
 28. Mitrofanov A.V. et al. High-order harmonic generation from a solid-surface plasma by relativistic-intensity sub-100-fs mid-infrared pulses // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 2018. Vol. 43, № 22. P. 5571–5574.
 29. Fork R.L. et al. Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 1987. Vol. 12, № 7. P. 483–485.
 30. Jung I.D. et al. Self-starting 6.5-fs pulses from a Ti:sapphire laser // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 1997. Vol. 22, № 13. P. 1009–1011.
 31. 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.
 32. Nisoli M., De Silvestri S., Svelto O. Generation of high energy 10 fs pulses by a new pulse compression technique // Appl. Phys. Lett. American Institute of

- Physics, 1996. Vol. 68, № 20. P. 2793–2795.
33. Nisoli M. et al. Compression of high-energy laser pulses below 5 fs // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 1997. Vol. 22, № 8. P. 522–524.
 34. Baltuška A. et al. Optical pulse compression to 5 fs at a 1-MHz repetition rate // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 1997. Vol. 22, № 2. P. 102–104.
 35. Mücke O.D. et al. Self-compression of millijoule 1.5 μm pulses // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 2009. Vol. 34, № 16. P. 2498–2500.
 36. Hauri C.P. et al. Generation of intense, carrier-envelope phase-locked few-cycle laser pulses through filamentation // Appl. Phys. B. 2004. Vol. 79, № 6. P. 673–677.
 37. Hauri C.P. et al. Intense self-compressed, self-phase-stabilized few-cycle pulses at 2 μm from an optical filament // Opt. Lett. 2007. Vol. 32, № 7. P. 868–870.
 38. Stibenz G., Zhavoronkov N., Steinmeyer G. Self-compression of millijoule pulses to 7.8 fs duration in a white-light filament // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 2006. Vol. 31, № 2. P. 274–276.
 39. Baltuška A., Fuji T., Kobayashi T. Visible pulse compression to 4 fs by optical parametric amplification and programmable dispersion control // Opt. Lett. Optica Publishing Group, 2002. Vol. 27, № 5. P. 306–308.
 40. Brida D. et al. Few-optical-cycle pulses tunable from the visible to the mid-infrared by optical parametric amplifiers // J. Opt. IOP Publishing, 2009. Vol. 12, № 1. P. 013001.
 41. Manzoni C. et al. Coherent pulse synthesis: towards sub-cycle optical waveforms // Laser Photonics Rev. 2015. Vol. 9, № 2. P. 129–171.
 42. Benabid F. et al. Stimulated Raman Scattering in Hydrogen-Filled Hollow-Core Photonic Crystal Fiber // Science. 2002. Vol. 298, № 5592. P. 399–402.
 43. Couny F. et al. Generation and photonic guidance of multi-octave optical-frequency combs // Science. 2007. Vol. 318, № 5853. P. 1118–1121.
 44. 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 $>$ 3.5 μm // Opt. Express. 2011. Vol. 19, № 2. P. 1441–1448.
 45. Yu F., Knight J.C. Negative Curvature Hollow-Core Optical Fiber // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2016. Vol. 22, № 2. P. 146–155.
 46. Hemmer M. et al. Self-compression to sub-3-cycle duration of mid-infrared optical pulses in dielectrics // Opt. Express. 2013. Vol. 21, № 23. P. 28095–28102.