МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Потёмкин Фёдор Викторович

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ИК ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ И ПЛОТНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

1.3.19. Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты

Гарнов Сергей Владимирович –
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук», дирекция, директор

Ионин Андрей Алексеевич –
доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук, отделение квантовой радиофизики, руководитель отделения

Антипов Олег Леонидович –
доктор физико-математических наук, профессор, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», отделение нелинейной динамики и оптики, ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится «14» сентября 2023 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.4 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, 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/013.4/2591.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

С момента создания первого лазера в 60-х годах XX века лазерная техника быстро развивалась как с точки зрения сокращения длительности, так и наращивания энергии лазерных импульсов [1]. Этому способствовал поиск новых перспективных и широкополосных лазерных сред, позволяющих генерировать и усиливать излучение фемтосекундной (1 фс = 10^{-15} с) длительности в различных спектральных диапазонах от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК). Настоящим прорывом в фемтосекундной технике явилось изобретение метода усиления чирпированных импульсов (УЧИ), известного в англоязычной литературе как CPA (*англ*. chirped pulse amplification), за что её изобретатели Ж. Муру и Д. Стрикленд в 2018 году были удостоены Нобелевской премии. После этого фемтосекундные лазеры смогли «шагнуть» в суб-джоулевый диапазон энергий лазерных импульсов, достигнув рекордных пиковых мощностей петаваттного уровня (1 ПВт = 10^{15} Вт) [2–4]. Развитие специальных адаптивных технологий в оптике позволило сфокусировать лазерный пучок такой мощности в дифракционный предел ($\sim\lambda^3$), что для доступных на тот момент источников составляло порядка нескольких микрометров в пространстве. Тем самым были достигнуты интенсивности выше 10^{16} Вт/см^2 и было создано сверхсильное световое поле, недоступное для получения другими способами в лабораторных условиях (при интенсивности $I \geq 10^{16}\ {\text{Вт}}/{\text{см}^2}$ напряженность светового поля превышает напряженность поля в атоме водорода E_a>10^9 В/см).

Создание мощных лазерных систем фемтосекундной длительности на многие годы определило вектор исследования нелинейного отклика различных сред, возникающего в полях интенсивного лазерного излучения. Эти разработки позволили провести новые виды экспериментов [5] – ускорение заряженных частиц сильными лазерными полями и лазерное инициирование ядерных реакций [6]. Они также продемонстрировали новые методы генерации рентгеновского излучения [7], в частности, генерацию предельно коротких рентгеновских импульсов. К 1990 году были разработаны и созданы уникальные пико- и фемтосекундные лазерные системы, позволяющие получать высокоинтенсивное лазерное излучение (10^{12} –10^{16} Вт/см^2) в УФ, видимом и ИК диапазонах [8]. Позже были продемонстрированы уникальные подходы к наращиванию пиковой мощности в гибридных лазерных системах, основанных на твердотельных генераторах и газовых усилителях [9].

Интерес исследователей к использованию более длинноволнового излучения среднего и дальнего ИК диапазонов, в первую очередь, связан с существенным повышением эффективности нелинейно-оптических процессов [10]. Увеличение пондеромоторной энергии электрона $\sim(I \times \lambda^2)$ приводит к тому, что возникают новые режимы ускорения частиц, генерации яркого рентгеновского и терагерцевого излучений. Релятивистский режим

взаимодействия электрона с полем лазерной волны в 4 мкм диапазоне длин волн достигается уже при $I_{rel} = 1{,}37 \times 10^{18}\ {}^{\text{Вт}}/_{\text{см}^2} \times \left({}^{1\ \text{мкм}}/_{\lambda}\right)^2 \cong 10^{17}\ {}^{\text{Вт}}/_{\text{см}^2}$, что в условиях формирующейся плазмы меньшей плотности позволяет уменьшить эффекты плазменной экранировки и довести большую часть энергии лазерного излучения до мишени. Отметим, что именно изменение баланса между ионизационным и нелинейным вкладами в сочетании с выраженным пондеромоторным действием поля при распространении длинноволнового мощного лазерного излучения в среде обеспечивает рост эффективности нелинейно-оптических процессов. Рост критической мощности самофокусировки позволяет доставлять в управляемом режиме одиночной филаментации больше энергии, что важно для удаленного мониторинга и других практических приложений. Филаментация мощных лазерных импульсов среднего ИК диапазона за счёт уменьшения влияния дисперсии на распространение лазерных импульсов позволяет получать многооктавный суперконтинуум, простирающийся от УФ до среднего и дальнего ИК диапазонов [11]. Это гарантирует в посткомпрессии импульсы с малым числом периодов светового поля. Произведение интенсивности лазерного поля на квадрат длины волны также определяет частоту отсечки гармоник высокого порядка, генерирующихся на плато. В применении к среднему ИК-диапазону это говорит о возможности получения гармоник в диапазоне энергий на уровне кэВ, столь важном для развития лазеров на свободных электронах [12]. Наличие молекулярных полос поглощения в средней ИК области спектра позволяет с использованием источников среднего ИК диапазона исследовать кинетику молекул и создавать на этой основе мощные лазерные источники [13], разрабатывать новые методы спектроскопии и микроскопии физических, химических и биологических объектов, а также получать новую информацию о природе оптических нелинейностей в этом спектральном диапазоне.

Несмотря на перспективность и значимость проведения исследований в средней ИК-области спектра, практически все оптические эксперименты, нацеленные на изучение сверхбыстрых процессов в веществе на фемтосекундном масштабе времени, ограничены в основном видимой и ближней ИК-областью спектра, так как здесь были разработаны эффективные коммерческие лазерные источники сверхкоротких импульсов. Существующие уникальные фемтосекундные лазерные установки среднего и дальнего ИК диапазонов в России и за рубежом громоздки, сложны в обслуживании и построены на схеме параметрического усиления чирпированных импульсов или основаны на CO_2 усилителях высокого давления [14]. Использование новых конденсированных лазерных материалов [15], способных усиливать широкополосное излучение в среднем ИК-диапазоне, позволило бы получать мощные ИК лазерные импульсы более простым способом, используя стандартную технологию УЧИ, и расширило бы спектр применения таких лазерных источников.

Развитие методов высокоэффективного оптико-терагерцевого преобразования позволило достичь сильного поля (>10 МВ/см) в терагерцевом диапазоне, что сделало

возможным наблюдение в нем нелинейных эффектов [16–19]. Разработка подходов, позволяющих создать источник, генерирующий мощные лазерные импульсы в различных спектральных диапазонах, открывает для решения новый класс задач, а именно мультиспектральное воздействие на конденсированные и газовые среды в условиях сильного поля как в оптическом, так и в терагерцевом диапазонах. Это позволяет рассмотреть когерентные и некогерентные эффекты в физике взаимодействия лазерного излучения с веществом, а также исследовать вопрос нелинейного отклика вещества в условиях воздействия сильного квазистационарного поля. Это может открыть новые режимы ускорения заряженных частиц и сформировать условия на генерацию гармоник высокого порядка с энергией фотонов в кэВ-диапазоне. Это, в свою очередь, может стать основой для получения предельно коротких аттосекундных импульсов и в перспективе позволить осуществить первую экспериментальную генерацию зептосекундных импульсов.

Исследованию нелинейно-оптических процессов взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом посвящена большая часть многолетних исследований в России и мире, что связано со стремлением ученых к пониманию фундаментальных механизмов формирования нелинейного отклика вещества, невозможного без создания эффективных методов расширения спектра [20]. Однако необходимость поддержания интенсивности на уровне более 1 ТВт/см^2 при узком выборе источников и ограниченном доступе к управлению параметрами лазерного излучения не позволяло обеспечить широкий спектральный охват генерируемого когерентного излучения, что также было связано с наличием в системе чаще всего лишь одного мощного канала лазерного излучения с фиксированной длиной волны. Предлагаемый в диссертации подход по созданию двух синхронизированных мощных каналов лазерного излучения в ближнем (1,24 мкм) и среднем (4–5 мкм) ИК диапазонах учитывает преимущества каждого из разработанных источников. В результате удалось разработать методы по эффективному преобразованию излучения в УФ, средний ИК и ТГц диапазоны длин волн и создать широкодиапазонный источник когерентного излучения. Это может стать основой для конкурентного преимущества МГУ имени М.В. Ломоносова в развитии фотоники ближнего и среднего ИК диапазонов с возможностью создания новых устройств нелинейной оптики.

Совершенствование лазерных технологий позволило выйти на новый уровень исследований в области неравновесных состояний вещества и физики высоких плотностей энергий и интенсивностей. В режиме сверхсильного светового поля оказывается возможным изучать фундаментальные свойства вещества в экстремальных состояниях, характеризующихся высокими значениями температуры (~10^5 К) и давления (~1 ТПа), то есть *экстремальные состояния вещества* [21]. Создание такого рода состояний имеет существенное значение, например, для задач, связанных с высокотемпературной лазерной плазмой и термоядерными процессами, что, в свою очередь, имеет отношение к

моделированию астрофизических процессов [22]. Лазерно-индуцированные экстремальные состояния в объёме конденсированных сред интересны по причине возможности наблюдения быстрых фазовых переходов и новых лазерно-индуцированных фаз вещества, не регистрируемых в стационарных условиях; они также находят применение в создании микро- и наноструктур в объёме материалов, что может рассматриваться как основа для новой компонентной базы оптоэлектроники и ИК фотоники.

Характер взаимодействия высокоинтенсивного (~10^{13}-10^{14} Вт/см^2) лазерного излучения с веществом может кардинальным образом отличаться в зависимости от *энергии лазерных импульсов, свойств материала, условий фокусировки (мягкая, жёсткая фокусировка)*, используемой *длины волны* и *длительности* лазерного воздействия. В первую очередь это связано с тем, что воздействие высокоинтенсивных (~10^{13}–10^{14} Вт/см^2) фемтосекундных лазерных импульсов на вещество приводит к ионизации вещества [23] и генерации микроплазмы (концентрация электронов близкая и даже выше критической, средняя температура электронов до 10 эВ) [24]. Для относительно длинных лазерных импульсов (τ~100 фс для ближнего ИК диапазона) доминирует ударная ионизация, в которой затравочные электроны формируются в процессах полевой ионизации. При уменьшении длительности лазерного импульса до нескольких осцилляций светового поля (τ<10 фс для ближнего ИК диапазона) механизм ионизации становится туннельным. Это позволяет реализовать режимы абляции материалов с нанометровой точностью. Такая локализованность лазерного воздействия определяется режимом сильного поля, который достигается при значениях параметра Келдыша $\gamma = \sqrt{\frac{2E_g}{E_{osc}}} \leq 1$, где E_g – ширина запрещённой зоны материала, E_{osc} – средняя кинетическая энергия, набираемая электроном в поле лазерной волны, или пондеромоторная энергия электрона. Можно заметить, что параметр Келдыша $\gamma \sim \frac{1}{\lambda}$ обратно пропорционален длине волны воздействующего излучения, поэтому другим способом достижения режима сильного поля может служить увеличение длины волны лазерного излучения. Переход к более длинным волнам кардинальным образом изменяет скорость нагрева электронов $\sigma_{1PA} = \frac{\tau_{coll}}{\omega^2 \tau_{coll}^2 + 1} \times \frac{e^2}{c \cdot n_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot m_c} \sim \lambda^2$, что влияет на приобретаемую электронами энергию в поле длинноволнового лазерного излучения. В условиях роста электронной плотности это позволяет значительно увеличить объёмную поглощённую плотность энергии (энерговклад) в среду при ограничении области формирующегося затравочного электронного облака с использованием коротковолнового воздействующего лазерного излучения. Отметим, что рост энерговклада при мультиспектральном воздействии на вещество также открывает путь к увеличению эффективности нелинейно-оптических процессов.

Дальнейшие стадии эволюции *экстремального состояния вещества* включают в себя передачу энергии от электронной к ионной подсистеме по различным каналам: от лазерного излучения плазме – за счёт ионизации и нагрева электронов плазмы на временах длительности лазерного импульса; от лазерного излучения к ионной подсистеме – на временах длительности лазерного импульса, и от плазмы фононам – на временах термализации электронной плазмы, – с последующей генерацией ударных волн и формированием остаточной микромодификации [25]. Отметим, что частота электрон-электронных, электрон-ионных, электрон-нейтральных и электрон-фононных столкновений зависит от энергии электрона, динамика набора которой определяется длиной волны лазерного излучения, что для корректного физического рассмотрения требует построения более сложных скоростных моделей, описывающих динамику концентрации электронов микроплазмы. Таким образом, процесс формирования микромодификаций в конденсированных средах, широко использующийся на практике, с точки зрения фундаментальной науки представляет собой каскад сложных взаимосвязанных процессов передачи энергии возбуждения, происходящих на разных масштабах времени. Понимание работы этих сложных фундаментальных процессов в динамике важно для потенциальных приложений фемтосекундных лазеров. Экспериментально идентифицировать отдельные процессы довольно сложно, но получение информации об объёмной плотности поглощённой энергии или *энерговкладе* имеет решающее значение для лазерного воздействия, структурирования и обработки различных материалов, а также для онлайн-диагностики этих процессов и поиска методов повышения энерговклада.

Локализация в пространстве поглощённой лазерной энергии обычно достигается за счёт жесткой фокусировки (NA>0,3) в объём вещества. Это приводит к созданию объёмного энерговклада до нескольких кДж/см^3 и наблюдению новых эффектов: ангармонизму фононных колебаний, сильному изменению частоты фононных колебаний, фазовым переходам с изменением частоты фононов и лазерно-индуцированным объёмным модификациям вещества с различной морфологией. Изменение условий фокусировки кардинальным образом сказывается на характере распространения лазерного излучения в среде. Так, мягкая фокусировка (NA <0.3) мощного ($P > P_{cr}$) фемтосекундного лазерного излучения в объём прозрачной конденсированной среды обеспечивает баланс между линейными и нелинейными потерями, позволяя получить эффект самоканалирования или филаментации лазерного излучения в среде [11]. С практической точки зрения это приводит к возможности создания протяжённых (более десятков миллиметров) плазменных каналов в среде, а наведённые таким образом изменения показателя преломления вдоль оси филамента находят широкое применение в различных прикладных областях. Однако ввиду ограничения интенсивности в одиночном филаменте (*англ.* intensity clamping) доставка энергии в объём среды ограничена. Таким образом, крайне актуальным становится исследование

распространения фемтосекундного лазерного излучения, пиковая мощность которого многократно превосходит критическую мощность фокусировки ($P >> P_{cr}$) в среде. За счёт модуляционной нестабильности в поперечном профиле лазерного излучения или флуктуаций, имеющихся в среде, при распространении лазерный пучок такой пиковой мощности разбивается на множество филаментов, что может приводить к потере пространственной когерентности излучения. Правильный выбор условий фокусировки может обеспечить режим эффективного слияния многих филаментов в области взаимодействия, формирования суперфиламента и нелинейного роста энерговклада. Новые подходы к увеличению объёмного энерговклада возникают при использовании двухцветной пары остросфокусированных низкоэнергетичных (~мкДж) фемтосекундных лазерных импульсов в объёме конденсированной среды [26], преимущество которых заключается в значительном повышении локальности лазерного воздействия.

На сегодняшний день влияние параметров воздействующих импульсов на механизмы пробоя и на морфологию формируемых модификаций остаются на уровне «оценочных» представлений, хотя развитие лазерных технологий, покрывающих всё больший диапазон длин волн за пределами видимого и ближнего ИК диапазонов, требует этого понимания [27], что связано с необходимостью создания лучестойких покрытий и развитием технологий объёмного структурирования полупроводниковых материалов. Трудности исследователей определяются, в первую очередь, необходимостью разработки новых методов диагностики процессов взаимодействия высокоинтенсивного (более 1 ТВт/см^2) лазерного излучения с объёмом прозрачной конденсированной среды, позволяющих с высоким пространственным (~мкм) и временным (~фс) разрешением получать информацию об эволюции лазерно-индуцированного экстремального состояния вещества и, следовательно, лучше управлять процессом лазерного воздействия.

Таким образом, круг проблем нелинейной оптики и лазерной физики, рассматриваемых в диссертационной работе, связан с исследованием процессов параметрического и лазерного усиления, а также нелинейных процессов, возникающих при взаимодействии высокоинтенсивного (более 1 ТВт/см^2) ИК лазерного излучения с конденсированной и плотной газовой средой, в том числе, лазерно-индуцированного экстремального состояния вещества, что представляет собой **актуальную научную задачу**.

Подтверждением этой **актуальности** является ряд положений. *Во-первых*, поиск новых лазерных сред и развитие твердотельных фемтосекундных лазерных источников ближнего и среднего ИК диапазонов позволит расширить спектр применения таких источников и создать новую технологическую платформу для объёмной микрообработки полупроводниковых материалов. С помощью компактных, «настольных» лазерных источников сверхширокополосного излучения от УФ до ТГц диапазона можно планировать время-разрешённые эксперименты типа накачка-зондирование в различных материалах и

спектральных диапазонах и на различных временных шкалах, создавая перспективы к мультиспектральному, многоимпульсному воздействию с одновременным контролем за происходящими процессами. *Во-вторых*, исследование процессов, протекающих при взаимодействии фемтосекундных лазерных импульсов с конденсированной средой, предполагает развитие новых методов создания и диагностики этого воздействия на микромасштабах по пространству и на фемтосекундной шкале по времени. *В-третьих*, исследование микроплазмы и процессов энергопереноса с использованием время-разрешённых методов необходимо для лучшего понимания механизмов пробоя и формирования объёмных микромодификаций под воздействием высокоинтенсивного излучения ИК диапазона, что актуально для создания новой компонентной базы в области ИК фотоники.

Степень разработанности исследуемых проблем

Создание фемтосекундных источников ближнего и среднего ИК диапазонов с высокой пиковой и средней мощностью важно для развития междисциплинарных научных направлений на стыке лазерной физики, нелинейной оптики, физики конденсированного состояния, физической химии и физики высоких энергий. Наиболее активно в мире развиваются подходы, основанные на титан-сапфировых (длина волны 0,8 мкм) и иттербиевых (1,03 мкм и 1,05 мкм) фемтосекундных лазерах и соответствующих схемах параметрического преобразования для генерации фемтосекундного излучения в других спектральных диапазонах. Однако наличие двухфотонного поглощения в большинстве тройных полупроводниковых нелинейно-оптических кристаллов не позволяет использовать такой способ накачки для расширения спектрального диапазона генерации параметрических источников [28]. Лазерная среда на хром-форстерите, спектр люминесценции которой поддерживает усиление фемтосекундных лазерных импульсов на центральной длине волны 1,24–1,25 мкм, рассматривалась как подходящий кандидат для ухода от этих проблем. В 2002 году в МГУ впервые в России был создан хром-форстеритовый генератор фемтосекундных импульсов [29], а уже через четыре года на его основе был разработан фемтосекундный лазерный комплекс, генерирующий высокоинтенсивное (до 10^{16} Вт/см^2) излучение в ближнем ИК-диапазоне (1,24 мкм). Позднее, несмотря на стремительное развитие иттербиевых лазерных источников, получение сверхкоротких лазерных импульсов в таких системах было затруднено, что сохранило интерес исследователей к хром-форстеритовой технологии, а достижение тераваттного уровня пиковой мощности позволило расширить класс решаемых научных задач [30]. Таким образом, определился потенциал подобных систем для создания на их основе высокоэффективных и высокоэнергетичных параметрических источников фемтосекундного излучения в среднем ИК-диапазоне. Системное исследование генерационных и усилительных свойств лазерной среды на хром-форстерите, оптимизация выходных параметров созданной лазерной системы с точки зрения

увеличения выходной энергии и расширение её возможностей при создании новых схем стретчирования и компрессии, достижения пиковой мощности ~100 ГВт при одновременном сокращении длительности, – всё это определило вектор исследования нелинейно-оптических процессов, происходящих при взаимодействии высокоинтенсивного (более 1 ТВт/см^2) лазерного излучения с конденсированными и газовыми средами.

Повышение пиковой мощности лазерных источников в ближнем и среднем ИК диапазонах важно для увеличения эффективности нелинейно-оптических процессов и до сих пор реализовывалось с применением технологий оптического параметрического усиления чирпированных импульсов, техник двойного чирпирования, либо с использованием мощных CO_2 газовых усилителей [14]. Эти направления активно развивались в МГУ имени М.В. Ломоносова на кафедре волновых процессов, впоследствии трансформировавшейся в кафедру общей физики и волновых процессов. Так, были предложены и реализованы конкретные схемы параметрических генераторов и усилителей света, развиты теоретико-экспериментальные методы создания эффективных схем параметрической генерации вблизи групповых синхронизмов в нелинейных кристаллах [31]; особый интерес связывался с областью 10 мкм [32] с точки зрения генерации сверхмощных пикосекундных лазерных импульсов дальнего ИК диапазона. Подходы оптического параметрического усиления чирпированных импульсов, развиваемые в мире, сразу показали свою эффективность с точки зрения наращивания выходной энергии лазерных импульсов, однако требовали пикосекундных источников накачки с практически идеальными пространственными и временными характеристиками. Выходная энергия и перестройка по длине волны была ограничена из-за апертурных эффектов при использовании «длинных» нелинейно-оптических кристаллов. Использование газовых CO_2 лазеров было выгодно по причине отсутствия ограничения на достигаемую выходную энергию из-за простоты увеличения апертуры «активных газовых элементов», но недостаточная полоса усиления, конструктивная громоздкость и сложность электрической накачки останавливали их широкое распространение. Разработанные A_2B_6 халькогенидные лазерные кристаллы быстро продемонстрировали свои возможности по получению наносекундного, микросекундного и непрерывного излучения в среднем ИК-диапазоне [33]. Фемтосекундная генерация низкоэнергетичных лазерных импульсов была получена ранее на кристаллах селенида цинка, легированного ионами хрома (Cr:ZnSe), в спектральном диапазоне 2–3 мкм в режиме синхронизации мод. Дальнейшему продвижению в область больших (4–5 мкм) длин волн и получению мощных и высокоэнергетичных фемтосекундных лазерных импульсов в этом диапазоне длин волн на основе твердотельных лазерных сред препятствовала нехватка знаний о генерационных и усилительных свойствах халькогенидных сред, легированных ионами железа, которые к тому же сильно зависели от выбора матрицы, уровня легирования ионами активатора и температуры активного элемента. Процессы затруднялись также

отсутствием мощных 3-мкм лазерных источников наносекундной длительности и потерей в 90-х годах прошлого столетия неразрывной связи между ростовыми и лазерными лабораториями. Решение этих задач определило направление исследований первой части диссертационной работы (***Главы 1, 2***).

Начиная с пионерских работ по нелинейной оптике Р.В. Хохлова, С.А. Ахманова и П. Франкена [21,34] увеличение эффективности нелинейно-оптических преобразований стало предметом интенсивных исследований. Это диктуется интересом к созданию ярких источников когерентного излучения в сверхширокoм диапазоне длин волн от рентгеновского до ТГц диапазона. С прикладной точки зрения это важно для развития современных методов мультиспектральной спектроскопии, в том числе с временным разрешением, которые повышают достоверность получаемых результатов. С точки зрения фундаментальной науки это даёт возможность лучше понять физические механизмы, которые лежат в основе взаимодействия сверхсильного светового поля с веществом, и открывает путь к генерации аттосекундных импульсов [12]. До сих пор нелинейно-оптические процессы в большей степени исследовались с использованием широко распространённого титан-сапфирового лазерного источника. Использование источников среднего ИК диапазона предпочтительнее по ряду причин: во-первых, пондеромоторная энергия электрона увеличивается пропорционально квадрату длины волны; во-вторых, дисперсия газов в среднем ИК-диапазоне уменьшается; в-третьих, появляется возможность использовать резонансы молекулярных газов, большая часть которых собрана именно в этом диапазоне длин волн. Эти предпосылки послужили основой для развития второй части диссертационного исследования (***Глава 3***).

С физикой сверхсильного светового поля неразрывно связана задача получения экстремального состояния вещества [35]. Острая фокусировка фемтосекундного лазерного излучения в объём конденсированной среды позволяет создавать такие состояния в лабораторных условиях [36]. Особый интерес с фундаментальной точки зрения представляет эволюция лазерно-индуцированного экстремального состояния вещества, которая может включать быстрые фазовые переходы, недостижимые в стационарных условиях. Большая часть исследований в мире либо направлена на исследование морфологии остаточных микромодификаций, либо затрагивает начальную стадию создания свободных электронов при взаимодействии высокоинтенсивного лазерного излучения с веществом. Для исследования структурной перестройки материала чаще всего используются рентгеновские методы, причём для получения информации о переходных процессах требуются установки класса «мегасайенс» – лазеры на свободных электронах и источники синхротронного излучения, что ограничивает общность и универсальность подходов для решения таких задач. Развитие лазерных методов создания и диагностики экстремального состояния вещества, работающих в широком временном окне (от фемтосекунд до наносекунд) и

применимых для широкого класса сред (диэлектрики, полупроводники), определило и расширило направление исследований второй части диссертационной работы (***Глава 4***).

Основной **целью диссертационной работы** является разработка экспериментальных подходов к генерации мощных широко перестраиваемых от ближнего до среднего ИК диапазона фемтосекундных лазерных импульсов и их применение к исследованию нелинейных процессов, инициируемых в конденсированных и плотных газовых средах при интенсивности более 1 ТВт/см^2. Для достижения основной цели были поставлены **следующие задачи**:

1. Создание на основе новых активных сред эффективных (до 10%) фемтосекундных лазерных источников нового поколения ближнего (1–2 мкм) и среднего (4–5 мкм) ИК диапазонов с пиковой мощностью порядка и более 10^9 Вт.
2. Разработка эффективных методов управления спектрально-временными свойствами мультигигаваттного фемтосекундного ИК излучения в интересах создания широкодиапазонного источника ультракоротких импульсов в диапазоне длин волн от УФ до ТГц на основе конденсированных и плотных газовых сред.
3. Оптимизация энерговклада и диагностика экстремального состояния вещества, инициируемого в объёме конденсированной среды в области её прозрачности под воздействием фемтосекундного лазерного излучения ближнего и среднего ИК диапазона с интенсивностью более 1 ТВт/см^2.

Объектом исследования являются лазерные источники ИК диапазона и нелинейный отклик среды под воздействием интенсивного лазерного излучения. **Предметом исследования** выступают процессы параметрического и лазерного усиления, а также нелинейно-оптические процессы, которые инициируются при взаимодействии интенсивного (более 1 ТВт/см^2) лазерного излучения ближнего и среднего ИК диапазонов с конденсированными и газовыми средами.

Методология диссертационной работы состоит в проведении экспериментальных исследований, разработке теоретических моделей, их верификации на получаемом экспериментальном материале, получении и интерпретации результатов. Исследования проводились на основе оригинальных разработанных экспериментальных схем.

При исследовании лазерных характеристик кристаллов экспериментально определялась зависимость их спектролюминесцентных свойств от температуры и степени легирования, определялись такие параметры, как коэффициент однопроходного усиления и оптимальная плотность энергии накачки, далее выбиралась оптимальная схема многопроходного усиления и измерялась динамика коэффициента усиления при прохождении импульса инжекции через активную среду, из этого определялась плотность энергии насыщения и коэффициент усиления лазерной среды. Полученные экспериментальные результаты сравнивались с расчётами по расширенной модели Франца-

Нодвика для чирпированных импульсов. При разработке оптических параметрических усилителей с накачкой хром-форстеритовым лазером осуществлялся отбор нелинейно-оптических кристаллов с точки зрения параметра качества преобразования, измерялись перестроечные зависимости и с помощью широкополосного оптического стробирования с разрешением по частоте определялись характеристики сверхкоротких лазерных импульсов на выходе реализованного параметрического усилителя. Для расширения спектра созданных мощных ИК источников в коротковолновую область спектра, вплоть до УФ, использовалась методика генерации оптических гармоник в условиях оптимизации длины среды, давления и состава газовой смеси, для чего также был разработан пакет специализированных программ. Для управления спектральными свойствами излучения в среднем ИК-диапазоне использовалось явление филаментации лазерного пучка в газовой среде, дисперсионные и нелинейные свойства которой могли управляться за счёт давления и использования бинарных смесей молекулярного и инертного газов. Генерация интенсивного малопериодного ТГц излучения осуществлялась в процессе оптического выпрямления в органических кристаллах при их накачке фемтосекундными импульсами ближнего ИК диапазона. Для изучения взаимодействия высокоинтенсивного импульсного излучения с объёмом прозрачной конденсированной среды на микронном пространственном масштабе применялся разработанный комплекс теоретических и экспериментальных методов, обеспечивший возможность регистрации переходных процессов в эволюции лазерно-индуцированного состояния вещества, включая динамические фазовые переходы, с фемтосекундным временным разрешением.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Параметрическое преобразование частоты *мощного фемтосекундного излучения хром-форстеритового лазера* при реализации частотно невырожденных групповых синхронизмов и в условиях отсутствия влияния паразитных преобразований в нелинейно-оптических полупроводниковых кристаллах позволяет *эффективно* (до 10%) генерировать перестраиваемые от ближнего (~ 1 мкм) до среднего ИК (~8 мкм) диапазона фемтосекундные лазерные импульсы *субгигаваттного* уровня мощности.
2. Генерация *мультигигаваттного* (более 20 ГВт) фемтосекундного лазерного излучения в *среднем ИК-диапазоне* (4–5 мкм) может быть реализована в легированных ионами железа халькогенидных средах по схеме *многопроходного усиления* чирпированных *широкополосных импульсов инжекции* микроджоульного уровня энергии при накачке мегаваттными наносекундными 3-мкм лазерными импульсами с плотностью энергии ~1 Дж/см^2.
3. Двухволновая мультигигаваттная фемтосекундная лазерная система ближнего и среднего ИК диапазонов в сочетании с разработанными нелинейными *методами расширения спектра* в конденсированных и газовых средах с синтезированной нелинейностью и

управляемыми дисперсионными свойствами позволяет создать высокоэффективный (1-10%) и широкодиапазонный (от УФ до ТГц) источник когерентного излучения.

4. Сочетание процессов генерации затравочной микроплазмы коротковолновым излучением за счёт полевой ионизации и последующего нагрева электронов микроплазмы длинноволновым лазерным излучением при использовании *двухцветной пары* остросфокусированных (NA=0,5) фемтосекундных низкоэнергетичных (~мкДж) лазерных импульсов обеспечивает управление объёмным энерговкладом (до уровня 10 кДж/см^3) в конденсированную среду в области её прозрачности.
5. Нелинейное взаимодействие остросфокусированного (NA=0,86) низкоэнергетичного (~мкДж) фемтосекундного лазерного излучения среднего ИК диапазона (λ=4,6 мкм) с объёмом монокристаллического высокоомного кремния позволяет достигнуть объёмного энерговклада более 5 кДж/см^3 и обеспечивает лазерную модификацию кристалла в микрообъёме в режиме однократного воздействия.
6. Острая фокусировка (NA=0,5) фемтосекундного низкоэнергетичного (~мкДж) лазерного изучения в объём конденсированной кристаллической среды (на примере кремния и фторида лития) в области её прозрачности приводит к созданию микроплазмы, термализация которой сопровождается возбуждением когерентных *терагерцевых фононов*, а их регистрируемый скачкообразный временной спектр отражает динамические *фазовые переходы*.

Научная новизна работы

В диссертационной работе впервые получены следующие научные результаты:

1. Созданы высокоэффективные (~10%) схемы генерации субтераваттного фемтосекундного излучения ближнего ИК диапазона (λ=1,24 мкм) на основе разработанных методов *компенсации термооптических искажений*, контроля параметров лазерного излучения в режиме реального времени и проведённых исследований усилительных свойств кристаллов хром-форстерита в зависимости от *уровня легирования*.
2. Предложены и разработаны высокоэффективные (до 10%) схемы генерации перестраиваемого от ближнего ИК (~1 мкм) до среднего ИК (~8 мкм) диапазона фемтосекундного излучения субгигаваттной пиковой мощности при параметрическом усилении *затравочного излучения суперконтинуума* в неоксидных полупроводниковых нелинейно-оптических кристаллах *вблизи вертикального участка перестроечной кривой* с накачкой излучением хром-форстеритового лазера.
3. Экспериментально показано, что генерация 3-мкм излучения в импульсно-периодическом режиме с высокой энергией (~100 мДж), высокой пиковой (~МВт) и средней (~Вт) мощностями требует тщательного согласования *активного метода модуляции* добротности и выбранной матрицы, легированной ионами эрбия, в условиях компенсации термооптических искажений в лазерном элементе.

4. Предложен и экспериментально обоснован подход к генерации малопериодного (до 4-х периодов поля) мультигигаваттного (более 20 ГВт) излучения среднего ИК диапазона (4–5 мкм) по схеме усиления чирпированных импульсов в *халькогенидных средах, легированных ионами железа,* с широкими возможностями к управлению спектрально-временными свойствами излучения: перестройкой по спектру генерации за счёт *изменения уровня легирования и матрицы*, в которой расположены легирующие ионы, расширением полосы генерации за счёт *спектрального синтеза* полос халькогенидных сред Fe:CdSe/Fe:ZnSe, *расширением спектра* лазерного излучения в процессе фазовой самомодуляции в смеси инертного и молекулярного газов и посткомпрессии в среде с *отрицательной* дисперсией групповой скорости.
5. Показано, что нелинейное распространение высокоинтенсивного лазерного излучения среднего ИК диапазона (λ=4,6 мкм) в *бинарной смеси* молекулярного и инертного газов с синтезированными нелинейными и дисперсионными свойствами позволяет управлять генерационными свойствами *суперконтинуума* с равномерным уширением как в длинноволновую (>5 мкм), так и коротковолновую (< 4 мкм) области спектра, а также способствует повышению эффективности нелинейно-оптического процесса *генерации оптических гармоник* (до 1% в третью, до 0,3% в пятую и до 0,5% суммарно в более высокие гармоники вплоть до 11-й) за счёт существенного изменения профиля показателя преломления вблизи перекрывающихся резонансных линий.
6. Экспериментально установлено, что микроплазма субкритической плотности, генерируемая при взаимодействии лазерного излучения ближнего ИК диапазона (λ=1,24 мкм) с вакуумной интенсивностью ~10^{14}-10^{15} Вт/см^2 с плотной газовой средой, позволяет осуществлять эффективное (до 0,1%) нелинейно-оптическое преобразование излучения ИК диапазона в *оптические гармоники*.
7. Экспериментально установлено, что *сочетание* разработанных методов мультиспектрального силового воздействия, а также методов диагностики микроплазмы и процессов переноса энергии позволяет реализовать режимы высокого (до ~10 кДж/см^3) объёмного энерговклада при взаимодействии остросфокусированного (NA=0,5;0,86) фемтосекундного лазерного излучения с интенсивностью более 1 ТВт/см^2 с диэлектрическими и полупроводниковыми средами в области их прозрачности. Это позволило впервые осуществить объёмную микромодификацию монокристаллического высокоомного кремния при однократном воздействии на него остросфокусированного (NA=0,86) фемтосекундного излучения среднего ИК диапазона (λ=4,6 мкм), открыв путь к трёхмерной функционализации полупроводниковых материалов.
8. Установлено, что использование метода генерации несинхронной третьей гармоники в остросфокусированных (NA=0,5) лазерных пучках при время-разрешённой нелинейно-оптической диагностике динамики когерентных терагерцевых фононов, индуцированных

в процессе лазерно-плазменного возбуждения в микрообъёме диэлектрика/полупроводника, позволяет, в сочетании с атомистическими расчётами, зарегистрировать каскад быстрых динамических *фазовых переходов*, происходящих на пикосекундном временном масштабе.

Практическая значимость работы определяется следующим:

1. На основе отечественной элементной базы создана двухдиапазонная фемтосекундная лазерная система *ближнего (1,24 мкм) и среднего ИК диапазонов (4–5 мкм) настольного типа* с использованием кристаллов хром-форстерита и легированного ионами железа селенида цинка; достигнуты близкие к рекордным показателям значения пиковой мощности и сверхкороткой длительности. Нелинейно-оптическое преобразование этого излучения при взаимодействии с конденсированными и плотными газовыми средами позволило создать лабораторный широкодиапазонный источник когерентного излучения (от УФ до ТГц). Развитие методов преобразования мощного ИК излучения в оптические гармоники низкого порядка (до 160 нм) обеспечивает, в перспективе, возможность применения методов инжекции для повышения временной когерентности излучения в источниках СИ с ультрамалым эмиттансом. Подобные «настольные» источники могут быть применены для стационарной и время-разрешенной мультиспектральной спектроскопии обратимых и необратимых структурных изменений в различных материалах.
2. Создание перестраиваемых в среднем ИК-диапазоне (2667-2851 нм) наносекундных лазерных источников с активной модуляцией добротности высокой пиковой (~6 МВт) и средней (~1,6 Вт) мощности позволило использовать их в качестве накачки фемтосекундных ИК лазерных систем. Их применение возможно в процессах взаимодействия 3 мкм излучения с веществом в интересах создания экстремальных состояний в жидкостях и твердотельных средах при реализации новых подходов в микрообработке материалов. Экстремальное (более 10^4 $см^{-1}$) поглощение в области 3 мкм в воде позволяет использовать разработанные лазерные источники при микрообработке поверхности материалов методом лазерно-индуцированного жидкостного травления.
3. Разработан метод фемтосекундного двухцветного лазерного воздействия на твердотельную среду, что открывает возможности для прецизионной объёмной управляемой микрообработки прозрачных материалов с контролем процесса взаимодействия по сигналу третьей гармоники. В результате такого воздействия становится возможным увеличение объёмной плотности поглощённой энергии при меньшей, по сравнению с одноимпульсным воздействием, энергии лазерного излучения, что обеспечивает условия ударно-волнового возмущения с давлением порядка нескольких гигапаскалей, что важно для развития фемтосекундных микротехнологий.

4. Создание нового класса фемтосекундных лазерных источников среднего ИК диапазона (λ>4 мкм) при использовании режима острой фокусировки (NA=0,86) открывает путь к трёхмерной объёмной микрообработке узкозонных полупроводников и знаменует собой начало нового подхода к трёхмерной лазерной функционализации полупроводниковых материалов. В перспективе это может привести к разработке новых подходов в ИК фотонике для прототипирования фотонных интегральных схем, интегрированных в один чип миниатюрных лазерных источников, оптоэлектронных устройств, оптоэлектронных переходов и высокоскоростных оптических каналов передачи данных.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 21-52-50005, № 21-32-70021, № 18-02-40018-мега, № 18-32-20016, № 18-52-50019, № 17-02-01065 а, № 14-29-07235 офи_м, № 14-02-00819, № 11-02-01323а, в которых соискатель выполнял роль руководителя; гранты № 19-29-12030, № 18-52-41007, № 18-29-20090, № 18-29-20074, № 18-29-06035, № 17-52-04062, № 15-32-20961, № 14-02-00814, № 12-02-11500, № 12-02-01367-а , № 12-02-01207-а, № 11-02-12197-офи-м-2011, № 11-02-05055-б, № 10-02-01465-а, № 09-02-12219-офи_м, № 09-02-09609-моб_з, № 09-02-01063-а, № 08-02-00673-а, № 06-02-16872-а, в которых соискатель выполнял роль исполнителя) и РНФ (грант № 17-72-20130, в которых соискатель выполнял роль руководителя; гранты № 14-12-00520, № 20-19-00148, в котором соискатель выполнял роль исполнителя). Исследования были поддержаны также Советом по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (стипендии Президента Российской Федерации молодым учёным и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики СП-274.2013.1 и СП-378.2018.4).

Объём и структура диссертации

Диссертационная работа включает в себя Введение, Основную часть в виде 4-х оригинальных глав, каждая из которых содержит обзор литературы, Заключение, содержащее выводы, Список литературы. Общий объём диссертации – 327 страниц, включая 148 рисунков и 12 таблиц. Библиография включает 424 наименования на 26 страницах.

Степень достоверности и апробация результатов

Представленные в диссертационной работе результаты получены с использованием современных методов экспериментальной физики. При выполнении экспериментальной части диссертационной работы отдельное внимание было уделено повторяемости регистрируемых эффектов, что обеспечивало необходимый уровень достоверности результатов. Вместе с тем, в диссертации для усиления защищаемых экспериментальных выводов были разработаны теоретические и численные модели, которые обеспечили более глубокий уровень физического понимания рассматриваемых явлений и повысили научную ценность полученных экспериментальных результатов.

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается также публикациями в ведущих научных журналах и выступлениями на профильных научных конференциях. Основные результаты диссертационной работы были представлены автором лично на следующих международных конференциях:

- ***в рамках приглашённых докладов***: SPIE Optics and Optoelectronics-2017 (Прага, Чехия); UltrafastLight-2017, UltrafastLight-2019 (Москва, Россия) (Москва, Россия); 18th International Conference on Laser Optics «ICLO 2018» (Санкт-Петербург, Россия); UltrafastLight-2018 (Москва, Россия); ALT'19, ALT'21 (Прага, Чехия; Москва, Россия, онлайн), ALPS-2021 (Япония, онлайн); SPIE Laser Damage 2021 (Рочестер, США, онлайн); IEEE Photonics Conference 2021 (Квебек, Канада, онлайн); ALT'22 (Москва, Россия);

- ***в рамках устных докладов***: XIV Школа молодых учёных «Актуальные проблемы физики-2012» (Звенигород, Россия); ICONO-LAT 2013 (Москва, Россия); ATL'13, ALT'21 (Будва, Черногория; Москва, Россия, онлайн); ILLA 2014 (Шатура, Россия); HILAS-2014 (Берлин, Германия); Laser Optics 2014, 2018 (Санкт-Петербург, Россия); PHOTOPTICS-2015 (Берлин, Германия); Conference on Lasers and Electro-Optics-2015 (Сан-Хосе, США); CLEO Europe & EQEC 2015, CLEO Europe & EQEC 2017, CLEO Europe & EQEC 2019 (Мюнхен, Германия); (Мюнхен, Германия); 15-ая Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков - ОМИП 2015» (Москва, Россия); PALS-2015 (Саратов, Россия); XVII научная школа «Нелинейные волны – 2016» (Нижний Новгород, Россия); FLAMN-16, FLAMN-19 (Санкт-Петербург, Россия); PIERS 2017 (Санкт-Петербург, Россия); X Международная конференция молодых учёных и специалистов «Оптика-2017» (Санкт-Петербург, Россия); VII международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, Россия); XXV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018» (Москва, Россия); ICLO 2018, ICLO 2020 (Санкт-Петербург, Россия); 7th International Summer School «Trends and new developments in Laser Technology 2018» (Дрезден, Германия); 7th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences-2018 (Москва, Россия); UltrafastLight-2018, UltrafastLight-2019, UltrafastLight-2020, UltrafastLight-2021 (Москва, Россия); VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, Россия); ЛаПлаз-2019, ЛаПлаз-2021 (Москва, Россия); SPIE Optics + Optoelectronics-2019 (Прага, Чехия); ICPPP20 (Москва, Россия); Laser Congress 2019 (Вена, Австрия); ASSL-2019 (Вена, Австрия); 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, Россия); XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике-2022 (Москва, Россия).

Публикации

По теме диссертации опубликовано **54** работы в рецензируемых научных периодических журналах: Materials Today Communications, European Physical Journal D, Laser

Physics Letters, Quantum Electronics, Journal of Russian Laser Research, New Journal of Physics, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, Optics Letters, Journal of Optics, Applied Physics Letters, Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики, Physical Review A, Scientific Reports, Optical Materials, Measurement Science and Technology, Photonics, International Journal of Molecular Sciences; **13** статей, изданных по результатам конференций, в сборниках: Journal of Physics: Conference Series, Proceedings of the 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology, OSA Technical Digest, Proceedings Nonlinear Optics and Applications XI, Proceedings SPIE , IEEE Proceedings of International Conference Laser Optics, 2021 IEEE Photonics Conference (IPC), **2** учебно-методических пособия; оформлен **1** патент.

Общее количество индексируемых публикаций по данным Web of Science Core Collection – **70**. Это позволяет считать, что результаты диссертационной работы соответствуют современному мировому уровню исследований в области лазерной физики, являются обоснованными и достоверными.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором или при его непосредственном участии. Вклад автора в исследования, на результатах которых подготовлена диссертационная работа, является определяющим; это касается как постановки решаемых задач, так и основных идей, расчётов и выводов. Диссертация является законченным научным исследованием и по своему содержанию соответствует специальности 1.3.19 — лазерная физика по физико-математическим наукам.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во ***введении*** обсуждается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели, задачи исследования, защищаемые положения, определяются научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также приводится краткое содержание диссертационной работы.

В первой части (первая и вторая главы) диссертационной работы описываются методы получения мультигигаваттных фемтосекундных лазерных импульсов в ближнем и среднем ИК диапазонах.

Первая глава посвящена описанию созданного многофункционального фемтосекундного лазерного комплекса ближнего ИК диапазона (1,24 мкм) на кристалле хром-форстерита с рекордными для нынешнего уровня таких лазерных систем выходными параметрами, а именно мульгигаваттной пиковой (более 100 ГВт) и высокой (более 1 Вт) средней мощностью. Благодаря системному исследованию усилительных свойств семейства хром-форстеритовых сред в зависимости от уровня легирования определяются такие важные параметры, как плотность энергии насыщения и коэффициент усиления слабого сигнала. Рассматриваются подходы к расширению спектра созданной фемтосекундной лазерной

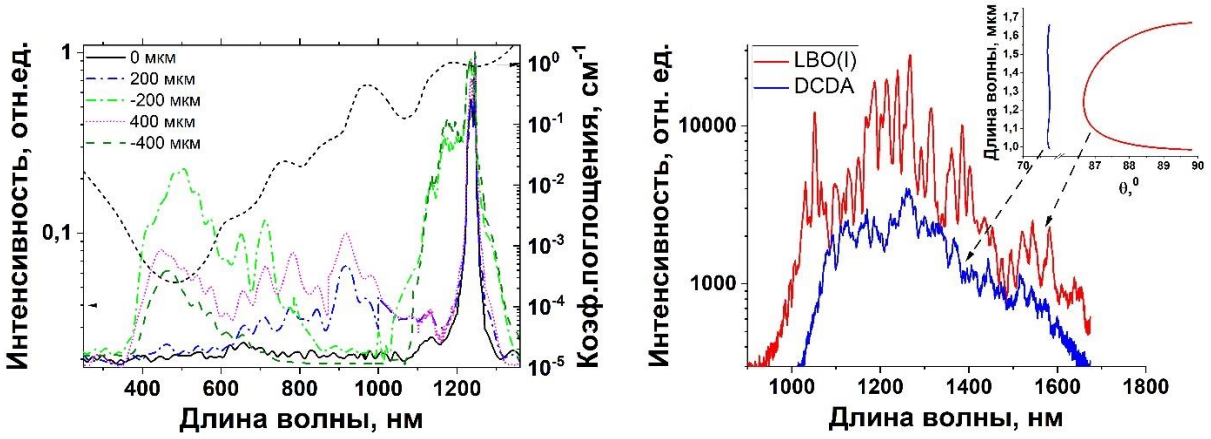
системы ближнего ИК диапазона на основе генераторов суперконтинуума в конденсированных средах и их широкополосного усиления в процессах параметрического усиления в нелинейно-оптических кристаллах.

В первой части *параграфа 1.1* проводится обзор существующих мощных твердотельных лазерных источников, определяются наиболее важные генерационные и усилительные характеристики активных сред, принципиальным образом влияющие на возможность получения большой энергии в относительно коротком лазерном импульсе, что позволяет рассчитывать на высокую пиковую мощность. В следующей части приводится подробный обзор существующих перестраиваемых от ближнего вплоть до дальнего ИК диапазона лазерных источников, основанных на параметрическом усилении, генерации разностной частоты, оптическом параметрическом усилении и методике двойного чирпирования.

В *параграфе 1.2* рассматриваются основные блоки разработанной хром-форстеритовой лазерной системы в ближнем ИК-диапазоне. Для хром-форстеритовых кристаллов с разным уровнем легирования определены плотность энергии насыщения и коэффициент усиления слабого сигнала, которые составили $F_{\text{нас}} = 0{,}2 \div 0{,}3$ Дж/см^2 и $G_0 = 1{,}38 - 1{,}75$ ($g_0 = 0{,}28 – 0{,}5$ см$^{-1}$) соответственно. Подробно описываются пути модернизации усилителей для увеличения средней мощности лазерного излучения до нескольких ватт при сохранении пиковой мощности на мультигигаваттном уровне. Показано, что при плотности энергии накачки $F > (1 - 1{,}5)$ Дж/см^2, необходимой для реализации максимального усиления, и при частоте повторения импульсов накачки $50 - 100$ Гц в кристалле форстерита возникает термооптическая линза с оптической силой $0{,}4 - 1{,}0$ диоптрии. Разработанные методы её компенсации позволили достичь близкого к 10% к.п.д. лазерного усилителя относительно поглощённой энергии накачки и рекордных для хром-форстеритовых фемтосекундных лазерных систем значений пиковой (более 100 ГВт) и средней мощности (более 1 Вт).

В *параграфе 1.3* обсуждаются методы расширения спектра созданной фемтосекундной лазерной системы ближнего ИК диапазона на основе генераторов суперконтинуума (СК) в конденсированных средах и их широкополосного параметрического усиления в нелинейно-оптических кристаллах. Впервые показано, что управление спектральным составом и спектральной яркостью СК при филаментации остросфокусированного (NA>0,1) фемтосекундного лазерного излучения в конденсированной среде (на примере воды) возможно в условиях расходящегося волнового фронта излучения накачки за счёт подбора его кривизны и интенсивности лазерного излучения на входе в среду, что обеспечивает динамический баланс между плазменной дефокусировкой, керровской самофокусировкой и дифракцией. В результате показано, что изменение положения перетяжки лазерного пучка остросфокусированного (NA>0,1) излучения ближнего ИК диапазона (λ=1,24 мкм) относительно границы раздела вода-воздух Δz_f в диапазоне $[-500$ мкм, $+500$ мкм$]$

позволяет изменять спектральную яркость СК (на примере видимой его части) более чем на порядок (см. ***Рис. 1 (а)***). В диссертации также предлагаются *высокоэффективные* (до 6%) схемы генерации широкополосных и ярких суперконтинуумов при накачке нелинейно-оптических кристаллов дидейтероарсената цезия (DCDA) и трибората лития (LBO) излучением второй гармоники хром-форстеритового лазера (λ=0,62 мкм) с плотностью энергии 50–120 ГВт/см^2 в области вертикальных участков перестроечных кривых. Разработанные подходы позволили реализовать генерацию *стабильных мощных* (до 20 МВт) *фемтосекундных суперконтинуумов* в ближнем ИК-диапазоне со спектральной шириной до 450 нм, которые использовались в качестве затравочного излучения в оптических параметрических усилителях (см. ***Рис. 1 (б)***).



(а) *(б)*

Рис. 1. (а) Спектры суперконтинуума при воздействии сфокусированного (NA=0,1) 100-мкДж лазерного импульса ближнего ИК диапазона (λ=1,24 мкм) на воду для различных расстояний Δz_f перетяжки лазерного пучка относительно границы раздела воздух-вода. Зеленые и синие линии соответствуют режиму воздействия, при котором перетяжка лазерного пучка находится ближе границы раздела воздух-вода ($\Delta z_f < 0$), а красными и розовыми линиями представлен режим, соответствующий фокусировке в воду ($\Delta z_f > 0$). Чёрная пунктирная линия отражает зависимость коэффициента поглощения воды от длины волны. (б) Спектр выходного излучения параметрического усилителя (ПУ) на основе кристаллов DCDA (θ =71^0, φ=45^0, толщина 8 мм) и LBO(I) (θ=88^0, φ=0^0, толщина 4 мм) с накачкой второй гармоникой (λ=0,62 мкм) хром-форстеритового лазера. На вставке показаны соответствующие перестроечные зависимости ПУ.

В *параграфе 1.4* содержится оригинальная часть диссертационной работы, связанная с созданием параметрических усилителей (ПУ) гигаваттного и субгигаваттного уровня мощности ближнего и среднего ИК диапазона соответственно с накачкой хром-форстеритовым лазером. В начале параграфа вырабатываются критерии отбора нелинейно-оптических кристаллов для высокоэффективного (до 10%) широкополосного параметрического преобразования мощной лазерной накачки ближнего ИК диапазона в область ~1–8 мкм, на основании которых выбираются кристаллы бета-бората бария (BBO), титанил-арсенат калия (KTA), тиогаллата серебра (AGS) и тиогаллата лития (LGS). Отмечается возможность получения широкополосного параметрического преобразования

вдали от вырожденного режима вблизи вертикального участка перестроечной кривой, что экспериментально достигается для кристаллов BBO и KTA в области 2,3 мкм и 3,8 мкм соответственно. Впервые продемонстрировано, что параметрическое усиление импульсов инжекции среднего ИК диапазона в кристалле тиогаллата серебра (AGS) при накачке *отрицательно чирпированными* импульсами хром-форстеритового лазера (2 мДж, 10 Гц, 260 фс) с плотностью мощности на уровне 100 ГВт/см^2 происходит с рекордной эффективностью (до 10% в две волны и до 3% в холостую волну) за счёт увеличения спектральной яркости суперконтинуума в условиях роста групповой длины взаимодействующих импульсов. Достигнута энергия импульса более 10 мкДж во всей полосе перестройки параметрического усилителя от 3,5 мкм до 5,5 мкм при сохранении спектральной ширины лазерных импульсов на уровне ~180 нм. Для увеличения спектральной ширины лазерных импульсов среднего ИК диапазона в диссертации впервые предложено рассмотреть кристалл LGS. В результате экспериментально обосновано и теоретически подтверждено, что наличие *невырожденного по частоте группового синхронизма* и отсутствие *спектрально близких паразитных преобразований* в условиях снижения влияния *двухфотонного поглощения* в процессе параметрического усиления затравочного излучения суперконтинуума в кристалле тиогаллата лития (LGS) с накачкой излучением хром-форстеритового лазера при плотности мощности на уровне 50 ГВт/см^2 обеспечивают *эффективную* (до 8%) генерацию фемтосекундных импульсов в ближнем и среднем ИК диапазонах с энергией более 200 мкДж в диапазоне 1,6–1,8 мкм и более 10 мкДж в диапазоне 5–7,5 мкм. Посткомпрессия импульсов ближнего и среднего ИК диапазонов на выходе трехкаскадного параметрического усилителя, выполненная с использованием пластинок из материала с обратным знаком дисперсии групповой скорости, позволила получить для сигнальной и холостой волн импульсы длительностью ~37 фс и ~75 фс и достигнуть уровня пиковой мощности до ~5 ГВт и ~0,3 ГВт соответственно (см. ***Рис. 2***).

Во *второй главе* диссертационной работы описывается разработанная фемтосекундная лазерная система среднего ИК (4−5 мкм) диапазона на основе халькогенидной активной среды Fe:ZnSe, рассматриваются подходы к расширению спектра генерации дальше в средний ИК-диапазон (до 5−6 мкм) с использованием кристалла Fe:CdSe. Для увеличения ширины полосы лазерного усиления в диссертации демонстрируются результаты по спектральному синтезу полос усиления Fe:ZnSe и Fe:CdSe.

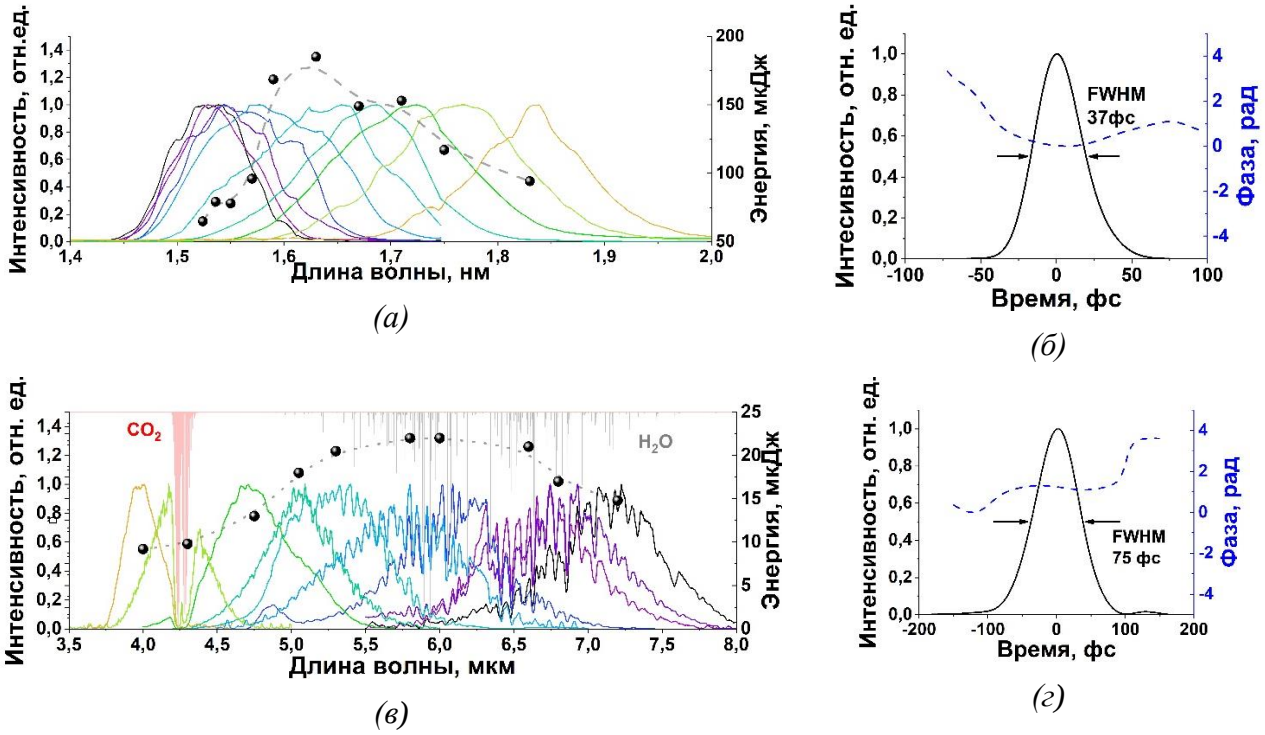


Рис. 2. Экспериментальная зависимость энергии от длины волны и восстановленные временная форма и спектральная фаза а), б) сигнального и в), г) холостого импульсов на выходе трёхкаскадного фемтосекундного параметрического усилителя на кристалле тиогаллата лития (LGS) с накачкой хром-форстеритовым лазером. В верхней части графика (в) показаны линии поглощения CO_2 и H_2O.

В *параграфе 2.3* приведены результаты по созданию твердотельных лазеров с длинами волн в области 3-мкм, попадающими в полосу поглощения халькогенидных лазерных сред. Разработаны методы компенсации тепловой линзы в резонаторе 3-мкм лазера накачки с сохранением относительно высокого пространственного качества излучения при мегаваттной пиковой мощности. Последовательно рассматриваются подходы к применению новых модуляторов добротности на основе KYW/KGW, обладающих высокой (на уровне 50 ГВт/см^2) лучевой стойкостью, для получения мощного импульсно-периодического излучения в области 3 мкм. В результате в схеме генератор/усилитель на основе кристалла Cr:Yb:Ho:YSGG достигается выходная энергия лазерных импульсов ~90 мДж при частоте повторения до 5 Гц. Использование кристалла Er:YAG с большей теплопроводностью (~13 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$) повышает частоту повторения импульсов до 10 Гц при незначительном снижении выходной энергии до ~60 мДж. Дальнейшее увеличение энергии до уровня, близкого к 100 мДж, при сохранении импульсно-периодического работы 3-мкм лазера на частоте 10 Гц удалось реализовать с применением оптико-механического метода модуляции добротности, свободного от потерь на деполяризацию. Использование диодной накачки кристалла Er:YLF позволила впервые создать перестраиваемый источник накачки в области 3 мкм с высокой пиковой (до 6,3 МВт) и средней (до 1,7 Вт) мощностью. Таким образом, было установлено, что, несмотря на широкий выбор сред для 3-мкм лазерной генерации, получение большой

энергии, высокой пиковой и/или высокой средней мощности требует выбора конкретной лазерной среды и конкретного метода модуляции добротности.

В *параграфе 2.4* демонстрируются оригинальные результаты по усилению широкополосных импульсов среднего ИК диапазона (4−5 мкм), генерируемых на выходе из ПУ в многопроходном усилителе на основе Fe:ZnSe с накачкой 3-мкм наносекундным лазером (см. ***Рис. 3***). Обсуждаются вопросы влияния различного профиля легирования активного элемента, остаточного давления углекислого газа и температуры среды (вплоть до температуры жидкого азота) на изменение генерационных и усилительных свойств лазерной среды. Демонстрируются способы увеличения энергии инжектируемых стретчированных импульсов в среднем ИК-диапазоне в многопроходных усилителях и методы их временной компрессии.

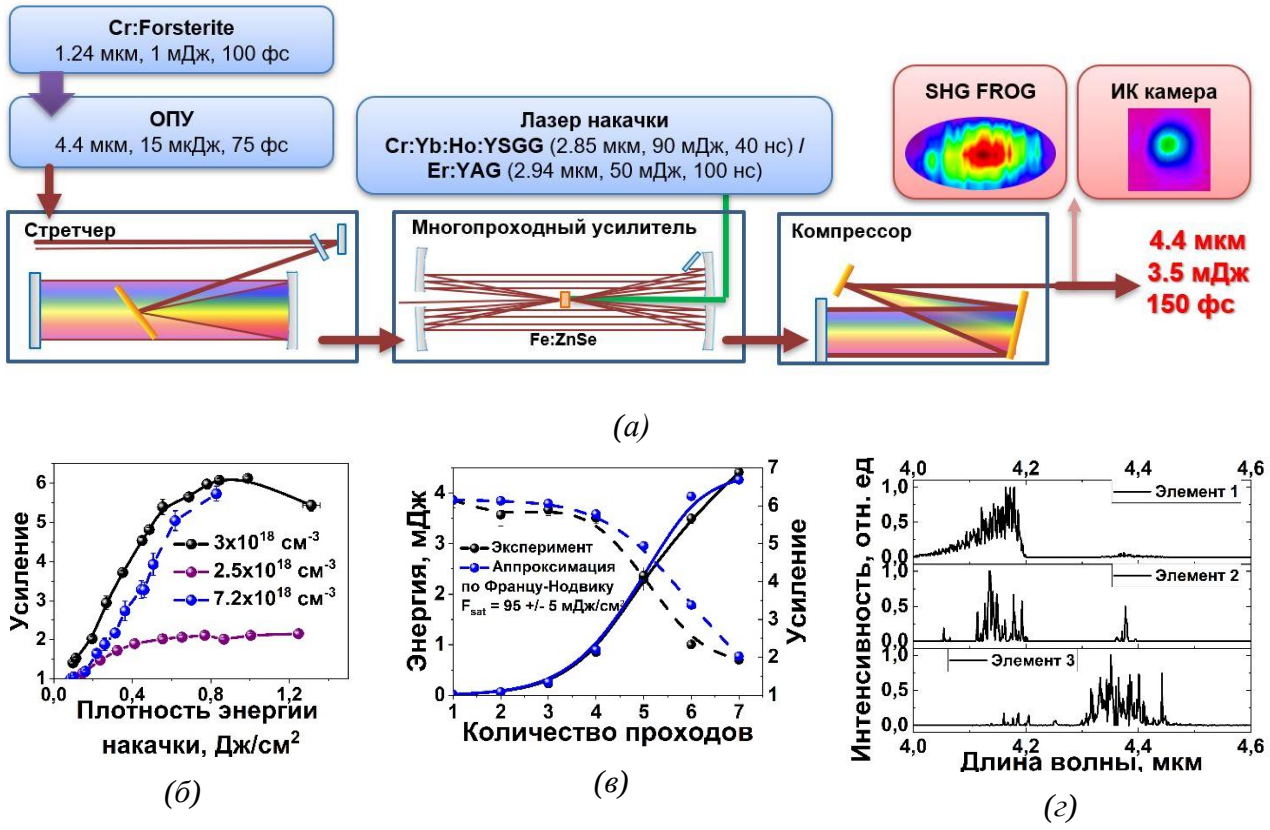


Рис. 3. (а) Экспериментальная схема фемтосекундной лазерной системы на основе усиления чирпированнных импульсов среднего ИК диапазона в кристалле Fe:ZnSe. (б) Зависимость коэффициента усиления на проход от плотности энергии накачки. (в) Зависимость коэффициента усиления и выходной энергии от числа проходов в многопроходном усилителе при плотности энергии накачки 0,8 Дж/см^2; (г) спектры генерации кристаллов с разным уровнем и профилем легирования (элемент №1 – 1,2×10^{19} ат./см^3, элемент №2 – 2,1×10^{19} ат./см^3, элемент №3 – 5,6×10^{19} ат./см^3) при накачке наносекундным Cr:Er:YSGG лазером при температуре 10^{o}C.

В результате после семи проходов через монокристалл Fe:ZnSe с концентрацией легирующих ионов железа на уровне 3×10^{18} см$^{-3}$ на выходе из многопроходного усилителя была получена энергия 4,4 мДж. Дальнейшее увеличение количества проходов приводило к падению выходной энергии. После компрессии (в компрессоре фемтосекундных импульсов на основе дифракционных решёток) была получена выходная энергия на уровне 3,5 мДж с

длительностью импульса ~150 фс, то есть пиковая мощность составила более 20 ГВт. Далее демонстрируются результаты по исследованию усилительных свойств поликристаллических элементов Fe:ZnSe с высоким уровнем легирования ионами железа (до 10^{20} $см^{-3}$). Обнаружено, что наличие областей с концентрацией порядка $(1\div2)\times10^{19}$ $см^{-3}$ и выше приводит к уменьшению времени жизни верхнего уровня в 1,5–2 раза по сравнению с однородно легированным элементом на уровне 3×10^{18} $см^{-3}$, что может быть связано с концентрационным тушением люминесценции. При использовании таких элементов в схемах многопроходных усилителей требуется умеренное охлаждение до 5−7 ºС. Спектр генерации сильно легированных элементов сдвигается в красную область спектра (4,4 мкм при использовании кристалла с уровнем легирования $5,6\times10^{19}$ ат./$см^3$), что позволяет создавать фемтосекундные источники в окне прозрачности атмосферы 4,5–5 мкм.

В *параграфе 2.5* рассматриваются подходы к расширению спектра генерации дальше в средний ИК-диапазон (до 5–6 мкм) с использованием кристалла Fe:CdSe. Для возможного увеличения длины волны излучения лазерной системы впервые исследованы усилительные свойства кристалла Fe:CdSe с накачкой излучением мощного 3-мкм лазера для широкополосного усиления фемтосекундного импульса ПУ с центральной длиной волны 5 мкм. Исследование температурной зависимости времени жизни верхнего лазерного уровня кристалла Fe:CdSe с концентрацией ионов железа $2,5\cdot10^{18}$ $см^{-3}$ выявило, что охлаждение лазерного элемента до температуры, близкой к температуре жидкого азота, позволяет увеличить время жизни верхнего лазерного уровня до 10 мкс и более. Оптическая накачка криогенно охлаждаемого кристалла Fe:CdSe с использованием лазера Er:YAG с длиной волны 2,94 мкм при плотности энергии накачки 0,8-1,0 Дж/$см^2$ позволила достичь коэффициента усиления слабого сигнала инжекции до 3,16 $см^{-1}$ в области 5 мкм. В результате удалось впервые реализовать многопроходное усиление чирпированных широкополосных импульсов среднего ИК диапазона в области 5-мкм в кристалле Fe:CdSe. На пяти проходах получены фемтосекундные импульсы с энергией ~1 мДж спектральной шириной в 320 нм на центральной длине волны ~ 5 мкм. После компрессии до 134 фс это позволило достичь мультигигаваттного уровня пиковой мощности на выходе такого лазерного источника. Таким образом, показана универсальность разработанного в диссертации подхода к созданию мощных источников среднего ИК диапазона (4–6 мкм) на основе усиления чирпированных импульсов в халькогенидных активных средах с оптической накачкой мощными 3-мкм эрбиевыми лазерными источниками. В конце параграфа впервые демонстрируются возможности по спектральному синтезу полос усиления халькогенидных сред Fe:ZnSe/Fe:CdSe. В результате комбинация этих активных сред позволила усилить более широкополосные лазерные импульсы, чем в схемах на основе одной активной среды. В перспективе это может позволить генерировать малопериодное излучение среднего ИК

диапазона напрямую из лазерной системы без использования дополнительных нелинейных методов расширения спектра импульса и его последующей посткомпрессии.

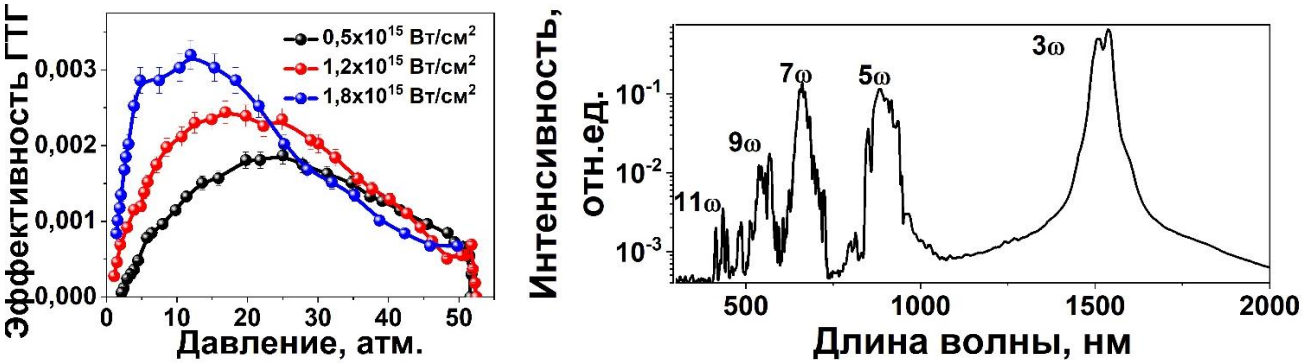
Вторая часть (третья и четвёртая главы) диссертации посвящена исследованию нелинейно-оптических преобразований высокоинтенсивного (более 1 ТВт/см^2) фемтосекундного лазерного излучения ближнего и среднего ИК диапазонов в конденсированных и плотных газовых средах.

В *третьей главе* представлены эксперименты по генерации оптических гармоник при взаимодействии сфокусированного излучения ближнего и среднего ИК диапазонов с газовой средой, включая смеси. Последовательно рассматривается вопрос влияния длины волны воздействующего лазерного излучения, давления и длины газовой среды на энергетические (эффективность) и спектральные характеристики генерируемых оптических гармоник. Обсуждаются и реализуются способы повышения эффективности преобразования в оптические гармоники при использовании молекулярных резонансов в смеси газов. Для расширения спектра излучения созданных источников ближнего и среднего ИК диапазонов в более длинноволновый диапазон отдельно рассматриваются способы генерации ТГц излучения в органических кристаллах в процессах оптического выпрямления интенсивного ИК лазерного излучения. За счёт использования смеси газов (молекулярного и атомарного) высокого давления демонстрируются возможности расширения спектра мощных фемтосекундных ИК-импульсов до нескольких октав. Делается вывод о создании широкодиапазонного источника (от УФ до ТГц) когерентного излучения на основе разработанных источников фемтосекундной длительности ближнего и среднего ИК диапазонов.

В *параграфе 3.1* описываются физические основы взаимодействия высокоинтенсивного лазерного излучения с веществом, в том числе явление филаментации мощного лазерного излучения; обсуждаются вопросы уширения спектра, временной компрессии лазерных импульсов и генерации оптических гармоник.

В *параграфе 3.2* приводятся эксперименты по генерации гармоник высокоинтенсивного (более 1 ТВт/см^2) излучения ближнего и среднего ИК диапазонов в конденсированных и плотных газовых средах в условиях плазмообразования. Исследование преобразований высокоинтенсивного излучения ближнего и среднего ИК диапазонов (1,24 мкм, 1,7–1,9 мкм, вакуумная интенсивность 10^{13}–10^{15} Вт/см^2) выявило, что генерируемая микроплазма позволяет снять ограничения, накладываемые условиями фазового согласования, на процесс генерации гармоник в режиме острой фокусировки (NA~0,1). Впервые показано, что баланс между дисперсией среды, генерацией плазмы и геометрической добавкой к фазе в подобных случаях приводит к эффективной генерации нечётных гармоник даже в относительно небольшом объёме среды (~10^4 мкм^3). В результате удаётся достичь относительно высокой эффективности преобразования в третью и пятую оптические гармоники при воздействии

высокоинтенсивного лазерного излучения ближнего ИК диапазона (λ=1,24 мкм) на ксенон, которая составила $1{,}1\times10^{-3}$ и $4{,}4\times10^{-4}$. Увеличение длины волны воздействующего лазерного излучения (λ=1,7 мкм; λ=1,96 мкм) или потенциала ионизации газа (использование CO_2 вместо Xe), несмотря на сохранение вакуумной интенсивности лазерного излучения на уровне ~10^{14} Вт/см^2, приводило к уменьшению эффективности преобразования в третью и пятую гармоники более чем на порядок за счёт снижения концентрации электронов плазмы. Дополнительным экспериментальным основанием снижения ионизационного влияния является значительное расширение и смещение (в область больших давлений) максимума кривой эффективности преобразования излучения накачки в оптические гармоники от давления (см. ***Рис. 4(а)***). Далее приводятся результаты исследования влияния молекулярных резонансов на режимы преобразования высокоинтенсивного излучения среднего ИК диапазона в оптические гармоники в газовой среде (см. ***Рис. 4 (б)***).



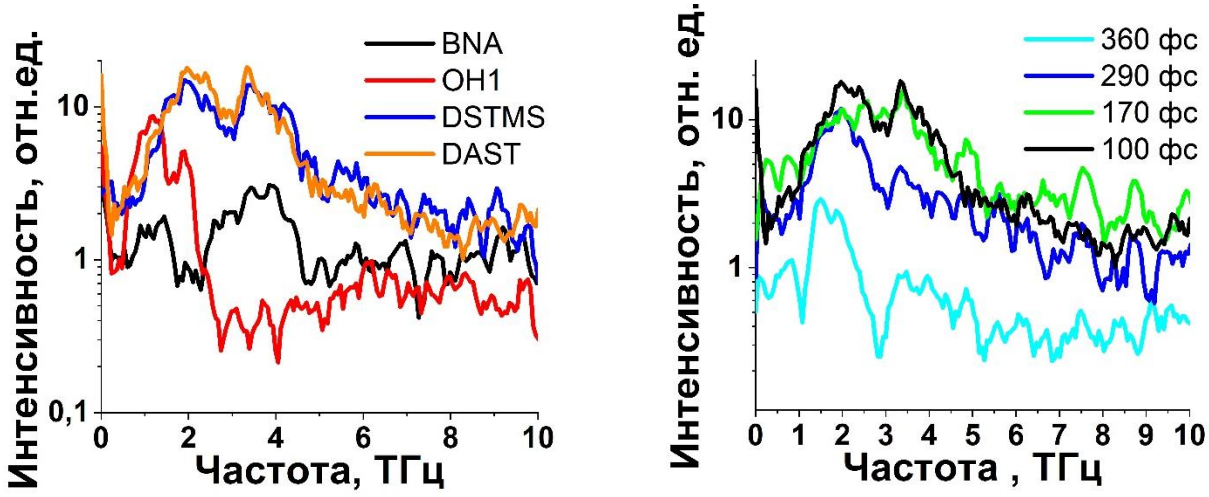
(а) *(б)*

Рис. 4 (а) Эффективность генерации третьей гармоники (λ=0,413 мкм) основного излучения хром-форстеритового лазера (λ=1,24 мкм) в углекислом газе в зависимости от давления в кювете. (б) Спектр оптических гармоник, генерируемых в смеси Xe-CO_2 при воздействии высокоинтенсивного лазерного излучения среднего ИК диапазона (λ=4,6 мкм).

Показано, что наличие уширенных перекрывающихся резонансных линий приводит к существенному изменению профиля показателя преломления для накачки в среднем ИК-диапазоне, но не ведёт к резонансному увеличению нелинейности. Увеличение эффективности генерации происходит только в случае выполнения условий фазового согласования, что, в частности, позволяет получить генерацию оптических гармоник вплоть до 11-ой, с эффективностью преобразования 1% и 0,3% в излучение третьей и пятой гармоник лазерной системы на Fe:ZnSe в смеси 44 атм. ксенона и 1 атм. CO_2.

Далее в *параграфе 3.3* описываются результаты экспериментов по генерации терагерцевого излучения в процессах оптического выпрямления интенсивного (~10−100 ГВт/см^2) лазерного излучения ближнего ИК диапазона в семействе органических кристаллов (BNA, DAST, DSTMS, OH1). Генерируемое ТГц излучение из кристаллов DAST, DSTMS и BNA имеет существенно более широкий спектр ТГц излучения (вплоть по 5–6 ТГц), в то время как спектр излучения из кристалла OH1 преимущественно локализован в окрестности

1 ТГц. Увеличение плотности энергии накачки хром-форстеритового лазера (1,24 мкм) до 20 мДж/см^2 позволяет достичь ~2% эффективности насыщенного оптико-терагерцевого преобразования в кристалле DAST, что соответствует энергии ~70 мкДж сразу после кристалла и при фокусировке этого излучения в пятно диаметром ~300 мкм по уровню 1/e^2 по интенсивности говорит о достижении напряжённости электрического поля ~15 МВ/см. Внесение положительного чирпа и соответствующее изменение длительности лазерного импульса ближнего ИК диапазона (1,24 мкм) от спектрально ограниченного (~100 фс) до чирпированного (~360 фс) позволяют управлять спектрально-временными свойствами ТГц излучения, что характеризуется смещением центральной длины волны ТГц излучения от 2 ТГц до 0,4 ТГц при синхронном изменении ширины спектра от 2,1 ТГц до 0,2 ТГц (см. ***Рис. 5***). В результате показано, что процесс оптического выпрямления мультигигаваттного излучения хром-форстеритового лазера в органических кристаллах позволяет генерировать интенсивное (до ~15 МВ/см) и высокоэнергетичное (до ~70 мкДж) ТГц излучение, перестройка частоты которого может осуществляться за счёт чирпирования лазерного излучения. Таким образом, можно заключить, что в рамках диссертационной работы предложены подходы к генерации мощного и перестраиваемого малопериодного ТГц излучения, которые легли в основу создания широкодиапазонного источника когерентного излучения от УФ до ТГц.



(а) *(б)*

Рис. 5 (а) Спектр ТГц излучения, генерируемого в органических кристаллах (BNA, OH1, DSTMS, DAST) при их накачке мультигигаваттной хром-форстеритовой лазерной системой; (б) спектр ТГц излучения, генерируемого в процессе оптического выпрямления чирпированного импульса хром-форстеритового лазера в кристалле DAST.

В *параграфе 3.4* приводятся результаты по управлению спектрально-временными свойствами мультигигаваттного излучения ближнего (1,24 мкм) и среднего (4,6 мкм) ИК диапазонов в плотных газовых средах. Показано, что управляемое расширение спектра мощного лазерного излучения ближнего ИК диапазона (1,24 мкм) реализуется в условиях доминирования керровского вклада над вкладом плазмы, что достигается выбором остроты

фокусировки NA, при которой расширение спектра лазерного излучения происходит симметрично относительно центральной длины волны, а достижение требуемой ширины спектра лазерного излучения однозначно определяется величиной произведения давления газа на энергию импульса и может управляться любым из этих параметров. В результате, экспериментально продемонстрировано *управляемое расширение спектра* мультигигаваттного (~20 ГВт) фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона (λ=1,24 мкм) при его оптимальной фокусировке (NA=0,004) в нелинейную газовую среду (Ar) высокого давления (p=4 атм). Использование схемы посткомпрессии на основе чирпирующих зеркал и уширения в газовой среде при работе в режиме слабого влияния плазмы на распространение мультигигаваттного (~20 ГВт) лазерного излучения ближнего ИК диапазона позволяет добиться почти полной компенсации линейного чирпа, возникающего вследствие фазовой самомодуляции, и сжать импульс практически вплоть до длительности спектрально-ограниченного импульса. Достигнутый фактор компрессии ~3,6 позволил сократить длительность импульса до ~28 фс и увеличить пиковую мощность лазерного излучения до ~60 ГВт. При этом данная схема масштабируема по энергии лазерного импульса, что обеспечивается возможностью компенсации увеличения энергии импульса уменьшением давления газовой среды в соответствии с законом $E \sim |\Delta\omega_{max}|^{fix}/p$.

Переход в средний ИК-диапазон приводит к уменьшению влияния дисперсии среды и плазмы на процесс распространения мощного лазерного излучения в газовой среде и обеспечивает однозначное управление спектральным сдвигом и уширением спектра в процессе самоканалирования мощных импульсов среднего ИК диапазона с длиной волны 4,4–4,6 мкм за счёт давления газа, состава смеси и условий фокусировки. Исследованы возможности управления генерационными свойствами суперконтинуума при филаментации мощного излучения среднего ИК диапазона (4,4 мкм) в атомарных (ксенон, криптон, аргон) и молекулярных (O_2, N_2) газах. Показано, что в молекулярных газах доминирующую роль в формировании выходного спектра играет рамановская нелинейность, приводящая к равномерному сдвигу спектра в красную область «как целого» при повышении давления. В атомарных газах уширение спектра происходит равномерно при малом превышении над критической мощностью самофокусировки (P_{cr}) и сопровождается генерацией суперконтинуума вплоть до видимой области спектра при значительном превышении над P_{cr} вследствие процессов генерации гармоник и четырехволнового смешения. Таким образом, реализована генерация мультиоктавного суперконтинуума в ксеноне (350 нм – 5,5 мкм) при давлении порядка 20 атм., а также осуществлен сдвиг в длинноволновую область спектра более чем на 250 нм в кислороде при давлении порядка 30 атм.

Смесь инертных и молекулярных газов представляет собой легко управляемую среду, подходящую для равномерного спектрального уширения в ближнюю и среднюю ИК области в режиме самоканалирования в условиях формирования лазерно-индуцированной плазмы

низкой плотности. В диссертации впервые показано, что *нелинейное* распространение мощного (>10 ГВт) слабо сфокусированного (NA=0,004) фемтосекундного лазерного импульса среднего ИК диапазона (λ=4,6 мкм, τ=160 фс) в газовой *смеси* инертного (Kr) и молекулярного (O_2) газов при высоком давлении (p_{Kr}=20 атм, p_{O2}=10 атм) происходит в режиме близком к волноводному и сопровождается *управляемым* и равномерным обогащением коротковолнового (<4 мкм) и длинноволнового (>5 мкм) крыльев спектра импульса вплоть до 1 мкм по уровню $1/e^2$. Нелинейная компрессия такого ИК импульса в 2,6 раза до длительности 62 фс (~4-х циклов поля) с использованием CaF_2 пластинки толщиной 3 мм, имеющей обратный знак дисперсии групповой скорости в этом спектральном диапазоне, происходит с сохранением милиджоулевого уровня энергии, обеспечивая прямой доступ к задачам экстремальной нелинейной оптики (см. ***Рис. 6***).

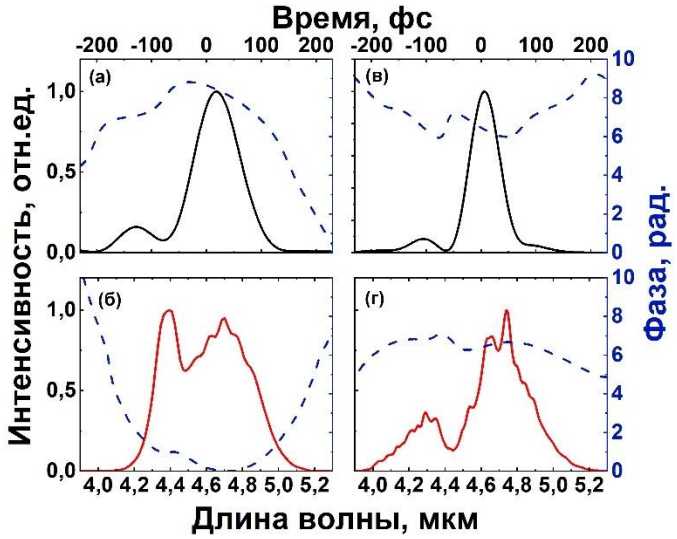


Рис. 6. Огибающая и спектральная фаза лазерных импульсов среднего ИК диапазона, регистрируемые с помощью широкополосного оптического стробирования с разрешением по частоте на основе суммарного преобразования на выходе короткой 17-сантиметровой газовой ячейки (а), (б) и длинной 32-сантиметровой газовой ячейки (в), (г), заполненных смесью газов Kr-O_2. Чёрные линии показывают огибающие (верхний ряд), красные линии – спектры (нижний ряд), синие пунктирные линии – соответствующие фазы лазерных импульсов среднего ИК диапазона.

В *четвертой главе* обсуждаются способы создания и диагностики экстремального состояния вещества, возникающего при острой (NA>0,3) фокусировке низкоэнергетичного (~мкДж) фемтосекундного лазерного излучения в объём конденсированной среды в области её прозрачности. Отметим, что в качестве объектов в диссертации рассматриваются как диэлектрики, так и полупроводники для демонстрации различий и особенностей создания лазерно-индуцированного экстремального состояния вещества в них. Подробно описывается весь комплекс разработанных методов стационарной и время-разрешённой диагностики лазерной микоплазмы и лазерно-индуцированного экстремального состояния вещества, включая теневую фотографию, оптоакустическую диагностику, трёхмерную визуализацию распространения лазерного импульса, нелинейно-оптическую методику зондирования

пробным импульсом третьей гармоники. Обсуждаются результаты экспериментов по генерации когерентных фононов в объеме кристаллов фторида магния и кремния в режиме формирования плазмы остросфокусированным фемтосекундным лазерным излучением ближнего и среднего ИК диапазонов (1,24 мкм; 4,6 мкм). Делается вывод о доминирующем влиянии плазмы на процесс генерации когерентных фононов в кристаллах при экстремально высоких интенсивностях возбуждающего лазерного излучения ~10^{12}–10^{13} Вт/см^2. Установлено, что формирование лазерно-индуцированной микроплазмы, созданной в объёме кристаллической среды в области её прозрачности остросфокусированным высокоинтенсивным (~10^{12}–10^{13} Вт/см^2) фемтосекундным лазерным излучением, приводит к возбуждению когерентных фононов, обмену энергией между когерентными фононными модами и изменению частоты фононных мод. Сочетание предложенных экспериментальных подходов с теоретическими расчётами с использованием программных пакетов молекулярной динамики позволяет впервые обосновать разработанный метод время-разрешенной регистрации быстрых фазовых переходов по спектру когерентных ТГц фононов, генерируемых при широкополосном лазерно-плазменном возбуждении в диэлектриках и полупроводниках на примере фторида магния и кремния.

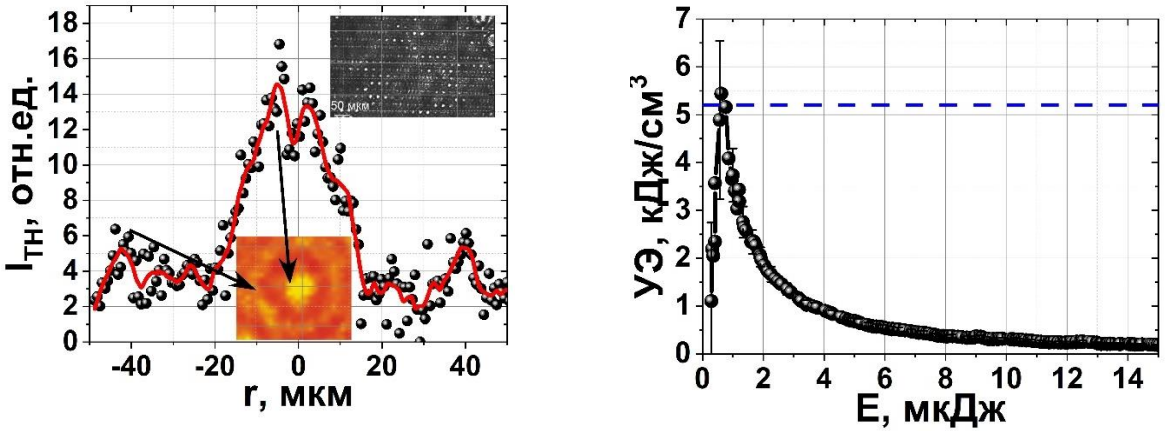
В *параграфе 4.1* и *4.2* рассматриваются фундаментальные и прикладные аспекты создания экстремального состояния вещества, отдельно выделяется острая фокусировка как метод концентрации энергии в малом объёме внутри конденсированной среды для получения лазерно-индуцированного экстремального состояния вещества без повреждения поверхности. Обозревается круг проблем, связанных со сферическими аберрациями и самофокусировкой как факторами, ограничивающими увеличение энерговклада в объём прозрачных материалов. В *параграфе 4.3* описывается физическая картина процессов, происходящих при взаимодействии высокоинтенсивного (более 1 ТВт/см^2) фемтосекундного лазерного излучения ближнего и среднего ИК диапазонов с объёмом конденсированной среды в области её прозрачности. Особое внимание уделяется влиянию параметров лазерного излучения (длительность и длина волны) на динамику рассматриваемых процессов. Уже здесь определяется основной тренд на возможность использования двухцветной методики воздействия для повышения объёмного энерговклада в конденсированную среду.

В *параграфе 4.4* подробно описываются разработанные в рамках диссертационного исследования методики диагностики микроплазмы, создаваемой в объёме прозрачной среды, включая трёхмерное картирование третьей гармоникой и теневую фотографию для измерения распределения концентрации электронов плазмы в области плазмообразования и параметров ударных волн, оптоакустическую диагностику для измерения объёмного энерговклада, нелинейно-оптическую методику зондирования пробным импульсом третьей гармоники для время-разрешённой диагностики микроплазмы и процессов энергопереноса.

Реализованный гибридный оптоакустический метод томографии лазерно-индуцированной плазмы позволил измерить трёхмерные распределения концентрации электронов ($8{,}7\times10^{19}$ $см^{-3}$ – среднее по объёму плазмы значение) и энерговклада (0,35 кДж/$см^3$ – среднее по объёму плазмы значение) при воздействии высокоинтенсивного лазерного излучения на объём конденсированной среды на примере воды. Трёхмерное картирование микроплазмы с использованием нелинейно-оптической методики генерации несинхронной третьей гармоники позволило восстановить продольные и поперечные размеры микроплазмы для разных фокусировок и длин волн возбуждающего излучения. Показано, что область плазмообразования совпадает с размерами перетяжки только при энергии порядка 2–3 пороговых энергий плазмообразования.

В *параграфе 4.5* рассматривается применение метода генерации третьей гармоники для диагностики остаточных модификаций в объёме конденсированных сред, что обеспечивает универсальность разрабатываемого подхода к применению нелинейно-оптических методов для диагностики процессов, происходящих на широком временном масштабе: от фемтосекунд до наносекунд. В *параграфе 4.6* подробно рассматривается влияние длины волны лазерного излучения на механизмы ионизации и нагрева при взаимодействии высокоинтенсивного (более 1 ТВт/$см^2$) лазерного излучения с объёмом прозрачных диэлектрических и полупроводниковых сред. Обнаружена немонотонная зависимость порога плазмообразования от длины волны в области длин волн 0,6−5 мкм. Теоретически и экспериментально демонстрируется, что при переходе от излучения видимого диапазона (0,62 мкм) к излучению ближнего ИК диапазона (1,24 мкм) порог плазмообразования возрастает, что связано с уменьшением скорости полевой ионизации и недостаточным нагревом электронов в процессе внутризонных переходов в зоне проводимости. Дальнейшее увеличение длины волны (до 2 мкм в плавленом кварце и до 4 мкм в MgF_2) ведёт к снижению порога, что, вероятно, связано с эффективным развитием электронной лавины. В области длин волн, превышающих 4 мкм, в MgF_2 порог плазмообразования растёт ввиду изменения механизма нагрева электронов и перехода к режиму «сильного поля». Приводятся результаты комплексного сравнения воздействия импульсов разной длительности (от 0,1–0,2 пс до 1,2 пс) ближнего (1,24 мкм) и среднего (4,6 мкм) ИК диапазонов на прозрачные диэлектрики (MgF_2) и полупроводники (Si) в режиме острой фокусировки (NA = 0,85) в объём материала. Выявлено, что при таком изменении длины волны и воздействии на диэлектрик существенным является изменение механизмов ионизации. Когда скорость полевой ионизации плавно уменьшается с длиной волны, механизм нагрева электронов в зоне проводимости переходит от одночастичного к многочастичному обратнотормозному поглощению. На практике такое изменение механизма нагрева приводит к слабой зависимости порога плазмообразования от длительности воздействующих импульсов в случае импульсов среднего ИК диапазона (4,6 мкм) и

значительному изменению в случае ближнего ИК диапазона (1,24 мкм). Также в *параграфе 4.6* приводятся результаты исследований влияния длины волны воздействующего остросфокусированного лазерного излучения на объём полупроводника (на примере кремния). В результате показано, что использование чирпированного лазерного излучения ближнего ИК диапазона уменьшает ионизационные потери остросфокусированного излучения до области перетяжки и повышает энерговклад до ~1 кДж/см^3, что, однако, недостаточно для образования микромодификации в объёме кремния. Переход к среднему ИК-диапазону ввиду уменьшения двух- и трёх фотонного поглощения позволяет лучше локализовать лазерное воздействие на кремний, что приводит к увеличению объемного энерговклада до 5,5 кДж/см^3. Достижение таких величин энерговклада дополнительно подтверждается морфологией формируемой микромодификации типа полости, регистрируемой с использованием метода микроскопии на основе генерации третьей оптической гармоники (см. ***Рис. 7***).



(а) *(б)*

Рис. 7. (а) Профиль микромодификации, регистрируемый методом микроскопии на основе процесса генерации третьей оптической гармоники (λ=1,53 мкм) при острой фокусировке (NA=0,86) фемтосекундного излучения среднего ИК диапазона (λ=4,6 мкм) в объем кремния. Энергия лазерного импульса 1,1 мкДж. На вставке показан массив созданных микромодификаций. (б) Зависимость удельного энерговклада (УЭ) от энергии (*E*) лазерного импульса. Пунктиром показан порог образования микромодификации.

В *параграфе 4.7* приводятся результаты двухцветного воздействия остросфокусированной парой фемтосекундных лазерных импульсов на объём конденсированной среды. Описывается новый экспериментальный подход к управлению объёмным энерговкладом и микромодификацией прозрачного диэлектрика при двухцветном (ближний/средний ИК и видимый/УФ) воздействии низкоэнергетичными (~ мкДж) остросфокусированными (NA = 0,5) фемтосекундными лазерными импульсами. Использование методики генерации третьей гармоники в сфокусированных лазерных пучках позволило произвести экспресс диагностику неравновесной микроплазмы, формирующейся на начальном этапе лазерного воздействия, и создаваемой микромодификации после прохождения лазерных импульсов. Экспериментально обнаружено, что изменение степени

поляризации греющего лазерного импульса от линейной к эллиптической приводит к увеличению объёмного энерговклада до ~10 кДж×см$^{-3}$, что может свидетельствовать о важной роли эффектов нагрева электронов при образовании «тандемной» микроплазмы в объёме диэлектрика. Увеличение длины волны греющего ИК лазерного импульса с 1,24 мкм до 1,76 мкм не позволило увеличить объёмный энерговклад ввиду зарегистрированной немонотонности зависимости порога плазмообразования от длины волны. Это обеспечивает больший энерговклад для той пары импульсов, в которой для ИК импульса порог плазмообразования выше, то есть 0,62 мкм и 1,24 мкм. Морфология лазерно-индуцированных «тандемных» дефектов позволяет оценить достигаемые в микрообъёме прозрачной среды давления до 12 ГПа, что хорошо согласуется с данными по измерению объёмного энерговклада.

В конце параграфа демонстрируется успешное применение методики двухцветного воздействия для управления энерговкладом в объём полупроводника (на примере высокоомного монокристалла кремния, HRFZ-Si). Экспериментально показана возможность управления объёмным энерговкладом (вплоть до 8 кДж/см^3) в кремнии при воздействии остросфокусированной (NA=0,5) парой фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 1,24 мкм и 4,6 мкм. По сравнению с режимом однократного воздействия на монокристалл кремния при использовании остросфокусированного (NA=0,5) фемтосекундного излучения среднего ИК диапазона (4,6 мкм) двухцветное воздействия позволяет увеличить энерговклад в ~2 раз, что подтверждает перспективность и универсальность предложенного подхода. Таким образом, можно утверждать, что полученные результаты важны для многих применений, где используются остросфокусированные низкоэнергетичные (~мкДж) фемтосекундные лазерные импульсы для диагностики и обработки прозрачных материалов, под которыми в диссертации понимаются как диэлектрики, так и важные для целого ряда приложений полупроводники (см. ***Рис. 8***).

В *параграфе 4.8* обсуждаются особенности процесса генерации когерентных фононов в объёме кристаллических конденсированных сред в режиме формирования плазмы. В схеме интерферометра Майкельсона возбуждающий и пробный импульсы с ортогональными поляризациями остро фокусировались в объём кристаллического диэлектрика или полупроводника (MgF_2, Si) с помощью короткофокусной асферической оптики с числовой апертурой *NA*=0,5. Для возбуждения когерентных терагерцевых фононов в кристаллах фторида магния и кремния использовалось основное излучение хром-форстеритового (λ=1,24 мкм) и Fe:ZnSe лазера (λ=4,6 мкм) с энергиями ~1 мкДж и ~0,5 мкДж соответственно, что близко к порогу плазмообразования в этих образцах.

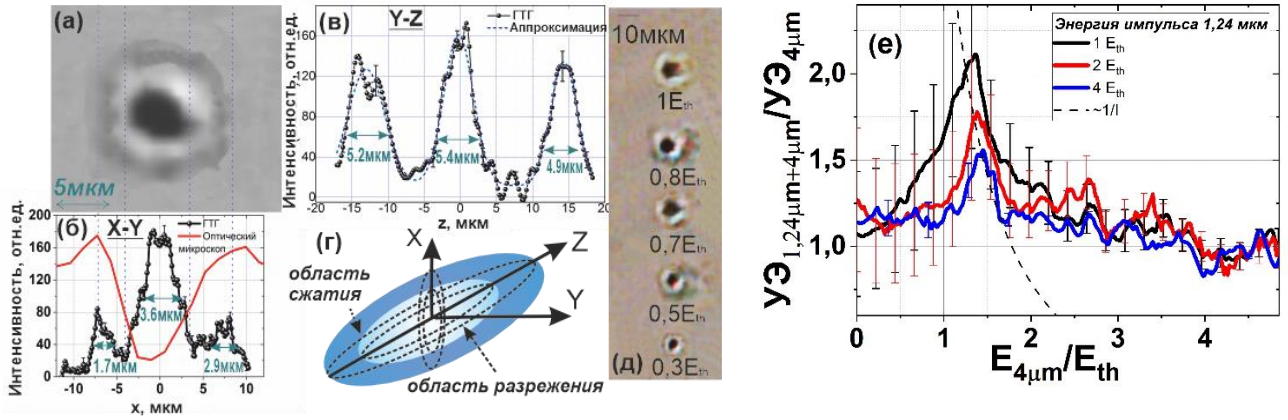
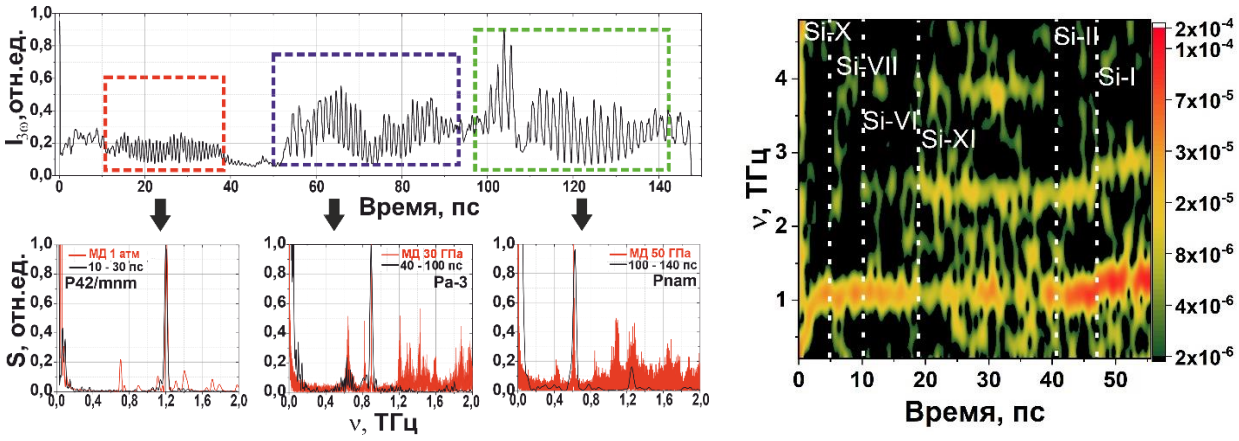


Рис. 8 (а) Изображение модификаций в плавленом кварце, наведённых с использованием в качестве затравочного импульса излучения с параметрами 620нм, 150фс, $0{,}3E_{порог}$ и в качестве греющего ИК импульса – 1240нм, 200фс, $0{,}9E_{порог}$. Порог плазмообразования $E_{порог}$ составляет 1,7 мкДж для греющего и 0,8 мкДж для затравочного лазерных импульсов; (б) поперечный и (в) продольный профили дефекта, полученные методом регистрации сигнала третьей оптической гармоники (чёрная) и с помощью оптического микроскопа (красная); (г) схематическое изображение полученных модификаций; (д) изображение на оптическом микроскопе (увеличение 100X) модификаций, полученных при разных энергиях затравочного импульса. Тёмная область (коэффициент отражения меньше, чем у чистого материала) – область разреженной плотности, светлая область (коэффициент отражения больше, чем у чистого материала) – уплотнённая оболочка; (е) увеличение удельного энерговклада при острой (NA=0,5) фокусировке пары фемтосекундных лазерных импульсов 1,24 мкм и 4,6 мкм в объем кремния по сравнению с режимом одноимпульсного воздействия на длине волны 4,6 мкм в зависимости от энергии греющего лазерного импульса (λ=4,6 мкм, E_{th}=0,2 мкДж) при различных энергиях затравочного излучения (λ=1,24 мкм, E_{th}=1 мкДж).

В эксперименте регистрировались энергия пробного импульса, прошедшего через образец, и сигнал третьей гармоники, генерируемой пробным импульсом в области зондирования. Эффективность генерации третьей гармоники пробного импульса в кристалле фторида магния и «тепловая» карта изменения частот когерентных фононов в кремнии в зависимости от задержки между возбуждающим и пробным импульсами представлены на ***Рис. 9***. Применяя для анализа временного сигнала третьей гармоники Фурье-анализ со скользящим временным окном, можно более наглядно визуализировать временную динамику фазовых переходов. Так, на ***Рис. 9 (а)*** лучше видны переходные процессы при фазовом переходе P42/mnm => Pa-3, который сопровождается плавным увеличением частоты, а также плавное уменьшение частоты при временных задержках более 140 пс, предшествующих образованию микромодификации.

В остальных случаях спектр фононных колебаний изменяется скачкообразно. При временной задержке 10 пс это, вероятно, вызвано характерными временами передачи энергии из электронной в фононную подсистему (время электрон-фононной релаксации), так как возбуждение фононов в диэлектриках имеет лазерно-плазменный механизм. При фазовых переходах скачкообразное изменение спектра, вероятно, вызвано изменением симметрии системы, и в «новой» кристаллической решётке «старые» колебания становятся невозможными, что приводит к перераспределению энергии между фононными модами.

Видимое увеличение амплитуды сигнала во временной зависимости при этом вызвано тем, что при большем давлении фононные колебания имеют более низкую частоту, а значит, сигнал третьей гармоники возрастёт.



(а) *(б)*

Рис. 9 (а) Зависимость сигнала третьей гармоники (λ=0,413 мкм) в фториде магния от временной задержки между возбуждающим (λ=1,24 мкм) и пробным лазерными импульсами. Снизу чёрными линиями показаны спектры данного сигнала во временных окнах, отмеченных цветным пунктиром. Красными линиями показаны фононные спектры (умноженные на функцию ν^{-3}), полученные в результатах численного моделирования для давлений 1 атм., 30 ГПа и 50 ГПа. (б) «Тепловая карта» изменения частот когерентных фононов в кремнии в зависимости от задержки между возбуждающим (λ=4,6 мкм) и пробным лазерными импульсами.

Отметим, что методика зондирования с помощью третьей гармоники может использоваться для время-разрешённой диагностики фазовых переходов в диэлектриках и полупроводниках в области их прозрачности, хотя сама по себе она не даёт полной информации о фазовом переходе, а только служит его индикатором. В сочетании с численным моделированием, например, на основе молекулярной динамики, данный способ может быть использован, чтобы полностью охарактеризовать нестационарные фазы вещества с суб-пикосекундным временным разрешением. В диссертации с использованием предложенного метода была восстановлена динамика лазерно-плазменных фазовых переходов во фториде магния. Было показано, что в MgF_2 существует каскад фазовых переходов P42/mnm => Pa-3 => Pnam; переход между фазами имеет характерные времена 5–10 пс, а время жизни фазы составляет порядка 40–60 пс; за 140 пс наблюдается полное разрушение решётки и когерентные фононы пропадают.

В отличие от фторида магния, частоты когерентных фононов в кремнии гораздо сложнее относить к тем или иным полиморфным фазам. Это вызвано, во-первых, наличием большого (больше двенадцати [37]) количества фаз в кремнии, наблюдаемых при высоких давлениях, а также тем, что многие частоты (например, $\nu = 3{,}9$ ТГц [130 $см^{-1}$]) характерны сразу для нескольких фаз и зависят от температуры кристаллическом решётки. С фундаментальной точки зрения динамика фазовых переходов, индуцированных

фемтосекундными лазерными импульсами в условиях высокого энерговклада в полупроводниках, имеет мало отличий по сравнению с динамикой, регистрируемой в прозрачных диэлектриках. За времена электрон-фононных взаимодействий (порядка 100–300 фс в кремнии) энергия передается от электронной подсистемы в ионный остов, это приводит к генерации ударных волн, на фронте которых наблюдаются фазовые переходы. На временных масштабах электрон-фононных взаимодействий генерируются когерентные фононы, изменение характерных частот которых может служить индикатором фазовых переходов. Исходя из динамики изменения частот когерентных фононов можно определить характерные времена изменения фононного спектра – на ***Рис. 9 (б)*** эти моменты времени отмечены вертикальными линиями. Проще всего идентифицировать фазовый переход из фазы Imma в β-Sn, он характеризуется плавным исчезновением фононов на частоте 3,9 ТГц (130 $см^{-1}$), а также увеличением фононной частоты с 2,4 ТГц (80 $см^{-1}$), характерной для Imma фазы, до 3 ТГц (100 $см^{-1}$), характерной для β-Sn фазы. Также можно отметить, что частоты в области 0,9 ТГц (30 $см^{-1}$) характерны для fcc фазы, как это продемонстрировано в [38]. В этой же работе показано, что частоты порядка 2,1 ТГц (70 $см^{-1}$) характерны для кубической фазы. Таким образом, исследование динамики когерентных ТГц фононов в кремнии с помощью время-разрешённой нелинейно-оптической диагностики позволило зарегистрировать каскад фазовых переходов Si-X=>Si-VII=>Si-XI=>Si-II=>Si-I (см. ***Рис. 9 (б)***), что подтверждает состоятельность и универсальность разработанного подхода.

В данном параграфе продемонстрировано, что формируемая в микрообъеме кристаллических сред лазерно-индуцированная плазма оказывает существенное влияние на процессы возбуждения и релаксации когерентных фононов. Передача энергии от электронной подсистемы в атомную происходит за время электрон-фононной релаксации (~6-10 пс во фториде магния и ~100-300 фс в кремнии). Именно на этих временных масштабах генерируются ударные волны и возбуждаются когерентные фононы. Зависимость амплитуды фононных колебаний от их частоты соответствует механизму смещения (*англ.* displacive excitation of coherent phonons [39]), однако возбуждение когерентных фононов происходит на гораздо больших временных масштабах (больше времени жизни плазмы), так как источником генерации фононов служит лазерно-индуцированная ударная волна, смещающая положение атомов в кристаллической решетке и инициирующая фазовые переходы. Это приводит к резкому изменению в фононном спектре, что является индикатором фазовых переходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в рамках настоящей диссертации, можно сформулировать следующим образом.

1. Использование *групповых синхронизмов* взаимодействующих импульсов в нелинейных кристаллах (дидейтероарсената цезия, трибората лития), чирпированных импульсов накачки, а также явления *филаментации* лазерных пучков в условиях расходящегося волнового фронта излучения накачки, позволило реализовать генерацию *мощных* (до 20 МВт) фемтосекундных суперконтинуумов в ближнем ИК-диапазоне со спектральной шириной до 450 нм, которые были использованы при создании высокостабильных источников затравочного излучения параметрических усилителей света.
2. Разработаны подходы и реализованы схемы *эффективной* (до 10%) генерации фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона (λ=1,24 мкм) мультигигаваттной пиковой и ваттной средней мощности на основе кристалла хром-форстерита и последующего его э*ффективного* (1-10%) преобразования в длинноволновое фемтосекундное излучение (~1-8 мкм) в схемах параметрического усиления на базе неоксидных нелинейно-оптических кристаллов (тиогаллата серебра, тиогаллата лития).
3. Предложены и реализованы новые схемы генерации *мощного фемтосекундного лазерного излучения среднего ИК диапазона* (4-5 мкм) на основе семейства халькогенидных сред с управляемыми спектролюминесцентными свойствами при их накачке высокоэнергичными (до 50 мДж) мощными (~МВт) лазерными наносекундными импульсами в 3-мкм диапазоне длин волн с плотностью энергии ~1 Дж/см^2. Разработанный подход позволил создать *уникальную* фемтосекундную лазерную систему, работающую на этом принципе в среднем ИК-диапазоне и генерирующую импульсы с пиковой мощностью более 20 ГВт.
4. Экспериментально показано, что бинарная газовая смесь, состоящая из инертного и молекулярного газов, является *перспективной нелинейно-оптической средой,* нелинейными и дисперсионными свойствами которой можно независимо *управлять* за счёт изменения парциального давления соответствующего газа в смеси и наличия спектрально близкой полосы поглощения, способствующей повышению эффективности нелинейно-оптических преобразований фемтосекундного лазерного излучения среднего ИК диапазона (λ=4,6 мкм). Реализована генерация гармоник основного излучения лазерной системы на кристалле Fe:ZnSe (λ=4,6 мкм, τ=160 фс, I=1.8·10^{13} Вт/см^2) в Xe-CO_2 газовой смеси (p_{Xe}=45 атм, p_{CO2}=1 атм) с эффективностью 1% в третью (λ=1,53 мкм), 0,3% в пятую (λ=0,92 мкм) и суммарно 0,5% в высокие оптические гармоники вплоть до 11-ой. Осуществлено равномерное расширение коротковолнового (< 4 мкм) и длинноволнового (> 5 мкм) крыльев спектра мощного (>10 ГВт) ИК импульса в газовой смеси Kr-O_2 высокого давления (p_{Kr}=20 атм, p_{O2}=10 атм) с последующей компрессией

фемтосекундных 4-мкм лазерных импульсов до длительности 62 фс, что близко к четырём оптическим циклам поля, при пиковой мощности более 30 ГВт.

5. Предложены, обоснованы и реализованы эффективные (1-10%) нелинейные методы управления спектрально-временными свойствами мощного фемтосекундного лазерного излучения ближнего (λ=1,24 мкм) и среднего (λ=4,6 мкм) ИК диапазонов в конденсированных и плотных газовых средах, позволившие создать *новые источники* когерентного излучения ультракороткой длительности в широком диапазоне длин волн (от УФ до ТГц).
6. Предложены и экспериментально обоснованы подходы к *управлению энерговкладом при фокусировке фемтосекундного лазерного излучения в объем полупроводника* на примере монокристалла кремния. Показано, что увеличение длительности (от 0,1 пс до 0,8 пс) лазерного импульса ближнего ИК диапазона (λ=1,24 мкм) позволяет уменьшить влияние лазерно–индуцированной плазмы на процесс распространения лазерного импульса и повысить энерговклад до ~0,7 кДж/см^3, а многофотонное поглощение остросфокусированного (NA=0,86) фемтосекундного (τ=160 фс) лазерного излучения среднего ИК диапазона (λ=4,6 мкм) позволяет достичь величины объёмного энерговклада более 5 кДж/см^3, что обеспечивает объёмную микромодификацию кремния в режиме однократного воздействия.
7. Предложены и реализованы *новые подходы к управлению энерговкладом при воздействии остросфокусированного фемтосекундного лазерного излучения с интенсивностью более 1 ТВт/см^2* на объём диэлектрических и полупроводниковых сред в области их прозрачности, что в сочетании с разработанными методами диагностики плазмы и эволюции лазерно-индуцированного экстремального состояния вещества с использованием нелинейно-оптического метода микроскопии на основе процесса генерации третьей гармоники позволяет создавать и регистрировать *динамические и стационарные лазерно-индуцированные фазовые переходы.*

Таким образом, в диссертации изучены и разработаны новые методы генерации мультигигаваттных, синхронизированных по времени, фемтосекундных лазерных импульсов ближнего и среднего ИК диапазонов, что в сочетании с предложенными *нелинейными* методами управления спектрально-временными свойствами этого излучения демонстрирует создание *широкодиапазонных фемтосекундных ИК лазерных источников нового поколения.* Генерируемое ими когерентное и перестраиваемое от УФ до ТГц диапазона излучение ультракороткой длительности может быть полезно для применения в области нелинейной оптики и физики взаимодействия излучения с веществом. Исследованные эффекты экстремального воздействия лазерного излучения на объём прозрачной конденсированной среды могут лечь в основу создания лазерно-индуцированных фаз вещества и методов объёмного микроструктурирования диэлектрических и полупроводниковых материалов, что важно для развития элементной базы современной ИК фотоники.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и RSCI

1. *Румянцев Б.В., Пушкин А.В., Сулейманова Д.З., Жидовцев Н.А., Потёмкин Ф.В.* Генерация перестраиваемого мощного малопериодного терагерцового излучения в органических кристаллах при накачке мультигигаваттными чирпированными лазерными импульсами ближнего ИК диапазона на длине волны 1.24 мкм // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2023. — Т.117. — С. 571–579. IF (РИНЦ)= 1.142 (Вклад автора 0.8)
2. *Mareev E.I., Obydennov N.G., Potemkin F.V.* Dynamics of the Femtosecond Mid-IR Laser Pulse Impact on a Bulk Silicon // Photonics. — 2023. — V.10. — P. 380. JIF =2.536 (Вклад автора 0.8)
3. *Lvov K.V., Potemkin F.V., Stremoukhov S.Y.* Extension of the multiple rate equation model for conduction band dynamics under near- and mid-IR femtosecond excitation of dielectrics and semiconductors // Materials Today Communications. — 2023. — P. 105594. JIF =3.662 (Вклад автора 0.2)
4. *Pushkin A.V., Potemkin F.V.* High-gain broadband laser amplification of mid-IR pulses in Fe:CdSe crystal at 5 μm with mJ output energy and multigigawatt peak power // Optics Letters – 2022. – V.47. – P. 5762–5765. JIF= 3.56 (Вклад автора 0.6)
5. *Румянцев Б.В., Михеев К.Е., Пушкин А.В., Потёмкин Ф.В.* Влияние длины и давления газовой струи на процесс генерации оптических гармоник фемтосекундным излучением лазерной системы на кристалле Fe:ZnSe с длиной волны 4,5 мкм // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики – 2022. – Т.116. – С. 659–666. IF (РИНЦ)= 1.142 = 1.142 (Вклад автора 0.6)
6. *Румянцев Б.В., Михеев К.Е., Пушкин А.В., Мигаль Е.А., Стремоухов С.Ю., Потёмкин Ф.В.* Генерация оптических гармоник при взаимодействии высокоинтенсивного (до 10^{14} Вт/см^2) фемтосекундного лазерного излучения среднего ИК диапазона лазерной системы на кристалле Fe:ZnSe с плотной ламинарной газовой струей // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики – 2022. – Т.115. – С. 431–436. JIF = 1.142 (Вклад автора 0.6)
7. *Пушкин А.В., Потёмкин Ф.В.* Особенности получения мощных (до 1 МВт, 100 мДж) 3-мкм наносекундных лазерных импульсов в эрбиевых кристаллах в частотном режиме // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики – 2022. – Т.116. – С. 508-516. JIF = 1.142 (Вклад автора 0.6)
8. *Mareev E.I., Potemkin F.V.* Dynamics of ultrafast phase transitions in MgF_2 triggered by laser-induced THz coherent phonons // Scientific Reports – 2022. – V.12. – P. 6621. JIF = 4.996 (Вклад автора 0.8)

9. *Mareev E.I., Pushkin A.V., Migal E.A., Lvov K.V., Stremoukhov S.Yu., Potemkin F.V.* Single-shot femtosecond bulk micromachining of silicon with mid-IR tightly focused beams // Scientific Reports – 2022. – V.12. – P. 7517. JIF= 4.996 (Вклад автора 0.8)
10. *Migal E.A., Pushkin A.V., Minaev N.G., Bravy B.G., Potemkin F.V.* Control of spectral shift, broadening, and pulse compression during mid-IR self-guiding in high-pressure gases and their mixtures // Optics Letters – 2022. – V.47. – P. 985-988. JIF= 3.56 (Вклад автора 0.8)
11. *Mareev E.I., Potemkin F.V.* Dynamics of Ultrafast Phase Transitions in (001) Si on the Shock-Wave Front // International Journal of Molecular Sciences – 2022. – V.23. – P. 2115. JIF= 6.208 (Вклад автора 0.6)
12. *Pushkin A.V., Migal E.A., Suleimanova D.Z., Mareev E.I., Potemkin F.V.* High-Power Solid-State Near- and Mid-IR Ultrafast Laser Sources for Strong-Field Science // Photonics – 2022. – V.9. – P. 90. JIF= 2.536 (Вклад автора 0.6)
13. *Pushkin A.V., Slovinsky I.A., Shakirov A.A., Shavelev A.A., Potemkin F.V.* Diode-side-pumped watt-level high-energy Q-switched mid-IR Er:YLF laser // Optics Letters – 2021. – V.46. – P. 5465-5468. JIF= 3.56 (Вклад автора 0.6)
14. *Lvov K.V., Stremoukhov S.Yu., Potemkin F.V.* The role of external focusing in spectral enrichment under mid-IR laser filamentation in dielectrics // Journal of Optics – 2021. – V.23. – P. 065502. JIF= 2.077 (Вклад автора 0.4)
15. *Rumiantsev B.V., Mareev E.I., Bychkov A.S., Karabutov A.A., Cherepetskaya E.B., Makarov V.A., Potemkin F. V.* Three-dimensional hybrid optoacoustic imaging of the laser-induced plasma and deposited energy density under optical breakdown in water // Applied Physics Letters – 2021. – V.118. – P. 011109. JIF= 3.971 (Вклад автора 0.6)
16. *Uehara H., Tsunai T., Han B., Goya K., Yasuhara R., Potemkin F., Kawanaka J., Tokita S.* 40 kHz, 20 ns acousto-optically Q-switched 4 μm Fe:ZnSe laser pumped by a fluoride fiber laser // Optics Letters – 2020. – V.45. – P. 2788-2791. JIF= 3.560 (Вклад автора 0.6)
17. *Mareev E.I., Rumiantsev B.V., Migal E.A., Bychkov A.S., Karabutov A.A., Cherepetskaya E.B., Makarov V.A., Potemkin F.V.* A comprehensive approach to the characterization of the deposited energy density during laser–matter interactions in liquids and solids // Measurement Science and Technology – 2020. – V.31. – P. 085204. JIF= 2.398 (Вклад автора 0.6)
18. *Migal E.A., Balabanov S.S., Savin D.V., Ikonnikov V.B., Gavrishchuk E.M., Potemkin F.V.* Amplification properties of polycrystalline Fe:ZnSe crystals for high power femtosecond mid-IR laser systems // Optical Materials – 2020. – V.111. – P. 110640. JIF= 3.754 (Вклад автора 0.8)
19. *Mareev E.I., Lvov K.V., Rumiantsev B.V., Migal E.A., Novikov I.D., Stremoukhov S.Yu., Potemkin F.V.* Effect of pulse duration on the energy delivery under nonlinear propagation of tightly focused Cr:forsterite laser radiation in bulk silicon // Laser Physics Letters – 2020. – V.17. – P. 015402. JIF= 1.704 (Вклад автора 0.6)
20. *Pushkin A.V., Migal E.A., Tokita S., Korostelin Yu.V., Potemkin F.V.* Femtosecond graphene mode-locked Fe:ZnSe laser at 4.4 μm // Optics Letters – 2020. – V.45. – P. 738-741. JIF= 3.56 (Вклад автора 0.6)

21. *Migal E.A., Stremoukhov S.Yu., Potemkin F.V.* Ionization-free resonantly enhanced low-order harmonic generation in a dense gas mixture by a mid-IR laser field // Physical Review A – 2020. – V.101. – P. 021401. JIF= 2.971 (Вклад автора 0.5)
22. *Пушкин А.В., Словинский И.А., Потемкин Ф.В.* Мегаваттный импульсно-периодический эрбиевый 3-мкм лазер с компенсацией сильной тепловой линзы // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики – 2020. – Т. 112– С.508–515. IF (РИНЦ) = 1.142 (Вклад автора 0.6)
23. *Migal E., Mareev E., Smetanina E., Duchateau G., Potemkin F.* Role of wavelength in photocarrier absorption and plasma formation threshold under excitation of dielectrics by high-intensity laser field tunable from visible to mid-IR // Scientific Reports – 2020. – V. 10 – P.14007. JIF= 4.996 (Вклад автора 0.6)
24. *Мареев Е.И., Румянцев Б.В., Потемкин Ф.В.* Исследование параметров лазерно-индуцированных ударных волн для задач лазерной ударной обработки кремния // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики – 2020. – Т. 112– С. 780–786. IF (РИНЦ) = 1.142 (Вклад автора 0.8)
25. *Migal E., Pushkin A., Bravy B., Gordienko V., Minaev N., Sirotkin A., Potemkin F.* 3.5-mJ 150-fs Fe:ZnSe hybrid mid-IR femtosecond laser at 4.4 μm for driving extreme nonlinear optics // Optics Letters – 2019. – V. 44– P. 2550–2553. JIF= 3.56 (Вклад автора 0.8)
26. *Mareev E.I., Potemkin F.V., Migal E.A., Minaev N.V., Gordienko V.M.* Controlled nonlinearity and the lasing effect under femtosecond filamentation in dense and supercritical Xe // Laser Physics Letters – 2019. – V. 16 – P. 035401. JIF= 1.704 (Вклад автора 0.2)
27. *Migal E.A., Potemkin F.V., Gordienko V.M.* Efficient strong-field low-order harmonic generation in xenon microplasma by a tightly focused Cr:Forsterite laser // Laser Physics Letters – 2019. – V. 16 – P. 045401. JIF= 1.704 (Вклад автора 0.2)
28. *Pushkin A.V., Mazur M.M., Sirotkin A.A., Firsov V.V., Potemkin F.V.* Powerful 3-μm lasers acousto-optically Q-switched with KYW and KGW crystals // Optics Letters – 2019. – V. 44 – P. 4837-4840. JIF= 3.56 (Вклад автора 0.6)
29. *Mareev E.I., Migal E.A., Potemkin F.V.* Ultrafast third harmonic generation imaging of microplasma at the threshold of laser-induced plasma formation in solids // Applied Physics Letters – 2019. – V. 114 – P. 031106. JIF= 3.816 (Вклад автора 0.8)
30. *Lvov K.V., Stremoukhov S.Yu., Migal E.A., Potemkin F.V.* Asymmetric temporal splitting of laser pulse and broad supercontinuum generation under femtosecond filamentation in YAG crystal // Laser Physics Letters – 2018. – V. 15 – P. 085402. JIF= 1.704 (Вклад автора 0.4)
31. *Pushkin A.V., Bychkov A.S., Karabutov A.A., Potemkin F.V.* Cavitation and shock waves emission on the rigid boundary of water under mid-IR nanosecond laser pulse excitation // Laser Physics Letters – 2018. – V. 15 – P. 065401. JIF= 1.704 (Вклад автора 0.6)
32. *Pushkin A.V., Migal E.A., Uehara H., Goya K., Tokita S., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Skasyrsky Ya.K., Potemkin F.V.* Compact, highly efficient, 21-W continuous-wave

mid-infrared Fe:ZnSe coherent source, pumped by an Er:ZBLAN fiber laser // Optics Letters – 2018. – V. 43 – P. 5941-5944. JIF= 3.56 (Вклад автора 0.6)

33. *Мигаль Е.А., Потёмкин Ф.В.* Широкополосное параметрическое усиление в ближнем ИК-диапазоне (2–2.5 мкм) в условиях дисперсионных аномалий перестроечных характеристик с накачкой хром-форстеритовым лазером // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2018. – Т. 107 – С. 301–305. IF (РИНЦ) = 1.142 (Вклад автора 0.6)
34. *Potemkin F.V., Mareev E.I., Smetanina E.O.* Influence of wave-front curvature on supercontinuum energy during filamentation of femtosecond laser pulses in water // Physical Review A– 2018. – V. 97. – P. 033801. JIF= 2.971 (Вклад автора 0.8)
35. *Мареев Е.И., Мигаль Е.А., Потёмкин Ф.В.* Диагностика энерговклада при острой фокусировке фемтосекундного лазерного излучения в объём прозрачного диэлектрика в реальном времени по сигналу третьей гармоники // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2018. – Т. 107– С. 422–425. IF (РИНЦ) = 1.142 (Вклад автора 0.8)
36. *Potemkin F.V., Mareev E.I., Rumiantsev B.V., Bychkov A.S., Karabutov A.A., Cherepetskaya E.B., Makarov V.A.* Two-dimensional photoacoustic imaging of femtosecond filament in water // Laser Physics Letters. – 2018. – V. 15. – P. 075403-075403. JIF= 1.704 (Вклад автора 0.6)
37. *Potemkin F., Mareev E., Bezsudnova Y., Platonenko V., Bravy B., Gordienko V.* Controlled energy deposition and void-like modification inside transparent solids by two-color tightly focused femtosecond laser pulses // Applied Physics Letters. – 2017. – V. 110 – P. 163903. JIF= 3.971 (Вклад автора 0.6)
38. *Potemkin F.V., Mareev E.I., Bezsudnova Y.I., Platonenko V.T., Bravy B.G., Gordienko V.M.* Enhancing nonlinear energy deposition into transparent solids with an elliptically polarized and mid-IR heating laser pulse under two-color femtosecond impact // Laser Physics Letters. – 2017. – V. 14 – P. 065403. JIF= 1.704 (Вклад автора 0.6)
39. *Frolov M.P., Gordienko V.M., Korostelin Y.V., Kozlovsky V.I., Podmar'kov Y.P., Potemkin F.V, Skasyrsky Y. K.*, Fe^{2+}-doped CdSe single crystal: growth, spectroscopic and laser properties, potential use as a 6 μm broadband amplifier // Laser Physics Letters – 2017. – V. 14 – P. 025001. JIF= 1.704 (Вклад автора 0.2)
40. *Migal E.A., Potemkin F.V., Gordienko V.M.* Highly efficient optical parametric amplifier tunable from near- to mid-IR for driving extreme nonlinear optics in solids // Optics Letters – 2017. – V. 42 – P. 5218–5221. JIF= 3.56 (Вклад автора 0.6)
41. *Potemkin F.V., Migal E.A., Podshivalov A.A., Gordienko V.M.* Broadband femtosecond parametric amplification in KTA close to mid-IR transparency cutoff // Journal of Optics – 2016. – V. 18 – P. 095502. JIF= 2.077 (Вклад автора 0.6)
42. *Mareev E., Bagratashvili V., Minaev N., Potemkin F., Gordienko V.* Generation of an adjustable multi-octave supercontinuum under near-IR filamentation in gaseous, supercritical, and liquid carbon dioxide // Optics Letters – 2016. – V. 41 – P. 5760-5763. JIF= 3.56 (Вклад автора 0.2)
43. *Бравый Б.Г., Гордиенко В.М., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Потёмкин Ф.В., Подмарьков Ю.П., Подшивалов А.А., Платоненко В.Т., Фирсов В.В., Фролов М.П.* Мощная

фемтосекундная лазерная система среднего ИК диапазона (4-5 мкм) с использованием широкополосного усилителя на кристалле Fe^{2+}:ZnSe // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2016. – Т. 80. – С. 489–494. IF (РИНЦ) = 0.564 (Вклад автора 0.6)

44. *Potemkin F.V, Migal E.A., Pushkin A.V., Sirotkin A.A., Kozlovsky V.I., Korostelin Y.V, Podmar'kov Y.P., Firsov V.V, Frolov M.P., Gordienko V.M.* Mid-IR (4 – 5 μm) femtosecond multipass amplification of optical parametric seed pulse up to gigawatt level in Fe2+:ZnSe with optical pumping by solid-state 3-μm laser // Laser Physics Letters . – 2016. – V. 13. – P. 125101. JIF= 1.704 (Вклад автора 0.6)
45. *Potemkin F.V., Bravy B.G., Bezsudnova Y.I., Mareev E.I., Starostin V.M., Platonenko V.T., Gordienko V.M.* Overcritical plasma ignition and diagnostics from oncoming interaction of two color low energy tightly focused femtosecond laser pulses inside fused silica // Laser Physics Letters. – 2016. – V. 13. – P. 045402. JIF= 1.704 (Вклад автора 0.8)
46. *Potemkin F.V., Bravy B.G., Kozlovsky V.I., Korostelin Y.V, Migal E.A., Podmar'kov Y.P., Podshivalov A.A., Platonenko V.T., Firsov V.V., Frolov M.P., Gordienko V.M.* Toward a sub-terawatt mid-IR (4–5 μm) femtosecond hybrid laser system based on parametric seed pulse generation and amplification in Fe^{2+}:ZnSe // Laser Physics Letters – 2016. – V. 13. – P. 015401. JIF= 1.704 (Вклад автора 0.8)
47. *Potemkin F.V., Mareev E.I.* Dynamics of multiple bubbles, excited by a femtosecond filament in water // Laser Physics Letters – 2015. – V. 12. – P. 015405. JIF= 1.704 (Вклад автора 0.8)
48. *Potemkin F.V., Mareev E.I, Podshivalov A.A., Gordienko V.M.* Highly extended high density filaments in tight focusing geometry in water: From femtoseconds to microseconds // New Journal of Physics – 2015. – V. 17. – P. 053010. JIF= 3.717 (Вклад автора 0.8)
49. *Gordienko V.M., Potemkin F.V., Pushkin A.V., Sirotkin A.A., Firsov V.V.* Powerful 3μm YSGG:Cr : Er and YSGG: Cr :Yb : Ho Q-Switched Lasers Operating in the Repetition-Rate Mode // Journal of Russian Laser Research – 2015. – V. 36. – P. 570–576. JIF= 0.81 (Вклад автора 0.4)
50. *Подшивалов А.А., Потёмкин Ф.В., Сидоров-Бирюков Д.А.* Генерация мощных фемтосекундных суперконтинуумов в ближней ИК области спектра с использованием широкополосного параметрического преобразования частоты в кристаллах LBO и DCDA с накачкой излучением с λ = 620 нм // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44. – С. 824-828. IF (РИНЦ)= 1.194 (Вклад автора 0.6)
51. *Potemkin F.V., Mareev E.I., Podshivalov A.A., Gordienko V.M.,* Laser control of filament-induced shock wave in water // Laser Physics Letters – 2014. – V. 11. – P. 106001. JIF= 1.704 (Вклад автора 0.8)
52. *Потёмкин Ф.В., Мареев Е.И., Михеев П.М., Ходаковский Н.Г.*, Резонансное лазерно-плазменное возбуждение когерентных терагерцевых фононов в объеме фторсодержащих кристаллов под действием интенсивного фемтосекундного лазерного излучения // Квантовая электроника. — 2013. — Т. 43. — С. 735–739. IF (РИНЦ)= 1.194 (Вклад автора 0.8)

53. *Potemkin F.V., Mareev E.I., Mikheev P.M., Khodakovskij N.G.* Resonant laser-plasma excitation of coherent THz phonons under extreme conditions of femtosecond plasma formation in a bulk of fluorine-containing crystals // Laser Physics Letters – 2013. – V. 10. – P. 076003. JIF = 1.704 (Вклад автора 0.8)
54. *Potemkin F.V., Mikheev P.M.* Efficient generation of coherent THz phonons with a strong change in frequency excited by femtosecond laser plasma formed in a bulk of quartz // European Physical Journal D – 2012. – V. 66. – P. 248. JIF= 1.611 (Вклад автора 0.8)

Учебно-методические пособия

55. *Потёмкин Ф.В., Пушкин А.В.* Динамика и усиление твердотельной МОРА-системы на основе Cr:Yb:Ho:YSGG. – М.: Физический факультет МГУ, 2017. – 20 с. (Вклад автора 0.8)
56. *Потёмкин Ф.В., Мигаль Е.А.* Измерение огибающей интенсивности и спектральной фазы импульсов ближнего ИК диапазона методом широкополосного оптического стробирования с разрешением по частоте в процессе генерации второй гармоники. – М.: Физический факультет МГУ, 2017. – 21 с. (Вклад автора 0.8)

Патент

57. *Потёмкин Ф.В., Мареев Е.И., Безсуднова Ю.И.*; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова" (МГУ). Способ формирования дефектов в объеме образца диэлектрика лазерным излучением. Патент № 2671150 РФ, B23K 26/02. № 2017130865; Регист.31.08.2017; Опубл. 29.10.2018. (Вклад автора 0.8)

Другие публикации

58. *Rumiantsev B.V., Mikheev K.E., Migal E.A., Stremoukhov S.Yu., Potemkin F.V.*, Low-order harmonics generation driven by femtosecond mid-IR Fe: ZnSe laser system // IEEE Proceedings of International Conference Laser Optics (ICLO-2022). – 2022 – P. 1.
59. *Potemkin F.V.* Mid-infrared (3–5 um) ultrafast Fe:ZnSe laser sources for driving extreme nonlinear optics // 2021 IEEE Photonics Conference (IPC). –2021. – P.1-2.
60. *Mareev E.I., Migal E.A., Potemkin F.V.* The effect of chirp and wavelength for ultrafast bulk modification of solids with tightly focused laser pulses // Proceedings SPIE. – 2021. – V. 11910. – P. 119100F.
61. *Mareev E.I., Potemkin F.V., Migal E.A., Minaev N.V., Gordienko V.M.* Flexible control of nonlinear processes under femtosecond filamentation using adjustable high-pressure gases and supercritical fluids // Proceedings Nonlinear Optics and Applications XI. –2019. – V. 11026. – P. 1102604.
62. *Rumiantsev B.V., Mareev E.I., Bychkov A.S., Makarov V.A., Karabutov A.A., Cherepetskaya E.B., Potemkin F.V.* Photoacoustic and optical imaging of the femtosecond filament in water // Proceedings Nonlinear Optics and Applications XI. –2019. – V. 11026. – P. 1102606.
63. *Migal E.A., Mareev E.I., Smetanina E.O., Duchateau G., Potemkin F.V.* Role of deposited energy density and impact ionization in the process of femtosecond laser-matter interaction with solids:

scaling from visible to mid-ir wavelength // Proceedings Nonlinear Optics and Applications XI. – 2019. – V. 11026. – P. 110260V.

64. *Potemkin F.V., Mareev E.I., Rumiantsev B.V., Bychkov A.S., Karabutov A.A., Cherepetskaya E.B., Makarov V.A.* Semi-analytical modelling of the forward and inverse problems in photoacoustic tomography of a femtosecond laser filament in water accounting for refraction and acoustic attenuation // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1141 – P. 012060.
65. *Migal E.A., Potemkin F.V.* Degenerate optical parametric amplifier driven by Cr: Forsterite laser // IEEE Proceedings of International Conference Laser Optics (ICLO-2018). – 2018 – P. 3.
66. *Potemkin F.V., Frolov M.P., Gordienko V.M.* Solid-state powerful femtosecond mid-ir laser sources based on Fe^{2+}doped chalcogenides: advances and prospects // IEEE Proceedings of International Conference Laser Optics (ICLO-2018). – 2018 – P. 33.
67. *Potemkin F.V., Mareev E.I., Rumiantsev B.V., Bychkov A.S., Cherepetskaya E.B., Karabutov A.A., Makarov V.A.* Two-dimensional photoacoustic imaging of femtosecond filament in water // IEEE Proceedings of International Conference Laser Optics (ICLO-2018). – 2018 – P. 315.
68. *Potemkin F.V, Migal E.A., Pushkin A.V., Bravy B.G., Sirotkin A.A., Kozlovsky V.I., Korostelin Y.V, Podmar'kov Y.P., Firsov V.V, Frolov M.P., Gordienko V.M.* Gigawatt mid-IR (4-5 μm) femtosecond amplifier of OPA seed pulse in monocrystalline Fe^{2+}:ZnSe optically pumped by solid-state 3 μm laser // Proceedings SPIE. of High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology III. – 2017. – V. 10238 – P. 102380L.
69. *Potemkin F.V., Mareev E.I., Podshivalov A.A., Gordienko V.M.* Superfilamentation in water with tight focusing laser beams // OSA Technical Digest of CLEO. – 2015. – P. FTu4D.5.
70. *Potemkin F.V., Mareev E.I., Podshivalov A.A., Gordienko V.M.* Whole life-cycle of superfilament in water: from femtoseconds up to microseconds // Proceedings of the 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology. – 2015 – V. 2. – P. 122–127.

Основная цитируемая литература:

1. *Крюков П.Г.* Лазеры ультракоротких импульсов // Квантовая электроника. 2001. Т. 31, № 2. С. 95–119.

2. Мощные пико- и фемтосекундные лазерные системы; вещество в сверхсильных световых полях / под ред. Ахманова С.А. Москва: ВИНИТИ, 1991. Т. 4. 244 р.

3. *Гаранин С.Г., Гарнов С.В., Сергеев А.М., Хазанов Е.А.* Мощные лазеры для физики высоких плотностей энергии // Академия наук и атомная отрасль, Научные сессии Общего собрания членов РАН и Общих собраний отделений РАН. Декабрь 2020 г.. Москва: Российская академия наук, 2021. С. 62–81.

4. *Korzhimanov A.V. et al.* Horizons of petawatt laser technology // Physics–Uspekhi. 2011. Vol. 54, № 1. P. 9–28.

5. *Kruer W.L.* Laser plasma interactions with intensities from 10^12–10^21 W/cm^2 // Phys Plasmas. 2003. Vol. 10, № 5. P. 2087.

6. *Andreev A.V., Gordienko V.M., Savel'ev A.B.* Nuclear processes in a high-temperature plasma produced by an ultrashort laser pulse // Quantum Electron. 2001. Vol. 31, № 11. P. 941.
7. *Umstadter D.* Review of physics and applications of relativistic plasmas driven by ultra-intense lasers // Phys Plasmas. 2001. Vol. 8, № 5. P. 1774.
8. *Gordienko V.M., Savel'ev A.B.* Femtosecond plasma in dense nanostructured targets: new approaches and prospects // Uspekhi Fizicheskih Nauk. 1999. Vol. 169, № 1. P. 78.
9. *Zvorykin V.D. et al.* GARPUN-MTW: A hybrid Ti:Sapphire/KrF laser facility for simultaneous amplification of subpicosecond/nanosecond pulses relevant to fast-ignition ICF concept // Laser and Particle Beams. 2007. Vol. 25, № 3. P. 435–451.
10. *Биглов З.А., Гордиенко В.М.* Мощные пикосекундные системы десятимикронного диапазона // Итоги Науки и Техники, Современные проблемы лазерной физики. 1991. Т. 4. С. 84–125.
11. *Кандидов В.П., Шленов С.А., Косарева О.Г.* Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. С. 205-228.
12. *Popmintchev T. et al.* Bright coherent ultrahigh harmonics in the keV x-ray regime from mid-infrared femtosecond lasers. // Science. American Association for the Advancement of Science, 2012. Vol. 336, № 6086. P. 1287–1291.
13. *Ionin A.A.* Electric discharge CO lasers // Gas Lasers. 2016. P. 201–237.
14. *Gordienko V.M., Platonenko V.T.* Regenerative amplification of picosecond 10-μm pulses in a high-pressure optically pumped CO_2 laser // Quantum Elec. 2010. Vol. 40, № 12. P. 1118.
15. *Akimov V.A. et al.* Vapour growth of II-VI single crystals doped by transition metals for mid-infrared lasers // Physica status solidi (c). 2006. Vol. 3, № 4. P. 1213–1216.
16. *Ovchinnikov A. V. et al.* Generation of 0.9-mJ THz pulses in DSTMS pumped by a $Cr:Mg_2SiO_4$ laser // Optics Letters. 2014. Vol. 39, № 23. P. 6632–6635.
17. *Zhang X.C., Shkurinov A., Zhang Y.* Extreme terahertz science // Nature Photonics. 2017. Vol. 11, № 1. P. 16–18.
18. *Zhang B. et al.* 1.4-mJ High Energy Terahertz Radiation from Lithium Niobates // Laser Photon Rev. 2021. Vol. 15, № 3. P. 2000295.
19. *Garnov S.V., Shcherbakov I.A.* Laser methods for generating megavolt terahertz pulses // Uspekhi Fizicheskih Nauk. 2011. Vol. 181, № 1. P. 97.
20. *Райнтжес Дж.* Нелинейные оптические параметрические процессы в жидкостях и газах. М.:Мир, 1987. 510 p.
21. *Akhmanov S.A.* Khokhlov's method in the theory of nonlinear waves // Uspekhi Fizicheskih Nauk. 1986. Vol. 149, № 7. P. 361–390.
22. *Фортов В.Е.* Физика высоких плотностей. Москва: Физматлит, 2013. 505 p.
23. *Arnold D., Cartier E.* Theory of laser-induced free-electron heating and impact ionization in wide-band-gap solids // Phys Rev B. American Physical Society, 1992. Vol. 46, № 23. P. 15102.

24. *Garnov S. V et al.* Dynamics of plasma production and development in gases and transparent solids irradiated by high-intensity, tightly focused picosecond laser pulses // Quantum Elec. 2003. Vol. 33, № 9. P. 758.
25. *Gattass R.R., Mazur E.* Femtosecond laser micromachining in transparent materials // Nat Photonics. 2008. Vol. 2. P. 219.
26. *Potemkin F.V. et al.* Overcritical plasma ignition and diagnostics from oncoming interaction of two color low energy tightly focused femtosecond laser pulses inside fused silica // Laser Phys Lett. 2016. Vol. 13, № 4. P. 045402.
27. *Yudin N. et al.* Effects of the Processing Technology of CVD-ZnSe, Cr2+:ZnSe, and Fe2+:ZnSe Polycrystalline Optical Elements on the Damage Threshold Induced by a Repetitively Pulsed Laser at 2.1 μm // Ceramics. 2022. Vol. 5, № 3. P. 459–471.
28. *Petrov V.* Frequency down-conversion of solid-state laser sources to the mid-infrared spectral range using non-oxide nonlinear crystals // Prog Quantum Electron. 2015. Vol. 42. P. 1–106.
29. *Гордиенко В.М.* Твердотельная фемтосекундная лазерная система на Cr:forsterite: перспективы использования в фундаментальных исследованиях и в создании критических фемтотехнологий. Препринт физического факультета №13/2000, МГУ, М., 2000.
30. *Agranat M.B. et al.* Terawatt femtosecond Cr : forsterite laser system // Quantum Elec. 2004. Vol. 34, № 6. P. 506.
31. *Gordienko V.M., Mikheev P.M., Potemkin F.V.* Generation of coherent terahertz phonons by sharp focusing of a femtosecond laser beam in the bulk of crystalline insulators in a regime of plasma formation // JETP Lett. 2010. Vol. 92, № 8. P. 553–558.
32. *Gordienko V.M. et al.* Efficient parametric oscillation in the 8—10-μm range upon pumping by a femtosecond Cr:forsterite laser // Quantum Elec. 2006. Vol. 36, № 2. P. 114–116.
33. *Mirov S. et al.* Frontiers of mid-IR lasers based on transition metal doped chalcogenides // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2018. Vol. 24, № 5. P. 1601829.
34. *Franken P.A. et al.* Generation of Optical Harmonics // Phys Rev Lett. 1961. Vol. 7, № 4. P. 118.
35. *Фортов В.Е.* Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе // УФН. 2009. Т. 179, № 6. С. 653–687.
36. *Batani K. et al.* Recent progress in matter in extreme states created by laser // Matter and Radiation at Extremes. 2021. Vol. 7, № 1. P. 013001.
37. *Wippermann S. et al.* Novel silicon phases and nanostructures for solar energy conversion // Appl Phys Rev. 2016. Vol. 3, № 4. P. 040807.
38. *Paul R., Hu S.X., Karasiev V. V.* Crystalline phase transitions and vibrational spectra of silicon up to multiterapascal pressures // Phys Rev B. 2019. Vol. 100, № 14. P. 144101.
39. *Zeiger H.J., Vidal J.* Theory for displacive excitation of coherent phonons // Phys Rev B. 1992. Vol. 45, № 2. P. 768.