

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Митина Екатерина Владимировна

**Формирование регулярных массивов филаментов и генерация терагерцевого
излучения слабосфокусированными и коллимированными фемтосекундными
лазерными пучками**

1.3.19. Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2023 г.

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

**Научный
руководитель –**

Савельев-Трофимов Андрей Борисович –
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные
оппоненты –**

Чекалин Сергей Васильевич – доктор
физико-математических наук, профессор, гл. научн.
сотр., и.о. заведующего лабораторией спектроскопии
ультрабыстрых процессов Института спектроскопии
РАН.

Мурзина Татьяна Владимировна – доктор
физико-математических наук, доцент кафедры
квантовой электроники физического факультета МГУ
имени М.В. Ломоносова.

Дормидонов Александр Евгеньевич – кандидат
физико-математических наук, заместитель начальника
отдела – начальник лаборатории Всероссийского
научно-исследовательского института автоматизации им.
Н.П. Духова.

Защита диссертации состоится "23"ноября 2023г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.4 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 11991 Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С. А. Хохлова.

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/013.4/2643>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

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

А.А. Коновко

Актуальность темы

Филаментация фемтосекундного лазерного излучения в газовой среде сопровождается образованием слабоионизированных каналов [1]. Поперечный размер плазменных каналов составляет около 100 мкм, а их длина достигает нескольких метров и даже километров в зависимости от пиковой мощности лазерного пучка и режима фокусировки. Концентрация свободных электронов обычно находится в диапазоне $10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Волна электронной концентрации в плазменном канале, распространяющаяся вслед за лазерным импульсом, является источником терагерцевого излучения.

Такой терагерцевый источник имеет широкий спектр (от 0,05 до 200 ТГц в зависимости от режима генерации [2, 3]). Изменяя длительность (чирп) лазерного импульса, его энергию, расходимость и моду пучка можно управлять положением филамента в пространстве и тем самым расположить источник терагерцевого излучения в нужной области, например, вблизи исследуемого объекта.

В двухцветном филаменте ($\omega + 2\omega$) была достигнута эффективность конверсии лазерного излучения в терагерцевое $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ при энергии терагерцевого импульса 6 мкДж [4]. Помещая одноцветный филамент в электростатическое поле были достигнуты значительно меньшие эффективности конверсии ($\sim 10^{-9}$), но данная схема обладает своими плюсами: генерация происходит в заполненный конус с максимумом сигнала вдоль оси распространения пучка накачки; не требуется помещения нелинейного кристалла в пучок, что особенно актуально для мощных лазерных систем. Также перекрытие пучков первой и второй гармоники лазерного импульса не может быть достигнуто в двухцветной схеме вдоль длинного филамента из-за разных скоростей распространения двух импульсов, что приводит к насыщению эффективности генерации ТГц [5]. Электростатическое же поле вполне может быть приложено вдоль всего филамента.

Большой интерес представляют упорядоченные и управляемые массивы фемтосекундных филаментов. Использование управляемого массива филаментов позволяет сформировать массив терагерцевых источников, выполнить условия когерентного суммирования терагерцевого излучения от нескольких филаментов и получить квазимонохроматический узкий пучок [6]. Формирование массивов филаментов также интересно для транспортировки оптического, терагерцевого или микроволнового излучения. Было получено канализование оптического излучения по волноводу плотности воздуха, образованного областями уменьшенной плотности, остающимися после филамента, на расстояние ~ 70 длин Релея [7].

Для практического использования фемтосекундного филамента на протяженных трассах принципиально важно получать неинвазивно информацию о параметрах созданного филамента. Широкие возможности диагностики плазменного канала филамента доступны при измерении испускаемого акустического сигнала. Подобный подход хорошо себя зарекомендовал при оценке длины филамента и поглощенной средой энергии [8, 9]. Однако, используя широкополосные детекторы возможно расширить область применения данного подхода и существенно диагностируемых параметров.

Цели и задачи

Основными целями работы были:

- Экспериментальная разработка и практическое применение метода широкополосного акустического исследования филамента для получения информации об одиночном и множественном филаменте в сфокусированном и коллимированном случаях. Исследование энерговклада в среду вдоль трассы в различных режимах филаментации.
- Создание экспериментальной установки для проведения исследований филаментации тераваттного фемтосекундного лазерного излучения на протяженной атмосферной трассе, а именно, вакуумного тракта для доставки пучка на трассу и мобильного диагностического стенда.

- Исследование распределения плотности энергии излучения вдоль трассы в различных режимах филаментации и фокусировки (одиночный и множественный стохастический филаменты, регуляризованный филамент).
- Исследование генерации терагерцевого излучения (энергия, диаграмма направленности, спектр) вдоль трассы в различных режимах филаментации в присутствии электростатического поля. Исследование увеличения выхода ТГц-излучения с ростом энергии лазерного импульса, длины филамента и числа филаментов.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования в данной работе был фемтосекундный лазерный филамент. Мощный лазерный пучок самофокусируется в нелинейной среде. Вблизи оси пучка образуется плазма, за счет динамического баланса керровской самофокусировки и плазменной дефокусировки образуется протяженный филамент. При релаксации токами плазменного канала испускается терагерцевое излучение. В результате дальнейшей термализации формируется акустическая волна.

Предметом исследования являлось формирование регулярного пучка филаментов в воздухе в сфокусированном и коллимированном режимах с помощью амплитудной маски. Было показано, что при широкополосном детектировании акустической волны филамента можно получать информацию об отдельных филаментах в массиве (объемную плотность поглощенной средой энергии и поперечный размер), можно определять пространственное положение филаментов в поперечном сечении. Также предметом исследования являлись параметры терагерцевого излучения, которое испускает протяженный филамент, помещенный в электростатическое поле.

Научная новизна

При регуляризации пространственной структуры коллимированного пучка с помощью амплитудной маски одиночные филаменты зарождаются из максимумов плотности энергии на расстоянии, при котором отверстием открывается первая зона Френеля. Такой максимум содержит не менее $1/3$ энергии лазерного импульса, прошедшей через отверстие. Самофокусировка приводит к образованию филамента, если пиковая мощность излучения превышает критическую мощность.

В сфокусированном пучке с регуляризованной пространственной структурой плазменные каналы филаментов образуются из максимумов плотности энергии, обладающих энергией, соответствующей критической мощности самофокусировки, и имеющих размер ~ 100 мкм.

Филаментация слабосфокусированного лазерного пучка тераваттной мощности создает протяженный плазменный канал. Поперечные колебания электронной концентрации, вызванные приложением постоянного электростатического поля электродами длиной 5,5–47 см с напряженностью поля 10 кВ/см, генерируют ТГц-излучение. Эффективное суммирование ТГц-излучения вдоль плазменного канала в электростатическом поле значительно увеличивает выход ТГц, почти пропорционально длине электродов (если она меньше длины плазменного канала). Эффективность преобразования лазерного излучения в ТГц растет вместе с энергией лазерного импульса W и достигает насыщения, а энергия ТГц импульса возрастает как $\sim W^{1,6 \pm 0,2}$ в рассмотренном диапазоне энергии лазерного импульса от 1 до 20 мДж. ТГц-излучение испускается в полный конус с углом раствора $18^\circ \pm 2^\circ$. ТГц спектр, измеряемый интерферометром Майкельсона, определяется концентрацией электронов в плазменном канале и лежит в диапазоне 0,05–0,3 ТГц.

Максимальный сигнал при приложении электростатического поля вдоль всего филамента наблюдался при формировании филамента с линзой с фокусным расстоянием $F = 6$ м при диаметре пучка 10 мм ($NA = 8 \cdot 10^{-4}$). Максимум в спектре при этом оставался в области 0,050–0,3 ТГц и не зависел от фокусировки. Наблюдались высокочастотные максимумы при приложении поля только в зоне высокой концентрации плазмы в филаменте.

Теоретическая и практическая значимость

С помощью экспериментально разработанного широкополосного акустического метода исследования филамента можно исследовать плазменный канал филамента. Регистрация акустического сигнала приемником с шириной полосы более 6 МГц обеспечивает в одном импульсе неинвазивное измерение объемной и линейной плотности поглощенной энергии с поперечным и продольным пространственным разрешением менее 100 мкм и 7 мм соответственно.

Разработан новый метод акустического измерения пространственной стабильности пучка мощных импульсных лазеров *in situ*. Показано, что изменение во времени положения акустического импульса можно использовать для оценки стабильности пучка с погрешностью до 1 мкрад за несколько сотен лазерных выстрелов. Значение пространственной стабильности, полученное с использованием нового метода, хорошо совпадает со стабильностью, рассчитанной с использованием стандартных измерений в дальней зоне.

Начало филантов, образованных пучком, регуляризованным с помощью амплитудной маски, может быть определено из решения задачи линейного распространения пучка и в коллимированном, и в сфокусированном случае. Созданный и исследованный регулярный массив филантов длиной 10–15 м может быть использован для доставки оптического излучения вдоль трассы по виртуальному волноводу.

Использование лазерных филантов для генерации ТГц импульсов дает уникальную возможность сформировать ТГц импульс близко к удаленному объекту исследования [13]. Прикладывая электростатическое поле к длинному филamentу можно удаленно эффективно генерировать терагерцевое излучение вдоль оси распространения излучения в спектральном диапазоне около 0,05–0,3 ТГц.

Методология диссертационного исследования

В работе был разработан метод акустического исследования фемтосекундного филамента с высоким пространственным разрешением в поперечном направлении. Цилиндрическая акустическая волна, исходящая от филамента, регистрировалась широкополосным пьезоприемником. Показана возможность исследования структуры множественного филамента широкополосным акустическим детектором, проанализированы его преимущества по сравнению с узкополосным акустическим приемником.

Исследовалось формирование регулярных массивов фемтосекундных филантов. Для формирования регулярного массива филантов лазерный пучок перегораживался амплитудными масками разной конфигурации (непрозрачными пластинками с отверстиями). Филament в коллимированном пучке формировался на атмосферной трассе длиной 48 м, что позволило проследить формирование, распространение и распад филантов при энергии лазерного импульса >10 мДж.

Создана установка для вывода лазерного излучения на трассу по вакуумному тракту. Длина тракта составляла около 8 м, давление внутри создавалось $\sim 10^{-2}$ мбар для минимизации искажений фазового фронта пучка. Тракт внутри был оснащен системой моторизованных зеркал, позволяющих юстировать схему, не выпуская воздух. Создан мобильный диагностический стенд для проведения измерений вдоль протяженной трассы. На нем был расположен широкополосный акустический детектор, высоковольтный блок для создания электростатического поля, система регистрации терагерцевого импульса, измеритель энергии лазерного импульса и распределения плотности энергии лазерного излучения.

В дополнение к широкополосному акустическому методу филament исследовался путем регистрации распределения плотности энергии излучения (моды). Излучение перегораживалось непрозрачным экраном, далее изображение переносилось с экрана на ПЗС матрицу. С помощью этого метода исследовалось формирование массива филантов в коллимированном и сфокусированном режимах.

Линейное распространение пучка моделировалось с помощью программного пакета *Diffraction* [34], что позволило соотнести пространственное положение плазменных каналов филантов с формированием дифракционных световых каналов.

Вторая часть диссертационной работы посвящена регистрации терагерцевого излучения протяженного филамента. Исследовалось терагерцевое излучение филамента, помещенного в

электростатическое поле. Электростатическое поле прикладывалось вдоль всего филамента и вдоль его части. Максимальная длина электродов составляла 2 м.

Терагерцевое излучение фокусировалось полиметилпентеновыми (TPX) линзами в детектор Голя для измерения энергии импульса. Спектр исследовался с помощью интерферометра Майкельсона, смонтированного перед детектором. Пучок терагерцевого излучения отправлялся на светоделиитель, разделялся и отражался обратно двумя зеркалами, одно из которых было подвижным. При регистрации энергии терагерцевого излучения в разных положениях зеркала была получена корреляционная функция терагерцевого импульса.

Положения, выносимые на защиту

- Регистрация акустического сигнала от филамента, создаваемого в воздухе мощным фемтосекундным лазерным излучением, приемником с шириной полосы 6 МГц обеспечивает в одном импульсе измерение объемной и линейной плотности поглощенной энергии с поперечным и продольным пространственным разрешением менее 100 мкм и 7 мм соответственно.
- Формирование регуляризованных плазменных каналов с помощью амплитудной модуляции волнового фронта в воздухе для сфокусированного фемтосекундного лазерного пучка происходит при выполнении следующих условий: 1) пиковая мощность в каждом из пучков, образованных амплитудной маской, превышает критическую мощность самофокусировки в 2-3 раза, и 2) фокусное расстояние линзы оказывается больше длины самофокусировки каждого из пучков, либо расстояния первой зоны Френеля для отверстия амплитудной маски. Если длина самофокусировки для отдельного пучка превышает фокусное расстояние линзы, возможно формирование одиночного филамента по оси исходного лазерного пучка.
- Стабильный массив филаментов на протяженной атмосферной трассе формируется для коллимированного фемтосекундного лазерного пучка при амплитудной модуляции волнового фронта, если пиковая мощность излучения, прошедшего через каждое отверстие, превышает критическую мощность самофокусировки в 2-3 раза. При этом начало массива филаментов определяется расстоянием, на котором открывается первая зона Френеля от отверстий маски, обеспечивающей амплитудную модуляцию волнового фронта.
- Увеличение выхода ТГц-излучения (в 100 и более раз) и обужение его диаграммы направленности для одноцветного филамента достигается в режиме слабой фокусировки тераваттного фемтосекундного пучка при условии, что длина приложения электростатического поля примерно равна длине плазменного канала филамента.

Достоверность полученных результатов

В представленных экспериментах измерения производились разными методами (акустический метод совместно с регистрацией ТГц излучения, акустический метод совместно с детектированием распределения плотности энергии), проверялась согласованность результатов. Экспериментальные результаты в главах 2 и 3 также сравнивались с численным моделированием. Результаты исследований были опубликованы в рецензируемых научных журналах и представлены автором на международных конференциях.

Личный вклад

Все оригинальные экспериментальные результаты, представленные в работе, получены автором, либо при его непосредственном участии. Митина Е.В. участвовала в создании экспериментальной установки и проведении экспериментов, обрабатывала и обсуждала полученные результаты, участвовала в написании статей. Моделирование линейного распространения пучка производилось автором в разделе 2.4 и Жидовцевым Н. А. в разделе 2.5. Моделирование филаментации с помощью модели медленно меняющейся волны (раздел 2.4.2) и нелинейного

однонаправленного уравнения распространения пучка (раздел 3.3.2) производилось Косаревой О. Г., Пановым Н. А., Шипило Д. Е., Николаевой И. А.

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 119 страниц, включая 36 рисунков и 4 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 145 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава

Первая глава работы посвящена экспериментальной разработке и применению широкополосного акустического метода исследования фемтосекундного филамента. В работе этот метод был впервые экспериментально реализован. Метод позволяет в одном лазерном выстреле неинвазивно получать параметры теплового источника акустического сигнала (размер и объемную плотность поглощенной энергии), которые в свою очередь отражают параметры плазменного канала филамента. По результатам данной главы была опубликована статья [1а].

Глава начинается с общего обзора явления филаментации и методов исследования филамента с последующим акцентом на акустический метод исследования.

Мощный лазерный пучок с гауссовым распределением плотности энергии в поперечном сечении самофокусируется при превышении пиковой мощностью пучка критической мощности самофокусировки в нелинейной среде. В центре пучка образуется плазма, за счет динамического баланса керровской самофокусировки и плазменной дефокусировки формируется протяженный световой канал. В результате дальнейшей термализации канала формируется акустическая волна. Эта волна имеет вид одиночного колебания сжатия и разряжения с характерным пространственным размером порядка 50 мкм (соответствующая длительность сигнала 150 нс, частота ~ 6 МГц). В разделе **1.2.1** приведена аналитическая форма акустического сигнала, генерируемого филаментом.

В эксперименте для формирования филаментов использовалась Ti:Sa-лазерная система с длительностью импульса 55 фс, частотой следования импульсов 10 Гц, длиной волны 805 нм, энергией в импульсе до 20 мДж. Схема детектирования акустического сигнала обсуждается в разделе **1.2.2**. Для детектирования акустической волны использовался широкополосный пьезоэлектрический детектор на основе полимерной пленки поливинилиденфторида (ПВДФ) толщиной 110 мкм (рабочая полоса пропускания до 6 МГц) с диаметром рабочей зоны 6 мм. Поперечное и продольное пространственные разрешения метода исследования филамента этим детектором обсуждались в разделе **1.2.3.1** и составляли менее 100 мкм и 7 мм соответственно.

На рисунке 1 представлены примеры сигналов, наблюдаемых на выходе детектора. Черной кривой представлен типичный сигнал одиночного филамента. Красной кривой соответствует сигнал двух пар филаментов. Каждая пара филаментов находилась на одном расстоянии от детектора и формировала по одному сигналу. Длительность этих акустических сигналов ~ 200 нс.

В разделе **1.2.3.2** приводится разработанный и реализованный алгоритм определения параметров теплового канала филамента, основанный на сравнении аналитических (с учетом полосы приема детектора) и реальных сигналов, полученных в эксперименте. Анализ акустического сигнала дает максимальную объемную плотность поглощенной средой энергии в филаменте H_0 , радиус канала w_0 и, проинтегрировав по поперечному сечению теплового источника, линейную плотность поглощенной энергии.

В разделе **1.2.4** обсуждается погрешность широкополосного акустического метода, которая складывается из погрешности аппроксимации отфильтрованных теоретических кривых и погрешности определения амплитуды и ширины акустического сигнала.

С использованием нового широкополосного метода в разделе **1.2.5.1** был предложен альтернативный способ оценки пространственной стабильности мощного лазерного пучка. По материалам данного раздела была опубликована статья [2а]. Значение угловой пространственной

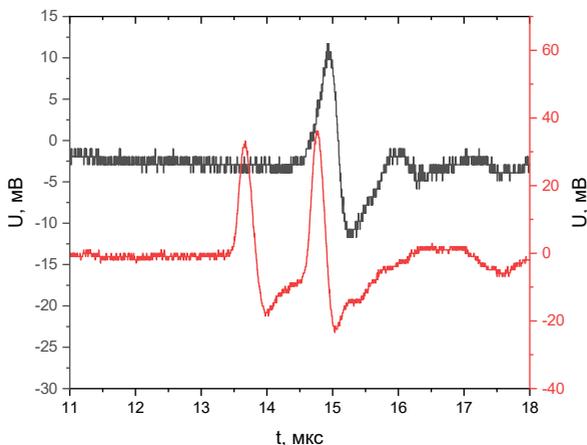


Рис. 1: Примеры сигналов, наблюдаемых на выходе широкополосного акустического детектора. Черной кривой представлен сигнал одиночного филамента. Красной кривой соответствует сигнал двух пар филаментов.

стабильности пучка может быть измерено неинвазивно по акустическому сигналу от плазмы, возникающей при мягкой фокусировке этого пучка. При этом важно не допускать формирования множественного филамента. Было показано, что изменение положения акустического импульса во времени можно использовать для оценки стабильности пучка с точностью до 1 мкрад за несколько сотен лазерных выстрелов. Значение пространственной стабильности, полученное с использованием нового метода, совпадает со стабильностью, рассчитанной с использованием стандартных измерений распределения плотности энергии пучка в дальней зоне [32].

В разделе **1.2.5.2** приведен обзор результатов, полученных с использованием широкополосного акустического метода. Наблюдалось слияние филаментов и образование суперфиламента вблизи фокуса линзы, формирующей филамент, в статьях [36] и [3а] по возрастанию амплитуды акустического сигнала при постоянной длительности. В [4а] наблюдалось формирование четырех филаментов и отсутствие слияния в фокусе линзы при предварительной модификации пространственной структуры пучка решеткой Даммана. Решетка Даммана представляла собой фазовую пластинку, состоящую из массива квадратов с фазовым набегом 0 или π . В этом разделе были представлены результаты, подробное исследование и обсуждение которых не является предметом настоящей диссертации. Также отметим, в последующих главах диссертации филамент исследовался широкополосным акустическим методом совместно с другими методиками.

Вторая глава

Вторая глава посвящена созданию массивов филаментов с помощью амплитудной регуляризации пространственной структуры пучка в сфокусированном и коллимированном ре-

жихах. Начинается глава с обзора литературы. Рассматривается влияние фокусировки и дифракции пучка на процесс формирования филамента, а также условия формирования постфиламента.

Раздел **2.2** посвящен описанию установки. Для формирования филаментов использовалась Ti:Sa-лазерная система с длительностью импульса 55 фс, частотой следования импульсов 10 Гц, длиной волны 805 нм, энергией в импульсе до 40 мДж. Пучок перегораживался амплитудными масками – непрозрачными пластинками с четырьмя отверстиями (см. таблицу 1). Исследовалось влияние размера и расположения отверстий на формирование филаментов. В сфокусированном пучке диаметром 7 мм по полувысоте использовались маски M0–M3, в коллимированном – M3 и M4 в пучке диаметром 14 мм по полувысоте. Исследовалось распределение плотности энергии в пучке (мода излучения) после распада филаментов в сфокусированном случае и в зоне филаментации в коллимированном. Лазерный пучок перегораживался белым экраном, изображение с экрана переносилось на ПЗС-камеру с помощью объектива. Чтобы заключить, является ли световое пятно на экране филаментом, проверялось наличие конической эмиссии в дальней зоне. Параллельно с измерениями моды излучения проводились широкополосные акустические измерения для определения параметров плазменного канала внутри филамента, производилось сканирование акустическим детектором вдоль филамента.

Название	M0	M1	M2	M3	M4
Тип					
d , мм	5	3	5	8	5
D , мм	4	2	2	6	4
F_0 , м	5	1.25	1.25	11.25	5
Коэффициент пропускания, %	50	16	10	41	15

Таблица 1: Параметры амплитудных масок. Здесь d – расстояние между центрами отверстий, D – диаметр отверстия, F_0 – расстояние, соответствующее открытию первой зоны Френеля.

Лазерное излучение доставлялось по вакуумному тракту длиной ~ 8 м на протяженную трассу (длиной 48 м). В разделе **2.2.1** приведена схема вакуумного тракта, также описывается методика измерений на протяженной трассе.

В работе проводилось моделирование линейного распространения пучка после амплитудной маски с помощью программного пакета Diffractio для Python [34]. В разделе **2.3** рассматривался вывод формул, которые были использованы в пакете. Особое внимание уделялось приближениям, используемым в выводе.

Раздел **2.4** посвящен экспериментальному исследованию формирования регулярных массивов филаментов в сфокусированном пучке. По материалам данного раздела была опубликована статья [7a]. Было показано, что пространственная структура, начало и длина массива плазменных каналов, образующихся при филаментации в воздухе сфокусированного фемтосекундного лазерного импульса с модулированным амплитудным фронтом, зависят не только от количества отверстий в амплитудной маске и пиковой мощности, проходящей через каждое отверстие, но также от диаметра отверстий и фокусировки.

В серии экспериментов в разделе **2.4.1** использовалась маска M0 – непрозрачная пластинка с четырьмя отверстиями диаметром 4 мм, расположенных по сторонам квадрата со стороной 5 мм. На рисунке 2 показаны моды излучения на расстоянии около $1,5F$ с фокусирующими $F = 30\text{--}400$ см. В первой колонке представлена расчетная мода излучения в режиме линейного распространения. Распространение пучка моделировалось с помощью пакета Diffractio [34]. В остальных столбцах (2–6) приведены экспериментальные результаты при различных энергиях лазерного импульса. Энергии лазерного импульса до маски, после маски и после одного отверстия указаны под рисунком.

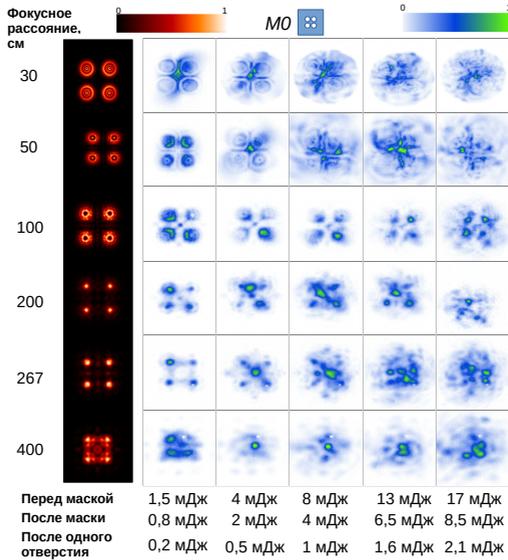


Рис. 2: Рассчитанные с использованием модели линейного распространения (1-й столбец) и экспериментальные (остальные столбцы) распределения плотности энергии с использованием линз с разной фокусировкой F на расстоянии $z = 1, 5F$. Разные столбцы для экспериментальных данных соответствуют разным энергиям лазерного импульса, которые указаны под рисунком.

Яркий белый максимум интенсивности наблюдался на оси пучка при $F = 267\text{--}400$ см и энергии лазерного излучения $0,5\text{--}1$ мДж на отверстие (третий и четвертый столбцы на Рис. 2). Пучок, соответствующий этому максимуму, возникал в области, близкой к фокусу линзы, не исчезал в дальней зоне и имел малую угловую расходимость. Одиночный постфиламент формировался при достаточной длине дифракционного канала, т.е. при малом угле схождения пучков после маски (в нашем эксперименте $\leq 0,05^\circ$). Этот пучок соответствовал постфиламенту, который является продолжением одиночного филамента, созданного нелинейным слиянием четырех пучков вдоль исходной оптической оси (осевой филамент). В случае слабой фокусировки часть лазерного пучка образует моду, которая может существовать на больших расстояниях за счет баланса керровской нелинейности и дифракции. В случае жесткой фокусировки градиент интенсивности в фокусе высок, почти весь импульс находился под влиянием плазмы и образования постфиламента не наблюдалось. Наблюдался распад центрального пучка на несколько постфиламентов с увеличением энергии до $13\text{--}17$ мДж (пятый и шестой столбцы на Рис. 2). Это связано с увеличением мощности излучения в приосевой части пучка до нескольких критических.

Исследовалась динамика плазменных каналов при распространении лазерного пучка. Акустический сигнал регистрировался с каждой фокусировкой F в широком диапазоне расстояний z от линзы. Данные, полученные с помощью акустических измерений, представлены на Рис. 3 в виде квадратов с градацией цвета. Цвет точки указывает на объемную плотность поглощенной энергии. Ширина по оси x соответствует поперечному размеру теплового источника и примерно совпадает с диаметром плазменного канала. В оттенках серого показано расчетное сечение интенсивности в линейном режиме. Приведено сечение в плоскости, проходящей через ось пучка и диагональ квадрата маски, образованного отверстиями.

Анализ линейного распространения пучка показал, что на расстоянии $F_f = (1/F + 1/F_0)^{-1}$

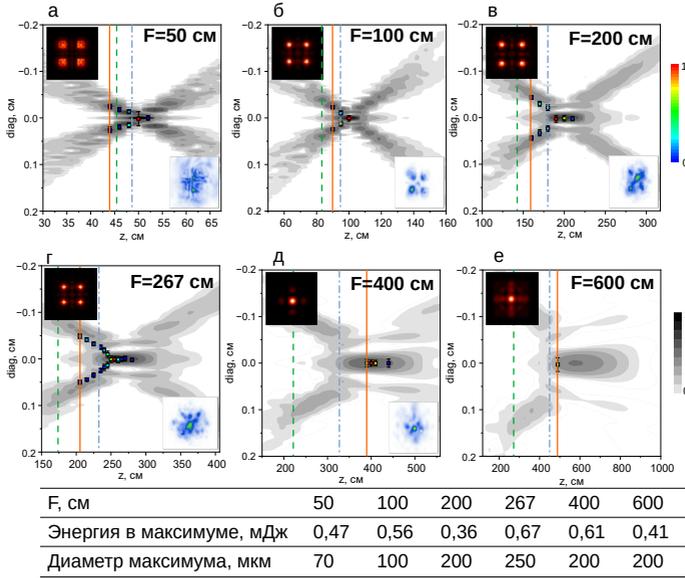


Рис. 3: Акустические измерения (цветные квадраты) для филамента при $F = 50 - 400$ см (регуляризация пучка с маской M_0 , энергия лазерного импульса перед маской 10 мДж). Цвет обозначает объемную плотность поглощенной энергии акустического источника (плазменного канала), вертикальный диапазон представляет размер источника. На изображениях в оттенках серого показаны поперечные сечения интенсивности в режиме линейного распространения в плоскости, заданной осью лазерного пучка и диагональю маски. Лазерное излучение распространяется снизу вверх. Вертикальные линии обозначают расстояние, на котором был зарегистрирован акустический сигнал L_a (оранжевая сплошная), расстояние открытия первой зоны Френеля F_f для одного отверстия маски (зеленая пунктирная) и расстояние самофокусировки L_f (синяя штрихпунктирная). На вставках представлены рассчитанные на расстояниях L_a (верхний левый угол) и измеренные на расстоянии $z = 1.5F$ (правый нижний угол) моды излучения в поперечном сечении. В таблице под рисунком приведены расчетные значения суммарной энергии и диаметра дифракционного максимума, возникающего в режиме линейного распространения на расстоянии L_a .

(зеленая пунктирная линия на Рис. 3, F_0 – расстояние, на котором отверстием открывается первая зона Френеля без фокусировки), формируется узкий максимум интенсивности, содержащий $\sim 1/3$ часть энергии, прошедшей через отверстие. При этом расстояние самофокусировки каждого лазерного пучка, вырезанного отверстием $L_f = (1/F + 1/Z_M)^{-1}$ (синяя штрихпунктирная линия), где Z_M – расстояние самофокусировки по формуле Марбурге-ра [33]

$$Z_M = \frac{0,367ka_0^2}{((P/P_c)^{1/2} - 0,852)^2 - 0,0219)^{1/2}} \quad (1)$$

для гауссова пучка с диаметром равным диаметру отверстия D находится дальше, чем F_f .

Если пиковая мощность, прошедшая через одно отверстие, ниже критической мощности самофокусировки, а полная пиковая мощность, прошедшая через все отверстия, выше критической, то в области фокуса наблюдается образование одиночного филамента (см. Рис.4в). Его начало связано с дифракционным стягиванием излучения к оптической оси с последующим быстрым схлопыванием из-за малого диаметра дифракционного канала. Если суммарная пиковая мощность незначительно (в 2–3 раза) превышает критическую мощность, формируется

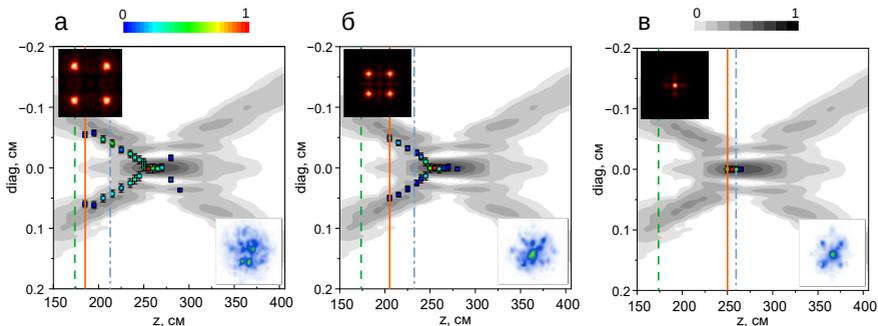


Рис. 4: Экспериментальные акустические сигналы и рассчитанные распределения плотности энергии в режиме линейного распространения для энергий лазерного импульса 17 мДж (а), 10 мДж (б) и 5 мДж (в) перед маской ($F = 267$ см, регуляризация пучка с маской М0). Остальные обозначения те же, что и на Рис. 3.

одиночный филамент на оптической оси. В противном случае он распадается и формируется множественный филамент (см. Рис.4а).

Если пиковая мощность, прошедшая через одно отверстие, порядка критической мощности, наблюдается влияние дифракции Френеля. Формируются максимумы интенсивности на осях пучков, прошедших через отверстия (Рис.3а–в и Рис.4а,б), которые могут содержать достаточную пиковую мощность для быстрого схлопывания (диаметр этих дифракционных максимумов невелик, 100–200 мкм). Обычно один такой максимум содержит 20–30% энергии, прошедшей через отверстие, но это также зависит от соотношения между расстоянием открытия первой зоны Френеля и фокусным расстоянием линзы F . Если F велико (в нашем эксперименте это $F > 400$ см на Рис.3д,е), то максимум, образованный дифракцией Френеля, широк и содержит малую энергию. Таким образом, короткий филамент появляется в фокальной области без постфиламентации. В противном случае каждый пучок создает филамент, а их пространственное положение задается маской. Далее эти филаменты сходятся в фокальной области и образуют одиночный или множественный филамент (и постфиламенты) на оптической оси в зависимости от суммарной пиковой мощности. При дальнейшем увеличении пиковой мощности множественный филамент формируются как перед, так и/или внутри фокальной области со стохастическим пространственным распределением.

В разделе 2.4.2 численное моделирование нелинейного уравнения огибающей с учетом дисперсии, мгновенной и запаздывающей керровской нелинейностью, ионизации показало, что учет сложной динамики нелинейных процессов существенно не улучшает предположения о позициях плазменных каналов в пространстве, сделанные на основе анализа дифракционных картин.

В разделе 2.4.3 исследовалась структура плазменных каналов в зависимости от взаимного расположения отверстий маски. Рассматривались три маски с отверстиями, расположенными в вершинах квадрата со сторонами 3 мм, 5 мм и 8 мм (см. маски М1, М0 и М3 в таблице 1). Для формирования филаментов использовалась линза с $F = 400$ см.

Эксперименты показали решающую роль дифракции при филаментации фемтосекундного пучка с амплитудной модуляцией в отличие от не регуляризованных (или слабо сфокусированных) гауссовских пучков. Был предложен способ, основанный на модели линейного распространения и дифракции, создания регуляризованного пучка филаментов с помощью амплитудной модуляции фемтосекундного пучка.

Раздел 2.5 посвящен исследованию формирования массивов филаментов в коллимирован-

ном пучке. По материалам данного раздела была опубликована статья [5а]. Рассматривалось формирование филамента без внешней фокусировки в двух режимах: (1) стохастическая множественная филаментация и (2) регуляризованная амплитудной маской.

Сечения плотности энергии пучка измерялись на разных расстояниях от начала трассы для разных энергий лазерного импульса. По полученным изображениям прослеживалась динамика формирования, взаимодействия и распада множественных филаментов вдоль пути распространения. Также детектировались акустические сигналы в режиме с максимальной энергией.

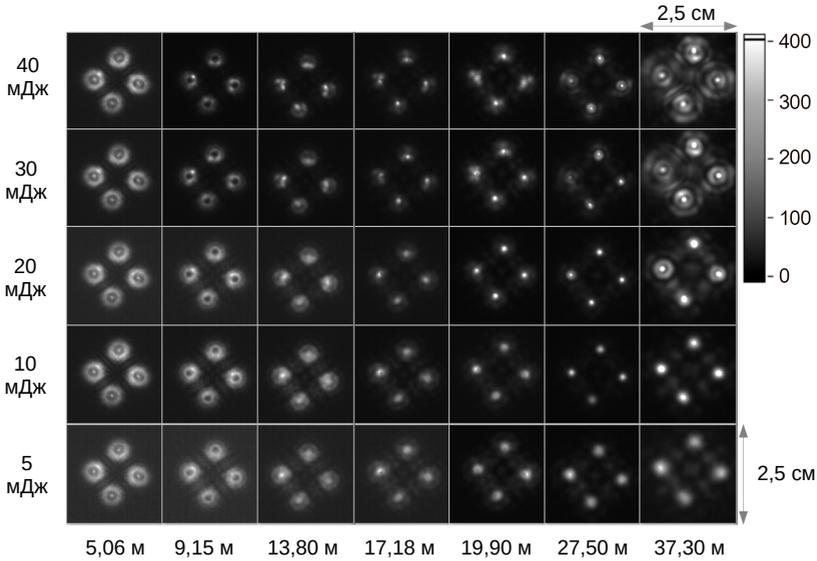


Рис. 5: Сечения пучка (плотность энергии) в режиме регуляризованной филаментации для коллимированного лазерного пучка на разных расстояниях L ($\pm 0,05$ м) от выходного окна (столбцы) при различной энергии лазерного импульса W_p (строки). Яркость каждого изображения нормирована на максимум.

Было показано, что регуляризация пространственной структуры тераваттного коллимированного фемтосекундного пучка с помощью маски с несколькими отверстиями позволяет создать устойчивый массив филаментов длиной не менее 10–15 м (на Рис.5, например, при энергии 20 мДж до маски и на расстояниях 17,18 м – 27,50 м).

В таблице 2 приведены энергии W_{p1} импульса, прошедшего через одно отверстие амплитудной маски, длина самофокусировки Z_M , рассчитанная по формуле Марбургера (формула (1)) для одного отверстия, и расстояние L_{exp} , на котором филаменты наблюдались в эксперименте. В качестве диаметра пучка при расчете длины самофокусировки использовался диаметр отверстия маски.

Филаменты зарождались гораздо раньше, чем это предсказывает теория самофокусировки нерегуляризованного лазерного пучка. За счет дифракции на отверстии создавался максимум плотности энергии на оси отверстия на расстоянии открытия отверстием маски первой зоны Френеля. В этом максимуме содержится не менее 1/3 энергии лазерного импульса, проходящей через отверстие. Самофокусировка приводит к образованию филамента, если пиковая мощность превышает критическую мощность самофокусировки. Так как диаметр пучка, фор-

W_p , мДж	W_{p1} , мДж	Z_M , м	L_{exp} , м ($\pm 0,05$ м)
40	2,6	26,7	9,15
30	1,95	34,6	9,15
20	1,3	52,4	13,8
10	0,65	192,0	17,8
5	0,35	∞	Филамент не наблюдался

Таблица 2: В таблице представлены длины самофокусировки, рассчитанные по формуле Марбургера Z_M и наблюдаемые экспериментально L_{exp} для регуляризованного амплитудной маской М3 пучка без дополнительной фокусировки.

мируемого в первой зоне Френеля, составляет около 1 мм, длина самофокусировки невелика, всего 1–2 м. Экспериментально наблюдаемые расстояния, на которых формируется массив филаментов, оказались близки значениям, полученным при моделировании дифракции пучка маске.

Для формирования устойчивого массива филаментов необходимо выбрать начальную энергию импульса, обеспечивающую зарождение филамента из максимума плотности энергии первой зоны Френеля. Это соответствует энергии импульса 10–20 мДж перед амплитудной маской с четырьмя отверстиями, используемой в экспериментах. Если энергия выше, одиночные филаменты в массиве разбиваются на несколько, а общая длина массива увеличивается.

Результаты показали важность дифракции для формирования массивов филаментов с помощью амплитудных масок. Чтобы получить массив желаемой конфигурации, необходимо правильно подобрать энергию импульса и диаметр пучка, а также геометрию амплитудной маски (количество отверстий, их диаметры и расстояния между отверстиями).

Третья глава

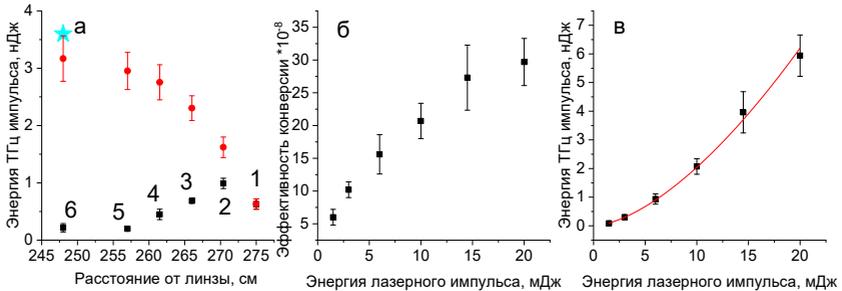


Рис. 6: (а) Энергия ТГц импульсов при подключении отдельных пластин длинного электрода (черные квадраты). Красные круги - арифметические суммы сигналов с пластин с номером, меньшим или равным текущему. Синяя звездочка - сигнал, зарегистрированный при соединенных пластинах длинного электрода (47 см). По оси x отложено расстояние от центров пластин до линзы, формирующей филамент. Эффективность преобразования лазерного излучения в терагерцевое (б) и энергия терагерцевых импульсов (в) при различных энергиях лазерного импульса. Электростатическое поле прикладывалось вдоль всего филамента (47 см) в (б) и (в).

Третья глава посвящена генерации терагерцевого излучения протяженным стохастиче-

ским филаментом. По материалам данной главы была опубликована статья [6а]. Начинается глава также с обзора литературы. Рассматриваются механизмы генерации ТГц-излучения в случае одноцветного филамента, одноцветного филамента в электростатическом поле и двухцветного филамента. Сравняются эффективности и параметры ТГц-излучения в этих режимах. Рассматривается возможность суммирования ТГц сигналов отдельных филаментов в множественном.

В разделе 3.2 приводится описание установки. По сторонам от филамента в слабосфокусированном пучке располагались плоские электроды переменной длины (от 5,5 см до 47 см). Один электрод состоял из отдельных пластинок, которые можно было соединять или подключать по отдельности. Регистрация ТГц-излучения проводилась детектором Голея (Tudex, GS-1P).

Филаментация слабосфокусированного лазерного пучка тераваттной мощности создает плазменный канал длиной до 47 см. Этот канал (диаметр, плотность энергии) исследовался с помощью широкополосной акустической методики. Поперечные колебания электронной концентрации, вызванные приложением постоянного электростатического поля электродами длиной 5,5–47 см с напряженностью поля 10 кВ/см, генерируют ТГц-излучение.

Для исследования выхода ТГц-излучения при увеличении длины электрода был проведен следующий эксперимент. Терагерцевые сигналы, генерируемые на разных расстояниях вдоль пути лазерного пучка, записывались, а затем суммировались. Энергия лазерного импульса в этом эксперименте была максимальной ($\sim 20 - 25$ мДж) и соответствовала самому длинному множественному филаменту. Результаты этого эксперимента представлены на Рис. 6а. Фокус собирающей линзы TL1 располагался под центром пластины №1 на оптической оси и эта линза не перемещалась во время эксперимента. Электрическое поле создавалось последовательно между каждой и коротких пластин электрода и длинным заземленным электродом. Сигналы, наблюдаемые при подаче напряжения на каждую пластину, отмечены черными квадратами. Расстояния по оси x соответствуют расстояниям от линзы, формирующей филамент, до центров соответствующих пластин. Последовательные суммы сигналов от отдельных пластин обозначены красными кругами. Сумма сигналов отдельных пластин совпадает в пределах погрешности с сигналом, полученным с использованием длинного электрода (синяя звездочка на Рис. 6а). Простое увеличение длины приложения электростатического поля приводит к конструктивному суммированию отдельных сигналов и позволяет эффективно увеличить выход ТГц-излучения почти пропорционально длине электродов (если она меньше длины плазменного канала).

Далее мы оптимизировали выход ТГц-излучения с помощью электрода длиной 47 см. Для этого был проведен дополнительный эксперимент, в котором положение филамента смещалось относительно зоны приложения поля. Эффективность преобразование лазерной энергии в энергию терагерцевых импульсов и зависимости энергии терагерцевого импульса от энергии лазерного импульса представлены на Рис. 6б,в. Эффективность преобразования лазерного излучения в ТГц росла вместе с энергией лазерного импульса W и достигала насыщения, а энергия ТГц импульса возрастает как $W^{1,60}$ в рассмотренном диапазоне энергии лазерного импульса от 1 до 20 мДж.

На Рис. 7а построена интерферограмма (автокорреляционная функция) терагерцевого импульса при энергии лазерного импульса 20 мДж и длине приложения электростатического поля 47 см. По оси x отложено относительное время между импульсами с двух плеч интерферометра. По оси y отложена энергия терагерцевых импульсов. ТГц спектр, полученный с помощью преобразования Фурье автокорреляционной функции, лежал в диапазоне 0,05–0,3 ТГц и определялся концентрацией электронов в плазменном канале. ТГц-излучение испускалось в полный конус с углом раствора $18^\circ \pm 2^\circ$.

Спектр терагерцевого излучения также исследовался с помощью полосовых фильтров с центральными частотами 0,1; 0,3; 0,5; 1; 3 ТГц. Результаты представлены на вставке к Рис. 7 черными квадратами. По оси y отложена доля терагерцевого сигнала с фильтром по отношению к сигналу без него. Были просуммированы части спектра, полученного интерферометром в полосах пропускания фильтров. Вычисленные суммы нормированы на энергию терагерцевого импульса, наблюдавшуюся с фильтром 0,1 ТГц (красные треугольники на вставке на Рис. 7). Можно видеть, что полученные спектры согласуются друг с другом.

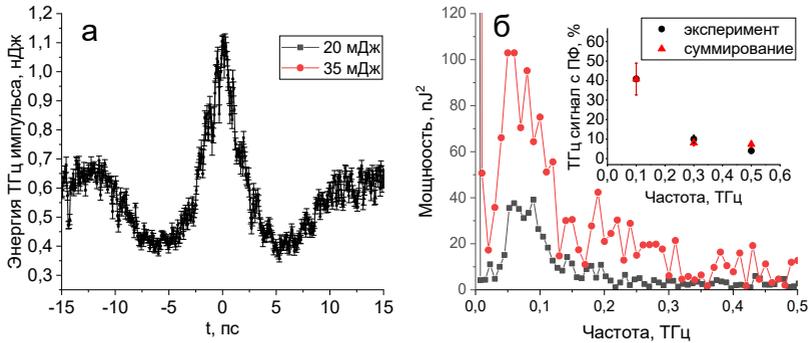


Рис. 7: (а) Корреляционная функция терагерцевого излучения филамента. Электростатическое поле прикладывалось по всей длине филамента (47 см). Энергия импульса составляла 20 мДж. (б) Спектры терагерцевого излучения, полученные при энергии лазерного импульса 20 мДж (черные квадраты) и 25 мДж (красные круги). На вставке представлены результаты измерений с помощью полосовых терагерцевых фильтров (черные круги). Красным треугольникам соответствуют суммы областей спектра в полосах пропускания фильтров.

Численное моделирование в рамках однонаправленного уравнения распространения импульса подтверждает экспериментальные результаты. В частности, была подтверждена корреляция между линейной концентрацией электронов и распределением мощности ТГц-излучения вдоль филамента.

Максимальный сигнал при приложении поля вдоль всего филамента наблюдался при формировании филамента с линзой $F = 6$ м (приложения поля осуществлялось электродами длиной 2 м). Максимум в спектре при этом оставался в области 0,05–0,3 ТГц и не зависел от фокусировки. Наблюдались высокочастотные максимумы при приложении поля только в зоне высокой концентрации плазмы в филаменте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был экспериментально реализован метод широкополосной акустической диагностики филамента. Регистрация акустического сигнала от филамента, создаваемого в воздухе мощным фемтосекундным лазерным излучением, приемником с шириной полосы более 6 МГц обеспечивает в одном импульсе неинвазивное измерение объемной плотности поглощенной энергии с поперечным и продольным пространственным разрешением менее 100 мкм и 7 мм соответственно. Дальнейшее развитие метода может состоять в численном решении обратной задачи.

Значение пространственной стабильности мощного лазерного пучка может быть измерено неинвазивно по акустическому сигналу от плазмы, возникающей при мягкой фокусировке этого пучка. Было показано, что изменение во времени положения акустического импульса можно использовать для оценки стабильности пучка с точностью до 1 мкрад за несколько сотен лазерных выстрелов. Значение пространственной стабильности, полученное с использованием нового метода, хорошо совпадает со стабильностью, рассчитанной с использованием стандартных измерений распределения плотности энергии пучка в дальней зоне.

Было показано, что пространственная структура, начало и длина массива плазменных каналов, образующихся при филаментации в воздухе сфокусированного фемтосекундного ла-

зерного импульса с модулированным амплитудным фронтом, зависят не только от количества отверстий в амплитудной маске и пиковой мощности, проходящей через каждое отверстие, но также от диаметра отверстий и фокусировки. Если пиковая мощность, прошедшая через одно отверстие, ниже критической мощности самофокусировки, полная пиковая мощность же, прошедшая через все отверстия, выше критической, то в области фокуса наблюдается образование одиночного филамента. Его начало связано с дифракционным стягиванием излучения к оптической оси с последующим быстрым схлопыванием из-за малого диаметра дифракционного канала. Если суммарная пиковая мощность незначительно (в 2–3 раза) превышает критическую мощность, формируется одиночный филамент на оптической оси. В противном случае он распадается и формируется множественный филамент. Одиночный постфиламент формируется при достаточной длине дифракционного канала, т.е. при малом угле схождения пучков после маски (в нашем эксперименте $\leq 0,05^\circ$).

Если уже пиковая мощность, прошедшая через одно отверстие, порядка критической мощности, формируются максимумы плотности энергии на осях пучков, прошедших через отверстия, которые могут содержать достаточную пиковую мощность для быстрого схлопывания (диаметр этих дифракционных максимумов невелик, 100–200 мкм). Обычно один такой максимум содержит 20–30% энергии, прошедшей через отверстие, но это также зависит от соотношения между расстоянием открытия первой зоны Френеля и фокусным расстоянием линзы F . Если F велико (в нашем эксперименте $F > 400$ см), то максимум, образованный дифракцией Френеля, широк и содержит малую энергию. Таким образом, короткий филамент появляется в фокальной области без постфиламентации. В противном случае каждый пучок создает филамент, а их пространственное положение задается маской. Далее эти филаменты сходятся в фокальной области и образуют одиночный или множественный филамент (и постфиламенты) на оптической оси в зависимости от суммарной пиковой мощности. При дальнейшем увеличении пиковой мощности множественный филамент формируются как перед, так и/или внутри фокальной области со стохастическим пространственным распределением.

Эксперименты показали решающую роль дифракции при филаментации фемтосекундного пучка с амплитудной модуляцией в отличие от не регуляризованных гауссовских пучков. Был предложен способ, основанный на модели линейного распространения и дифракции, создания регуляризованного пучка филаментов с помощью амплитудной модуляции фемтосекундного пучка. Численное моделирование нелинейного уравнения огибающей с учетом дисперсии, мгновенной и запаздывающей керровской нелинейности, ионизации показало, что учет сложной динамики нелинейных процессов существенно не улучшает предположения о позициях плазменных каналов в пространстве, сделанные на основе анализа дифракционных картин.

Филаментация слабосфокусированного лазерного пучка тераваттной мощности создает протяженный плазменный канал. Поперечные колебания электронной плотности, вызванные приложением постоянного электростатического поля электродами длиной 5,5–47 см с напряженностью поля 10 кВ/см, генерируют ТГц-излучение. Эффективное суммирование ТГц-излучения вдоль плазменного канала в электростатическом поле значительно увеличивает выход ТГц, почти пропорционально длине электродов (если она меньше длины плазменного канала). Эффективность преобразования лазерного излучения в ТГц растет вместе с энергией лазерного импульса W и достигает насыщения, а энергия ТГц импульса возрастает как $\sim W^{1,6 \pm 0,2}$ в рассмотренном диапазоне энергии лазерного импульса от 1 до 20 мДж. ТГц-излучение испускается в полный конус с углом раствора $18^\circ \pm 2^\circ$. ТГц спектр, измеряемый интерферометром Майкельсона, определяется концентрацией электронов в плазменном канале и лежит в диапазоне 0,05–0,3 ТГц.

Численное моделирование в рамках однонаправленного уравнения распространения импульса подтверждает экспериментальные результаты. В частности, была подтверждена согласованность между линейной концентрацией электронов и распределением ТГц излучаемой мощности вдоль филамента.

Максимальный сигнал при приложении поля вдоль всего филамента наблюдался при формировании филамента с линзой $F = 6$ м при диаметре пучка 10 мм ($NA = 8 \cdot 10^{-4}$). Максимум в спектре при этом оставался в области 0,05–0,3 ТГц и не зависел от фокусировки. Наблюдались высокочастотные максимумы при приложении поля только в зоне высокой концентрации плазмы в филаменте.

Дальнейшая оптимизация разработанной схемы предполагает поиск оптимального сочетания фокусировки лазерного пучка, длительности (чирпа) лазерного импульса.

Список публикаций по теме диссертации

Основные публикации, выпущенные по материалам диссертации с импакт фактором журнала и вкладом автора в процентах:

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в Перечне изданий МГУ

- [1a] Uryupina, D. S., Bychkov, A. S., Pushkarev, D. V., Mitina, E. V., Savel'ev, A. B., Kosareva, O. G., Panov, N. A., Karabytov, A. A., & Cherepetskaya, Laser optoacoustic diagnostics of femtosecond filaments in air using wideband piezoelectric transducers //Laser physics letters. – 2016. – Т. 13. – №. 9. – С. 095401. *JIF WoS 1,7; вклад автора 20%*
- [2a] Pushkarev, D., Mitina, E., Uryupina, D., Volkov, R., Karabytov, A., & Savel'ev, A. In situ optoacoustic measurement of the pointing stability of femtosecond laser beams //Laser Physics Letters. – 2018. – Т. 15. – №. 2. – С. 025401. *JIF WoS 1,7; вклад автора 60%*
- [3a] Pushkarev, D., Mitina, E., Shipilo, D., Panov, N., Uryupina, D., Ushakov, A., Volkov, R., Karabutov, A., Babushkin, I., Demircan, A., Morgner, U., Kosareva, O., & Savel'ev, A. Transverse structure and energy deposition by a subTW femtosecond laser in air: from single filament to superfilament //New Journal of Physics. – 2019. – Т. 21. – №. 3. – С. 033027. *JIF WoS 3,3; вклад автора 30%*
- [4a] Pushkarev, D. V., Lar'kin, A. S., Mitina, E. V., Zhidovtsev, N. A., Uryupina, D. S., Volkov, R. V., Karpeev, S.V., Khonina, S.N., Karabutov, A.A., Geints, Yu. E., Kosareva, O. G., & Savel'ev, A. B. Robust multifilament arrays in air by Dammann grating //Optics Express. – 2021. – Т. 29. – №. 21. – С. 34189-34204. *JIF WoS 3,8; вклад автора 20%*
- [5a] Mitina, E., Uryupina, D., Zhidovtsev, N., Volkov, R., Kosareva, O., & Savel'ev, A. Long-range robust multifilament arrays from terawatt femtosecond beam //Laser Physics Letters. – 2021. – Т. 19. – №. 1. – С. 015201. *JIF WoS 1,7; вклад автора 60%*
- [6a] Mitina, E., Uryupina, D., Nikolaeva, I., Shipilo, D., Panov, N., Ushakov, A., Volkov, R., Kosareva, O., & Savel'ev, A. Enhanced forward THz yield from the long DC-biased femtosecond filament //Optics & Laser Technology. – 2023. – Т. 159. – С. 108949. *JIF WoS 5; вклад автора 60%*
- [7a] Mitina, E., Uryupina, D., Shipilo, D., Nikolaeva, I., Panov, N., Volkov, R., Kosareva, O., & Savel'ev, A. Diffraction Impact onto Regularized Plasma Channel Formation by Femtosecond Laser Filamentation //Photonics. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. – Т. 10. – №. 8. – С. 928. *JIF WoS 2,4; вклад автора 60%*

Иные труды соискателя

- [8a] Mitina, E., Pushkarev, D., Uryupina, D., Volkov, R., Karabytov, A., Kosareva, O., & Savel'ev, A. Nonpertubing diagnostics of multiple filamentation and superfilamentation of powerful femtosecond laser pulses in air. IEEE 2018 International Conference Laser Optics (ICLO) (2018). *вклад автора 60%*
- [9a] Mitina, E., Pushkarev, D., Ushakov, A. A., Uryupina, D., Kosareva, O., & Savel'ev, A. Optimization of terahertz production from femtosecond multi- and superfilaments in air. In 2020 International Conference Laser Optics (ICLO) (2020), IEEE, pp. 1–1. *вклад автора 60%*

Список литературы

- [1] Кандидов В. П., Шленов С. А., Косарева О. Г. Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения //Квантовая электроника. - 2009. - Т. 39. - №. 3. - С. 205-228.
- [2] Matsubara E., Nagai M., Ashida M. Ultrabroadband coherent electric field from far infrared to 200 THz using air plasma induced by 10 fs pulses //Applied Physics Letters. - 2012. - Т. 101. - №. 1. - С. 011105.
- [3] Blank V., Thomson M. D., Roskos H. G. Spatio-spectral characteristics of ultra-broadband THz emission from two-colour photoexcited gas plasmas and their impact for nonlinear spectroscopy //New Journal of Physics. - 2013. - Т. 15. - №. 7. - С. 075023.
- [4] Kim K. Y. et al. Coherent control of terahertz supercontinuum generation in ultrafast laser-gas interactions //Nature photonics. - 2008. - Т. 2. - №. 10. - С. 605-609.
- [5] Kress M. et al. Terahertz-pulse generation by photoionization of air with laser pulses composed of both fundamental and second-harmonic waves //Optics letters. - 2004. - Т. 29. - №. 10. - С. 1120-1122.
- [6] Mityukovskiy S. I. et al. Coherent synthesis of terahertz radiation from femtosecond laser filaments in air //Applied Physics Letters. - 2013. - Т. 102. - №. 22. - С. 221107.
- [7] Goffin A. et al. Optical guiding in 50-meter-scale air waveguides //Physical Review X. - 2023. - Т. 13. - №. 1. - С. 011006.
- [8] Yu J. et al. Sonographic probing of laser filaments in air //Applied optics. - 2003. - Т. 42. - №. 36. - С. 7117-7120.
- [9] Rosenthal E. W. et al. Energy deposition of single femtosecond filaments in the atmosphere //Optics Letters. - 2016. - Т. 41. - №. 16. - С. 3908-3911.
- [10] Беспалов В.И., Таланов В.И. //Письма в ЖЭТФ. - 1966. - Т. 3. - №. 1. - С. 471.
- [11] Mlejnek M. et al. Optically turbulent femtosecond light guide in air //Physical Review Letters. - 1999. - Т. 83. - №. 15. - С. 2938.
- [12] Xi T. T., Lu X., Zhang J. Interaction of light filaments generated by femtosecond laser pulses in air //Physical review letters. - 2006. - Т. 96. - №. 2. - С. 025003.
- [13] Méchain G. et al. Range of plasma filaments created in air by a multi-terawatt femtosecond laser //Optics Communications. - 2005. - Т. 247. - №. 1-3. - С. 171-180.
- [14] Fibich G. et al. Control of multiple filamentation in air //Optics letters. - 2004. - Т. 29. - №. 15. - С. 1772-1774.
- [15] Gao H. et al. Femtosecond laser filament array generated with step phase plate in air //Optics express. - 2013. - Т. 21. - №. 4. - С. 4612-4622.
- [16] Jhajj N. et al. Demonstration of long-lived high-power optical waveguides in air //Physical Review X. - 2014. - Т. 4. - №. 1. - С. 011027.
- [17] Kandidov V. P. et al. Towards a control of multiple filamentation by spatial regularization of a high-power femtosecond laser pulse //Applied Physics B. - 2005. - Т. 80. - С. 267-275.
- [18] Méchain G. et al. Organizing multiple femtosecond filaments in air //Physical review letters. - 2004. - Т. 93. - №. 3. - С. 035003.

- [19] Roskey D. E. et al. The role of linear power partitioning in beam filamentation //Applied Physics B. - 2007. - Т. 86. - С. 249-258.
- [20] Cook K., Kar A. K., Lamb R. A. White-light filaments induced by diffraction effects //Optics express. - 2005. - Т. 13. - №. 6. - С. 2025-2031.
- [21] Tzortzakis S. et al. Coherent subterahertz radiation from femtosecond infrared filaments in air //Optics Letters. - 2002. - Т. 27. - №. 21. - С. 1944-1946.
- [22] D'Amico C. et al. Conical forward THz emission from femtosecond-laser-beam filamentation in air //Physical review letters. - 2007. - Т. 98. - №. 23. - С. 235002.
- [23] Amico C. D. et al. Forward THz radiation emission by femtosecond filamentation in gases: theory and experiment //New Journal of Physics. - 2008. - Т. 10. - №. 1. - С. 013015.
- [24] Panov N. A. et al. Angular distribution of the terahertz radiation intensity from the plasma channel of a femtosecond filament //JETP letters. - 2011. - Т. 93. - С. 638-641.
- [25] Пушкарев, Д. В., Ушаков, А. А., Митина, Е. В., Панов, Н. А., Урюпина, Д. С., Шипило, Д. Е., ... & Савельев, А. Б. Влияние фокусного расстояния линзы на энерговклад в среду и генерацию терагерцевого излучения при фокусировке двухцветного фемтосекундного излучения в воздухе //Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. - 2019. - №. 2. - С. 55-59.
- [26] Houard A. et al. Strong enhancement of terahertz radiation from laser filaments in air by a static electric field //Physical review letters. - 2008. - Т. 100. - №. 25. - С. 255006.
- [27] Löffler T., Jacob F., Roskos H. G. Generation of terahertz pulses by photoionization of electrically biased air //Applied Physics Letters. - 2000. - Т. 77. - №. 3. - С. 453-455.
- [28] Bhasin L., Tripathi V. K. Terahertz generation from laser filaments in the presence of a static electric field in a plasma //Physics of Plasmas. - 2011. - Т. 18. - №. 12.
- [29] Su Q. et al. Control of terahertz pulse polarization by two crossing DC fields during femtosecond laser filamentation in air //JOSA B. - 2019. - Т. 36. - №. 10. - С. G1-G5.
- [30] Chin S. L. et al. Filamentation and supercontinuum generation during the propagation of powerful ultrashort laser pulses in optical media (white light laser) //Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials. - 1999. - Т. 8. - №. 01. - С. 121-146.
- [31] Mityukovskiy S. I. et al. Effect of an external electric field on the coherent terahertz emission from multiple filaments in air //Applied Physics B. - 2014. - Т. 117. - С. 265-269.
- [32] ISO 11670 2003 Lasers and laser-related equipment—test methods for laser beam parameters—beam positional stability (International Organization for Standardization) (<https://www.iso.org/standard/31690.html>), ГОСТ Р ИСО 11670-2010 Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений параметров лазерных пучков. Стабильность положения пучка.
- [33] Dawes E. L., Marburger J. H. Computer studies in self-focusing //Physical Review. - 1969. - Т. 179. - №. 3. - С. 862.
- [34] Brea L. M. S. Diffractio, python module for diffraction and interference optics. - 2019.
- [35] Ushakov A. et al. Superposition of 2ω and Electrostatic Field Induced Terahertz Waveforms in DC-Biased Two-Color Filament //Applied Sciences. - 2021. - Т. 11. - №. 24. - С. 11888.
- [36] Пушкарев Д. В., Митина, Е. В., Урюпина, Д. С., Волков, Р. В., Панов, Н. А., Карабутов, А. А., ... & Савельев, А. Б. Нелинейный рост энерговклада в среду при слиянии регуляризованных фемтосекундных филаментов //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2017. - Т. 106. - №. 9. - С. 545-548.