

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 530.182.551.510.42+535.621.33

# Влияние давления газа на пространственные и спектральные характеристики фемтосекундного лазерного импульса при его филаментации

Д.В. Апексимов, П.А. Бабушкин, Ю.Э. Гейнц, А.М. Кабанов<sup>✉</sup>,  
В.К. Ошлаков, А.В. Петров, А.А. Удалов, Е.Е. Хорошаева\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 02.11.2024;  
после доработки 24.12.2024;  
принята к печати 25.12.2024

Филаментация мощных фемтосекундных импульсов в газе вызывает большой теоретический и практический интерес с точки зрения исследования масштабных спектральных и временных трансформаций, происходящих с лазерным излучением в среде, в том числе для получения сверхширокого (суперконтинуального) излучения. Это излучение востребовано в задачах нелинейной фемтосекундной диагностики окружающей среды, передачи оптической информации по атмосферному каналу, современных оптических технологий обработки материалов. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния давления газовой среды (азот) в оптической кювете на характеристики фемтосекундного лазерного излучения, распространяющегося в режиме филаментации. Показано, что в условиях повышенного давления азота (до 11 атм) и острой геометрической фокусировки фемтосекундного излучения реализуется его керровская самофокусировка, которая с увеличением давления газа переходит из режима одиночной филаментации в режим формирования множества интенсивных световых нитей — постфиламентов. Вследствие фазовой самомодуляции фемтосекундного импульса и образования плазмы в газе происходит существенное обогащение спектрального состава излучения, а ширина спектра импульса увеличивается практически линейно с повышением давления в кювете. Впервые установлено, что с увеличением остроты начальной фокусировки пучка уширение спектра лазерного импульса приобретает асимметрию и реализуется преимущественно в длинноволновую область. Кроме того, при повышении давления газа в оптической ячейке средний размер образующихся интенсивных световых постфиламентов внутри пучка уменьшается и может составлять доли миллиметра.

*Ключевые слова:* фемтосекундное лазерное излучение, филаментация, газ повышенного давления, уширение спектра, суперконтинуум, структура лазерного пучка; femtosecond laser radiation, filamentation, high-pressure gas, spectrum widening, supercontinuum, laser beam structure.

## Введение

Филаментация лазерного пучка является основным режимом нелинейного распространения мощного ультракороткого лазерного излучения в прозрачной среде. В воздухе признаками филаментации излучения могут считаться пространственный распад поперечного профиля пучка на локализованные области с высокой интенсивностью — филаменты, появление вдоль трассы распространения протяженных светящихся плазменных каналов, а также генерация экстремально широкополосного излучения — суперконтинуума [1].

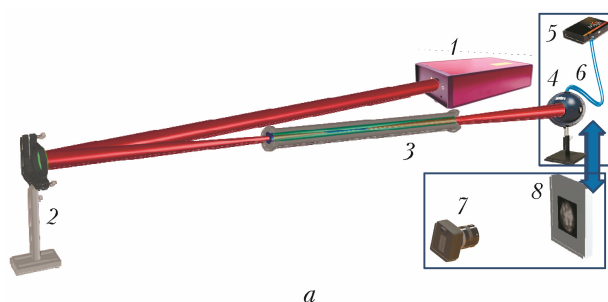
Спектральные характеристики фемтосекундного излучения, прошедшего газовую среду (воздух, аргон, ксенон, неон) с различным давлением, изучались в ряде работ [2–9]. Итоговым результатом данных исследований является то, что спектр лазерного импульса после филаментации существенно зависит от плотности газа в кювете и расширяется преимущественно в антистоксовую область за счет повышенной генерации плазмы с увеличением давления газа. Отмечается также пропорциональное давлению уширение стоксового крыла спектра импульса, причина которого — усиление фазовой самомодуляции излучения за счет эффекта Керра при распространении в более плотной среде. Основной массив работ посвящен лазерной филаментации при атмосферном и пониженном давлении, за исключением небольшого числа статей [2, 9, 10], в которых приведена некоторая информация о спектральном уширении импульсов в газах с давлением до сотен бар.

\* Дмитрий Владимирович Апексимов (apeximov@iao.ru); Павел Александрович Бабушкин (bra@iao.ru); Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Андрей Михайлович Кабанов (kam@iao.ru); Виктор Константинович Ошлаков (ovk@iao.ru); Алексей Вадимович Петров (awp@iao.ru); Андрей Александрович Удалов (udalov\_tusur@mail.ru); Елена Евгеньевна Хорошаева (bee@iao.ru).

Цель настоящей работы — установление влияния избыточного давления газовой среды (азота) на спектральные и пространственные характеристики фемтосекундного лазерного импульса при филаментации в сфокусированной геометрии. Основной задачей исследований было получение эмпирической информации о характеристиках спектрального уширения оптического импульса при филаментации в зависимости от давления среды, энергии и начальной фокусировки излучения для получения суперконтинуального спектра.

## Материалы и методы

Для реализации поставленной цели на стенде «Фемтосекундная атмосферная оптика» Института оптики атмосферы СО РАН была собрана схема (рис. 1). Она включала в себя в качестве источника фемтосекундных импульсов Ti:Sapphire-лазер 1 (длина волны 800 нм, частота повторения импульсов 10 Гц, энергия 1 мДж, длительность импульса 65 фс), фокусирующее зеркало 2 с фокусным расстоянием 150 см при диаметре пучка  $d = 25$  и 6 мм, что давало значения числовой апертуры фокусирующей системы  $NA = 8 \cdot 10^{-3}$  и  $2 \cdot 10^{-3}$  соответственно. Для формирования области повышенного давления была использована оптическая кювета 3 (металлическая труба внешним диаметром 46 мм,



а



б

Рис. 1. Схема эксперимента по филаментации излучения в оптической кювете под высоким давлением  $N_2$ : 1 — Ti:Sapphire-лазерный комплекс, 2 — сферическое зеркало, 3 — оптическая кювета, 4 — интегрирующая сфера, 5 — спектрометр Maya2000Pro, 6 — световод, 7 — CCD-камера (Andor Clara, 1392 × 1040 пикселей, 16 бит/пиксель), 8 — экран (а); общий вид стенда (труба, интегрирующая сфера, спектрометр, CCD-камера) (б) (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.38-2025/iss.3>)

внутренним — 36 мм, длиной 1 м, входные и выходные окна из плавленного кварца толщиной 5 мм). Кювета выдерживала избыточное давление до 11 атм и устанавливалась так, что геометрический фокус зеркала находился в центре трубы, т.е. на расстоянии 1 м от зеркала, чтобы исходное сфокусированное излучение и постфиламентационные интенсивные световые каналы (постфиламенты) не повредили входное и выходное окна.

Кювета 3 не имеет бокового смотрового окна, поэтому контролировать продольную и поперечную структуры области филаментации было невозможно. Источником информации о процессе филаментации были только характеристики излучения на выходе из кюветы. Таковыми являются размер и поперечная структура пучка и изменения спектра излучения после филаментации. В кювету из баллона высокого давления закачивался азот как доминирующая компонента атмосферного воздуха до давления 11 атм. Угол поворота на фокусирующем зеркале не превышал  $10^\circ$ , чтобы избежать астигматизма на сферическом зеркале, который приводит к существенному изменению динамики филаментации за счет появления двух разграниченных областей с плазменными нитями (меридионального и сагиттального фокусов), что значительно усложняет интерпретацию изменений оптических характеристик пучка после филаментации. Измерения проводились при ступенчатом снижении давления от 11 до 1 атм.

Для регистрации спектральных характеристик излучения после филаментации в кювете использовался спектрометр 5, который принимал полный спектр излучения, собранного в интегрирующую сферу 4. Пространственные характеристики излучения после филаментации регистрировались CCD-камерой 7 на экране 8, размещенном перед интегрирующей сферой, после регистрации серии спектров для каждого давления. Для определения влияния входного и выходного окон кюветы на поперечную энергетическую структуру и спектр лазерного импульса проводились измерения выбранных характеристик при прохождении излучения мимо кюветы, что реализовывалось поворотом фокусирующего зеркала (см. рис. 1).

## Результаты и обсуждение

Рассмотрим изменения пространственных и спектральных характеристик лазерного импульса после филаментации в кювете при различных давлениях и в атмосфере лаборатории (без кюветы). На рис. 2 представлены снимки, сделанные CCD-камерой при максимальном и минимальном давлениях в камере. Видно, что поперечная энергетическая структура пучка для этих случаев существенно отличается. При давлении 11 атм (рис. 2, б) регистрируются отдельные интенсивные каналы — постфиламенты, которые можно связать с реализацией множественной филаментации в кювете. При атмосферном давлении пучок является практически унимодальным

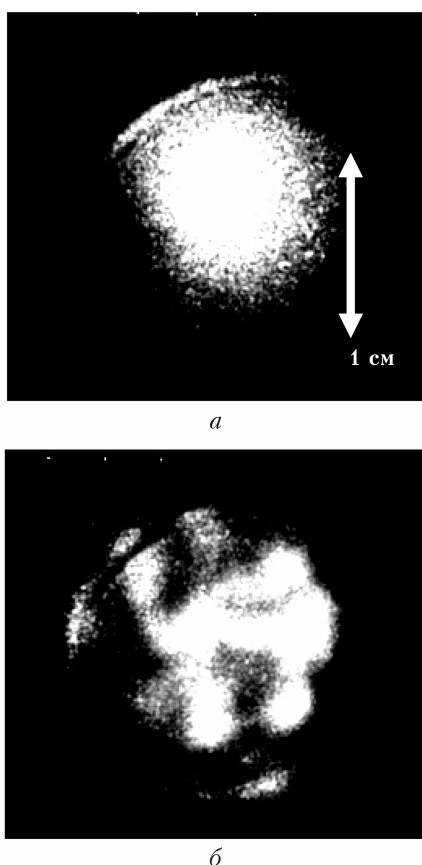


Рис. 2. Снимки CCD-камеры поперечной структуры лазерного пучка с  $d = 25$  мм на экране, расположенном на расстоянии 227 см от фокусирующего зеркала, при давлении в трубе 1 (а) и 11 атм (б)

с поперечным профилем, близким к гауссовому. Стоит отметить, что даже при достаточно невысокой энергии импульса 1 мДж и вне кюветы наблюдается филаментация, хотя и небольшой протяженности. Мощность импульса при этом составляет  $\sim 15$  ГВт, что в несколько раз превышает критическую мощность для самофокусировки и филаментации пучка в воздухе. Регистрируемая на экране структура пучка при атмосферном давлении газа в кювете и в воздухе вне кюветы практически не отличаются (рис. 2, а). Камера регистрировала изображения на экране с экспозицией 100 мс, т.е. при работе лазера с частотой 10 Гц в кадр попадал один лазерный импульс.

Зависимость количества постфиламентов от давления в кювете представлена на рис. 3, а. Видно, что рост давления приводит к существенному увеличению числа постфиламентационных световых каналов (ПФК), что указывает на реализацию мелкомасштабного самоструктурирования пучка внутри области филаментации.

Диаметр лазерного пучка после филаментации в кювете показан на рис. 3, б, где видно, что с ростом давления азота происходит незначительное увеличение выходного диаметра пучка (по полувысоте). Это свидетельствует о том, что в данной гео-

метрии эксперимента (острая фокусировка, пучок сантиметрового диаметра) приближение области филаментации к источнику излучения и увеличение длины области филаментации с изменением давления газа также являются несущественными.

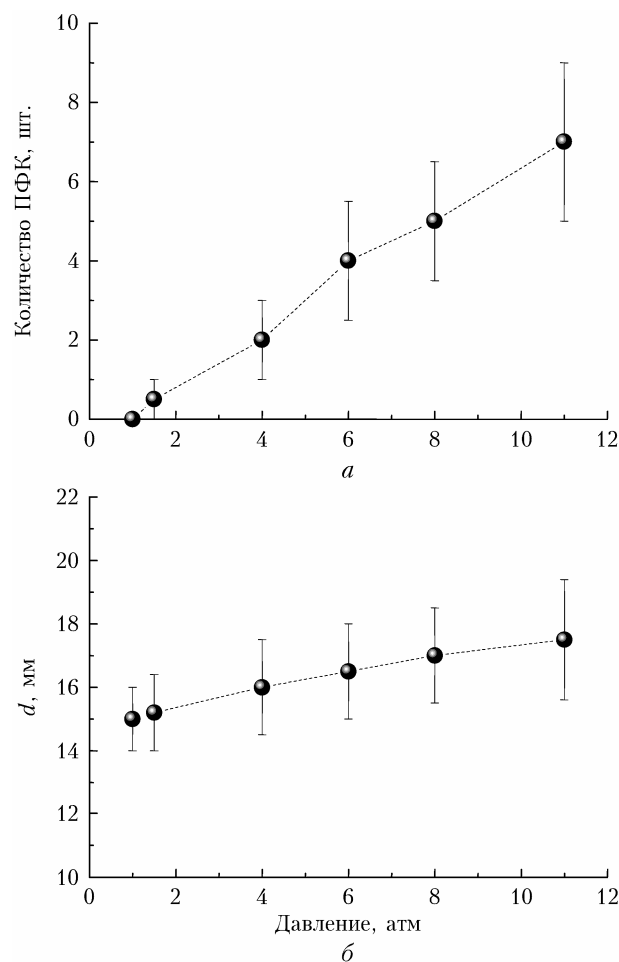


Рис. 3. Зависимость количества ПФК (а) и диаметра всего пучка (б) от давления в кювете

Рассмотрим изменения спектральных характеристик импульса при филаментации при различных давлениях. На рис. 4, а приведены усредненные спектры лазерного импульса после филаментации в кювете при различных давлениях. Видно, что все спектры после фокусировки и филаментации в азоте уширяются в сравнении с исходным спектром излучения за счет приобретаемой фазовой самоудуляции интенсивного лазерного импульса в среде с кубично-плазменной нелинейностью. С ростом давления спектр импульса дополнительно уширяется и испытывает преимущественное смещение в длинноволновую область, в то время как уширение в область антистоксовых гармоник (blue-shift) можно считать не столь значительным. Количественная информация по ширине спектра (по уровню  $e^{-2}$ ) в азоте различного давления представлена на рис. 4, б. Спектральная ширина фемтосекундного

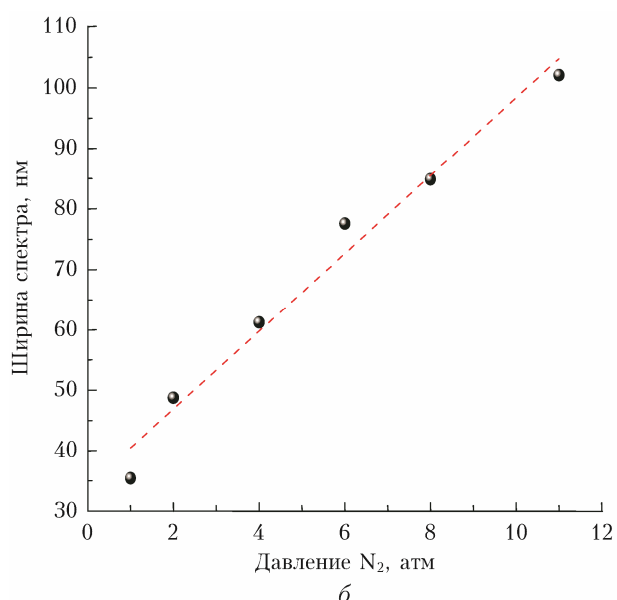
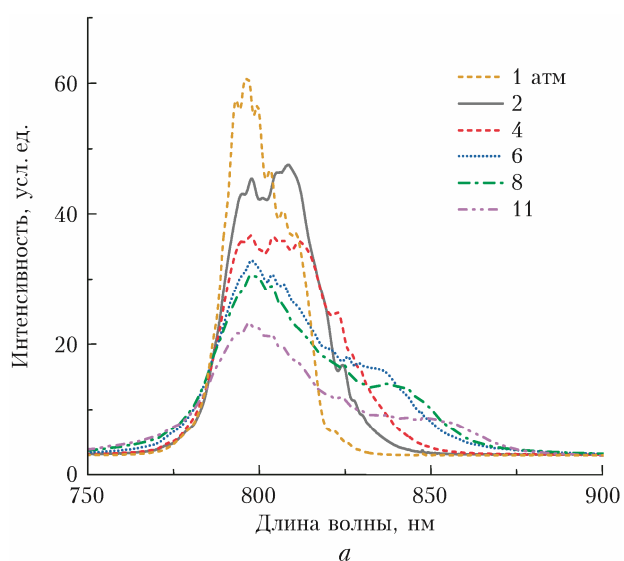


Рис. 4. Спектр лазерного излучения после филаментации в кювете при различных давлениях азота (*a*); зависимость ширины спектра лазерного импульса от давления после филаментации в кювете (точки) и ее линейная аппроксимация (штриховая кривая) (*б*)

излучения увеличивается практически линейно с ростом давления газа в кювете.

На рис. 5 для сравнения представлены спектр исходного импульса на выходе из лазера, спектр при фокусировке вне кюветы при атмосферном давлении и спектры после прохождения излучения через кювету при минимальном (1 атм) и максимальном давлении (11 атм). Здесь важными являются два момента: 1) в кювете с газом атмосферного давления происходит очевидная филаментация излучения, что видно из сравнения спектров исходного и прошедшего кювету импульсов; 2) спектры излучения при нелинейном распространении вне кюветы и внутри нее при давлении 1 атм оказываются очень близкими, что свидетельствует о несуществен-

ном влиянии входного и выходного кварцевых окон на процесс филаментации пучка в исследуемой геометрии эксперимента.

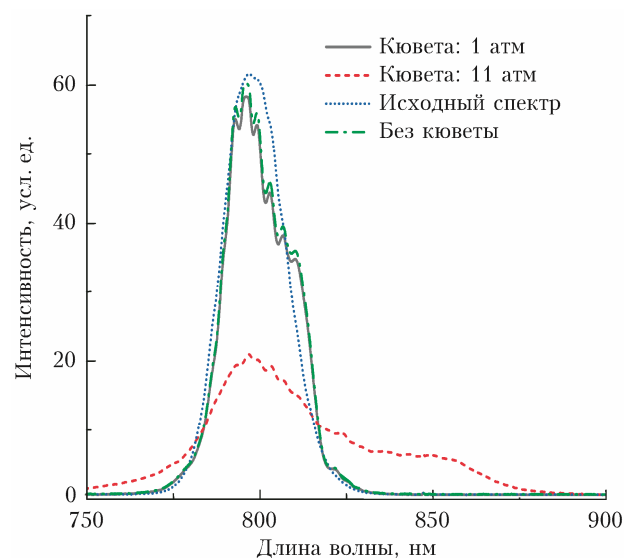


Рис. 5. Спектры лазерного излучения в различных условиях

В рамках следующего этапа исследований, заключающихся в установлении влияния начальной линейной фокусировки излучения при филаментации в сжатом газе внутри кюветы на пространственные и спектральные характеристики фемтосекундного излучения, нами были выполнены измерения при распространении пучка меньшего диаметра в имеющейся оптической ячейке. Диаметр выходного пучка лазерного излучения был уменьшен с 25 до 6 мм за счет изменения схемы вывода излучения после многопроходового усилителя. В данной схеме излучение на выходе из усилителя проходит мимо телескопической системы, которая необходима для увеличения диаметра пучка, и далее падает под прежним углом на компрессор фемтосекундных импульсов, состоящий из пары дифракционных решеток. Основные итоги экспериментов приведены на рис. 6.

Видно, что изменения спектрального состава фемтосекундного излучения после филаментации в сжатом азоте (см. рис. 6, *a*) подобны изменениям более широкого пучка (см. рис. 4, *a*). Спектры импульса также демонстрируют уширение с повышением давления. Отличия заключаются, во-первых, в более масштабном расширении спектрального состава импульса, реализующегося для узкого пучка за счет смягчения фокусировки, во-вторых, в том, что уширение приобретает симметрию в обе стороны спектра. Кроме того, число образующихся в результате филаментации интенсивных световых каналов и их средний диаметр  $D$  также становятся меньше при снижении начального диаметра фемтосекундного пучка. Интересно, что с повышением давления азота в кювете (рис. 6, *в*) диаметр постфиламентов  $D$  снижается при их неизменном числе.

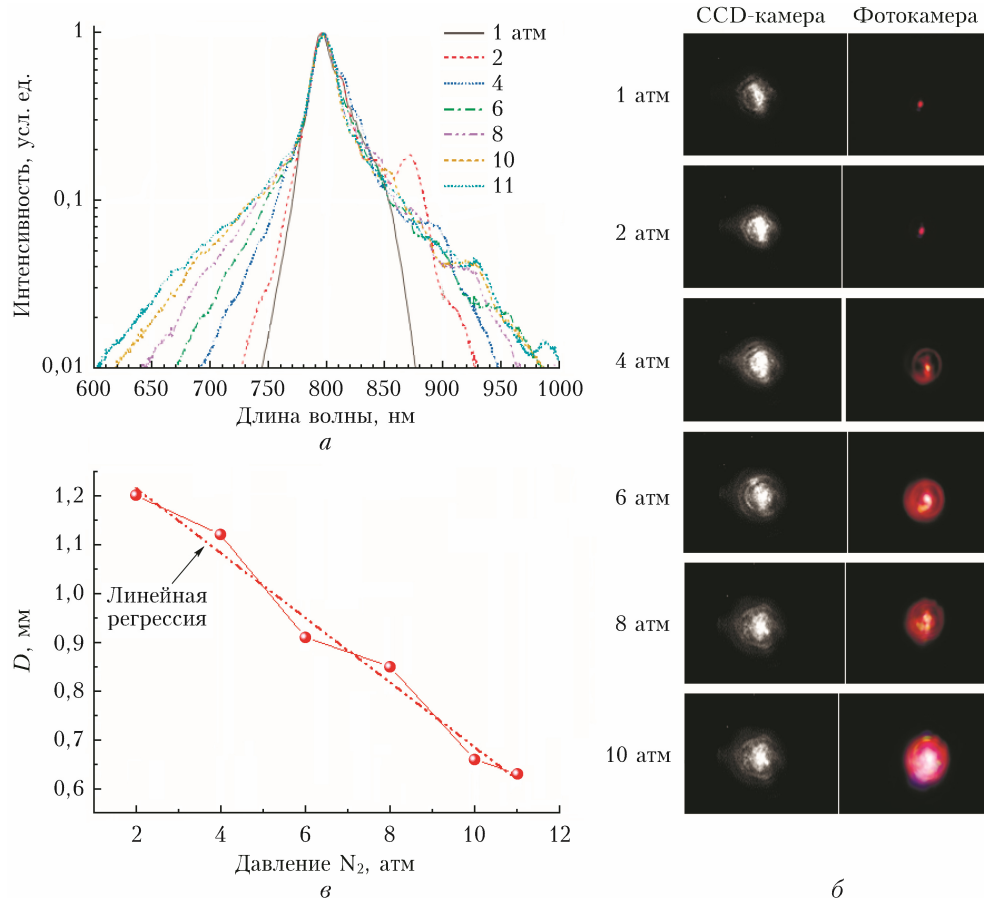


Рис. 6. Эксперименты с узким фемтосекундным пучком ( $d = 6$  мм; 1,5 мДж): спектры излучения на выходе из кюветы (а); снимки поперечной структуры пучка на CCD-камеру и фотокамеру (б); зависимость среднего диаметра  $D$  постфиламентов от давления азота в кювете (в)

Для более широкого пучка с  $D = 25$  мм при повышении давления газа реализуется практически линейное увеличение числа постфиламентов (см. рис. 3, а).

### Заключение

Таким образом, проведенные эксперименты с оптической кюветой показали, что в условиях повышенного давления азота и острой геометрической фокусировки фемтосекундного излучения реализуется его самофокусировка и нелинейное распространение, которое с увеличением давления газа переходит из режима одиночной филаментации в режим формирования множества интенсивных световых каналов. За счет фазовой самомодуляции фемтосекундного излучения происходит существенное уширение спектра лазерного импульса. Ширина спектра импульса возрастает практически линейно с повышением давления в кювете и при давлении азота 11 атм увеличивается приблизительно в три раза относительно своего значения при атмосферном давлении. При наибольшем значении числовой апертуры ( $NA \approx 0,008$ ) спектр лазерного импульса демонстрирует преимущественное уширение в длинноволновую (стоксовую) область, при этом формируется несколько достаточно широких световых постфила-

ментов. В случае менее острой фокусировки ( $NA \approx 0,002$ ) трансформация спектра импульса происходит практически симметрично в обе стороны, а филаменты становятся тоньше. В целом с повышением давления газа в оптической кювете средний размер образующихся в результате множественной филаментации интенсивных световых каналов (постфиламентов) внутри пучка уменьшается и может составлять доли миллиметра, а их число увеличивается.

**Финансирование.** Исследования выполнены в рамках госзадания ИОА СО РАН (в части исследования структуры филаментированного лазерного пучка при его различной фокусировке), а также при поддержке РФФ (грант № 24-12-00056) (эксперименты при разном давлении газа).

### Список литературы

1. Houard A., Liu Y., Mysyrowicz A. Recent developments in femtosecond filamentation // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 497. P. 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/497/1/012001.
2. Mlejnek M., Wright E.M., Moloney J.V. Femtosecond pulse propagation in argon: A pressure dependence study // Phys. Rev. E. 1998. V. 58, N 4. P. 4903-4910. DOI: 10.1103/PhysRevE.58.4903
3. Couairon A., Franco M., Méchain G., Olivier T., Prade B., Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in air

- at low pressures: Part I: Theory and numerical simulations // *Opt. Commun.* 2006. V. 259, N 1. P. 265–273. DOI: 10.1016/j.optcom.2005.08.064.
4. *Stibenz G., Zhavoronkov N., Steinmeyer G.* Self-compression of millijoule pulses to 7.8 fs duration in a white-light filament // *Opt. Lett.* 2006. V. 31, N 2. P. 274–276. DOI: 10.1364/OL.31.000274.
  5. *Peca J., Reyes D., Richardson M.* Filamentation in low pressure conditions // *Sci. Rep.* 2022. V. 12. P. 21365. DOI: 10.1038/s41598-022-19765-6.
  6. *Zhang H., Zhang Y., Lin S., Zhang Y., Chen A., Jiang Y., Li S., Jin M.* Influence of pressure on spectral broadening of femtosecond laser pulses in air // *Phys. Plasmas.* 2021. V. 28, N 4. P. 043302. DOI: 10.1063/5.0042998.
  7. *Li S., Yu M., Cai X., Zhang H., Jin M., Wu J.* Energy transmittance of focused femtosecond pulses at different air pressures // *Optoelectron. Lett.* 2023. V. 19, N 10. P. 605–613. DOI: 10.1007/s11801-023-3037-6.
  8. *Feng Z., Li R., Li W., Liu Y., Shu X.F., Yu C.X., Li J., Liu X.* The propagation of femtosecond laser filaments in air with continuously varying pressures // *Opt. Commun.* 2022. V. 502. P. 127404. DOI: 10.1016/j.optcom.2021.127404.
  9. *Geints Y.E., Bulygin A.D., Kompanets V.O., Chekalin S.V.* Supercontinuum saturation of a femtosecond laser filament in pressurized gases // *Opt. Lett.* 2024. V. 49, N 21. P. 6033–6036. DOI: 10.1364/OL.539885.
  10. *Kompanets V.O., Shipilo D.E., Nikolaeva I.A., Panov N.A., Kosareva O.G., Chekalin S.V.* Nonlinear enhancement of resonance absorption at the filamentation of a mid-infrared pulse in high-pressure gases // *JETP. Lett.* 2020. V. 111. P. 31–35. URL: <https://doi.org/10.1134/S002136402001012>.

*D.V. Apeksimov, P.A. Babushkin, Yu.E. Geints, A.M. Kabanov, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, A.A. Udalov, E.E. Khoroshaeva.* **The influence of gas pressure on spatial and spectral characteristics of a femtosecond laser pulse during its filamentation.**

Filamentation of high-power femtosecond pulses in a gas is of great theoretical and practical interest with relation to study of large-scale spectral and temporal transformations of laser radiation in a medium and generation of extra-wide (supercontinuum) radiation, actual for the problems of nonlinear femtosecond diagnostics of the environment, transmission of optical information through an atmospheric channel, and modern optical technologies for material processing. This paper experimentally studies the influence of pressure of a gas medium (nitrogen) in an optical cell on the characteristics of femtosecond laser radiation propagating under filamentation conditions. It is shown that under conditions of high nitrogen pressure (up to 11 atm) and sharp geometric focusing of femtosecond radiation, its Kerr self-focusing is implemented, and the single filamentation made transforms into multiple post filamentation as the gas pressure increases. In this case, due to the phase self-modulation of a femtosecond pulse and plasma generation in the gas, there is a significant enrichment of the spectral composition of the radiation, and near-linear increase in the pulse spectrum width with gas pressure in the cell. It was established for the first time that the pulse spectrum is extended asymmetrically and mainly to the long-wave region with an increase in the sharpness of the initial focusing of a laser beam. In addition, the average size of intense light post-filaments formed inside a beam decreases and can be fractions of a millimeter as the gas pressure increases in the optical cell.