

ФИЛАМЕНТАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ГАЗА

Апексимов Д.В., Бабушкин П.А., Гейнц Ю.Э., Кабанов А.М., Ошлаков В.К., Петров А.В.,
Удалов А.А., Хорошаева Е.Е.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

e-mail: apeximov@iao.ru, bpa@iao.ru, ygeints@iao.ru, kam@iao.ru, ovk@iao.ru, awp@iao.ru,
udalov@iao.ru, bee@iao.ru

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований влияния давления газовой среды в оптической кювете на характеристики фемтосекундного лазерного излучения, распространяющегося в режиме филаментации. Показано, что в условиях повышенного давления и острой геометрической фокусировки излучения реализуется его керровская самофокусировка, которая с увеличением давления газа переходит из режима одиночной филаментации в режим формирования множества интенсивных световых нитей - постфиламентов. Впервые установлено, что с увеличением остроты начальной фокусировки пучка уширение спектра 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.

Целью проведенных экспериментальных исследований являлось установление влияния давления воздуха на процесс филаментации сфокусированного лазерного импульса. Для реализации поставленной цели на стенде «Фемтосекундная атмосферная оптика» была собрана схема (см. рис. 1), включающая в себя в качестве источника фемтосекундных импульсов Ti:Sapphire-лазер 1 с характеристиками, поименованными в подрисуночной подписи. Для формирования области с повышенным давлением использовалась кювета (труба) из нержавеющей стали длиной 1 м, внутренним диаметром 3,6 см, входным и выходным окнами из плавленого кварца толщиной 0,5 см, выдерживающее давление до 11 атмосфер. Труба устанавливалась так, что геометрический фокус зеркала находился в центре трубы, т.е. входное окно кюветы находилось на расстоянии 1 м от зеркала, чтобы сфокусированное излучение и постфиламентационные каналы не повредили входное и выходное окна, поскольку постфиламентационные каналы имеют интенсивность $\sim 10^{10}$ Вт/см². Труба 3 не имеет «смотрового» бокового окна, поэтому контролировать продольную и поперечную структуру области филаментации внутри трубы, как это было сделано в [1], невозможно. В качестве источника информации о процессе филаментации использовались только характеристики излучения на выходе из кюветы. Таковыми являются поперечная структура пучка и изменения спектра излучения после филаментации. В кювету закачивался из баллона высокого давления 10 азот, как доминирующая компонента атмосферного воздуха, до давления 11 атмосфер.

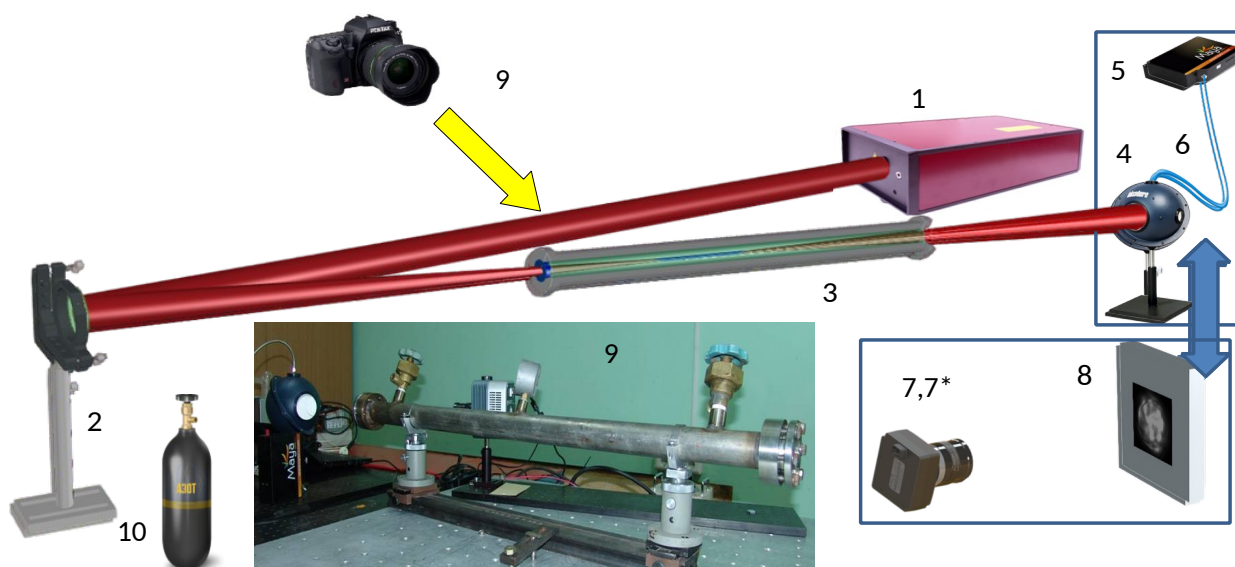


Рисунок 1 – Схема эксперимента: 1 – Ti:Sapphire-лазерный комплекс: длина волны 800 нм, частота повторения импульсов 10 Гц, энергия 1 мДж, длительность импульса 65 фс, диаметр пучка 2,5 и 0,6 см, числовая апертура ($NA = r/f$) $8 \cdot 10^{-3}$ и $2 \cdot 10^{-3}$, соответственно; 2 – сферическое зеркало с радиусом кривизны - 300 см; 3 - металлическая труба (внешний диаметр 46 мм, внутренний диаметр 36 мм, длина 1000 мм, давление до 11 атм., входное и выходное окна: плавленый кварц, толщина 5 мм); 4 – интегрирующая сфера; 5 - спектрометр Maya2000 Pro; 6 – световод; 7,7* – CCD-камера «Andor Clara», 1392*1040 пикселей, 16 бит/пиксель, фотокамера Pentax K- 3 (25 МП) с объективом Pentax100MacroWR; 8 – экран; 9 – фотография стенда (труба, интегрирующая сфера, спектрометр, CCD-камера); 10 – баллон высокого давления с азотом

Измерения оптических характеристик проводилось при давления от 11 атм. до 1 атм. Для регистрации спектральных характеристик излучения после филаментации использовался спектрометр 5, который через световод 6 фиксировал полный спектр излучения после филаментации, собираемый в интегрирующую сферу 4. Пространственные характеристики излучения после филаментации регистрировались CCD-камерой 7 на экране 8, который размещался перед сферой после регистрации серии спектров для каждого давления. Для определения влияния входного и выходного окон кюветы проводились измерения выбранных характеристик при прохождении излучения мимо кюветы, что реализовывалось поворотом фокусирующего зеркала, как представлено на схеме рис. 1. На рис. 2 представлены снимки CCD-камеры для максимального и минимального давлений в камере. Видно, что поперечная энергетическая структура пучка для этих случаев существенно отличаются. При давлении 11 атм. (см. рис. 1б) регистрируются отдельные интенсивные каналы, которые можно связать с реализацией множественной филаментации в кювете. При атмосферном давлении пучок практически однороден, при этом стоит отметить, что при прохождении пучка вне кюветы

наблюдается, оптически и акустически, непротяженная филаментация. При энергии 1 мДж мощность импульса составляла $1,5 \cdot 10^{10}$ Вт, что в несколько раз превышает критическую мощность для самофокусировки и филаментации пучка в воздухе. Регистрируемая на экране структура пучка при атмосферном давлении в кювете и вне кюветы практически не отличаются (см. рис. 2а). Камера регистрировала изображения на экране с экспозицией 100 мс, т.е. при работе лазера с частотой 10 Гц в кадр попадал один лазерный импульс.

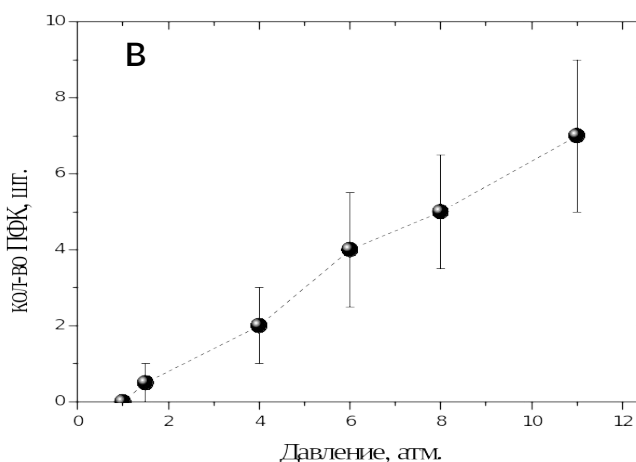
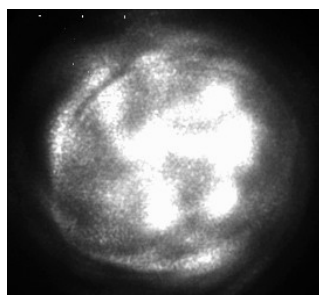
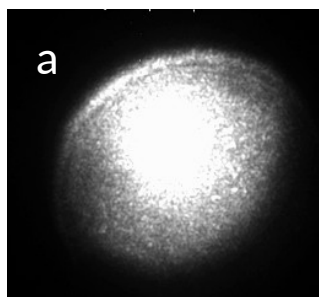


Рисунок 2 - Снимки CCD-камеры поперечной структуры лазерного пучка на экране, расположенном на расстоянии 227 см от фокусирующего зеркала при давлении в трубе 1 атм. (а) и 11 атм. (б). Зависимость количества ПФК от давления в кювете (в)

На рисунке 3а представлены спектр исходного импульса на выходе его из лазера, спектр при фокусировке вне кюветы и спектр после прохождения через кювету при минимальном и максимальном давлениях для пучка диаметром 2,5 см. Сравнение кривых 1 и 4 указывает на то, что влияние прохождения излучения через входное и выходное окна незначительно. При этом существенную роль в этом уширении играет смещение в длинноволновую область спектра. Аналогичный эксперимент был проведен для диаметра лазерного пучка 0,6 см, что при использовании того же фокусирующего зеркала означает значительно более мягкую фокусировку ($NA = 2 \cdot 10^{-3}$). На рисунке 4 представлены спектры лазерного излучения после филаментации для трех случаев, поименованных в легенде рисунка. Из сравнения спектров, представленных на рисунке 4 и рисунке 6 видно, что, во-первых спектры для узкого ($d = 6$ мм) пучка значительно шире, чем для широкого ($d = 25$ мм), во-вторых — спектры для узкого пучка в кювете при 1 атм. и без кюветы существенно отличаются, что указывает на значительный вклад в уширение спектра окон кюветы. Уменьшение диаметра пучка в ~ 4 раза, при заданной энергии, означает увеличение интенсивности излучения, а следовательно и нелинейной добавки к показателю преломления в материале окон $n_2 I$ в ~ 16 раз, которой становится достаточно

для реализации нелинейного уширения спектра внутри входного и выходного окон кюветы [2], вне фокуса зеркала.

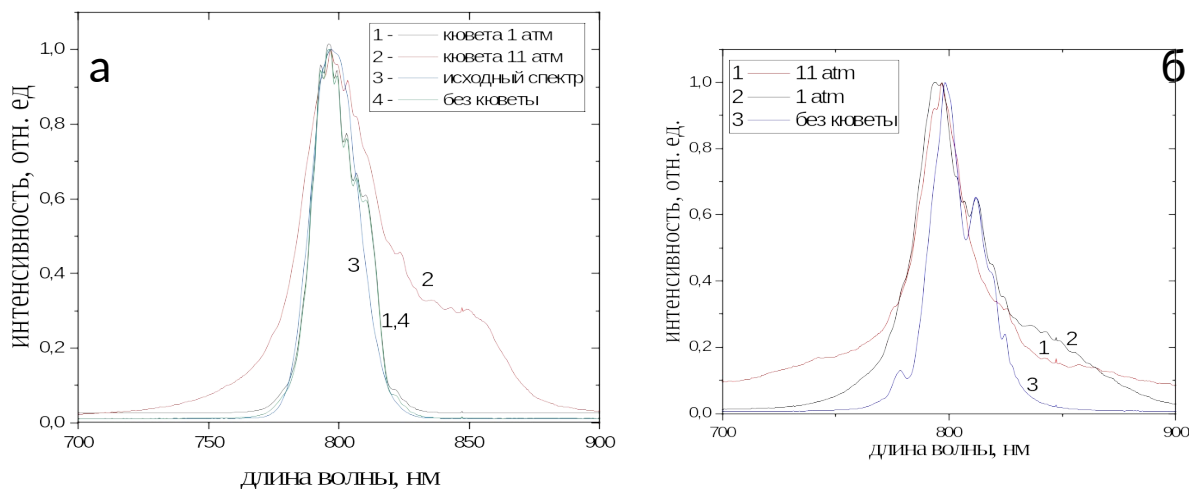


Рисунок 3 – а) Спектры лазерного излучения для условий, поименованных в легенде ($NA = 8 \cdot 10^{-3}$); б) Спектры лазерного излучения после филаментации в кювете (кривые 1,2) и вне кюветы (3) ($NA = 2 \cdot 10^{-3}$)

Таким образом проведенные исследования 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 преимущественно в длинноволновую область. При повышении давления газа в оптической кювете средний размер образующихся в результате множественной филаментации интенсивных световых каналов (постфиламентов) уменьшается и составляет доли миллиметра. При этом число постфиламентов, помимо давления, зависит от остроты фокусировки фемтосекундного пучка. Влияние входного и выходного окон кюветы на процесс филаментации для «широкого» пучка является несущественным, при этом уменьшение диаметра пучка приводит к увеличению нелинейного вклада в спектральное уширение излучения. Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ №24-12-00056.

Литература

1. П.А. Чижов, В.В. Букин, А.А. Ушаков, С.В. Гарнов. Особенности динамики электронной плотности при филаментации фемтосекундного лазерного излучения в воздухе при повышенном давлении // Квантовая электроника. 2016. Т. 46, № 4.
2. Yu.E. Geints, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov and A.V. Petrov. Microstructure of the multiple-filamentation zone formed by femtosecond laser radiation in a solid dielectric // Quantum electronics. 2016. V.46. Is. 2. P. 133-141.