

**КОНФЕРЕНЦИЯ В**

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ  
В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ**

## ПОСТФИЛАМЕНТАЦИОННАЯ ОБЛАСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Д.В. Апексимов<sup>1</sup>, А.А. Землянов<sup>1</sup>, А.Н. Иглакова<sup>1</sup>, А.М. Кабанов<sup>1</sup>, О.И. Кучинская<sup>1,2</sup>,  
Г.Г. Матвиенко<sup>1</sup>, В.К. Ошлаков<sup>1</sup>, А.В. Петров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, 634055, пл. Академика Зуева 1, Россия, <sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, 634050, пр. Ленина 36, Россия

olesyatsu14@mail.ru, apeximov@iao.ru, zaа@iao.ru, kam@iao.ru, mgg@iao.ru, awp@iao.ru

**Ключевые слова:** фемтосекундный импульс, филаментация, постфиламентационный световой канал

Представлены результаты экспериментальных исследований формирования поперечной структуры лазерного пучка после множественной филаментации. Показано, что спектры ПФК, колец и пучка существенно отличаются. Спектр ПФК обладает значительным и симметричным спектральным уширением, и охватывает диапазон 600-1100 нм. Уширение спектра колец ассиметрично и направлено, в основном, в коротковолновую область спектра. Данные уширения являются устойчивыми и не изменяются при удалении от области множественной филаментации. Кольцевая структура излучения в поперечном сечении пучка формируется вокруг отдельных филаментов внутри области множественной филаментации, а на удалении десятка метров от нее начинает формироваться общая кольцевая структура, окружающая постфиламентационные каналы.

Распространение лазерного излучения ультракороткой длительности при достижении критических значений мощности импульса сопровождается его самофокусировкой и филаментацией [1,2]. При этом происходят значительные изменения энергетических, пространственных, спектральных и угловых характеристик лазерного излучения. Энергия излучения локализуется в узких световых нитях, содержащих предпороговую плотность потока световой энергии, спектральный состав излучения существенно обогащается. Данные свойства имеют приоритетное значения для задач атмосферной оптики – лазерного зондирования атмосферы и транспортировки через атмосферу локализованной световой энергии. При этом стоит задача трансляции области филаментации на значительные удаления от источника, причем для атмосферной оптики наиболее привлекательной является множественная филаментация пучка.

Настоящая работа направлена на экспериментальные исследования эволюции пространственной и спектральной структуры пучка после его филаментации. Схема эксперимента представлена на рис. 1 и подробно описана в [3]. Центральная часть пучка содержит яркие, так называемые «горячие» точки – постфиламентационные каналы (ПФК), окруженные системой менее ярких концентрических колец, интенсивность которых убывает от центра периферии пучка. Следует отметить, что наличие и концентричность данных окружностей не зависит от количества и конфигурации филаментов в поперечном сечении ОМФ и соответственно ПФК.

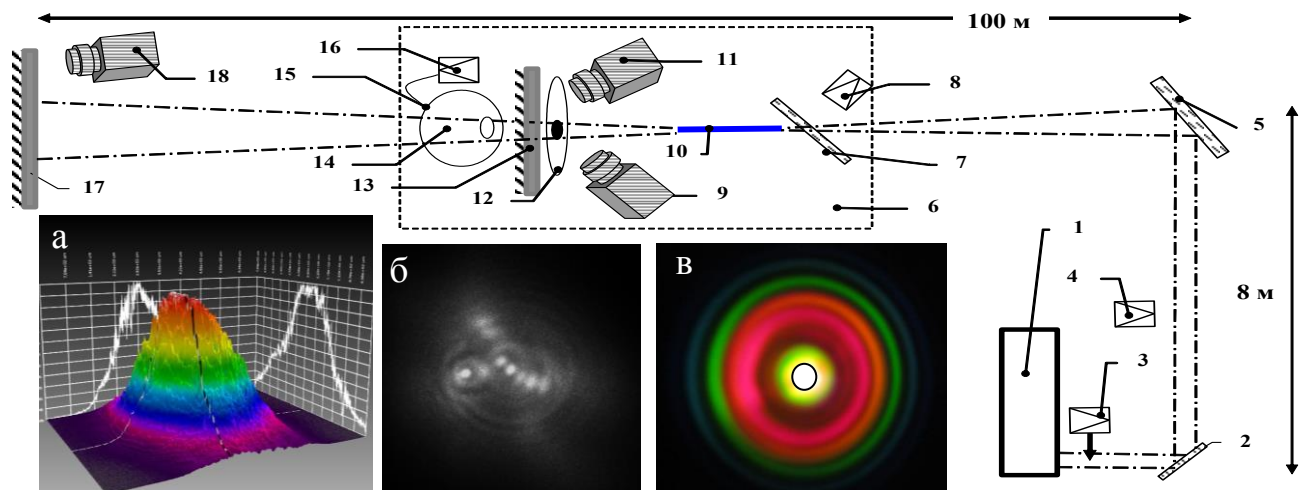


Рисунок 1 - Ti:Sapphire-лазерный комплекс,  $t = 50$  фс, энергия импульса  $E = 30$  мДж, частота следования импульсов 10 Гц, начальный диаметр пучка  $d_0 = 2,5$  см; 2, 5 – поворотные зеркала; 3 - измеритель энергии импульса OPHIR-II; 4 – автокоррелятор; 6 – передвижной оптический стол Thorlabs; 7 – оптический клин OptoSigma WSSQ-50C10-20-3; 8 - измеритель профиля пучка LBP2-HR-VIS; 9 - CCD-камера «ANDOR-Clara E»; 10 – область филаментации; 11 – фотокамера SONY DSC-F828; 12 – диафрагма; 13 - экран; 14 – интегрирующая сфера Newport 819C-SF-6; 15 световод; 16 – спектрометр Maya2000Pro; 17 – неподвижный экран в конце трассы; 18 - фотокамера Pentax K-3 (25 МП) с макрообъективом Pentax100MacroWR. а) – начальный профиль лазерного пучка (измеритель 8); б) – профиль пучка на экране 12; в) – полихромные кольца конической эмиссии, регистрируемые на экране 17 (светлый круг в черной окружности - область в которой регистрируется изображение (б) и снимки на рис. 2,4).

На рисунке 2 а представлена огибающая яркости отдельного ПФК, которая хорошо аппроксимируется гауссовым распределением плотности энергии. Огибающая ПФК совместно с кольцами (рис. 2б) соответствует распределению плотности энергии в Бессель-Гауссовом пучке. Данное обстоятельство, возможно, является причиной аномально низкой ( $\sim 10^{-5}$  рад [4]) расходимости ПФК, которая является центральной частью полученного распределения. Яркость колец при удалении от ПФК уменьшается примерно вдвое, что хорошо согласуется с соотношением яркости интерференционных максимумов различного порядка при дифракции света на тонком препятствии [5].

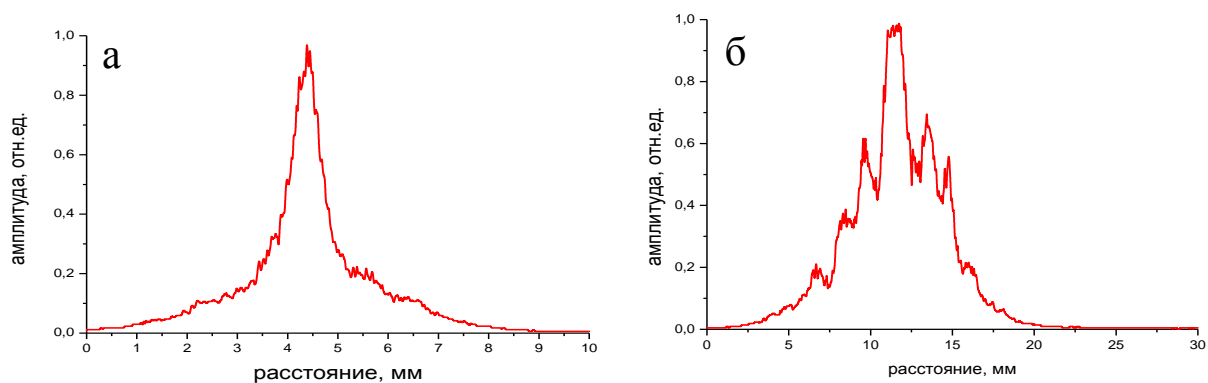


Рисунок 2 – Огибающая яркости ПФК (а) и ПФК, окруженного системой колец (б), восстановленная фотометрированием изображения с использованием программного-вычислительного комплекса для анализа поперечных профилей лазерных пучков.

Снимки зарегистрированной на различных расстояниях от источника структуры пучка на экране (13) представлены на рис. 3. На снимках видно, что в начале области филаментации регистрируются только яркие точки, соответствующие филаментам (рис. 3а). Во второй половине области филаментации вокруг филаментов появляются кольца, которые к концу области филаментации окружают каждый филамент (рис.3 а,б). После области филаментации (рис. 3 г) кольцевая структура, окружающая отдельные филаменты, трансформируется в общую кольцевую структуру. Наблюдаемая картина соответствует интерференции волн от различных, близко расположенных, источников, которыми в данном случае являются отдельные филаменты.

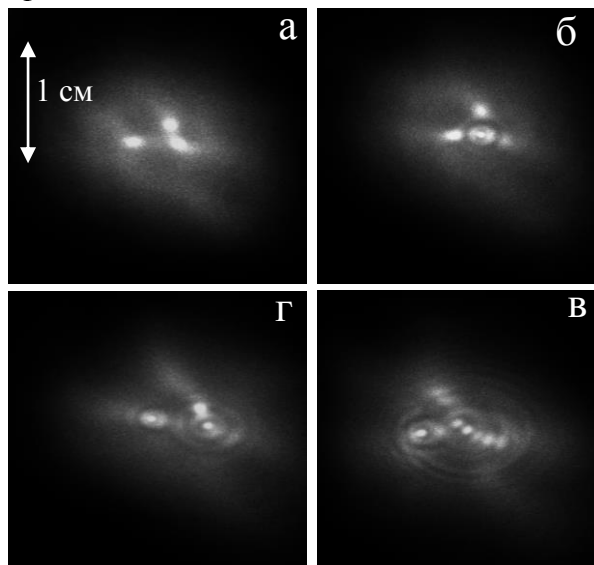


Рисунок 3 Изображения поперечной структуры лазерного пучка на различном удалении от источника. а) 30; б) 40; в) 48; г) 57м. Начало ОМФ 30 м, конец ОМФ 45 м.

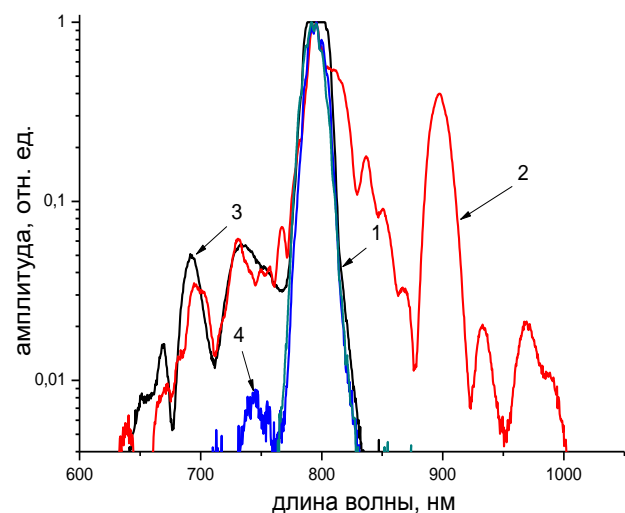


Рисунок 4 Спектральные характеристики элементов лазерного пучка 1) спектр исходного импульса; 2) спектр ПФК; 3) спектр кольца; 4) спектр пучка вне ПФК и колец.

Спектр ПФК симметрично уширен относительно несущей длины в диапазоне 600-1100 нм и содержит квазипериодические пики (рис. 4). Данное поведение спектра указывает на его формирование за счет самонаведенной модуляции фазы волны излучения в керровской среде. Спектр колец, окружающих отдельные ПФК и пакет ПФК уширен несимметрично, он содержит только антистоксову компоненту. Подобный характер уширения спектра указывает либо на влияние плазменной нелинейности [6], либо на то, что кольцевая структура формируется только «хвостом» импульса, т.к. за счет зависимости групповой скорости от интенсивности задний фронт становится более крутым [7].

Таким образом, результаты экспериментальных исследований пространственной и спектральной трансформации излучения после филаментации на контролируемой для коллимированных пучков показали, что спектры ПФК, колец и пучка существенно отличаются.

Спектр ПФК обладает значительным и симметричным спектральным уширением, и охватывает диапазон 600-1100 нм. Уширение спектра колец ассиметрично и направлено, в основном, в коротковолновую область спектра. Данные уширения являются устойчивыми и не изменяются при удалении от области множественной филаментации. Кольцевая структура излучения в поперечном сечении пучка формируется вокруг отдельных филаментов внутри области множественной филаментации, а на удалении десятка метров от нее начинает формироваться общая кольцевая структура, окружающая постфиламентационные каналы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (соглашение №16-17-10128).

### **Литература**

- 1 Self-focusing: Past and present. Fundamentals and prospects // Topics in Applied Physics / Eds. R.W. Boyd et al. Berlin: Springer, 2009. V. 114. P. 3–19.
- 2 Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г. Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы / Под общей ред. д.ф.-м.н., профессора А.А. Землянова. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН. 2010. 212 с.
- 3 Д.В. Апекумов, А.А. Землянов, А.Н. Иглакова, А.М. Кабанов, О.И. Кучинская, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, А.В. Петров Постфиламентационные каналы при распространении субтераваттных импульсов Ti:Sapphire-лазера на стопятидесяти метровой трассе // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т.30. №.5.
- 4 Apeksimov D.V., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V. Postfilamentation channels of terawatt pulses Ti: sapphire-laser in distribution on 150 - meter track // Proceedings of SPIE. 2016. V.10035. CID: 1003 2M. [10035–251].
- 5 Борн М. Вольф Э. Основы оптики. Изд. 2-е. Перевод с английского. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973. 713 с.
- 6 Плазменная нелинейность
- 7 Ахманов С. А., Сухоруков А. П., Хохлов Р. В., Самофокусировка и дифракция света в нелинейной среде // УФН. 1967. Т. 93 С. 19-70.