

УДК 535.433

Исследование пространственной структуры фемтосекундного лазерного пучка в области филамента при его абберационной фокусировке в воздухе

В.Е. Прокопьев, Д.М. Лубенко, В.Ф. Лосев*

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 20.04.2020 г.

Исследованы и проанализированы условия возникновения двух пучков накачки, распространяющихся под углом друг к другу, в которых формируются высоконаправленные пучки суперконтинуума белого цвета. Образование пучков происходит при абберационной фокусировке фемтосекундного импульса излучения с длиной волны 940 нм. Показано, что механизм их образования связан с искажением волнового фронта пучка накачки при дифракции на плазме филамента и керровской самофокусировкой излучения. Промонстрирована динамика развития этих пучков.

Ключевые слова: ультракороткие лазерные импульсы, филаментация, лазерная плазма; ultrashort laser pulses, filamentation, laser plasma.

Введение

Одно из самых ярких и интересных явлений современной нелинейной оптики — это филаментация излучения при распространении фемтосекундного лазерного импульса в воздухе. В области филаментации интенсивность поля столь высока, что возникают генерация гармоник, вынужденное рассеяние, многофотонная и туннельная ионизация и другие нелинейные процессы. Зачастую филаментация сопровождается эффектом самоканализации излучения, который приводит к волноводному распространению пучка накачки, а также возникновением широкополосного суперконтинуума (СК) в результате многофотонных процессов. Последний вызывает, во-первых, научный интерес, связанный с многообразием нелинейно-оптических механизмов, задействованных в формировании широких спектров СК и определяющих совокупность его свойств. Во-вторых, значительный практический интерес, так как СК может использоваться в таких приложениях, как дистанционный мониторинг окружающей среды, исследование быстропротекающих процессов и т.п.

В настоящее время большинство экспериментальных и теоретических работ, посвященных этим явлениям, как правило, относится к случаю филаментации и канализации коллимированных и фокусированных осесимметричных гауссовых пучков [1–3]. При этом лишь в некоторых работах был

зарегистрирован направленный СК [4–8], параметры и условия формирования которого подробно не изучались, поскольку эффективность и стабильность формирования были низкими.

В ряде работ было показано, что фазовые искажения при фокусировке фемтосекундного лазерного излучения могут приводить к различным эффектам при филаментации [9–18]. Наиболее простой метод создания фазовых искажений заключается во внесении аббераций за счет наклона фокусирующей линзы или сферического зеркала. В большинстве этих работ изучаются характерные особенности и параметры филамента, обусловленные распределением светового поля на основной частоте. При этом отмечается, что филамент распадается на две последовательные части, расположенные в областях меридионального и сагитального фокусов, расстояние между которыми зависит от угла падения пучка накачки на линзу или фокусирующее зеркало [13]. И только в некоторых работах [9, 15–20] указывается на то, что в определенных условиях кроме двух частей основного филамента могут формироваться два других дополнительных филамента, распространяющихся под углом друг к другу. При определенных условиях в них также может возникать направленный СК белого цвета, как при осесимметричной фокусировке [4–8]. Однако в указанных работах не изучаются и не уточняются физические процессы, приводящие к образованию дополнительных филаментов, в которых и происходит устойчивое формирование высоконаправленного широкополосного излучения. При проведении расчетов этого явления в [9] было получено хорошее согласие с экспериментом, но не были выделены главные

* Владимир Егорович Прокопьев (prokop@ogl.hcei.tsc.ru); Дмитрий Михайлович Лубенко (lubenkodm@gmail.com); Валерий Федорович Лосев (losev@ogl.hcei.tsc.ru).

процессы, приводящие к возникновению дополнительных филаментов. На сегодняшний день теоретические и экспериментальные исследования в этой области выполнены лишь для ограниченного числа экспериментальных условий. Следует отметить, что параметры излучения, при которых возникает направленный СК в этих филаментах, имеют достаточно узкий диапазон значений, и получить стабильную и устойчивую работу такого источника излучения достаточно сложно. В наших публикациях [17–20] при абберационной фокусировке были найдены условия стабильного формирования двух пучков белого света, однако не проводился подробный анализ полученных экспериментальных результатов, позволяющий определить физические процессы, ответственные за их возникновение.

В настоящей работе анализируются результаты детальных исследований пространственной структуры пучка накачки в области филамента при абберационной фокусировке фемтосекундного лазерного излучения с центральной длиной волны $\lambda = 940$ нм с целью определения физических причин возникновения двух дополнительных пучков накачки.

Условия эксперимента и методики измерений

Эксперименты проводились на фемтосекундном лазерном комплексе «Старт-480М» («Авеста-проект», Россия). Комплекс включает в себя Ti:Sa задающий генератор с накачкой лазером Verdi-V8 (Coherent, США), стретчер, регенеративный и два многопроходных усилителя с импульсными лазерами накачки, работающими на $\lambda = 532$ нм, и компрессор на двух дифракционных решетках. Параметры комплекса: центральная длина волны $\lambda = 940$ нм, длительность импульса $\tau = 70$ фс, энергия в импульсе $E = 5\text{--}15$ мДж, диаметр пучка 14 мм, частота следования импульсов 10 Гц, линейная поляризация излучения в горизонтальной плоскости, коэффициент качества пучка $M^2 = 2$. Для создания филамента в воздухе лазерный пучок направлялся на сферическое зеркало ($F = 750$ мм) под углом $15 \pm 3^\circ$ в горизонтальной плоскости. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

Измерение энергии лазерного пучка осуществлялось с помощью измерителей мощности и энергии Maestro (Gentec, США) и Nova II (Ophir, Израиль). Изображение различных областей филамента регистрировалось сверху и сбоку с помощью цифрового фотоаппарата Canon EOS7D с объективом Canon 18–135 IS STM. Свечение филамента в области между первой и второй его частями регистрировалось при длительной экспозиции (10–30 с). В таких условиях интенсивность основных частей филамента на снимке достигала насыщения. Для детальных измерений распределения плотности энергии и интенсивности излучения накачки в области филаментации и за ней применялась регистрация отпечатков на фотобумаге, алюминиевых и диэлектрических (рассчитанных на диапазон 600–800 нм) зеркалах

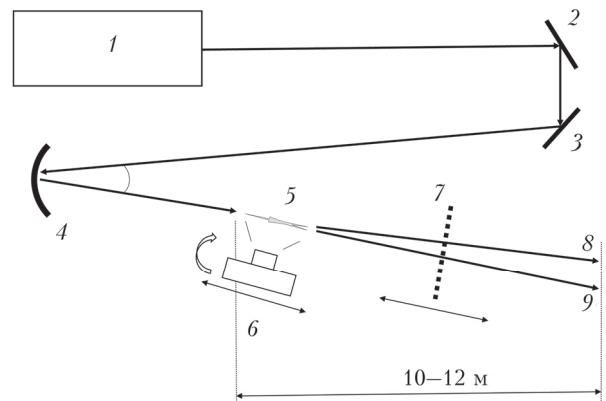


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – лазерный комплекс; 2, 3 – поворотные зеркала; 4 – фокусирующее зеркало; 5 – область филамента; 6 – фотоаппарат; 7 – регистраторы распределения интенсивности излучения; 8, 9 – лучи белого света

на кварцевых ложках, а также на визуализаторе ИК-излучения VRC4 (Thorlabs, США). Отпечатки визуально изучались с помощью бинокулярного микроскопа фирмы KZ Stemi 2000C, а также регистрировались цифровой камерой AxioCam ARc5 с программой Axio Vision AC. Фокусные расстояния при абберационной фокусировке и расстояние между меридиональным и сагиттальным фокусами дополнительно рассчитывались в программе Zemax.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 (цв. вкладка) приведены фотографии филамента при осесимметричной и абберационной фокусировках излучения накачки. На всех изображениях масштаб один и тот же, а на рис. 2, в он увеличен в вертикальной плоскости рисунка для лучшего отображения тонких нитей. В первом случае формировался филамент длиной 5–6 см. Во втором случае филамент разделялся на две части. Первая часть соответствовала области меридионального фокуса, а вторая – сагиттального. В первой части фокусировка излучения происходила таким образом, что формировался вертикальный плазменный «столб», а во второй – горизонтальный, как при фокусировке пучка двумя скрещенными цилиндрическими линзами, разнесенными на некоторое расстояние [13].

С увеличением энергии накачки от 5 до 15 мДж длина обоих ярких участков филамента увеличивалась в сторону расположения источника излучения. При этом между участками всегда наблюдалась тонкая слабо светящаяся нить при наблюдении сбоку или две расходящиеся под углом нити при наблюдении сверху. Последние выходили из первой части филамента и проходили в непосредственной близости от второй. При энергии 14 мДж толщина нитей между двумя частями филамента составляла ~100 мкм. После прохождения второй части филамента толщина нитей увеличивалась примерно в 2 раза за счет дополнительной подпитки энергией от лазерного пучка в области сагиттального фокуса.

Анализ фотографий, сделанных на фоне масштабной линейки, позволил оценить характерные размеры двух ярких областей плазменного канала. Первая часть филамента начиналась на расстоянии 5–6 см до меридионального фокуса (расчетное значение $F = 751,7$ мм) и имела общую длину 6–7 см. Ее поперечные размеры составляли $0,8 \pm 0,2$ мм (максимальный размер) в вертикальной плоскости и $0,1 \pm 0,03$ мм (минимальный размер) в горизонтальной. Длина второй части филамента в области сагиттального фокуса составляла 1–2 см с поперечными размерами $1,5 \pm 0,1$ мм в горизонтальной плоскости (максимальный размер) и $0,1 \pm 0,05$ мм в вертикальной (минимальный размер).

Измеренная энергия излучения в одном пучке (область одной нити) на расстоянии 2 м от филамента составляла 2,5 мДж, а после 5 мм диафрагмы – 0,66 мДж. Импульсная мощность излучения при этом была 35 и 10 ГВт соответственно, что превышает критическую мощность формирования филамента в воздухе.

Для прояснения механизма возникновения двух пучков, расходящихся под углом друг к другу, мы регистрировали распределение излучения накачки в различных областях филаментации (рис. 3, цв. вкладка). За нулевую точку было выбрано положение меридионального геометрического фокуса, который находится в конце первой части филамента (см. рис. 2).

Расстояние между меридиональным и сагиттальным фокусами при угле падения пучка накачки на зеркало $\theta = 14^\circ$, определенное экспериментально, $Z \approx 45$ мм, что хорошо совпадает со значением, рассчитанным по простой формуле $Z = F \sin\theta \tan\theta$, и значением, полученным при расчетах в программе Zemax. В отличие от осесимметричного случая, когда в фокусе возникает плазменная перетяжка, дающая в сечении круг, в абберационном случае возникают два ортогональных друг другу и пучку накачки плазменных «столба», что хорошо видно на отпечатках, полученных вблизи геометрических фокусов (рис. 3, позиции –10 мм и 40 мм). Из анализа микрофотографий отпечатков на фотобумаге следует, что плазменный столб представляет собой массив горячих точек с интенсивностью, превышающей пороговое значение керровской самофокусировки. Отметим, что отпечатки на зеркалах, где области с испарившимся материалом более светлые по сравнению с темным окружающим фоном, дают наибольшую информацию о достаточно неоднородной структуре пучка. Темный цвет в центральной части пучка на алюминиевом зеркале (рис. 3, а, поз. –50, –10 и 30 мм), где интенсивность максимальная, обусловлен тем, что в этой области передняя часть импульса испаряет металл, а задняя либо напыляет его обратно, либо рассеивается на парах металла, оставляя часть его на подложке. При меньших интенсивностях в соседних областях наблюдается полное испарение металла. Отпечатки на фотобумаге при 10 импульсах полностью удаляют фотоэмульсию (рис. 3, в), а при

однократном импульсе (рис. 3, г) окрашивают ее в красный цвет. Два пересекающихся кольца на фотобумаге (рис. 3, в, г, поз. 30 и 40 мм), возможно, связаны с дифракцией излучения на концах плазменного «столба» в области меридионального фокуса.

Анализ изображений отпечатков на зеркалах (рис. 3, а, б, поз. 10 и 30 мм) показал, что, в отличие от осесимметричного пучка с кольцевой дифракцией на плазменном канале (точечное препятствие) [21], в абберационном случае рассеяние излучения накачки происходит на плазменном «столбе». Это приводит к образованию справа и слева от него двух дифракционных максимумов первого порядка, в которых за счет керровской самофокусировки формируются два пучка, распространяющиеся под углом друг к другу. Поскольку типичная плотность электронов в филаменте составляет $10^{16} - 10^{17}$ см⁻³, то плазма начинает искажать фазу и вести себя как препятствие по отношению к излучению накачки. Можно предположить, что передний фронт фемтосекундного импульса создает плазму, а задний дифрагирует на ней. Подобная картина наблюдалась в [13], где при абберационной фокусировке излучения цилиндрическими линзами формировалось два аналогичных пучка.

Расстояние между максимумами излучения хорошо описывается формулой дифракции света на препятствии (в данном случае на плазменном «столбе»):

$$d \sin\varphi = d \operatorname{tg}\varphi = \pm(2m + 1)\lambda/2, \quad (1)$$

$$(m = \pm 1, \pm 2, \dots),$$

где d – толщина плазменного «столба»; φ – угол дифракции; λ – длина волны.

Тогда расстояние X между двумя дифракционными максимумами первого порядка, которые находятся на расстоянии L от препятствия ($L \gg X$), и полный угол между этими лучами можно связать следующим соотношением:

$$\operatorname{tg}2\varphi \approx \sin2\varphi = X/L = 3\lambda/2d. \quad (2)$$

В нашем случае для излучения с длиной волны $\lambda = 0,95$ мкм и толщиной препятствия $d = 120$ мкм, полный угол $2\varphi = 1,36^\circ$, а из экспериментальных данных (рис. 3, а, б, поз. 30 мм), для $X = 0,8$ мм и $L = 34$ мм, $2\varphi = 1,35^\circ$. Таким образом, экспериментальный измеримый угол хорошо согласуется с углом, рассчитанным в предположении дифракции излучения на плазменном «столбе». Этот угол достаточно хорошо совпадает с углом распространения высоконаправленных пучков СК ($1,4^\circ$), измеренным в [17]. Ранее мы получали хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных с учетом только керровской нелинейности [19]. Мы не исключаем, что в наших условиях оба этих явления, приводящие к фазовым искажениям волнового фронта излучения накачки, работают вместе и обеспечивают эффективное образование двух направленных под углом друг к другу филаментов,

в которых впоследствии формируется высоконаправленный СК белого цвета.

На рис. 4, *a* (цв. вкладка) приведена интерференционная картина излучения накачки, снятая на расстоянии 2 м после геометрического фокуса при энергии 10 мДж. При таких значениях энергии видимый спектр только начинает зарождаться (рис. 4, *б* – розовый цвет). Наблюдаемое распределение интенсивности формируется в результате взаимодействия дифрагируемого излучения на вертикальном и горизонтальном плазменных «столбах». Фотография пучка накачки (рис. 4, *б*) показывает, что зоны повышенной интенсивности (горячие точки) образуются и в вертикальной плоскости, однако в них не формируется СК белого цвета, и по мере распространения они исчезают. После филамента всегда генерируется конический суперконтинуум с максимумом в красной области спектра, однако он сильно расходится и на расстоянии 3–4 м от филамента становится практически не различим.

На рис. 5 показано изменение размера одного из пучков при его распространении от первой части филамента.

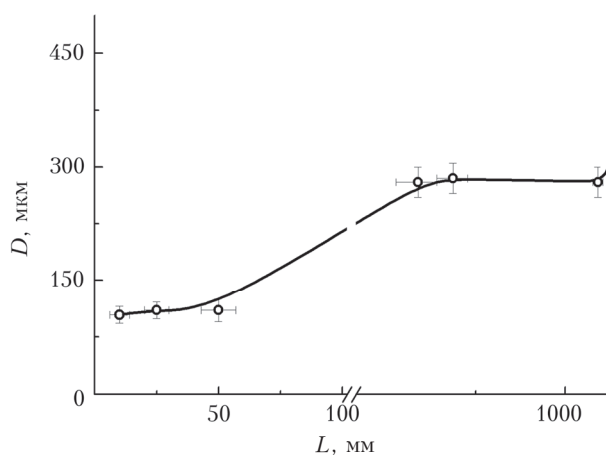


Рис. 5. Изменение размера одного из пучков по мере его распространения от конца первой части филамента

Диаметр определялся из фотографий и отпечатков по уровню интенсивности $1/e^2$. Видно, что диаметр пучка между двумя частями основного филамента составляет ~100 мкм. После области сагитального фокуса диаметр постепенно увеличивается до ~300 мкм и не изменяется на протяжении ~1 м за счет баланса керровской самофокусировки и линейной дифракции излучения. На этом участке распространения излучения накачки происходит формирование высоконаправленного СК белого цвета [17, 18]. На расстоянии более 1,5 м мощность пучка достаточно быстро падает, что приводит к снижению влияния керровской самофокусировки; диаметр пучка резко увеличивается до ~8 мм, и далее пучок распространяется по закону линейной дифракции.

Заключение

Таким образом, при абберационной фокусировке фемтосекундного импульса излучения в воздухе детально исследованы условия возникновения двух дополнительных пучков накачки, расходящихся под углом ~1,4°, в которых формируется высоконаправленное излучение СК белого цвета. Показано, что образование таких пучков обусловлено дифракцией излучения на плазме, возникающей в области первого (меридионального) фокуса оптической системы, и керровской самофокусировкой. В области между двумя основными частями филамента каждый пучок имеет диаметр ~100 мкм. После области филаментации на расстоянии ~35 см он увеличивается до ~300 мкм и остается неизменным на протяжении ~1 м. Именно на этом участке формируется высоконаправленный СК белого цвета.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-48-700016 р-сибирь.

1. Землянов А.А., Булыгин А.Д., Гейнц Ю.Э., Минина О.В. Динамика световых структур при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 5. С. 359–368; Zemlyanov A.A., Bulygin A.D., Geints Yu.E., Minina O.V. Dynamics of light structures during filamentation of femtosecond laser pulses in air // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 5. P. 395–403.
2. Анексимов Д.В., Землянов А.А., Кабанов А.М., Степанов А.Н. Постфиламентационные световые каналы в воздухе // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 4. С. 291–295; Apeksimov D.V., Zemlyanov A.A., Kabanov A.M., Stepanov A.N. Post-filamentation light channels in air // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 5. P. 451–455.
3. Анексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К. Управление характеристиками множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 9. С. 717–725; Apeksimov D.V., Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Kabanov A.M., Matvienko G.G., Oshlakov V.K. Control of multiple filamentation of femtosecond laser pulses in air // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 01. P. 42–50.
4. Braun A., Korn G., Liu X., Du D., Squier J., Mourou G. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air // Opt. Lett. 1995. V. 20, N 1. P. 73–75.
5. Wille H., Rodriguez M., Kasparian J., Mondelain D., Yu J., Mysyrowicz A., Sauerbrey A.R., Wolf J.-P., Wöste L. Teramobile: A mobile femtosecond-terawatt laser and detection system // Eur. Phys. J.: Appl. Phys. 2002. V. 20. P. 183–190.
6. Kasparian J., Rodriguez M., Mejean G., Yu J., Salmon E., Wille H., Bourayou R., Frey S., André Y.B., Mysyrowicz A., Sauerbrey A.R., Wolf J.P., Wöste L. White-light filaments for atmospheric analysis // Sci. 2003. V. 301, N 5629. P. 61–64.
7. Theberge F., Liu W., Luo Q., Chin S.L. Ultrabroadband continuum generated in air (down to 230 nm) using ultrashort and intense laser pulses // Appl. Phys. B. 2005. V. 80, N 2. P. 221–225.

8. *Bejot P.O., Bonacina L., Extermann J., Moret M., Wolf J.-P., Ackermann R., Lascoux N., Salamé R., Salmon E., Kasparian J., Berge L., Champeaux S., Guet C., Blanchot N., Bonville O., Boscheron A.C.L., Canal P., Castaldi M., Hartmann O., Lepage C., Marmande L., Mazataud E., Mennerat G., Patisso L., Prevot V., Raffestin D., Ribolzi J.* 32 TW atmospheric white-light laser // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90. 151106. P. 1–3.
9. *Méchain G., Couaïron A., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A.* Organizing multiple femtosecond filaments in air // *Phys. Rev. Lett.* 2004. V. 93, N 3. P. 1–4.
10. *Fibich G., Eisenmann Sh., Ilan B., Zigler A.* Control of multiple filamentation in air // *Opt. Lett.* 2004. V. 29, N 15. P. 1772–1774.
11. *Kamali Y., Sun Q., Daigle J.-F., Azarm A., Bernhardt J., Chin S.L.* Lens tilting effect on filamentation and filament-induced fluorescence // *Opt. Commun.* 2009. V. 282, iss. 5. P. 950–954.
12. *Alonso B., Borrego-Varillas R., Sola Í.J., Varela Ó., Vilamarín A., Collados V.M., San Román J., Bueno J.M., Roso L.* Enhancement of filamentation postcompression by astigmatic focusing // *Opt. Lett.* 2011. V. 36, N 19. P. 3867–3869.
13. *Fu Y., Gao H., Chu W., Ni J., Xiong H., Xu H., Yao J., Zeng B., Liu W., Cheng Y., Xu Z., Chin S.L.* Control of filament branching in air by astigmatically focused femtosecond laser pulses // *Appl. Phys. B.* 2011. V. 103. P. 435–439.
14. *Дергачев А.А., Ионин А.А., Кандидов В.П., Мокроусова Д.В., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Сунчугашева Е.С., Шленов С.А., Шустикова А.П.* Плазменные каналы при филаментации в воздухе фемтосекундного лазерного излучения с астигматизмом волнового фронта // *Квант. электрон.* 2014. Т. 44, № 12. С. 1085–1093.
15. *Алексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошляков В.К.* Филаментация фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе. Томск: ИОА СО РАН, 2017. 161 с.
16. *Xu Z., Zhu X., Yu Y., Zhang N., Zhao J.* Superluminescent jet light generated by femtosecond laser pulses // *Sci. Rep.* 2014. V. 4. 3892. P. 1–7.
17. *Ivanov N.G., Losev V.F., Prokop'ev V.E., Sitnik K.A.* Generation of a highly directional supercontinuum in the visible spectrum range // *Opt. Commun.* 2017. V. 387. P. 322–327.
18. *Ivanov N.G., Losev V.F., Lubenko D.M., Prokop'ev V.E., Sitnik K.A.* Forming of supercontinuum in the visible upon filamentation of a femtosecond pulse in air // *Proc. SPIE.* 2017. V. 10228. P. 1–9.
19. *Иванов Н.Г., Лосев В.Ф.* Влияние керровской нелинейности на филаментацию фемтосекундного импульса излучения в воздухе // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 3. С. 198–203; *Ivanov N.G., Losev V.F.* Kerr nonlinearity effect on femtosecond pulse radiation filamentation in air // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 4. P. 331–336.
20. *Ivanov N.G., Losev V.F., Lubenko D.M., Prokop'ev V.E.* Features of laser air filamentation at aberration focusing // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10614. 06141D.
21. *Theberge F., Liu W., Simard P.T., Becker A., Chin S.L.* Plasma density inside a femtosecond laser filament in air: Strong dependence on external focusing // *Phys. Rev.* 2006. V. E74. P. 036406-1–7.

V.E. Prokop'ev, D.M. Lubenko, V.F. Losev. Study of the spatial structure of a femtosecond laser beam in the filamentation domain under aberrational focusing in air.

The conditions for the occurrence of two pump beams propagating at an angle to each other, in which highly directed white SC beams are formed, are investigated and analyzed. The beams are formed due to aberration focusing of a femtosecond radiation pulse with a wavelength of 940 nm. It is shown that the mechanism of their formation is related to the diffraction of the pump beam on the filament plasma in the meridional focus region and Kerr self-focusing of radiation. The dynamics of development of these beams is demonstrated.

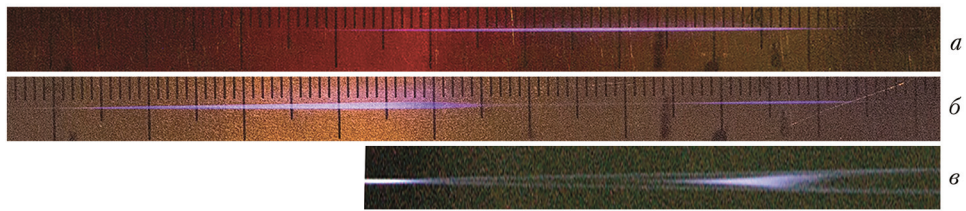


Рис. 2. Фотографии филамента: *a* – при осесимметричной фокусировке излучения накачки (угол падения на сферическое зеркало 2° , вид сбоку); *b* – при абберационной (угол падения 15° , вид сбоку); *v* – при абберационной (угол падения 15° , вид сверху, пропорции изображения по вертикали увеличены в 2 раза). Энергия накачки $E = 14$ мДж. Распространение излучения слева направо

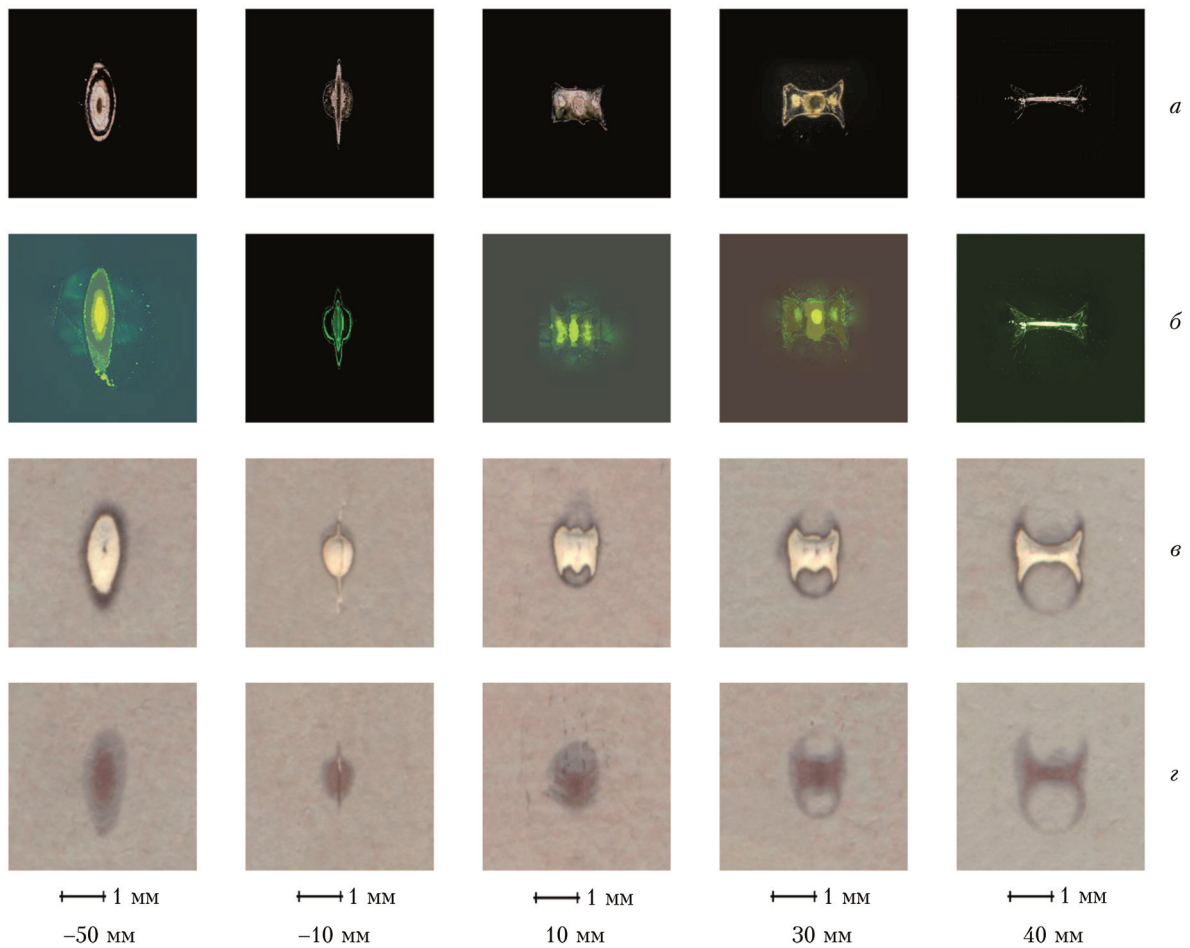


Рис. 3. Автографы пучка накачки при абберационной фокусировке на различных расстояниях от геометрического фокуса, полученные: *a* – на алюминиевом; *b* – диэлектрическом зеркалах; *v* – на фотобумаге для 10 импульсов; *z* – фотобумаге для одного импульса; $E = 14$ мДж

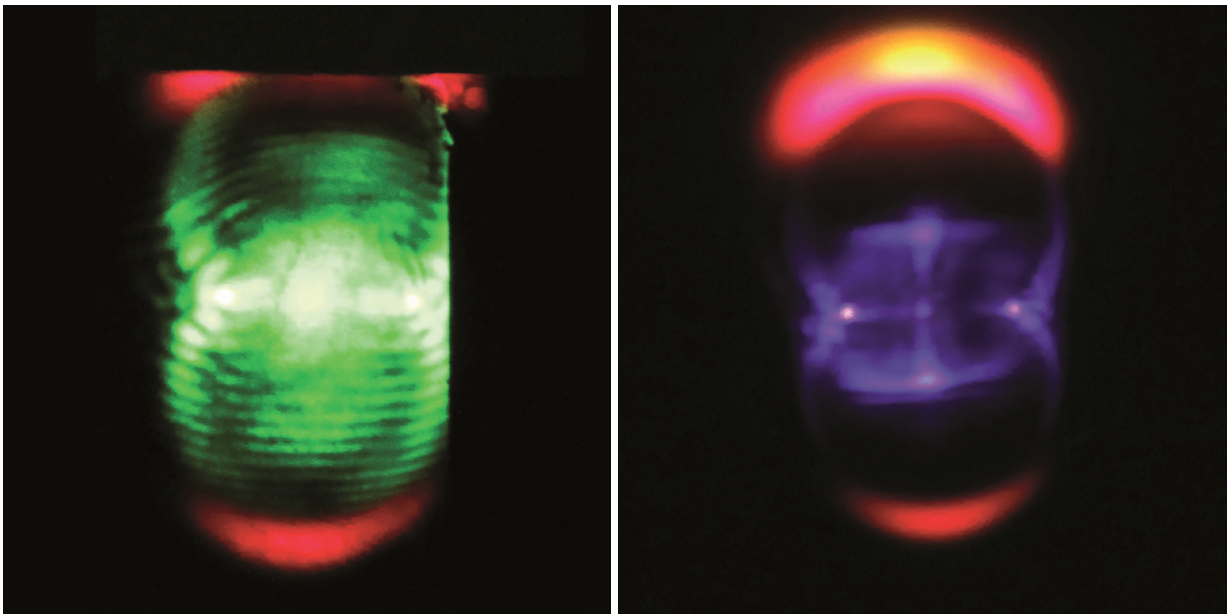


Рис. 4. Фотографии: *a* – на визуализаторе ИК-излучения (зеленый цвет соответствует излучению накачки), *б* – пучка на листе бумаги (фиолетовый цвет соответствует излучению накачки, розовые пятна – СК). Изображения получены на расстоянии ~ 2 м от геометрического фокуса