

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН

УДК 530.182.551.510.42+535.621.33

## Закономерности распространения амплитудно-модулированного мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе

Д.В. Апексимов, П.А. Бабушкин, Ю.Э. Гейнц, А.А. Землянов, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, А.В. Петров, Е.Е. Хорошаева\*

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

Поступила в редакцию 3.09.2021 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей формирования и распространения на трассе интенсивных световых каналов в условиях структурирования начального профиля пучка мощного фемтосекундного лазерного излучения в виде отдельных субапертур. Структурированное излучение получено путем амплитудной модуляции лазерного пучка с использованием масок. Применение амплитудных масок позволяет получить заданное число высокоинтенсивных световых каналов и осуществить их контролируемое распространение в конкретном нелинейном режиме, преимущественно на коротких (десяти метров) дистанциях в атмосфере.

*Ключевые слова:* ультракороткое лазерное излучение, структурированный свет, эффект Керра, самофокусировка, высокоинтенсивные световые каналы; ultrashort laser radiation, structured light, Kerr effect, self-focusing, high-intensity light channels.

### Введение

Уникальные свойства лазеров ультракоротких импульсов и тераваттной пиковой мощности в настоящее время используются в диагностике газовой и аэрозольной составляющих атмосферы, управлении молниеобразованием, лазерной доставке световой энергии [1–3]. Для решения этих задач ведутся экспериментальные и теоретические исследования по амплитудно-фазовой модуляции мощного фемтосекундного лазерного излучения с целью формирования в лазерном пучке системы световых каналов с высокой интенсивностью. Эксперименты [4], проведенные на 150-метровой трассе с использованием тераваттной лазерной системы, излучение которой формировалось телескопом и деформируемым зеркалом, показали, что в воздухе возможна реализация трех типов высокоинтенсивных световых каналов. Это, во-первых, — филаментационные каналы, содержащие внутри себя плазменную область [5]. Во-вторых, после процесса филаментации они трансформируются в высокоинтенсивные бесплазменные

каналы — так называемые постфиламентационные каналы. И третий тип связан с модуляционной неустойчивостью некоторых областей лазерного пучка, вызванной действием керровской нелинейности и дифракции [3]. Протяженность каналов второго и третьего типов значительно больше, чем филаментационных; они характеризуются высокой интенсивностью и субдифракционной расходимостью. Это позволяет применять их в лазерном зондировании газовых и аэрозольных сред с использованием нелинейных эффектов для детектирования отраженного сигнала, несущего информацию о структуре среды. Свойства таких бесплазменных каналов исследуются не только на протяженных трассах, но и в лабораторных условиях, где эта задача решается технически проще.

В настоящее время активно применяются несколько способов управления высокоинтенсивными световыми каналами. Один из них связан с использованием chirпированных (частотно-модулированных) импульсов [6]. Уменьшение длительности импульса вследствие дисперсионного сжатия в воздухе, как и увеличение его начальной мощности, приводит к уменьшению длины самофокусировки пучка. При фиксированной энергии лазерного излучения изменение длительности импульса позволяет управлять положением световых каналов вдоль трассы.

Другой способ управления положением и протяженностью интенсивных световых каналов состоит в пространственной модуляции начального

\* Дмитрий Владимирович Апексимов (apeximov@iao.ru); Павел Александрович Бабушкин (bra@iao.ru); Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (magg@iao.ru); Виктор Константинович Ошлаков (ovk@iao.ru); Алексей Владимирович Петров (awp@iao.ru); Елена Евгеньевна Хорошаева (bee@iao.ru).

распределения фазы или амплитуды [7, 8] светового поля, что приводит к изменению условий самофокусировки пучка. В экспериментах контролируемые фазовые искажения начального профиля пучка можно реализовать с помощью адаптивного модуля, в который входят деформируемое зеркало и датчик волнового фронта [9], амплитудные искажения — путем использования амплитудных масок [10].

Амплитудная (пространственная) модуляция поперечного профиля лазерного пучка позволяет получить крупные, порядка размера пучка, неоднородности или разложить пучок на отдельные сегменты. В последнем случае возможны два варианта: 1) получение хаотично распределенных плазменных каналов; 2) формирование упорядоченных связей филаментов [11]. Если начальный пучок имеет гауссов профиль, то оба варианта можно получить с помощью наложения жесткой диафрагмы. Из-за наличия в поперечном сечении резких градиентов интенсивности жесткое диафрагмирование приводит к сильной дифракции распространяющегося пучка. Вследствие этого образующиеся дополнительные максимумы интенсивности могут привести к самофокусировке и старту филаментации пучка раньше, чем при отсутствии диафрагмы. Численные эксперименты по управлению положением и протяженностью области множественной филаментации с использованием амплитудной модуляции представлены в [12]. Результаты экспериментальных исследований процессов самофокусировки и филаментации сходящихся лазерных пучков с различным профилированием (диафрагмированием) приведены в [13].

Цель настоящей работы — разработать методы получения высокоинтенсивных световых каналов, наиболее простым и доступным из которых является использование амплитудных масок. В зависимости от размера апертуры элемента маски становится возможным осуществить два режима распространения субпучка излучения в нелинейной керровской среде: филаментация и модуляционная неустойчивость.

## Экспериментальные исследования

В экспериментах, направленных на исследование влияния амплитудной модуляции пучка, использовалась схема, представленная на рис. 1, *а*; начальный профиль пучка показан на рис. 1, *б* (цв. вкладка).

Лазерное излучение плоским поворотным зеркалом направлялось на специально подготовленные амплитудные маски двух конфигураций (рис. 2, цв. вкладка): 1) 5 симметричных, включая центральное, отверстий; 2) 4 симметричных отверстия разного диаметра ( $d_{\text{отв}}$  от 3 до 6 мм). Выбор именно такого вида масок (расположение и размер отверстий) связан с начальным профилем пучка, точнее, с распределением интенсивности в нем, которое определяет распространение световых каналов в конкретном нелинейном режиме [14].

Маска 1-й конфигурации использовалась для того, чтобы установить влияние центральной части пучка на его периферийные области (таблица, цв.

вкладка). Рисунки во 2-й строке таблицы показывают, что отверстие в центральной части маски сильно влияет на распределение интенсивности прошедшего через маску излучения. Центральная субапертура сохраняет наибольшую интенсивность по сравнению с периферийными, что можно объяснить высокой концентрацией энергии в центре начального осесимметричного пучка. Однако при изменении энергии начального пучка могут возникать несимметричности в распределении интенсивности излучения после маски. В нашем эксперименте наибольшая интенсивность излучения в области центрального отверстия наблюдается для энергии  $E = 16$  мДж, а не 30 мДж, как можно было ожидать. Не всегда контролируемое влияние центральной части пучка на распределение интенсивности излучения, прошедшего через маску 1-й конфигурации, обосновало проведение более детальных исследований с масками 2-й конфигурации.

Как следует из таблицы (строки 3–5), увеличение начальной энергии лазерных импульсов и диаметра отверстий масок 2-й конфигурации приводят к появлению локальных пиков (неоднородностей) в распределениях интенсивности в субапертурных пучках уже на дистанции 5 м. Причем если при  $E = 1$  и 16 мДж в каждом пучке возникает один максимум интенсивности, то при  $E = 30$  мДж и  $d_{\text{отв}} = 6$  мм этот локальный пик начинает распадаться на отдельные неоднородности. Последнее обстоятельство указывает на возможность формирования нелинейных световых каналов.

Зависимость полной энергии излучения, прошедшей через маски 2-й конфигурации, от диаметра отверстий и начальной энергии лазерных импульсов представлена на рис. 3. Значения энергии, измеренные на выходе из каждого отверстия, одинаковы. Полная энергия излучения, прошедшего через маску, равна произведению энергии на выходе отдельного отверстия на число отверстий.

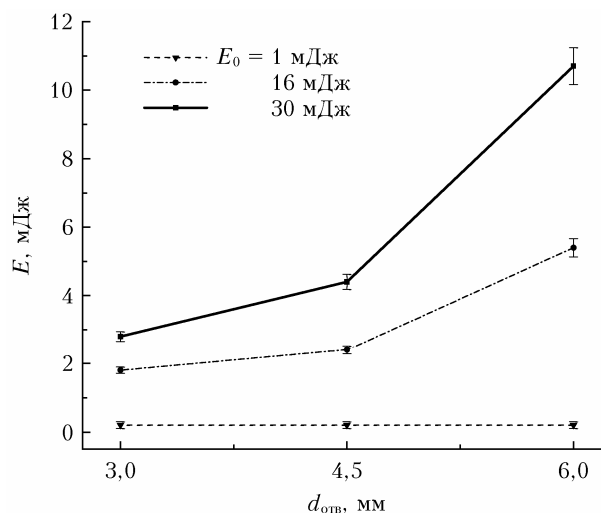


Рис. 3. Зависимость энергии излучения, прошедшего через маску, от диаметра отверстий и начальной энергии лазерных импульсов

Из рис. 3 видно, что максимальная энергия излучения, прошедшего через маску 2в,  $E \approx 11$  мДж,

при этом мощность лазерных импульсов  $\sim 200$  ГВт. Это значение намного превышает пороговую мощность возникновения филаментов в воздухе, равную 3–5 ГВт, но филаменты в данном случае не регистрировались вследствие сильного дифракционного уширения отдельных субапертурных пучков сразу после маски.

Для анализа этого факта был проведен эксперимент по исследованию динамики распространения образовавшихся нелинейных высокоинтенсивных световых каналов вдоль контролируемой трассы. Чтобы повысить вероятность образования филаментов, диаметр отверстий в маске 2-й конфигурации был уве-

личен до 9 мм. Начальная энергия излучения составляла 30 мДж; полная энергия излучения, прошедшего через данную маску, —  $\sim 15$  мДж, что соответствует мощности, кратно превышающей пороговое значение возникновения филаментов в воздухе, однако филаменты в данном случае не образовывались. Это связано, как упоминалось выше, с влиянием дифракции отдельных субапертур пучка и продемонстрировано на рис. 4, где представлено распределение интенсивности излучения на различных расстояниях от маски (5–42 м).

Рис. 4 показывает, что структура целого пучка, состоящего из четырех субапертур, сохраняется

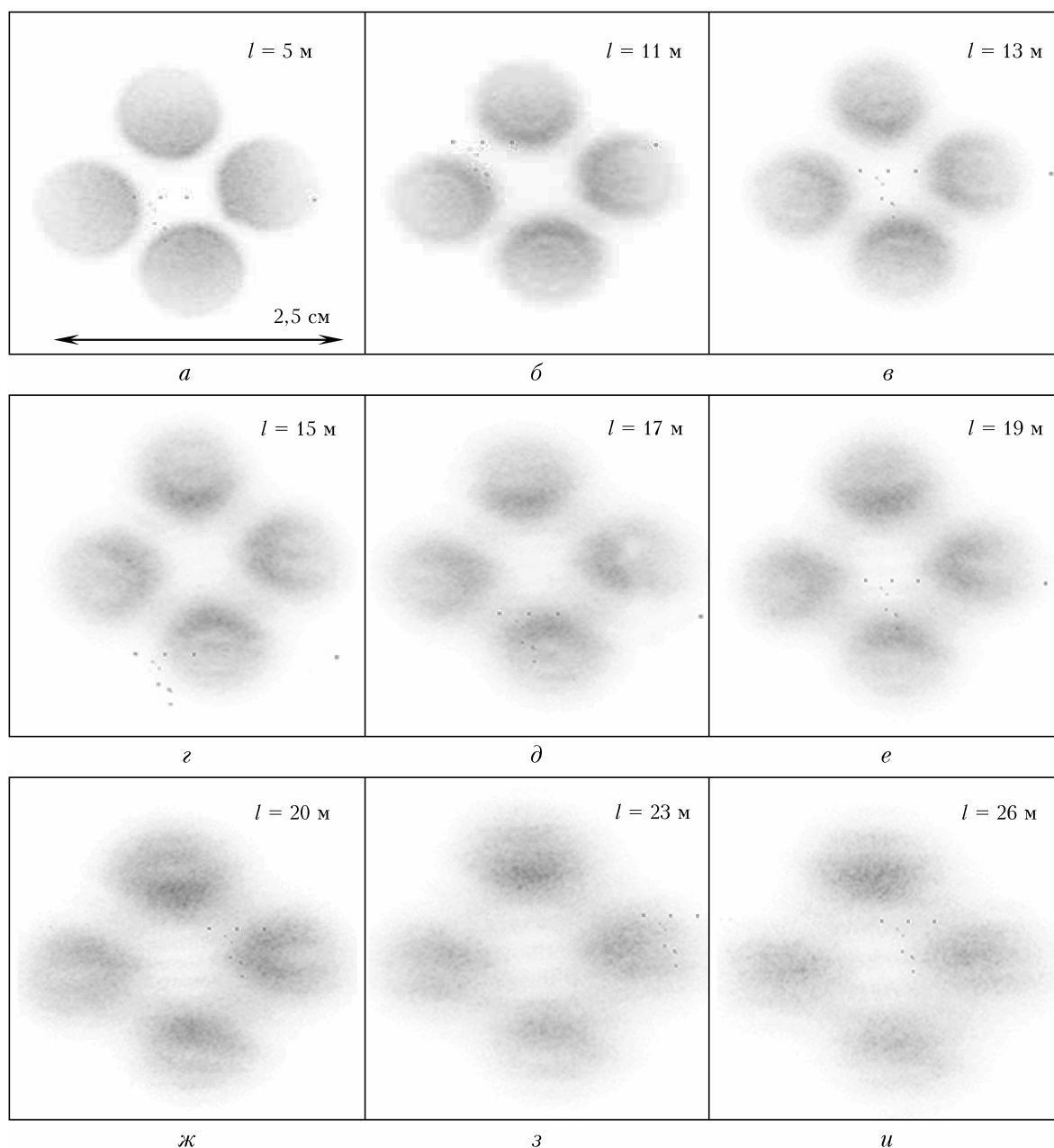
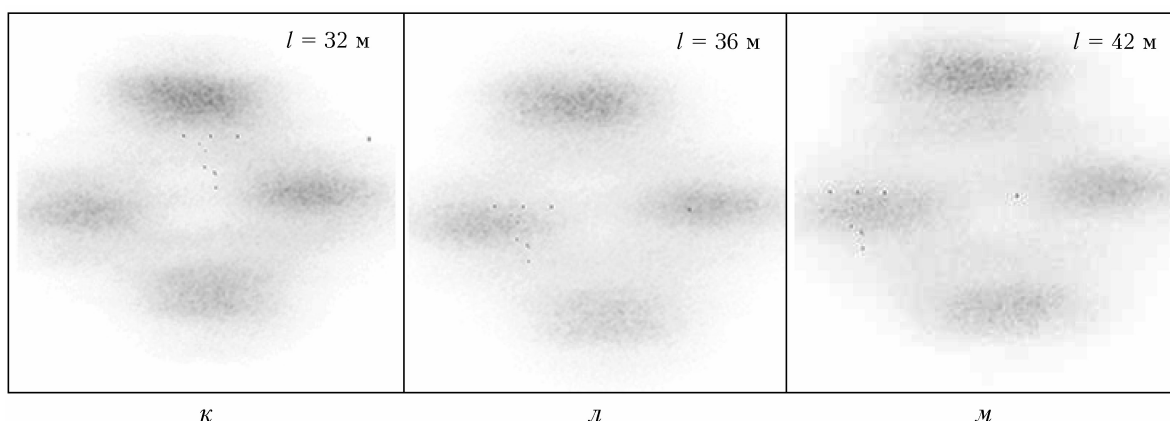


Рис. 4. Динамика распространения по трассе нелинейных высокоинтенсивных световых каналов, образовавшихся после маски. Регистрация велась CCD-камерой на различном удалении  $l$  экрана от маски. Полная энергия излучения после маски составляла: 15,1 (а); 15 (б); 14,9 (в); 14,8 (г); 14,8 (д); 14,7 (е); 14,7 (ж); 14,6 (з); 14,3 (и); 13,9 (к); 13,5 (л); 13 мДж (м).

Окончание рисунка см. на с. 840



Окончание рис. 4. Начало рисунка см на с. 839

вдоль трассы распространения. В интервале дистанций  $l = 15\text{--}20$  м видны области повышенной локализации интенсивности, которые можно считать областью перетяжки в результате самовоздействия. Однако дифракция увеличивает расходимость пучка и препятствует образованию филаментов. При этом интенсивность в данных световых каналах сохраняется высокой (до  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>), что характерно для бесплазменных каналов [13]. Полная энергия излучения незначительно уменьшается вдоль трассы наблюдения.

### Заключение

В результате проведенных исследований установлена возможность управления структурированным с помощью амплитудных масок профилем пучка мощного фемтосекундного лазерного излучения. Амплитудная модуляция отдельных областей пучка приводит к более раннему формированию нелинейных световых каналов и к возникновению рефокусировки после фокальной перетяжки. Это можно объяснить различием в динамике дифракции унимодального (гауссовского) и пространственно-структурированного пучков. Действительно, «диафрагмирование» приводит к появлению дополнительных локальных максимумов в распределении интенсивности, положение которых определяется конфигурацией амплитудной маски; конкретный тип формирующихся нелинейных световых каналов к тому же зависит от начальной энергии лазерного излучения.

Применение амплитудных масок позволяет получить заданное число высокоинтенсивных световых каналов и осуществить их контролируемое распространение в конкретном нелинейном режиме, преимущественно на коротких (десятьки метров) дистанциях в атмосфере.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 21-12-00109) в части измерения энергетических характеристик амплитудно-модулированного пучка и в рамках государственного задания ИОА СО РАН в части исследования динамики распространения пучка мощного фемтосекундного лазерного излучения структурированного профиля.

1. Singh J., Thakur S. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. England: Elsevier Science, 2020. 620 p.
2. Clerici M., Hu Y., Lassonde P., Milian C., Couairon A., Christodoulides D.N., Chen Z., Razzari L., Vidal F., Legare F., Faccio D., Morandotti R. Laser-assisted guiding of electric discharges around objects // Sci. Adv. 2015. V. 1, N 5. P. e1400111.
3. Durand M., Houard A., Prade B., Mysyrowicz A., Durré A., Moreau B., Fleury D., Vasseur O., Borchert H., Diener K., Schmitt R., Théberge F., Chateauneuf M., Daigle J., Dubois J. Kilometer range filamentation // Opt. Express. 2013. V. 21, N 22. P. 26836–26845.
4. Анексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошляков В.К., Петров А.В. Множественная филаментация лазерных пучков различного диаметра в воздухе на трассе длиной 150 м // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 1. С. 51–55; Apeksimov D.V., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V. Multiple filamentation of laser beams of different diameters in air along a 150-meter path // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 3. P. 263–266.
5. 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.
6. Mechain G., Amico C.D., Andre Y.-B., Tzortzakis S., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A., Couairon A., Salmon E., Sauerbrey R. Range of plasma filaments created in air by a multi-terawatt femtosecond laser // Opt. Commun. 2005. V. 247, N 1. P. 171–180.
7. Liu W., Hosseini S.A., Luo Q., Ferland B., Chin S.L., Kosareva O.G., Panov N.A., Kandidov V.P. Experimental observation and simulations of the self-action of white light laser pulse propagating in air // New J. Phys. 2004. V. 6, N 6. P. 6.1–6.8.
8. Hosseini S.A., Luo Q., Ferland B., Liu W., Chin S.L., Kosareva O.G., Panov N.A., Aközбек N., Kandidov V.P. Competition of multiple filaments during the propagation of intense femtosecond laser pulses // Phys. Rev. A. 2004. V. 70, N 3. P. 033802-1–12.
9. Ionin A.A., Iroshnikov N.G., Kosareva O.G., Larichev A.V., Mokrousova D.V., Panov N.A., Seleznev L.V., Sinityn D.V., Sunchugasheva E.S. Filamentation of femtosecond laser pulses governed by variable wavefront distortions via a deformable mirror // J. Opt. Soc. Am. B. 2013. V. 30, N 8. P. 2257–2262.

10. Kosareva O.G., Liu W., Panov N.A., Bernhardt J., Ji Z., Sharifi M., Li R., Xu Z., Liu J., Wang Z., Ju J., Lu X., Jiang Y., Leng Y., Liang X., Kandidov V.P., Chin S.L. Can we reach very high intensity in air with femtosecond PW laser pulses? // *Las. Phys.* 2009. V. 19, N 8. P. 1776.
11. Heck M., Krämer R.G., Ullsperger T., Goebel T.A., Richter D., Tünnermann A., Nolte S. Efficient long period fiber gratings inscribed with femtosecond pulses and an amplitude mask // *Opt. Lett.* 2019. V. 44, N 16. P. 3980–3983.
12. Апе́ксимов Д.В., Ге́йниц Ю.Э., Зе́млянов А.А., Каба́нов А.М., Ма́твиенко Г.Г., Ошлако́в В.К. Управление характеристиками множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 9. С. 717–725; *Апе́ксимов Д.В., Ге́йниц Ю.Э., Зе́млянов А.А., Каба́нов А.М., Ма́твиенко Г.Г., Ошлако́в В.К.* Control of multiple filamentation of femtosecond laser pulses in air // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 1. P. 42–50.
13. Ге́йниц Ю.Э., Зе́млянов А.А., Изюмо́в Н.А., Ио́нин А.А., Ку́дряшов С.И., Се́лезнев Л.В., Си́ницын Д.В., Су́нчу́гашева Е.С. Самофокусировка профилированных световых пучков ультракороткого лазерного излучения в воздухе // *ЖЭТФ.* 2013. Т. 143, № 2. С. 228–237.
14. Мокроу́сова Д.В. Влияние резервуара энергии на распространение фемтосекундных лазерных импульсов в режиме филаментации вблизи геометрического фокуса: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Физин-т им. П.Н. Лебедева, 2019. 21 с.

*D.V. Apeksimov, P.A. Babushkin, Yu.E. Geints, A.A. Zemlyanov, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.E. Khoroshaeva. Regularities of propagation of amplitude-modulated powerful femtosecond laser radiation in air.*

The results of experimental studies of the features of formation and path propagation of high-intensity light channels under conditions of distortions of the initial profile of a high-power femtosecond laser radiation beam are presented. The distortions are introduced by amplitude modulation of the laser beam with the help of masks. The use of amplitude masks allows generation of a preset number of high-intensity light channels and their controllable filamentation mainly at short (tens of meters) distances of radiation propagation in air.

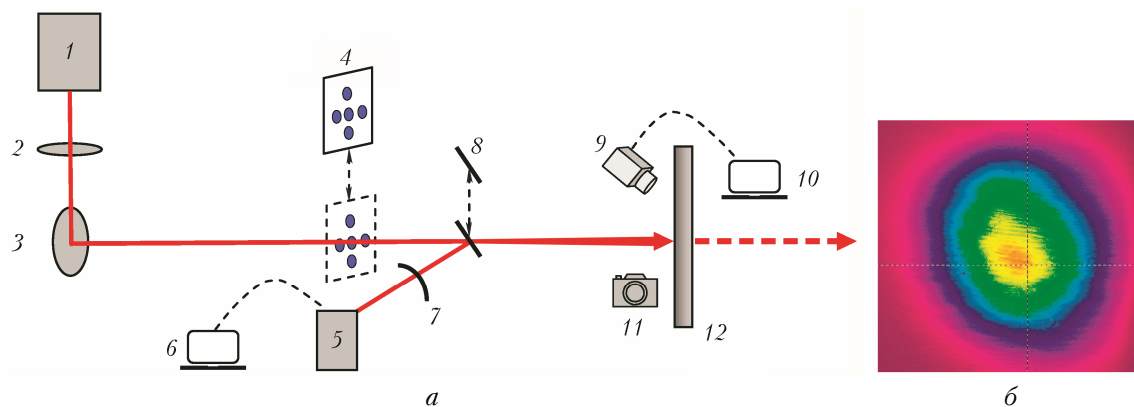


Рис. 1. Схема эксперимента с амплитудными масками: 1 – Ti:Sapphire лазерный комплекс ( $\lambda = 800$  нм, длительность импульсов  $\tau_{\text{и}} = 60$  фс, энергия в импульсе  $E < 30$  мДж, начальный диаметр пучка  $d_0 = 2,5$  см (по уровню  $e^{-2}$ ), частота следования импульсов 10 Гц); 2 – измеритель энергии импульса ОРНІR-II; 3 – поворотное зеркало; 4 – амплитудная маска, изготовленная из пластика толщиной 2 мм; 5 – измеритель профиля пучка LBP2-HR-VIS; 6 – ноутбук для управления измерителем профиля пучка; 7 – фокусирующая линза (фокусное расстояние  $f = 100$  см); 8 – оптический клин Optosigma WSSQ-50C10-10-3; 9 – CCD-камера ANDOR-Clara E с объективом HELIOS-44M 2/58 и набором светофильтров HC-8, HC-10; 10 – ноутбук для управления CCD-камерой; 11 – фотокамера Pentax K-3 (25 МП) с макрообъективом Pentax100MacroWR; 12 – передвижной экран (а); начальный профиль пучка лазерного излучения (б). Длина трассы наблюдения – 42 м

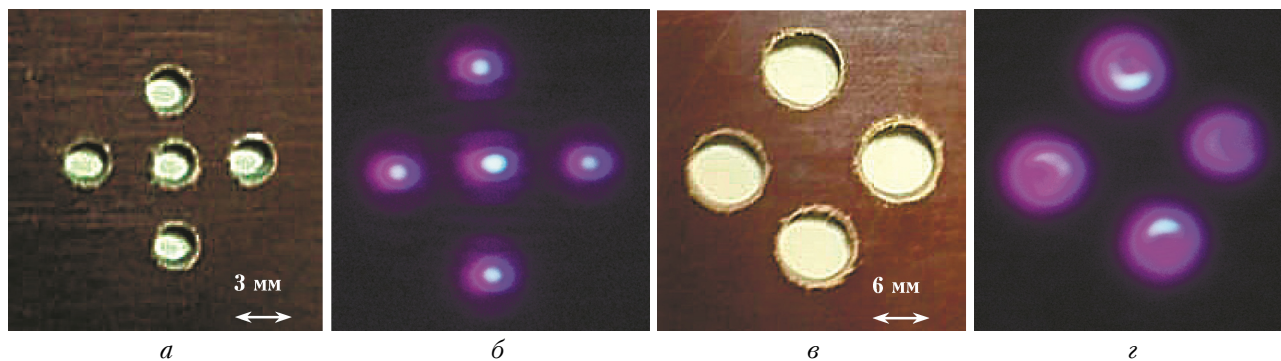
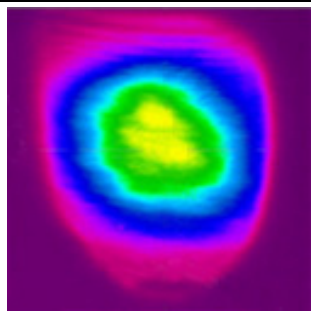
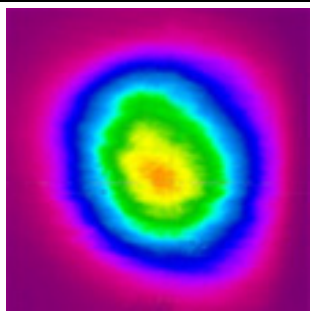
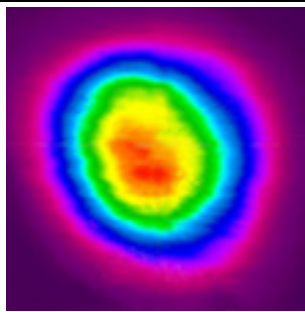
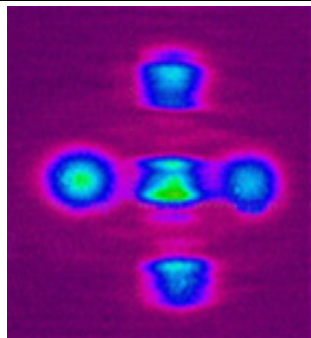
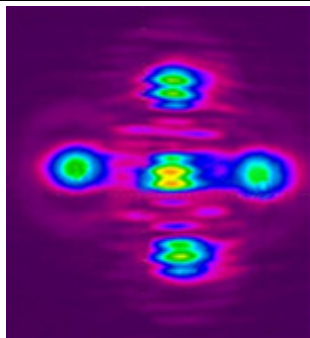
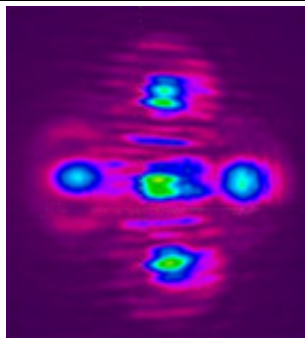
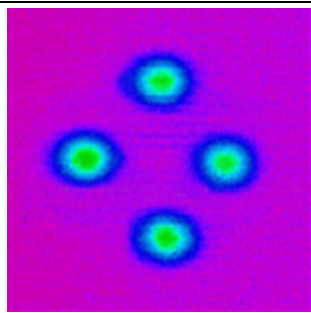
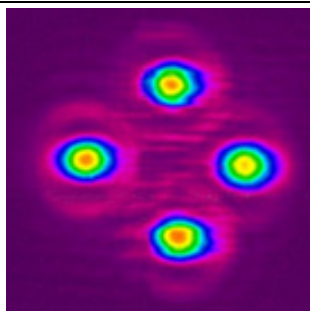
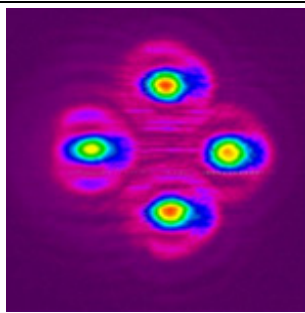
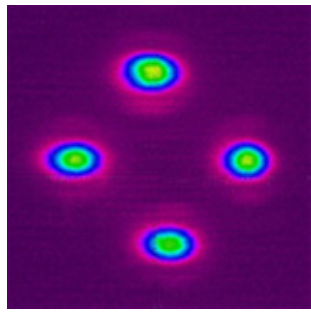
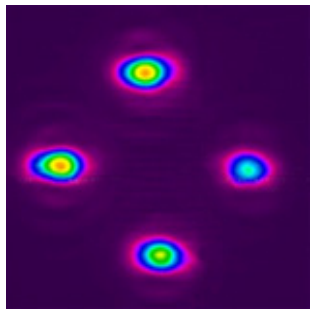
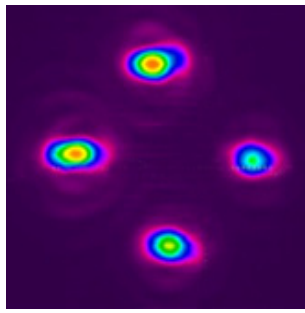


Рис. 2. Вид маски (а, в) и сделанный фотокамерой снимок излучения (б, г), прошедшего через соответствующую маску, на экране, расположенном в 5 м от маски

Начальный профиль пучка и снимки излучения, прошедшего через маски, на экране, расположенном в 5 м от масок, при различной начальной энергии лазерных импульсов (для удобства визуализации масштаб снимков изменен)

№	Конфигурация	$E = 1$ мДж	$E = 16$ мДж	$E = 30$ мДж
1	Начальный профиль пучка, $d_0 = 2,5$ см			
2	Маска 1, $d_{отв} = 3$ мм			
3	Маска 2а, $d_{отв} = 3$ мм			
4	Маска 2б, $d_{отв} = 4,5$ мм			
5	Маска 2в, $d_{отв} = 6$ мм	