

НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 530.182.551.510.42 + 535.621.33

Повышение эффективности генерации излучения на смещенных длинах волн за счет трансформации мономодальной структуры пучка фемтосекундного лазерного излучения в мультимодальную

Д.В. Апексимов, П.А. Бабушкин, Ю.Э. Гейнц, А.М. Кабанов[✉],
В.К. Ошлаков, Е.Е. Хорошаева*

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

Поступила в редакцию 02.10.2025;
после доработки 16.10.2025;
принята к печати 28.10.2025

Дистанционное лазерное возбуждение свечения спектральных линий и полос, информативных для диагностики среды, и генерация электромагнитного излучения вне оптического диапазона, например в терагерцовом, — это актуальные прикладные задачи. При этом одним из важных аспектов является повышение эффективности преобразования энергии лазерного излучения, чему и посвящена настоящая работа. Представлены результаты комплексных исследований филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов при создании в начале трассы распространения локализованного слоя со случайно-неоднородным показателем преломления (искусственный турбулентный слой). Показано, что принудительная хаотическая модуляция (стохастизация мощности) излучения вызывает разбиение исходного пучка на множество высокоинтенсивных световых субпучков-каналов с повышенной устойчивостью на значительных дистанциях. За счет сегментирования излучения турбулентным слоем кратно увеличивается число высокоинтенсивных оптических каналов, возникающих при распространении пучка излучения титан-сапфирового лазера в воздухе. Характерная интенсивность этих оптических каналов оказывается достаточно высокой для реализации двухфотонного поглощения в объеме микронных частиц водного аэрозоля с флуорофором, помещенного в конце 100-метровой оптической трассы, что практически вдвое увеличивает регистрируемый по лидарной схеме сигнал флуоресценции от частиц. Также установлено, что создание в начале оптической трассы локализованного турбулентного слоя кратно повышает эффективность генерации из области лазерной филаментации низкочастотного (ТГц) электромагнитного излучения. Результаты работы могут быть использованы для дистанционной диагностики атмосферного аэрозоля и генерации электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне.

Ключевые слова: фемтосекундный лазерный импульс, турбулентность, лазерная филаментация, плазма, аэрозоль, двухфотонно-возбужденная флуоресценция, угловое распределение, генерация ТГц-излучения; femtosecond laser pulse, turbulence, laser filamentation, plasma, aerosol, two-photon excited fluorescence, angular distribution, THz radiation generation.

Введение

Распространение мощных лазерных импульсов фемтосекундной длительности через газовую и конденсированную среды происходит в нелинейном режиме и приводит к существенной трансформации их пространственных, угловых и спектральных характеристик [1]. Самовоздействие сверхкоротких

лазерных импульсов в атмосферном воздухе, являясь по своей сути процессом нестационарной фазовой самомодуляции волны, обусловлено множеством физических факторов, которые могут находиться в локальном динамическом балансе друг с другом. Ключевые здесь — самофокусировка пучка за счет оптического эффекта Керра и ионизация канала распространения вследствие многофотонного поглощения и туннельных процессов в сильном световом поле.

Эффект Керра, проявляющийся при нелинейном отклике среды за счет кубической восприимчивости, увеличивает показатель преломления среды и способствует фокусированию пучка. Дальнейшее повышение интенсивности в пучке приводит

* 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); Елена Евгеньевна Хорошаева (bee@iao.ru).

к многофотонному поглощению и ионизации на первом этапе образования плазмы, затем при достижении интенсивности значений 10^{13} – 10^{14} Вт/см² туннельная ионизация становится преобладающей в плазмообразовании. Эти процессы сопровождаются нелинейной рефракцией излучения и поглощением в самонаведенной лазерной плазме, что, в свою очередь, ограничивает дальнейший рост интенсивности излучения и стабилизирует поперечные размеры высокоинтенсивной части пучка, приводя к самоканалированию пучка и появлению световых филаментов [1–6].

Вследствие филаментации частотный спектр фемтосекундного излучения уширяется и оно становится широкоспектральным когерентным. Такое излучения может стать перспективным для ряда приложений атмосферной оптики, в частности удаленного обнаружения и физико-химического анализа атмосферных аэрозолей различной природы. Многофотонные процессы (ионизация, вынужденная флуоресценция, суперизлучение) могут реализоваться в среде даже в постфиламентационном режиме, что расширяет возможности фемтосекундной диагностики [7–11].

Действительно, экспериментально было установлено [12–14], что и после прекращения филаментации излучения и активного плазмообразования в воздухе часть лазерного пучка сохраняет высокую концентрацию энергии в виде узконаправленных световых пучков-каналов (постфиламентов) с достаточно высокой интенсивностью (порядка нескольких долей ТВт/см²) и сниженной угловой расходимостью по сравнению с основным пучком. Встречая на своем пути более плотную, конденсированную среду, например частицы атмосферных аэрозолей или массивные мишени, эти световые каналы способны вызвать повторную филаментацию излучения и генерацию плазмы [15, 16]. Это обуславливает научный и практический интерес именно к постфиламентационному самоканалированию мощного излучения как средству доставки интенсивного широкополосного и высоконаправленного излучения на дальние дистанции в атмосфере.

Кроме того, плазма филамента, как известно [17], является источником микроволнового (терагерцового — ТГц) излучения. Такое излучение активно изучается в настоящее время [10, 11], что обусловлено его широкой применимостью, в том числе и в атмосферной оптике, где терагерцовый диапазон важен для удаленной лазерной диагностики атмосферных газов и антропогенных загрязнений [18]. Основной проблемой получения ТГц-излучения с помощью плазмы лазерного филамента является достаточно низкий коэффициент конверсии оптического излучения в микроволновое в силу фототокового механизма образования микроволн [19]. Этот механизм обусловлен смещением электронов в плазме из-за асимметрии ионизации и действия осциллирующего поля, приводящих к возникновению мгновенного постоянного тока в плазме и генерации нового электромагнитного излучения в ТГц-диапазоне. В силу низкого коэффициента конвер-

сии одного вида излучения в другое задача усиления ТГц-генерации с помощью самой ранней и проще всего реализуемой схемы одноцветной филаментации приобретает особую актуальность.

Мы предлагаем для повышения эффективности генерации ТГц-излучения плазмой лазерных филаментов использовать турбулентный экран, ранее исследованный в [16], что позволяет перейти от одиночной осевой к множественной в области нелинейного фокуса филаментации. Сформированный в начале трассы распространения мощного лазерного пучка пространственно-локализованный турбулентный слой существенно изменяет условия распространения лазерного импульса и вызывает его усиленную хаотичную фрагментацию, мелкомасштабную самофокусировку и последующую множественную филаментацию. В ходе наших исследований было установлено, что такое турбулентное структурирование мощного лазерного пучка приводит к заметному, почти в 1,5 раза, увеличению интенсивности ТГц-излучения, генерируемого из области филаментации, по сравнению с филаментацией без дополнительного турбулентного слоя. Это превышение сохраняется в широком диапазоне энергии лазерного импульса — до 30 мДж.

Цель настоящей работы — определение влияния слоя со случайно-неоднородным показателем преломления, помещенного в лазерный пучок гигаваттной мощности, на филаментацию лазерного импульса и, как следствие, на генерацию ТГц-излучения и возбуждение флуоресценции аэрозоля.

Материалы и методы

Принципиальная схема эксперимента по флуоресценции водного аэрозоля с добавлением красителя уранин (0,4 г/л) при двухфотонном поглощении гигаваттных лазерных импульсов в условиях сегментации пучка с использованием слоя с неоднородным показателем преломления среды представлена на рис. 1. Ранее проведенные нами экспериментальные исследования по влиянию турбулентности на филаментацию лазерного пучка [15] показали, что установка «турбулентного экрана» в оптический тракт распространения мощного лазерного излучения приводит за счет сформированных неоднородностей показателя преломления среды к перераспределению интенсивности в поперечном сечении пучка, что инициирует формирование множества высокоинтенсивных световых каналов.

Для исследования генерации ТГц-излучения из области филаментации фемтосекундных лазерных импульсов была использована схема на рис. 2. В качестве источника лазерного излучения выступал Ti:Sapphire-лазер 1. Фемтосекундные импульсы фокусировались сферическим зеркалом 3 с радиусом кривизны 200 см в лабораторный воздух, где происходит их филаментация с образованием плазменной области, которая служила источником ТГц-излучения. Для усиления ТГц-генерации в область геометрического фокуса, т.е. в конец области филаментации, подавалось статическое электрическое

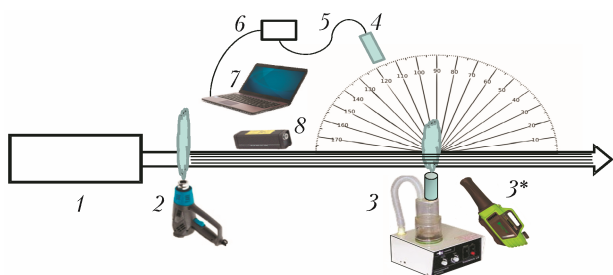


Рис. 1. Схема эксперимента по генерации свечения аэрозоля: 1 – Ti:Sapphire-лазер с длиной волны $\lambda = 800$ нм, длительностью импульса $t = 60$ фс, энергией в импульсе $E = 40$ мДж, частотой следования импульсов $\nu = 10$ Гц; диаметром пучка $d = 2,5$ см; 2 – промышленный фен TESLA TH-2200; 3 – генератор аэрозоля «Вулкан-3»; 3* – генератор аэрозоля GoldFogger SF-720; 4 – коллиматорная насадка световода; 5 – световод; 6 – спектрометр Maya-2000Pro; 7 – ноутбук; 8 – гелий-неоновый лазер «jds uniphase» мощностью 4 мВт (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.39-2026/iss.01>)

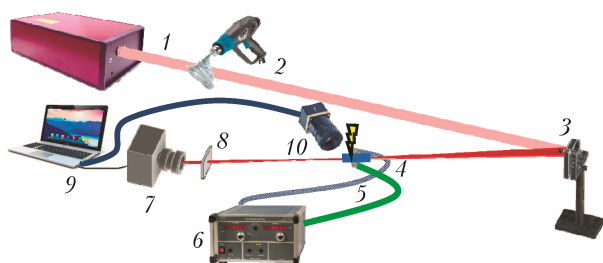


Рис. 2. Схема эксперимента по генерации ТГц-излучения из области филаментации: 1 – Ti:Sapphire-лазер; 2 – промышленный фен TESLA TH-2200; 3 – фокусирующее зеркало $f = 100$ см (числовая апертура $NA = 0,025$); 4 – область филаментации; 5 – электроды; 6 – источник питания высокого напряжения; 7 – датчик ТГц-излучения (ячейка Голея) Tudeх-1D; 8 – фильтр видимого излучения для выделения ТГц; 9 – ноутбук; 10 – CCD-камера Andor Clara, 1392×1040 пикселей

поле с напряжением до 5 кВ. Использовались сферические электроды 5, удаленные друг от друга на расстояние 6 мм. На рис. 3 представлены снимки поперечной структуры лазерного пучка без турбулентного экрана и с ним.

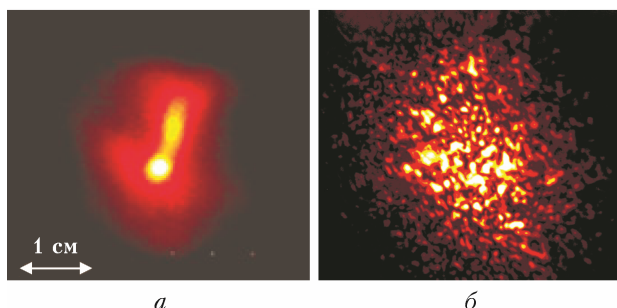


Рис. 3. Поперечная энергетическая структура лазерного пучка без турбулентного экрана (а) и с ним (б)

Для реализации стохастизации мощности лазерного пучка в схеме предусмотрен генератор неоднородности показателя преломления с перемен-

ной температурой нагревательного элемента – фен 2. В наших экспериментах он устанавливался на расстоянии 10 см от пучка, толщина турбулентного слоя составляла 2 см. На рис. 4 представлен график увеличения количества интенсивных каналов в лазерном пучке в зависимости от температуры нагревательного элемента и энергии фемтосекундного импульса. Важно отметить, что включение турбулентного экрана приводит более чем к 10-кратному увеличению количества интенсивных каналов в пучке.

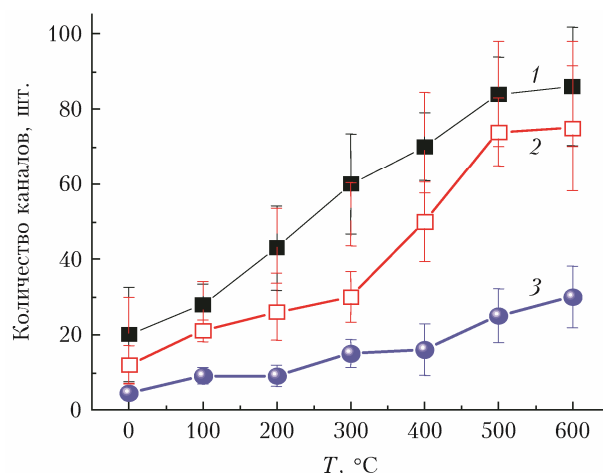


Рис. 4. Зависимость количества интенсивных каналов в пучке от температуры нагревательного элемента при $E = 35$ (1), 24 (2), 12 мДж (3)

Для генерации аэрозоля использовались элементы 3 и 3* схемы на рис. 1. Распределение частиц по размерам, измеренное датчиком OPC-N3, а также обработанное с помощью программного обеспечения цифрового микроскопа «Микмед-6 ЛОМО», представлено на рис. 5.

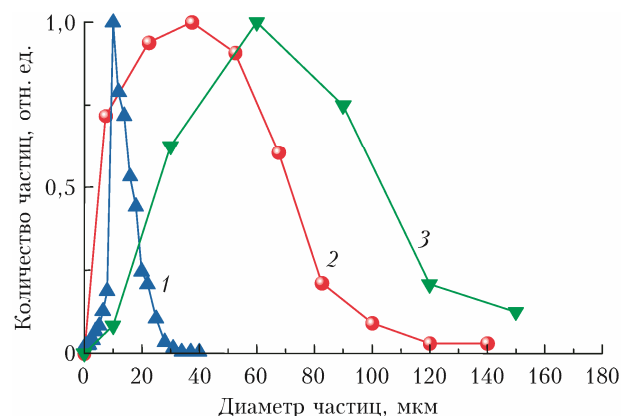


Рис. 5. Распределение по размерам частиц, генерируемых приборами «Вулкан-3» (кривая 1) и GoldFogger (кривые 2, 3)

Результаты и обсуждение

Рассмотрим результаты, полученные с применением методики стохастизации энергетической структуры лазерного импульса. На рис. 6, а видно

зеленое свечение аэрозоля с красителем при облучении излучением ближнего ИК-диапазона, справа — свечение экрана, расположенного за аэрозольным слоем. Двухфотонная флуоресценция аэрозоля осуществляется в сформированных в сечении пучка интенсивных каналах. Красный цвет свечения на экране обусловлен керровским уширением спектра импульса на $\lambda = 800$ нм в высокоинтенсивных каналах в видимую область.

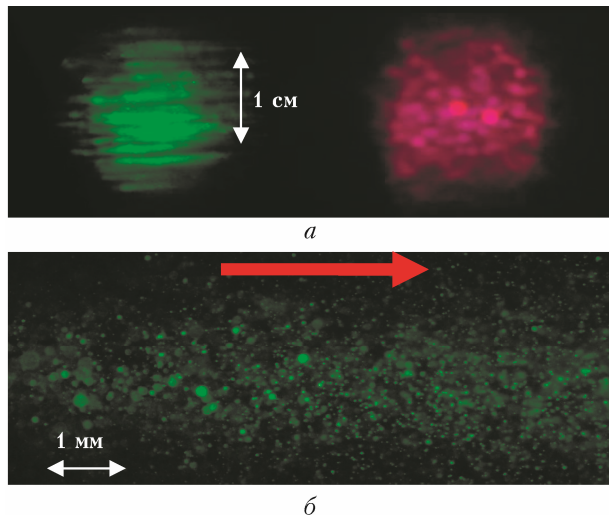


Рис. 6. Свечение мелкодисперсного (а) и крупнодисперсного аэрозоля (б) в поле лазерного импульса; стрелка — направление распространения излучения

На рис. 6, б показана двухфотонная флуоресценция на крупнодисперсном аэрозоле. Можно видеть, что интенсивность флуоресценции выше в центральной части пучка, чем на периферии, что соответствует распределению огибающей мощности. Эксперименты на разноразмерном аэрозоле показывают инвариантность метода двухфотонной флуоресценции, что является его несомненным преимуществом.

На рис. 7 представлены спектры свечения аэрозоля для случаев с турбулентным экраном и без него. Видно, что турбулентный слой (Т-слой) на пути фемтосекундного излучения вызывает увеличению интенсивности флуоресценции аэрозоля за счет пространственное структурирование мощного пучка. Это связано с тем, что структурированное излучение лучше заполняет область взаимодействия с аэрозольной струей многочисленными световыми каналами, за счет чего аэрозольный объем дает более сильную флуоресценцию по сравнению с пучком гауссовского профиля, т.е. без турбулентного экрана. За счет турбулентности в лазерном пучке флуоресценция аэрозоля увеличивается (в центре полосы флуоресценции уранина 520 нм) на ~20% для мелкодисперсного аэрозоля и 30% для более крупных частиц. Это обстоятельство позволяет повысить чувствительность и селективность методов определения малых концентраций веществ по методике фемтосекундной флуоресцентной спектроскопии с использованием специальным образом структурированного лазерного излучения. Результаты измерений

углового распределения флуоресценции подкрашенных водных капель показаны на рис. 8.

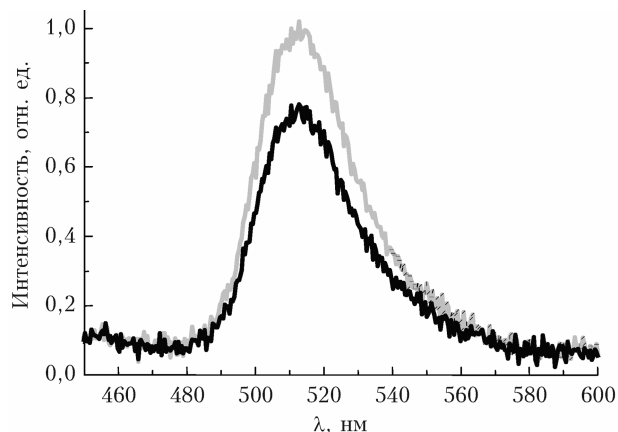


Рис. 7. Спектры флуоресценции водного аэрозоля с Т-слоем (серая кривая) и без него (черная кривая), зарегистрированные под углом 190° (мелкодисперсный аэрозоль)

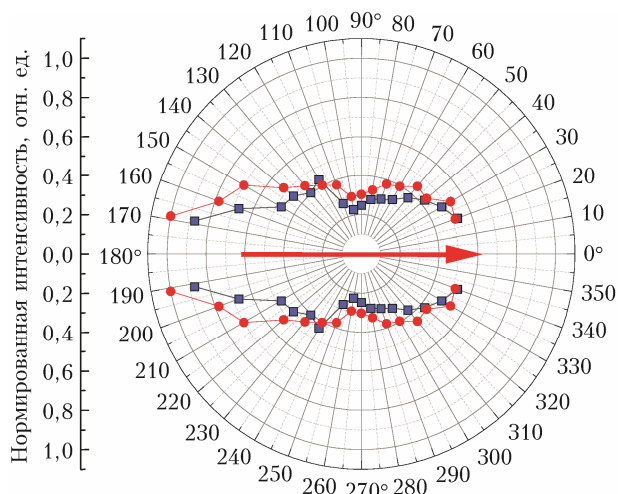


Рис. 8. Угловая диаграмма флуоресценции водного аэрозоля ($\lambda = 515$ нм) в поле фемтосекундного излучения для мелкодисперсного аэрозоля без Т-слоя (квадраты) и с ним (круги), $T = 200$ °C

Видно, что угловая диаграмма в целом имеет квазидипольную форму с выраженной асимметрией в направлениях вперед-назад. Максимум эмиссии наблюдается в диапазоне углов ~160–170° относительно направления воздействия фемтосекундного импульса. Измеренная форма распределения характерна как для мелко-, так и для крупнодисперсного аэрозоля. Степень асимметрии вперед-назад интенсивности сигнала флуоресценции достигает двух раз для мелкодисперсного тумана и почти трех раз для крупнодисперсного.

Установка турбулентного «экрана» в оптический тракт распространения мощного лазерного излучения приводит за счет сформированных неоднородностей показателя преломления среды к перераспределению интенсивности в поперечном сечении пучка (см. рис. 3), что инициирует формирование стохастической множественной филаментации на этих неоднородностях. Этот факт позволяет предположить,

что область филаментации сфокусированного лазерного пучка при наличии турбулентного слоя существенно изменится, что должно отразиться на генерации электромагнитного излучения в терагерцовой области из плазменного филамента. На рис. 9 представлена зависимость амплитуды ТГц-сигнала от энергии лазерного импульса для случаев с Т-слоем и без него.

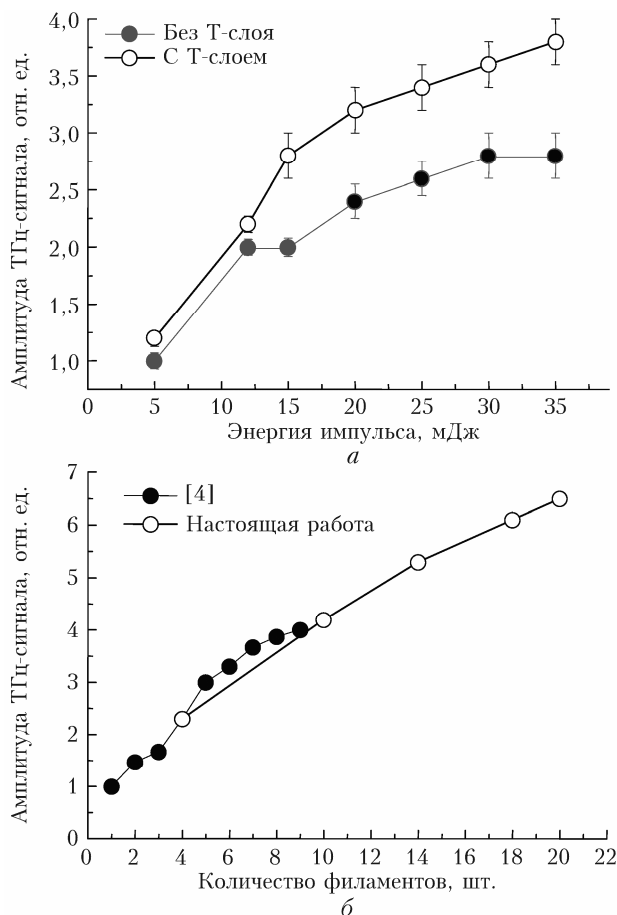


Рис. 9. Зависимости амплитуды терагерцового сигнала от энергии лазерного импульса с Т-слоем и без него (нормировка на минимум ТГц-сигнала) (а) и от количества филаментов (б)

«Включение» экрана с неоднородным показателем преломления среды приводит к увеличению эффективности генерации ТГц-излучения из плазмы филамента на ~30–40% (рис. 9, а). Такое увеличение можно связать с ростом количества филаментов, что подтверждают снимки области филаментации, а также сравнение с результатами, полученными в [4] (рис. 9, б).

Заключение

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований филаментации интенсивных фемтосекундных импульсов Ti:Sapphire-лазера в воздухе при наличии искусственно созданной турбулентности в форме пространственно локализованной струи нагретого воздуха. После прохож-

дения через турбулентный слой и самофокусировки в воздухе поперечный профиль лазерного излучения состоит из множества ярких световых пятен («горячих точек»), представляющих собой локальные максимумы плотности энергии. Характерная интенсивность этих постфиламентов оказывается достаточной для реализации двухфотонного поглощения в объеме частиц аэрозоля, что, в свою очередь, существенно (в 1,8 раза) увеличивает интенсивность сигнала флуоресценции, в том числе регистрируемого по лидарной схеме с расстояния ~100 м. Показано, что эффективность генерации ТГц-сигнала лазерными филаментами может быть повышена приблизительно в 1,5 раза, если на пути оптического пучка создать тонкий слой нагретого воздуха, который вносит случайно-неоднородные возмущения в фазу оптического поля и инициирует стохастическую филаментацию силового пучка.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. *Self-focusing: Past and Present. Fundamentals and Prospects* / R.W. Boyd, S.G. Lukishova, Y.R. Shen (eds.). New York: Springer, 2009. 605 p. DOI: 10.1007/978-0-387-34727-1.
2. Couaïron A., Myzyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media // *Phys. Reports*. 2007. V. 441. P. 47–189. DOI: 10.1016/j.physrep.2006.12.005.
3. Bergé L., Skupin S., Nuter R., Kasparian J., Wolf J.-P. Ultrashort filaments of light in weakly-ionized, optically-transparent media // *Rep. Prog. Phys.* 2007. V. 70. P. 1633. DOI: 10.1088/0034-4885/70/10/R03.
4. Кандидов В.П., Шленов С.А., Косарева О.Г. Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения // *Квант. электрон.* 2009. Т. 39, № 3. С. 205–228.
5. Chin S.L. *Femtosecond Laser Filamentation*. New York: Springer, 2010. 130 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-0688-5.
6. Чекалин С.В., Кандидов В.П. От самофокусировки световых пучков — к филаментации лазерных импульсов // *Успехи физ. наук*. 2013. Т. 183, № 2. С. 133–152.
7. Woste L., Wedekind C., Wille H., Rairoux P., Stein B., Nikolov S., Werner Ch., Niedermeier S., Schillinger H., Sauerbrey R. Femtosecond atmospheric lamp // *Laser Optoelektron.* 1997. V. 29. P. 51–53.
8. Kasparian J., Rodriguez M., Mejean G., Yu J., Salmon E., Wille H., Bourayou R., Frey S., Andre Y.-B., Mysyrowicz A., Sauerbrey R., Wolf J.-P., Wöste L. White-light filaments for atmospheric analysis // *Science*. 2003. V. 301. P. 61. DOI: 10.1126/science.1085020.
9. Daigle J.-F., Mejean G., Liu W., Theberge F., Xu H.L., Kamali Y., Bernhardt J., Azarm A., Sun Q., Mathieu P., Roy G., Simard J.-R., Chin S.L. Long range trace detection in aqueous aerosol using remote filament-induced breakdown spectroscopy // *Appl. Phys. B*. 2007. V. 87, N 4. P. 749–754. DOI: 10.1007/s00340-007-2642-6.
10. Bergé L., Kaltenecker K., Engelbrecht S., Nguyen A., Skupin S., Merlat L., Fischer B., Zhou B., Thiele I., Jepsen P.U. Terahertz spectroscopy from air plasmas created by two-color femtosecond laser pulses: The ALTESSE project // *Europhys. Lett.* 2019. V. 126. P. 24001. DOI: 10.1209/0295-5075/126/24001.
11. Bai K., Gou Y., Peng X.-Y. Terahertz beam array generated by focusing two-color-laser pulses into air with a microlens array // *AIP Adv.* 2022. V. 12. P. 095113. DOI: 10.1063/5.0098771.

12. Méchain G., Couairon A., André Y.-B., D'Amico C., Franco M., Prade B., Tzortzakis S., Mysyrowicz A., Sauerbrey R. Long-range self-channeling of infrared laser pulses in air: A new propagation regime without ionization // *Appl. Phys. B*. 2004. V. 79, N 3. P. 379–382. DOI: 10.1007/s00340-004-1557-8.
13. Daigle J.-F., Kosareva O., Panov N., Wang T.-J., Hosseini S., Yuan S., Roy G., Chin S.L. Formation and evolution of intense, post-filamentation, ionization-free low divergence beams // *Opt. Commun.* 2011. V. 284, N 14. P. 3601–3606. DOI: 10.1016/j.optcom.2011.03.077.
14. Geints Yu.E., Ionin A.A., Mokrousova D.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S., Zemlyanov A.A. High intensive light channel formation in the post-filamentation region of ultrashort laser pulses in air // *J. Opt.* 2016. V. 18. P. 095503. DOI: 10.1088/2040-8978/18/9/095503.
15. Apeksimov D.V., Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Kabanov A.M., Oshlakov V.K., Petrov A.V., Matvienko G.G. Controlling TW-laser pulse long-range filamentation in air by a deformable mirror // *Appl. Opt.* 2018. V. 57, N 34. 10 p. DOI: 10.1364/AO.99.099999.
16. Apeksimov D.V., Bulygin A.D., Geints Yu.E., Kabanov A.M., Khoroshaeva E.E., Petrov A.V. Statistical parameters of femtosecond laser pulse post-filament propagation on 65 m air path with localized optical turbulence // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2022. V. 39, N 12. P. 3237–3246. DOI: 10.1364/JOSAB.473298.
17. D'Amico C., Houard A., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A., Couairon A., Tikhonchuk V.T. Conical forward THz emission from femtosecond-laser-beam filamentation in air // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 98. P. 235002. DOI: 10.1103/PHYSREVLETT.98.235002.
18. Clough B., Liu J., Zhang X.-C. All air-plasma terahertz spectroscopy // *Opt. Lett.* 2011. V. 36. P. 2399–2401. DOI: 10.1364/OL.36.002399.
19. Couairon A., Mysyrowicz A. *Femtosecond Filamentation in Air*. Progress in Ultrafast Intense Laser Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. V. I. P. 235–258.

D.V. Apeksimov, P.A. Babushkin, Yu.E. Geints, A.M. Kabanov, V.K. Oshlakov, E.E. Khoroshaeva.
Enhancement of the efficiency of generating radiation at shifted wavelengths by transforming a single-mode femtosecond laser beam into multimode one.

The results of complex studies of filamentation of high-power femtosecond laser pulses in experiments where a localized air layer with a randomly inhomogeneous refractive index (artificial turbulent layer) is created at the beginning of the propagation path are discussed. It is shown that the technique of forced chaotic modulation (power stochastization) of a radiation beam, which initiates inhomogeneities in the transverse energy structure of laser radiation, causes the splitting of an original beam into many high-intensity light sub-beams (channels) due to strong optical nonlinearity of the air medium. These channels are characterized by high intensity and stability along significant distances. The segmentation of the radiation by a turbulent layer multiplies increases the number of high-intensity optical channels, which arise during propagation of a 2.5-cm beam of a Ti:Sapphire laser with a wavelength of 800 nm and power of up to 150 GW in air. The characteristic intensity of these optical channels is high enough for two-photon absorption in a volume of colored (rhodamine or uranine with a concentration of 0.4 g/l) water aerosol microparticles, created at the end of a 100-m optical path, which, in turn, almost doubles the fluorescence signal from the particles recorded by the lidar scheme. In addition, it was determined that a localized turbulent layer created at the beginning of an optical path enables a multiple enhancement of the efficiency of low-frequency (THz) electromagnetic radiation generation from laser filamentation region.