

## Секция С

### УЛЬТРАКОРОТКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИМПУЛЬСЫ

УДК 530.182.551.510.42+535.621.33

#### **Влияние локальной неоднородности среды на трассе распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов на генерацию электромагнитного излучения на смещенных длинах волн**

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

*Институт оптики атмосферы СО РАН*

*634055, Томск, Россия, пл. Академика Зюева, 1, apeximov@iao.ru, bpa@iao.ru, ygeints@iao.ru, kam@iao.ru, ovk@iao.ru, atwp@iao.ru, bee@iao.ru*

Представлены результаты исследований филаментации фемтосекундных лазерных импульсов при наличии в начале трассы распространения слоя со случайно-неоднородным показателем преломления, формируемым потоком горячего воздуха, направленного перпендикулярно направлению распространения излучения. Показано, что данная методика принудительного инициирования неоднородностей в поперечной энергетической структуре лазерного пучка приводит к формированию высокоинтенсивных световых субпучков, которые, в отличие от слабоинтенсивных узких пучков, не «расплываются» на коротких дистанциях за счет большой дифракционной расходимости, а сохраняют малый диаметр, а следовательно и интенсивность на протяженных трассах, за счет реализации керровской нелинейности в среде. Такое предварительное сегментирование мощного лазерного излучения приводит к кратному увеличению количества высокоинтенсивных слабодиффундирующих световых каналов, характерная интенсивность которых достаточна для реализации двухфотонного поглощения в объеме частиц аэрозоля, что в свою очередь существенно увеличивает величину регистрируемого по лидарной схеме сигнала флуоресценции. Кроме того показано, что сформированный в начале оптической трассы турбулентный слой позволяет повысить эффективность генерации из области филаментации ТГц-излучения до 1,5 раз за счет формирования множества хаотично расположенных филаментов, являющихся результатом случайных возмущений энергетического профиля оптического пучка.

*Ключевые слова:* фемтосекундный лазерный импульс, турбулентность, лазерная филаментация, плазма, аэрозоль, двухфотонно-возбужденная флуоресценция, угловое распределение, генерация ТГц-излучения; femtosecond laser radiation, filament, turbulence, aerosol.

#### **Введение**

Задача дистанционного лазерного возбуждения свечения информативных спектральных линий и полос для диагностики среды [1], либо генерации электромагнитного излучения в вне оптического диапазона, например в терагерцовом [2], являются актуальными во многих прикладных аспектах. В обоих случаях одной из важных задач является повышение эффективности преобразования энергии лазерного излучения. Работа посвящена решению именно этой задачи. 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. 1а. Проведенные нами ранее экспериментальные исследования по влиянию турбулентности на филаментацию лазерного пучка [3] 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 высокоинтенсивных световых каналов каждой из этих неоднородностей. Для исследования генерации терагерцового излучения из области филаментации фемтосекундных лазерных импульсов была использована схема, представленная на рис. 1б. В качестве источника лазерного излучения также использовался лазерный источник Ti:Sapphire (1). Фемтосекундные импульсы фокусировались сферическим зеркалом (3) с радиусом кривизны 200 см в лабораторный воздух, где испытывали филаментацию с образованием плазменной области, которая служила источником ТГц излучения. Для усиления ТГц гене-

рации в область геометрического фокуса, т.е. в конец области филаментации, подавалось статическое электрическое поле с напряжением до 5 кВ. Использовались сферические электроды (5), удаленные друг от друга на расстояние 6 мм. На рис. 2 представлены снимки поперечной структуры лазерного пучка без турбулентного экрана (а) и при его установке (б).

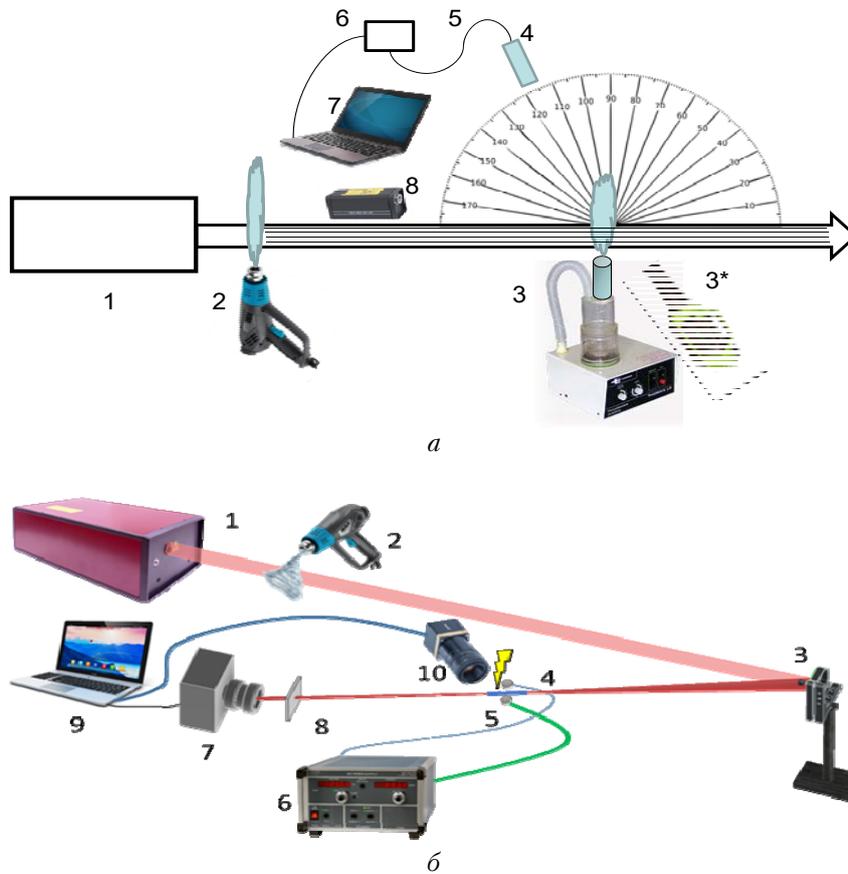


Рис. 1. Схема экспериментов по генерации свечения аэрозоля (а) и генерации ТГц излучения из области филаментации (б). 1 – лазер Ti:Sapphire ( $\lambda = 800$  нм,  $t = 60$  фс,  $E = 40$  мДж,  $\nu = 10$  Гц;  $d = 2,5$  см), 2 – промышленный фен TESLA TH-2200, 3 – генератор аэрозоля Вулкан-3, 3\* – генератор аэрозоля GoldFogger SF-720, 4 – коллиматорная насадка световода, 5 – световод, 6 – спектрометр Maya-2000Pro, 7 – ноутбук, 8 – гелий-неоновый лазер «jds uniphase» 4 мВт (а); 1 – лазер Ti:Sapphire ( $\lambda = 800$  нм,  $t = 60$  фс,  $E = 40$  мДж,  $\nu = 10$  Гц;  $d = 2,5$  см), 2 – промышленный фен TESLA TH-2200, 3 – фокусирующее зеркало ( $f = 100$  см – числовая апертура  $NA = 0,025$ ), 3\* –  $f = 150$  см ( $NA = 0,0167$ ), 4 – область филаментации, 5 – электроды, 6 – источник питания высокого напряжения, 7 – датчик ТГц излучения (ячейка Голея) Tудex-1D, 8 – набор фильтрующих элементов, 9 – ноутбук, 10 – CCD-камера «Andor Clara» (1392\*1040 пикселей) (б)

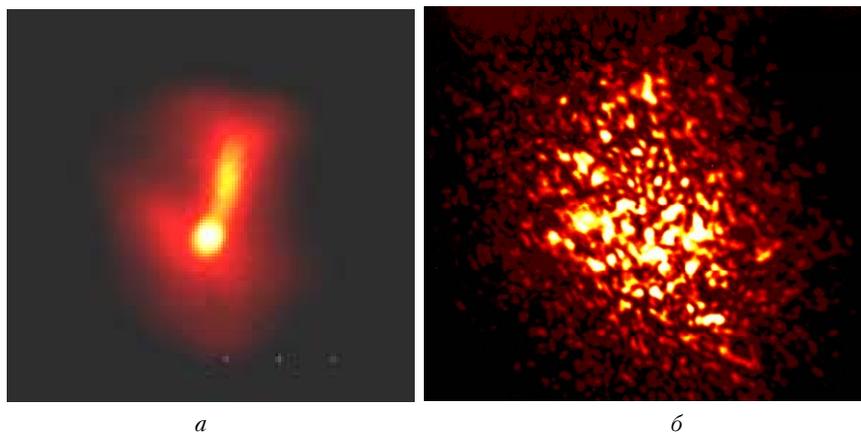


Рис. 2. Поперечная энергетическая структура лазерного пучка без турбулентного экрана (а) и с ним (б)

Для реализации данного механизма в схеме предусмотрен генератор неоднородности показателя преломления с переменной температурой нагревательного элемента (2). В наших экспериментах генератор (2) устанавливался на расстоянии 10 см от пучка, толщина турбулентного слоя составляла 2 см. На рис. 3а

представлен график увеличения количества интенсивных каналов в лазерном пучке в зависимости от температуры нагревательного элемента для двух энергий фемтосекундного импульса. Видно, что обе кривые на графике выходят на уровень насыщения при температуре нагревателя  $> 400$  °С, что соответствует температуре воздуха в пучке  $\sim 160$  °С. При этом важно отметить, что включение турбулентного экрана приводит более чем к 10-кратному увеличению количества интенсивных каналов в пучке. Для генерации аэрозоля использовались элементы (3) и (3\*) схемы на рис. 1, а. Распределение частиц по размерам, измеренное датчиком OPC-N3, а также обработанное с использованием программного обеспечения цифрового микроскопа «Микмед-6 ЛОМО», представлено на рис. 3, б.

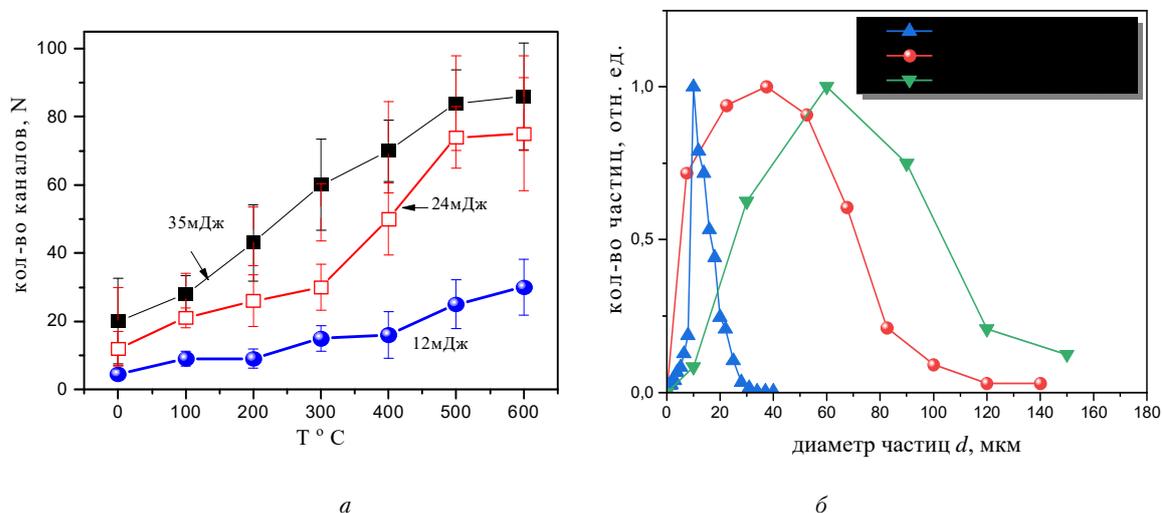


Рис. 3. Зависимость количества интенсивных каналов в пучке от температуры нагревательного элемента (а); распределение частиц по размерам для генератора Вулкан-3 (кривая 1) и генератора GoldFogger (кривые 2, 3) (б)

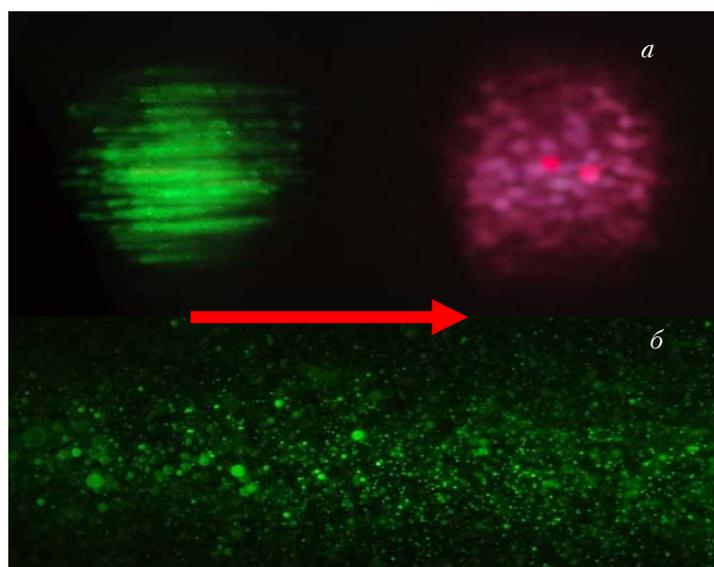


Рис. 4. Снимки свечения мелкодисперсного (а) и крупнодисперсного аэрозоля (б) в поле лазерного импульса. Стрелка – направление распространения излучения

На снимке рис. 4, а слева видно зеленое свечение аэрозоля с красителем при облучении излучением ближнего ИК диапазона, справа – свечение экрана, расположенного за аэрозольным слоем. Видно, что двухфотонная флуоресценция аэрозоля осуществляется в сформированных в сечении пучка интенсивных каналах. Красный цвет свечения на экране обусловлен керровским уширением спектра импульса с  $\lambda = 800$  нм в высокоинтенсивных каналах в видимую область. На рис. 5 представлены спектры свечения аэрозоля для случаев с турбулентным экраном и без него. Видно, что постановка турбулентного слоя на пути фемтосекундного излучения, что вызывает пространственное структурирование мощного пучка, приводит к увеличению интенсивности флуоресценции капелек. Это связано с тем, что структурированное излучение создает лучшее заполнение области 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. Степень повышения нелинейной эмиссии аэрозольных частиц за счет турбулентности в лазерном пучке (в центре полосы флуоресценции уранина 520 нм) составляет при-

мерно 20% для мелкодисперсного аэрозоля и 30% для более крупных частиц. Это обстоятельство открывает перспективы к повышению чувствительности и селективности методов определения малых концентраций веществ по методике фемтосекундной флуоресцентной спектроскопии при использовании специальным образом структурированного лазерного излучения. Результаты измерений углового распределения флуоресценции подкрашенных водных капель показаны на рис. 5, б.

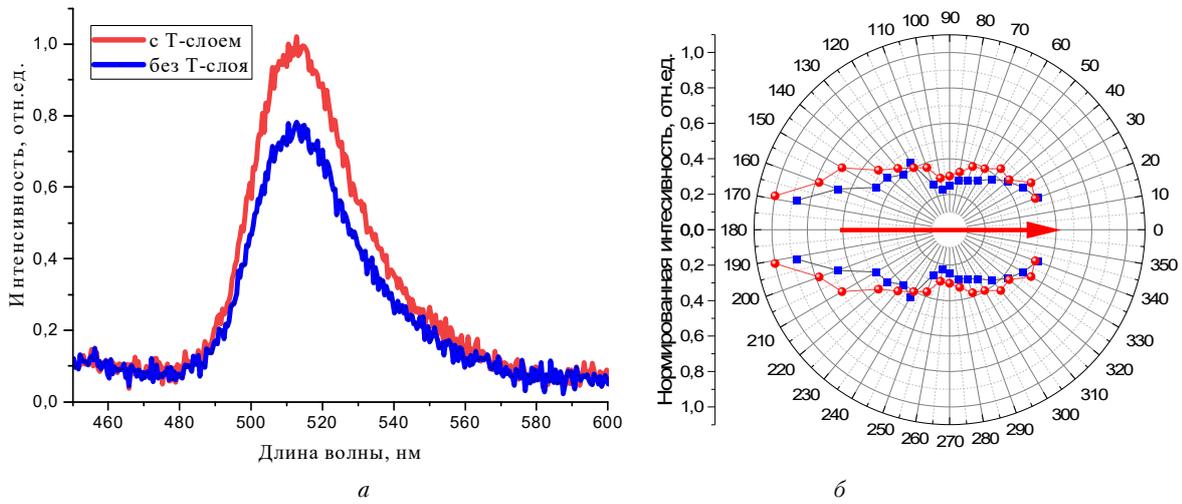


Рис. 5. Спектры флуоресценции водного аэрозоля с уранином с Т-слоем и без него (мелкодисперсный аэрозоль см. рис. 4, а) (а); угловая диаграмма флуоресценции водного аэрозоля в поле фемтосекундного излучения для мелкодисперсного аэрозоля без турбулентного слоя (квадраты) и с Т-слоем (круглые точки),  $T = 200^{\circ}\text{C}$  (б)

Видно, что угловая диаграмма в целом имеет квазидипольную форму с выраженной асимметрией в направлениях вперед-назад. Максимум эмиссии наблюдается в диапазоне углов примерно 160–170 градусов относительно направления воздействия фемтосекундного импульса. Измеренная форма распределения характерна как для мелкодисперсного аэрозоля, так и для и крупнодисперсного. Степень асимметрии вперед-назад достигает двух раз по интенсивности сигнала флуоресценции 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 интенсивностей в поперечном сечении пучка (см. рис. 2, а, б), что инициирует формирование стохастической множественной филаментации на этих неоднородностях. Данное обстоятельство позволяет предположить, что область филаментации сфокусированного лазерного пучка, при наличии турбулентного слоя (Т-слоя), существенно изменится, что должно отразиться на генерации электромагнитного излучения в терагерцовой области из плазменного филамента. На рис. 6, а представлена зависимость амплитуды ТГц сигнала от энергии лазерного импульса для случаев без Т-слоя и с Т-слоем. Видно, что «включение» экрана с неоднородным показателем преломления среды приводит к увеличению эффективности генерации ТГц излучения из плазмы филамента на ~30–40%. Данное увеличение можно связать с увеличением количества филаментов, что подтверждают снимки области филаментации, а также сравнение с результатами, полученными в [4], представленными на рис. 6, б.

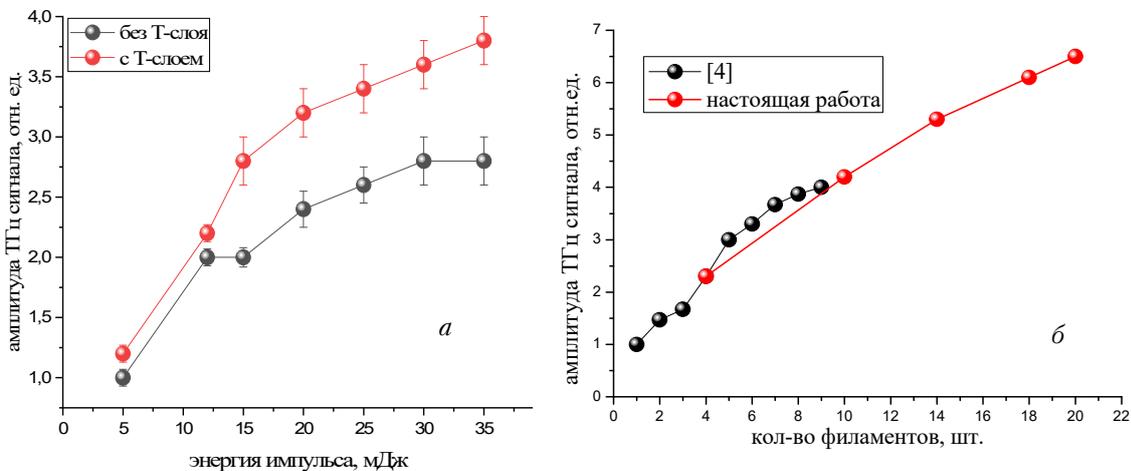


Рис. 6. Зависимость амплитуды терагерцового сигнала от энергии лазерного импульса без Т-слоя и с Т-слоем (нормировка на минимум ТГц сигнала) (а) и зависимость амплитуды терагерцового сигнала от количества филаментов (б)

Таким образом, проведенные нами исследования показали, что предварительное сегментирование мощного лазерного излучения за счет прохождения им слоя со случайно-неоднородным показателем преломления в форме нагретой струи воздуха, приводит за счет развития мелкомасштабной самофокусировки к формированию в пучке множества высокоинтенсивных слаборасходящихся световых каналов (постфиламентов). Характерная интенсивность этих постфиламентов оказывается достаточной для реализации двухфотонного поглощения в объеме частиц аэрозоля, что в свою очередь существенно увеличивает (в 1,8 раза) величину регистрируемого по лидарной схеме сигнала флуоресценции. Кроме того показано, что эффективность генерации ТГц сигнала лазерными филаментами может быть повышена приблизительно в 1.5 раза, если на пути оптического пучка разместить тонкий слой нагретого воздуха, который вносит случайно-неоднородные возмущения в фазу оптического поля и инициирует стохастическую филаментацию силового пучка.

## Список литературы

1. *Daigle J.-F., M'ejean G., Liu W., Th'Eberge 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 // *Applied Physics B*. 87. 2007. P. 749–754.
2. *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 // *EPL* 2019. V. 126. P. 24001. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/126/24001>.
3. *Apeksimov D., Bulygin A., Geints Yu., Kabanov A., Khoroshaeva E., Petrov A.* Statistical parameters of femtosecond laser pulse post-filament propagation on 65m air path with localized optical turbulence // *Journal of the Optical Society of America B*. 2022. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.473298>.
4. *Bai K., Gou Y., Peng X.-Y.* Terahertz beam array generated by focusing two-color-laser pulses into air with a microlens array // *AIP Advances*. 2022. V. 12. P. 095113. DOI: 10.1063/5.0098771.

*D.V. Apeksimov, P.A. Babushkin, Yu.E. Geints, A.M. Kabanov, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.E. Khoroshaeva.* **The effect of local heterogeneities of the medium along the propagation path of high power femtosecond laser pulses on the generation of electromagnetic radiation at shifted wavelengths.**

The report presents the results of studies of filamentation of femtosecond laser pulses in the presence at the beginning of the propagation path of a layer with a randomly inhomogeneous refractive index formed by a stream of hot air directed perpendicular to the direction of radiation propagation. It is shown that this technique of forced initiation of inhomogeneities in the transverse energy structure of a laser beam leads to the formation of high-intensity light sub-beams, which, unlike low-intensity narrow beams, are not blurring at short distances due to the large diffraction divergence, while maintaining a small diameter and, consequently, intensity over long distances due to the implementation of Kerr nonlinearity in the medium. Such preliminary segmentation of high-power laser radiation leads to a multiple increase in the number of high-intensity slightly divergent light channels, the characteristic intensity of which is sufficient to realize two-photon absorption in the volume of aerosol particles, which in turn significantly increases the magnitude of the fluorescence signal detected by the lidar circuit. In addition, it is shown that the turbulent layer formed at the beginning of the optical path makes it possible to increase the efficiency of THz radiation generation from the filamentation region by up to 1.5 times due to the formation of a multitude of randomly arranged filaments resulting from random perturbations of the energy profile of the optical beam.