

# Управление угловой расходимостью терагерцового излучения, генерируемого при одноцветной филаментации, с помощью фазовых оптических элементов

Д. В. Пушкарев<sup>+</sup>, Г. Э. Ризаев<sup>+</sup>, О. Г. Косарева<sup>+,\*</sup>, Л. В. Селезнев<sup>+,1)</sup>

<sup>+</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

<sup>\*</sup> Физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 5 сентября 2023 г.

После переработки 7 сентября 2023 г.

Принята к публикации 7 сентября 2023 г.

Приводятся экспериментально полученные двумерные распределения терагерцового излучения, генерация которого осуществляется одним и четырьмя филаментами, формируемыми фазовыми оптическими элементами. Продемонстрировано, что применение фазовой маски примерно в полтора раза уменьшает углы распространения терагерцового пучка, что обусловлено интерференцией терагерцового излучения от четырех источников. Применение решетки Дамманна эти углы несколько увеличивает.

DOI: 10.31857/S1234567823190059, EDN: xsyptw

**1. Введение.** В течение последних двух десятилетий задачи генерации и детектирования излучения терагерцового диапазона ( $\sim 0.1\text{--}10$  ТГц) остаются одной из весьма актуальных тем в лазерной физике и нелинейной оптике [1–3]. Одним из источников терагерцового излучения, предложенных за эти годы, является плазма, формирующаяся при филаментации фемтосекундного лазерного излучения в воздухе [4, 5]. В случае одноцветной филаментации диаграмма направленности такого источника представляет собой полый конус, угол раствора которого определяется соотношением  $\theta \sim \sqrt{\lambda_{\text{THz}}/L}$ , где  $\lambda_{\text{THz}}$  – длина волны терагерцового излучения,  $L$  – длина плазменного канала филамента [5–7]. В некоторых случаях распределение терагерцового излучения в плоскости, перпендикулярной направлению распространения лазерного импульса, может иметь сильную модуляцию [8], либо представлять собой два максимума, расположенных на оси, перпендикулярной плоскости поляризации лазерного излучения [9–11], при этом на оси распространения излучения также наблюдается минимум терагерцового сигнала. Отмечалось, что эффективность генерации терагерцового излучения в одноцветном филаменте существенно возрастает при увеличении числовой апертуры пучка (жесткости фокусировки), при этом угол раствора конуса возрастает и может достигать  $120^\circ$ , и при угле  $90^\circ$  от оси наблюдается значимый ненулевой терагерцовый сигнал [12]. Очевидно, что диагностировать и рабо-

тать со столь расходящимся терагерцовым пучком весьма затруднительно. Поэтому появился ряд работ, где авторы попытались уменьшить расходимость терагерцового пучка. Например, в работе [13] с помощью численного моделирования было показано, что интерференция сигналов от нескольких филаментов, формирующихся со сдвигом по времени, может дать один узкий максимум, направленный под углом к оси. Однако внесение необходимых временных сдвигов для большого массива филаментов представляется довольно сложной экспериментальной задачей. В более поздней работе [14] также с помощью компьютерного моделирования было показано, что конус, в который распространяется терагерцовое излучение, можно многократно сузить, если создать регулярный массив филаментов с периодом, равным длине волны терагерцового излучения, повысив тем самым яркость терагерцового источника.

Цель нашей работы – экспериментально продемонстрировать возможность изменения диаграммы направленности терагерцового излучения, генерируемого при одноцветной филаментации, путем создания упорядоченного массива филаментов с помощью дифракционных оптических элементов.

**2. Методика эксперимента.** В экспериментах использовалось излучение лазерной системы на Ti:Sa, генерирующей импульсы длительностью 100 фс с центральной длиной волны 750 нм, диаметр пучка составлял 8 мм по уровню  $1/e$ . Поляризация лазерного излучения лежала в горизонтальной плоскости. После компрессора фазовая маска делила ла-

<sup>1)</sup>e-mail: seleznev@lebedev.ru

зерный пучок на четыре равных части с фазой соседних частей, смещенной на  $\pi$ . Такая маска формирует в дальней зоне эрмит-гауссову моду  $TEM_{11}$  [15]. При мощности в каждом из максимумов, в несколько раз превышающих критическую мощность самофокусировки, такая маска создает массив из 4 филаментов, не сливающихся друг с другом даже вблизи фокуса при использовании дополнительной фокусировки [16]. В экспериментах также применялась решетка Дамманна, которая, как и фазовая маска, в дальней зоне образовывала четыре равноинтенсивных максимума в вершинах квадрата. Как было продемонстрировано в работе [17], этот фазовый элемент также создает структуру из 4 филаментов, стабильную в широком диапазоне мощности лазерного импульса. Кроме того, проводились эксперименты с гауссовым пучком, т.е. без фазовых элементов, который образовывал одиночный максимум. Энергия лазерного импульса в гауссовом пучке составляла 1.5 мДж, а в случае наличия фазовых элементов – 6 мДж. Таким образом на каждый максимум приходилось 1.5 мДж, что соответствовало примерно 5-кратному превышению над критической мощностью самофокусировки. После прохождения фазовых элементов (или без них) лазерный пучок фокусировался сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 1 или 0.5 м. При фокусном расстоянии 0.5 м использование фазовой маски приводило к возникновению четырех филаментов с расстоянием между ними в фокальной плоскости около 50 мкм, для решетки Дамманна соответствующее расстояние составляло около 250 мкм. Применение зеркала с фокусным расстоянием 1 м приводило к двукратному увеличению расстояния между филаментами. Расстояние определялось по боковому изображению плазменных каналов, полученному с помощью объектива и ПЗС матрицы. Образующаяся в результате самофокусировки и ионизации воздуха плазма являлась источником терагерцового излучения. Терагерцовое излучение регистрировалось сверхпроводниковым NbN болометром на горячих электронах (“Сконтел”). Перед болометром располагался узкополосный фильтр с максимумом пропускания около 85 % на частоте 1 ТГц со спектральной шириной 0.17 ТГц. Применение подобного фильтра было необходимо, поскольку различные терагерцовые частоты распространяются под разными углами [18], а в случае регистрации широкополосного сигнала изменения угла распространения могут “замываться” [7]. В экспериментах применялась оптическая схема, аналогичная [11], позволяющая получать двумерное распределение терагерцового излучения. Болометр находился на расстоянии

около 40 см от положения фокуса сферического зеркала. Горизонтальное распределение терагерцового излучения измерялось с помощью поворота болометра в горизонтальной плоскости вокруг точки фокуса. Затем ось распространения лазерного излучения поворачивалась путем перемещения и юстировки сферического зеркала в вертикальной плоскости. Положение точки фокуса при этом фиксировалось. Для каждого угла наклона оптической оси в эксперименте измерялось распределение терагерцового излучения в горизонтальной плоскости. В результате пошагово получалось двумерное (растровое) распределение терагерцового излучения.

**3. Результаты эксперимента.** В экспериментах при фокусировке лазерного излучения зеркалом с фокусным расстоянием 1 м были получены двумерные распределения терагерцового излучения, генерируемого в плазме при одноцветной филаментации гауссового пучка, гауссового пучка с применением фазовой маски и решетки Дамманна (рис. а–с, соответственно). Как и в более ранних работах [9–11] при филаментации гауссового пучка структура терагерцового пучка на частоте 1 ТГц представляла из себя два ярко выраженных максимума, лежащих на оси, перпендикулярной поляризации лазерного излучения (рис. 1а).

Применение фазовых элементов (фазовой маски и решетки Дамманна) не приводило к изменению характера распределения терагерцового излучения: также наблюдались два максимума на вертикальной оси. Однако применение фазовой маски существенно (примерно в полтора раза) уменьшало углы распространения терагерцового излучения (рис. 1б). Повидимому, это связано с интерференцией терагерцового излучения, что численно было показано в работе [14]. В случае применения решетки Дамманна углы распространения терагерцового излучения наоборот несколько увеличивались (рис. 1с). В этом случае после решетки пучок разбивается не на четыре, а на множество суб-пучков, которые в дальней зоне формируют четыре локальных максимума. Таким образом, эффективная числовая апертура соответствует исходному гауссову пучку (суб-пучки сходятся из различных областей исходного пучка). Однако при фокусировке и распространении гауссового пучка происходит набег фазы за счет керровской нелинейности и самофокусировка. Тогда как каждый из множества суб-пучков имеет относительно небольшую мощность, и керровская нелинейность начинает действовать, только когда суб-пучки уже в значительной мере сложились в пространстве, т.е. вблизи перетяжки [17]. За счет такого сложения само-

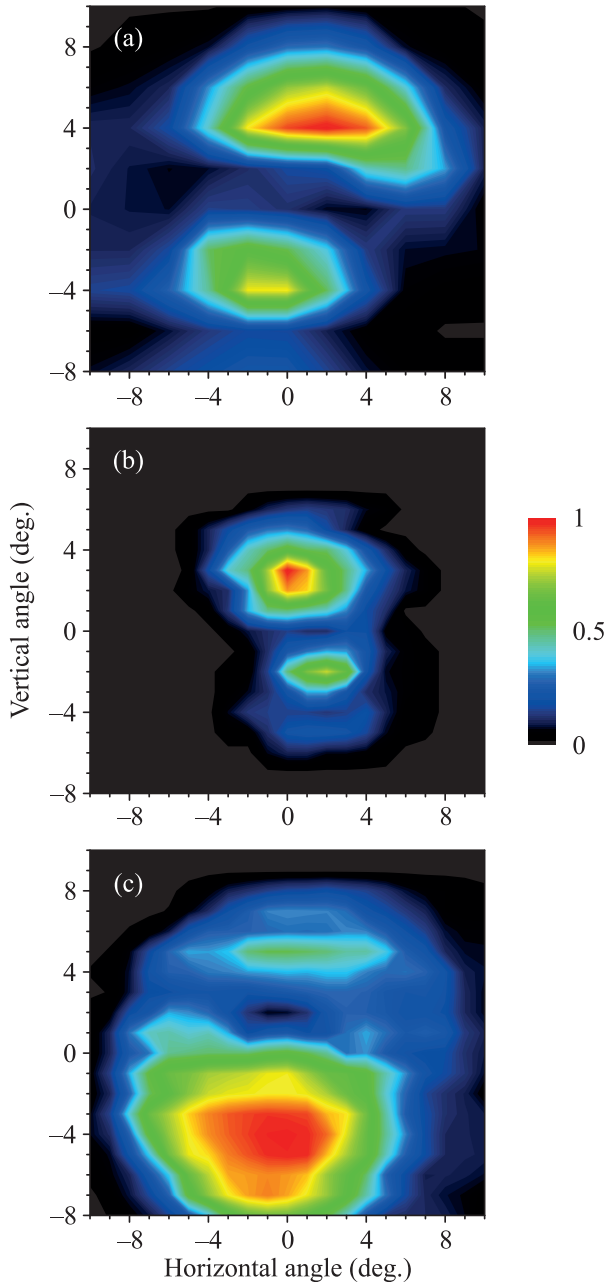


Рис. 1. (Цветной онлайн) Нормированные двумерные угловые распределения терагерцового излучения на частоте 1 ТГц для гауссова пучка (а), в случае наличия фазовой маски (b) и решетки Дамманна (с) при фокусировке зеркалом с фокусным расстоянием 1 м

фокусировка не оказывает значительного действия на распространение пучка после решетки Дамманна, что выливается в значительное сокращение длины плазменных каналов и, как следствие, увеличение углов распространения генерируемого терагерцового излучения [4, 7, 12]. Следует отметить, что с фазовыми элементами амплитуда терагерцового сигнала была несколько выше, что может объясняться четы-

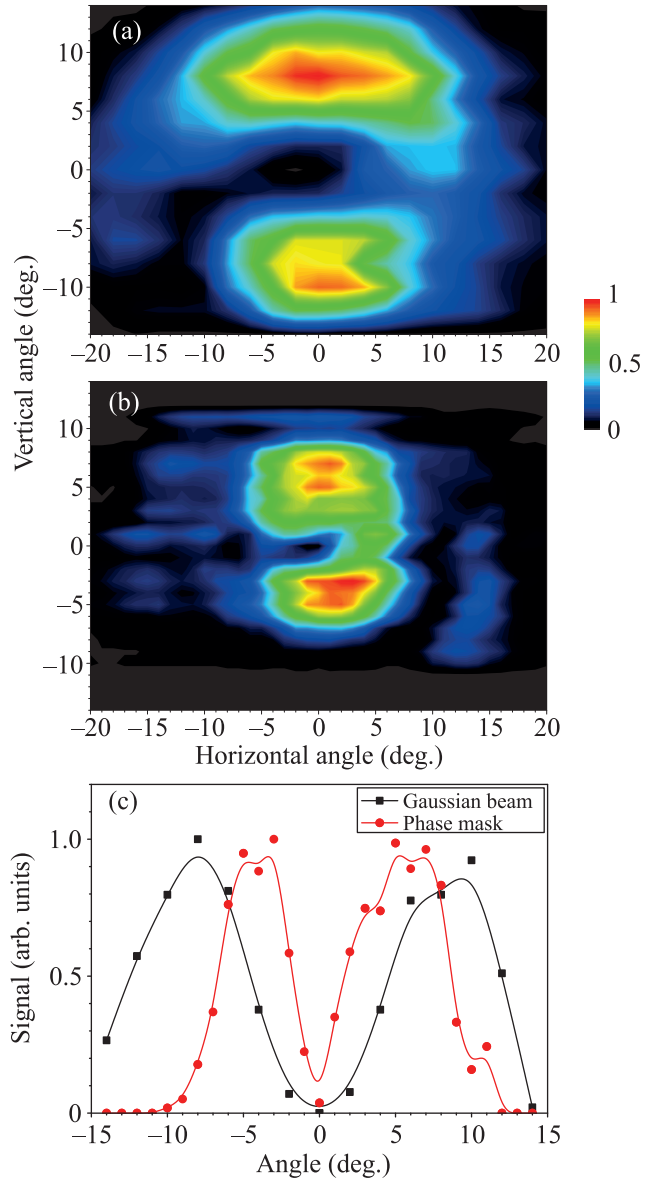


Рис. 2. (Цветной онлайн) Нормированные двумерные угловые распределения терагерцового излучения на частоте 1 ТГц для гауссова пучка (а), в случае наличия фазовой маски (b) и вертикальные сечения приведенных распределений (с) при фокусировке зеркалом с фокусным расстоянием 0.5 м

рехкратным увеличением энергии исходного лазерного импульса.

Эксперименты, проведенные со сферическим зеркалом с меньшим фокусным расстоянием (0.5 м) показали схожие результаты (рис. 2) – применение фазовой маски за счет создания четырех источников и их интерференции позволило существенно уменьшить углы распространения терагерцового излучения (рис. 2b) по сравнению с одиночным филаментом (рис. 2a). Кроме того, на рис. 2b видны слабые

(не намного выше шумов) дополнительные локальные максимумы, предсказанные в [14]. На рисунке 2с показаны вертикальные сечения изображенных выше терагерцовых пучков. Применение фазовой маски позволило уменьшить углы распространения терагерцового пучка почти в полтора раза.

**4. Заключение.** Экспериментально были получены двумерные распределения терагерцового излучения на частоте 1 ТГц, генерируемого одним и четырьмя филаментами. Терагерцовый пучок имеет вид двух максимумов, расположенных на оси, перпендикулярной поляризации лазерного пучка. Четыре филамента создавались с помощью фазовой маски и решетки Дамманна. При генерации терагерцового излучения четырьмя плазменными каналами, созданными фазовой маской, за счет интерференции терагерцового излучения от нескольких источников углы распространения терагерцового пучка уменьшаются примерно в полтора раза. Применение решетки Дамманна эти углы наоборот несколько увеличивает, что, по-видимому, связано с значительным уменьшением длины филаментов в этом режиме по сравнению с режимом с использованием фазовой маски и гауссовым пучком без дополнительной фазовой модуляции.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда (21-49-00023), и грантом National Natural Science Foundation of China (12061131010).

Авторы выражают признательность А. Б. Савельеву (МГУ) за предоставленные фазовые оптические элементы.

1. X.-C. Zhang and J. Xu, *Introduction to THz wave photonics*, Springer, N.Y. (2010), v. 29.
2. X.C. Zhang, A. Shkurinov, and Y. Zhang, *Nat. Photonics* **11**(1), 16 (2017).
3. J. A. Fülöp, S. Tzortzakis, and T. Kampfrath, *Adv. Opt. Mater.* **8**(3), 1900681 (2020).
4. C. D'Amico, A. Houard, M. Franco, B. Prade, A. Mysyrowicz, A. Couairon, and V.T. Tikhonchuk, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 235002 (2007).
5. C. D'Amico, A. Houard, S. Akturk, Y. Liu, J. Le Bloas,

- M. Franco, B. Prade, A. Couairon, V. Tikhonchuk, and A. Mysyrowicz, *New J. Phys.* **10**(1), 013015 (2008).
6. Н. А. Панов, О. Г. Косарева, В. А. Андреева, А. Б. Савельев, Д. С. Урюпина, Р. В. Волков, В. А. Макаров, А. П. Шкуринов, *Письма в ЖЭТФ* **93**, 715 (2011).
7. G. E. Rizaev, L. V. Seleznev, D. V. Mokrousova, D. V. Pushkarev, and A. A. Ionin, *Opt. Lett.* **47**(22), 5917 (2022).
8. N. A. Zharova, V. A. Mironov, and D. A. Fadeev, *Phys. Rev. E* **82**(5), 056409 (2010).
9. Р. А. Ахмеджанов, И. Е. Иляков, В. А. Миронов, Е. В. Суворов, Д. А. Фадеев, Б. В. Шишкин, *Известия высших учебных заведений. Радиофизика* **52**(7), 536 (2009).
10. E. Suvorov, R. Akhmedzhanov, D. Fadeev, I. Pyakov, V. Mironov, and B. Shishkin, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **32**, 1243 (2011).
11. Г. Э. Ризаев, Д. В. Мокроусова, Д. В. Пушкарев, Д. Е. Шипило, И. А. Николаева, Н. А. Панов, Л. В. Селезнев, О. Г. Косарева, А. А. Ионин, *Письма в ЖЭТФ* **115**(11), 699 (2022).
12. A. P. Shkurinov, A. S. Sinko, P. M. Solyankin, A. V. Borodin, M. N. Esaulkov, V. V. Annenkov, I. A. Kotelnikov, I. V. Timofeev, and X.-C. Zhang, *Phys. Rev. E* **95**, 043209 (2017).
13. S. I. Mitryukovskiy, Y. Liu, B. Prade, A. Houard, and A. Mysyrowicz, *Appl. Phys. Lett.* **102**(22), 221107 (2013).
14. N. Panov, V. Andreeva, O. Kosareva, A. Shkurinov, V. Makarov, L. Berg'e, and S. Chin, *Laser Phys. Lett.* **11**(12), 125401 (2014).
15. А. С. Ларькин, Д. В. Пушкарев, С. А. Дегтярев, С. Н. Хонина, А. Б. Савельев, *Квантовая электроника* **46**(8), 733 (2016).
16. D. Pushkarev, D. Shipilo, A. Lar'kin, E. Mitina, N. Panov, D. Uryupina, A. Ushakov, R. Volkov, S. Karpeev, S. Khonina, O. Kosareva, and A. Savel'ev, *Laser Physics Lett.* **15**(4), 045402 (2018).
17. D. Pushkarev, A. Lar'kin, E. Mitina, N. Zhidovtsev, D. Uryupina, R. Volkov, S. Karpeev, S. Khonina, A. Karabutov, Y. E. Geints, O. G. Kosareva, and A. B. Savelev, *Opt. Express* **29**(21), 34189 (2021).
18. Г. Э. Ризаев, Д. В. Мокроусова, Д. В. Пушкарев, Л. В. Селезнев, А. А. Ионин, *Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук* **49**(7), 3 (2022).