

## Нарушение осевой симметрии терагерцового излучения плазмы одноцветного филамента

Г. Э. Ризаев<sup>1)</sup>, Д. В. Мокроусова<sup>+</sup>, Д. В. Пушкарёв<sup>+</sup>, Д. Е. Шипило<sup>+</sup>, И. А. Николаева<sup>++</sup>, Н. А. Панов<sup>++</sup>,  
Л. В. Селезнев<sup>+</sup>, О. Г. Косарева<sup>++</sup>, А. А. Ионин<sup>+</sup>

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

<sup>++</sup> Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 14 апреля 2022 г.

После переработки 22 апреля 2022 г.

Принята к публикации 25 апреля 2022 г.

Измерены двумерные диаграммы направленности терагерцового излучения, генерируемого в плазме лазерного филамента, в различных диапазонах терагерцового спектра. Показано, что в низкочастотной области 0.1–0.5 ТГц излучение распространяется в конус с минимумом на оси. На больших частотах ~1 ТГц диаграмма направленности терагерцового излучения существенно зависит от поляризации лазерного импульса. Так, при линейной поляризации осевая симметрия картины нарушается: излучение распространяется в два максимума, расположенных на оси, перпендикулярной направлению поляризации лазерного излучения, а в случае циркулярной поляризации осесимметричный характер распределения терагерцового излучения сохраняется.

DOI: 10.31857/S1234567822110040, EDN: ilgev

Терагерцовое излучение плазменных каналов [1], формирующихся при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов [2, 3] в воздухе, изучается с середины 1990-х гг. Во многих работах сообщалось, что терагерцовое излучение плазменных каналов одноцветного филамента распространяется в конус с минимумом на оси [4, 5]. В указанных экспериментальных исследованиях применялись существенно разные методики измерения: узкополосный гетеродинный детектор, чувствительный к частоте около 0.1 ТГц [4] и болометр с рабочим диапазоном частот от 0.1 до 3 ТГц [5]. Совершенно иначе выглядит угловое распределение терагерцового излучения, полученное в работах [6, 7], – оно представляет собой два максимума, расположенных на вертикальной оси при горизонтальной поляризации импульса накачки. Во многих работах по отдельности рассматривались и спектр терагерцового излучения [8], или его диаграмма направленности [4]. Однако угловое распределение отдельных спектральных компонент изучено сравнительно мало [9]. Поэтому целью нашей работы стало измерение разрешенных по спектру двумерных распределений терагерцового излучения.

Эксперименты проводились на титан-сапфировой лазерной системе с центральной длиной волны 740 нм (Авеста). Длительность импульсов составля-

ла 90 фс, диаметр лазерного пучка – 8 мм  $FWe^{-1}M$ . На выходе лазерной системы излучение имело горизонтальную поляризацию. Поворот плоскости поляризации осуществлялся с помощью полуволновой пластинки, преобразование поляризации в круговую (эллиптическую) – с использованием четвертьволновой пластинки. Для симметризации пучок проходил через диафрагму диаметром 6 мм, затем направлялся на сферическое зеркало с фокусным расстоянием 50 см, что соответствует числовой апертуре  $NA = 0.006$ . Энергия импульса после диафрагмы составляла 1.5 мДж. В области филаментации в воздухе формировался плазменный канал, являвшийся источником терагерцового излучения, которое регистрировалось сверхпроводниковым NbN болометром (Сконтел) с рабочим диапазоном от 0.1 до 6 ТГц. Перед входным окном болометра размещалась тефлоновая пластина толщиной 3 мм, отсекающая оптическое излучение, и узкополосные терагерцовые фильтры для регистрации сигнала в определенных спектральных диапазонах [9, 10].

Для регистрации двумерных угловых распределений терагерцового излучения ТГц независимо изменялись два угла (см. рис. 1). Горизонтальный угол  $NA$  варьировался вращением поворотного столика, на котором был установлен болометр В, в плоскости оптического стола вокруг оси, проходящей через фокус. Изменение вертикального угла  $VA$  до-

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

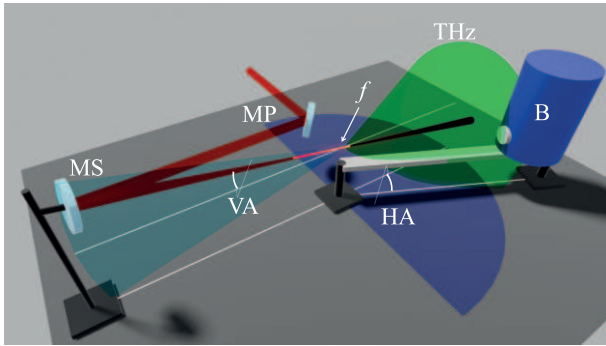


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема эксперимента. Красным показано распространение лазерного пучка, оранжевым – область филаментации. MP и MS – плоское поворотное и сферическое фокусирующее зеркала; HA и VA – горизонтальный и вертикальный углы; B – болометр; THz – терагерцовое излучение;  $f$  – положение геометрического фокуса. Белыми прямыми показаны оптическая ось лазерного пучка при нулевых углах HA и VA, ее проекция на оптический стол, а также проекция на оптический стол прямой, соединяющей фокус  $f$  и входное окно болометра

стигалось вращением оптической оси лазерного пучка вокруг фокуса: фокусирующее зеркало перемещалось по вертикальной оси, поворотное плоское зеркало MP и фокусирующее сферическое зеркало MS переюстировались, чтобы вернуть фокус  $f$  лазерного пучка в прежнее положение. Оптическая схема обеспечивала минимальный угол падения на сферическое зеркало в целях уменьшения наведенного им астигматизма.

До начала экспериментов по регистрации терагерцового излучения мы убедились, что в наших условиях при энергии импульса 1.5 мДж образуется одиночный плазменный канал. Для этого в области филаментации помещался кварцевый клин, изображение распределения плотности энергии лазерного пучка на котором с помощью линзы переносилось на ПЗС-матрицу. Поперечные профили снимались с шагом 1 см вдоль оси распространения пучка. На протяжении около 3 см перед геометрическим фокусом в поперечном сечении наблюдался яркий филамент, окруженный низкоинтенсивным резервуаром, что свидетельствовало о существовании одиночного плазменного канала.

В ходе экспериментов были получены угловые распределения терагерцового излучения на частотах 0.1, 0.3, 0.5, 1 ТГц. Так, на рис. 2 показано распределение терагерцового излучения на 0.3 ТГц. Измеренное распределение на частотах 0.1–0.5 ТГц имело кольцевую структуру, т.е. терагерцовое излучение распространялось в конус с минимумом на оси,

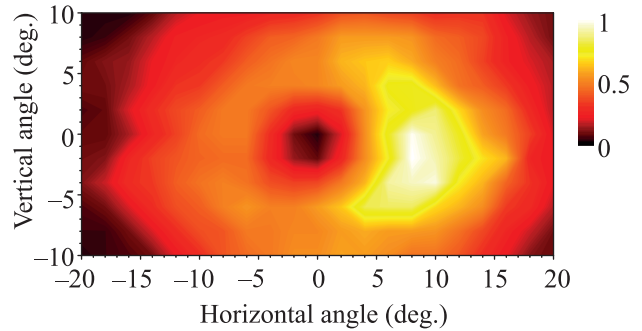


Рис. 2. (Цветной онлайн) Нормированное угловое распределение терагерцового излучения на частоте 0.3 ТГц

что полностью соответствует ранее наблюдавшейся картине [4, 5]. Несмотря на существование одиночного плазменного канала, распределение терагерцового излучения было неоднородно и обладало локальными минимумами и максимумами.

В отличие от низкочастотных компонент терагерцового излучения, в области 1 ТГц излучение имело два ярко выраженных максимума (рис. 3а), расположенных на вертикальной оси, что согласуется с результатами работ [6, 7]. Как и в этих работах, представленные на рис. 2 и 3а результаты получены при горизонтальной поляризации лазерного пучка. При повороте поляризации лазерного пучка на  $90^\circ$  распределение терагерцового излучения на частоте 1 ТГц поворачивается вслед за ней (ср. рис. 3а, б), а при эллиптической поляризации накачки (соотношение осей эллипса 0.6) приобретает кольцевую структуру (рис. 3с).

К настоящему времени разработан ряд моделей терагерцовой генерации одноцветным филаментом. Работы [11, 12], в которых нелинейным механизмом терагерцовой генерации полагались световое давление [11] либо пондеромоторная сила [12], предсказывают осесимметричное угловое распределение терагерцового излучения на всех частотах независимо от поляризации оптического импульса накачки. В моделировании [13], проведенном в условиях эксперимента [6, 7], удалось получить модулированную кольцевую структуру в двумерном распределении плотности энергии терагерцового излучения одноцветного филамента. Максимумы плотности энергии в [13] были расположены на прямой, перпендикулярной поляризации фемтосекундной накачки. Однако в численном моделировании [13] модуляция кольцевой структуры составляла всего  $\sim 20\%$ , тогда как провал между лепестками в работах [6, 7] и наших экспериментах на частотах  $\sim 1$  ТГц существенно глубже. Тем самым, современные модели генерации терагерцового

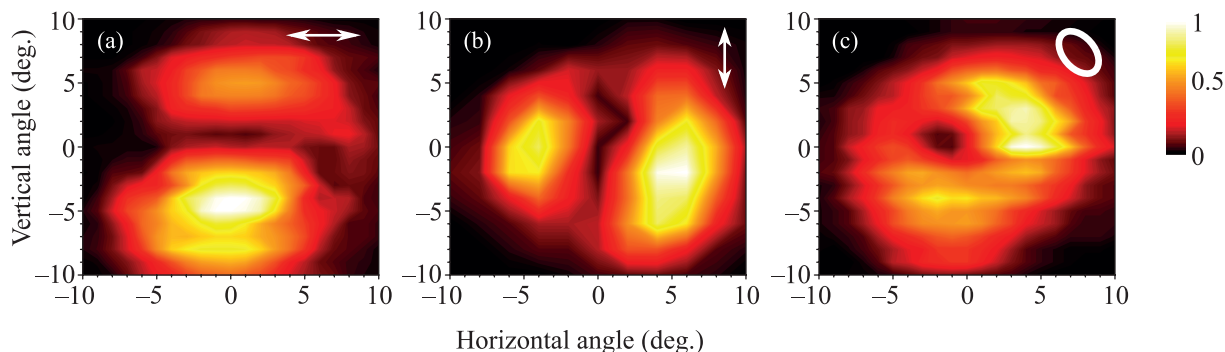


Рис. 3. (Цветной онлайн) Нормированное угловое распределение излучения на частоте 1 ТГц, полученное для горизонтальной (а), вертикальной (б) и эллиптической (с) поляризации лазерного пучка. Белым показана поляризация лазерного импульса

излучения одноцветным филаментом не воспроизводят зарегистрированные нами его двумерные угловые распределения.

Таким образом, в нашей работе были впервые экспериментально исследованы двумерные угловые распределения излучения в различных диапазонах терагерцового спектра. Показано, что характер распределений качественным образом меняется при переходе от низкочастотной части терагерцового спектра к высокочастотной. Если излучение с частотой 0.1–0.5 ТГц имеет коническую диаграмму направленности с минимумом на оси независимо от поляризации фемтосекундного импульса, то при переходе к частотам  $\sim 1$  ТГц в диаграмме направленности наблюдаются два ярко выраженных максимума на прямой, перпендикулярной плоскости поляризации линейно поляризованного лазерного излучения. При переходе к циркулярной поляризации излучение в дальней зоне распространяется в виде полого конуса, подобно наблюдавшемуся на более низких частотах.

Полученные нами результаты могут прояснить видимое несоответствие диаграмм направленности терагерцового излучения одноцветного филамента, зарегистрированных в работах [4] и [6]. В экспериментах [4] измерялись угловые распределения низкочастотной ( $\sim 0.1$  ТГц) компоненты электромагнитного излучения, и терагерцовое излучение имело коническую диаграмму направленности. В работе [6] регистрация осуществлялась без какой-либо спектральной селекции, однако независимые измерения спектра терагерцового излучения, приведенные в этой работе, показали, что он достигает максимума на частоте около 1 ТГц. Тем самым, диаграммы направленности (имеющие вид двух максимумов, расположенных на прямой, перпендикулярной поляризации оптической накачки) измерены в [6] для из-

лучения, спектр которого лежит в окрестности этой частоты. Рассмотренные выше два типа угловых распределений терагерцового излучения одноцветного филамента разумно соответствуют зарегистрированным в данной работе на низких и высоких частотах.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований # 20-02-00114. Работа Д. Е. Шпило поддержана стипендией Президента РФ молодым ученым и аспирантам (СП-3450.2022.2). Работа И. А. Николаевой поддержана стипендией Фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС” (21-2-10-55-1).

1. H. Hamster, A. Sullivan, S. Gordon, W. White, and R. W. Falcone, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 2725 (1993).
2. S. L. Chin, S. A. Hosseini, W. Liu, Q. Luo, F. Théberge, N. Aközbek, A. Becker, V. P. Kandidov, O. G. Kosareva, and H. Schroeder, *Can. J. of Phys.* **83**, 863 (2005).
3. A. Couairon and A. Mysyrowicz, *Phys. Rep.* **441**, 47 (2007).
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. 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**(4), 043209 (2017).
6. R. A. Akhmedzhanov, I. E. Piyakov, V. A. Mironov, E. V. Suvorov, D. A. Fadeev, and B. V. Shishkin, *Radiophys. Quantum Electron.* **52**(7), 482 (2009).
7. E. Suvorov, R. Akhmedzhanov, D. Fadeev, I. Piyakov, V. Mironov, and B. Shishkin, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **32**(10), 1243 (2011).
8. Y. Zhang, Y. Chen, C. Marceau, W. Liu, Z.-D. Sun, S. Xu, F. Théberge, M. Châteauneuf, J. Dubois, and S. L. Chin, *Opt. Express* **16**, 15483 (2008).

9. L. V. Seleznev, G. E. Rizaev, D. V. Pushkarev, A. V. Koribut, Y. A. Gerasimova, Y. V. Grudtsyn, S. A. Savinov, Y. A. Mityagin, D. V. Mokrousova, and A. A. Ionin, *JOSA B* **38**(7), 2168 (2021).
10. I. A. Nikolaeva, D. E. Shipilo, D. V. Pushkarev, G. E. Rizaev, D. V. Mokrousova, A. V. Koribut, Y. V. Grudtsyn, N. A. Panov, L. V. Seleznev, W. Liu, A. A. Ionin, and O. G. Kosareva, *Opt. Lett.* **46**(21), 5497 (2021).
11. C. D'Amico, A. Houard, S. Akturk, Y. Liu, J. Le Bloas, M. Franco, B. Prade, A. Couairon, V. T. Tikhonchuk, and A. Mysyrowicz, *New J. Phys.* **10**(1), 013015 (2008).
12. 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**(11), 715 (2011).
13. N. A. Zharova, V. A. Mironov, and D. A. Fadeev, *Phys. Rev. E* **82**(5), 056409 (2010).