

УДК 53.043; 537.563.5; 537.872.31

УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ФИЛАМЕНТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧИСЛОВЫХ АПЕРТУРАХ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Г. Э. Ризаев, Д. В. Мокроусова, Д. В. Пушкарев,
Л. В. Селезнев, А. А. Ионин

Измерены угловые направленности различных спектральных компонентов терагерцового излучения, генерируемого плазмой филамента в широком диапазоне числовых апертур лазерного пучка NA от 0.003 до 0.1. Показано, что углы распространения терагерцового излучения обратно пропорциональны корню терагерцовой частоты. Продемонстрировано, что рост числовой апертуры лазерного пучка ведет к увеличению углов распространения терагерцового излучения во всем диапазоне наблюдаемых частот.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, угловое распределение, филаментация, плазменный канал, спектральные компоненты.

При распространении мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе возможна их самофокусировка и филаментация, которая сопровождается возникновением плазменного канала [1]. Как было показано в работах [2, 3], газовая плазма может служить источником терагерцового излучения. Согласно существующей модели такое излучение распространяется в полый конус, причем угол раствора конуса определяется формулой $\Theta \sim (\nu L)^{-1/2}$, где ν – частота терагерцового излучения, а L – длина плазменного канала [4, 5]. В более поздней работе [6] было продемонстрировано, что угол раствора конуса в диапазоне исследуемых условий не зависит от длины плазменного канала. Это позволяет предположить, что угол определяется другими параметрами, которые изменяются при различной геометрической фокусировке (интенсивность, плотность плазмы и пр.), как и длина канала. Кроме того, в работах [4, 5] изменение числовой апертуры лазерного пучка осуществлялось применением линз с разным фокусным расстоянием, которые могли различаться по толщине, материалу и т. д. В такой

ситуации фазовый набег пучка в проходной оптике для разных числовых апертур мог быть неодинаков, что, в свою очередь, может влиять на филаментацию и генерацию терагерцового излучения. Поэтому целью данной работы было исследовать угловые направленности различных спектральных компонент терагерцового излучения, генерируемого в плазме филамента, при различных числовых апертурах лазерного пучка в условиях минимизации отличий фазового набега в проходной оптике. Помимо этого, была поставлена задача проверить достоверность приведенной выше формулы для зависимости угла раствора конуса от частоты терагерцового излучения.

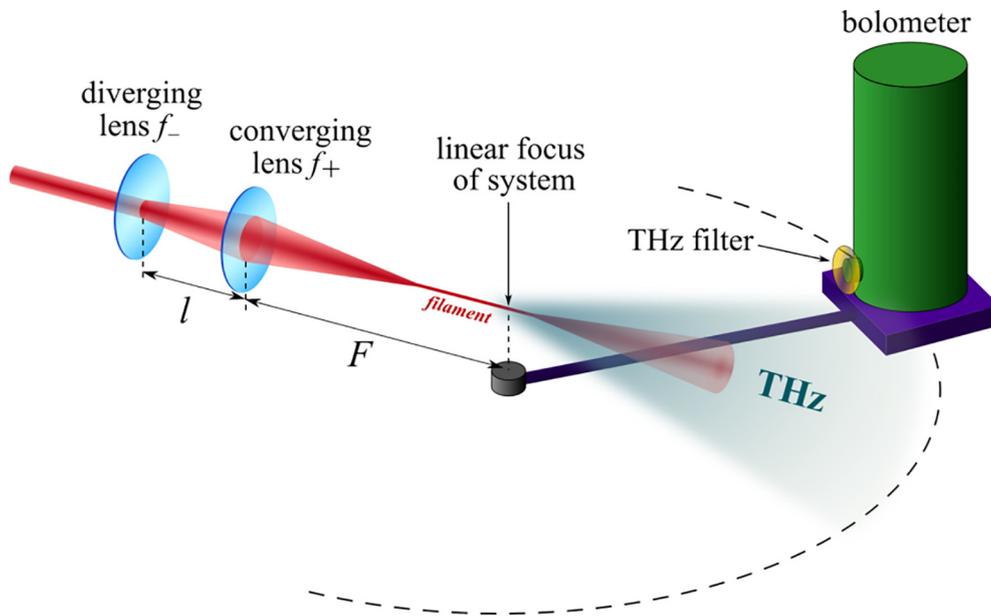


Рис. 1: Схема эксперимента.

В экспериментах лазерные импульсы генерировались в титан-сапфировой лазерной системе (Авеста) с центральной длиной волны 740 нм. Энергия импульсов составляла 1.5 мДж, длительность – 90 фс. Лазерный пучок проходил через диафрагму радиусом $a = 3$ мм, а затем фокусировался с помощью линзового телескопа (системы из двух линз), первая из которых обладает отрицательным фокусом (дефокусирующая линза) $f_- = -9$ см, а другая – положительным (фокусирующая линза) $f_+ = 9.5$ см (рис. 1). Изменение расстояния между линзами l позволяло менять числовую апертуру лазерного пучка. Несложно показать, что числовая апертура определяется следующей формулой: $NA = a(|f_-| - f_+ + l)|f_-|^{-1}f_+^{-1}$. Такой способ фокусировки позволял изменять числовую апертуру лазерного пучка в широком диапазоне $NA = 0.003 - 0.1$. В экспериментах расстояние от лазерной системы до положения геометрического фо-

куса сохранялось. При этом, поскольку фокусирующие элементы не изменяются, то фазовый набег в лазерном пучке будет постоянен. После прохождения телескопа лазерный импульс распространялся, испытывая самофокусировку и филаментацию. В плазме филамента генерировалось излучение терагерцового диапазона. Это излучение регистрировалось сверхпроводниковым болометром (Scontel). Болометр регистрировал излучение в области частот от 0.1 до 6 ТГц. Для выделения определенного спектрального диапазона применялись узкополосные терагерцовые фильтры [7], устанавливаемые непосредственно перед входной апертурой болометра. Для получения углового распределения терагерцового излучения болометр мог вращаться в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси, проходящей через геометрический фокус телескопа (рис. 1).

На рис. 2 показаны угловые распределения различных компонент терагерцового излучения, полученные при числовых апертурах 0.003 и 0.05. Для наглядности масштаб оси абсцисс на рис. 2(a) и 2(b) одинаков. Форма распределений на различных частотах имеет два максимума с минимумом на оси, т. е. терагерцовое излучение распространялось в конус. Стоит отметить, что в приведенных результатах конус не всегда имеет симметричную форму, что имеет под собой некоторые физические причины, выходящие, однако, за рамки данной работы. Угол раствора конуса тем выше, чем ниже частота спектральных компонентов: при жесткой фокусировке ($NA = 0.05$) сигнал на частоте 0.1 ТГц регистрировался вплоть до 65 градусов (рис. 2(a)). При увеличении числовой апертуры амплитуда регистрируемых болометром сигналов возрастала, что позволило зарегистрировать сигналы на частоте 3 ТГц при жесткой фокусировке (рис. 2(a)).

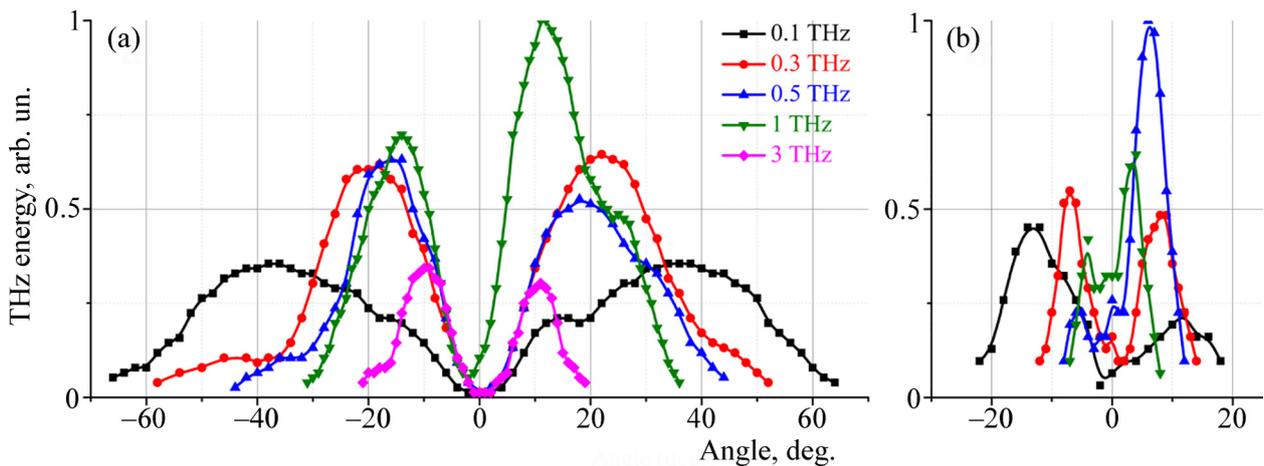


Рис. 2: Угловые распределения различных компонент терагерцового излучения при числовых апертурах $A = 0.05$ (a) и 0.003 (b).

Согласно общепринятой модели угол раствора терагерцового конуса связан с частотой по следующему закону: $\Theta \sim \nu^{-1/2}$ [4, 5]. На рис. 3(a) показана зависимость угла распространения терагерцового излучения от обратного корня частоты терагерцового излучения для нескольких значений числовой апертуры лазерного пучка. Полученные данные аппроксимируются линейной функцией, что согласуется с приведенной формулой. Зависимость полного угла раствора терагерцового конуса от числовой апертуры на разных частотах показана на рис. 3(b). С увеличением числовой апертуры до $NA \sim 0.02$ угол раствора конуса быстро растет на всех частотах терагерцового излучения. При дальнейшем увеличении числовой апертуры рост этого угла существенно замедляется, что, по-видимому, можно объяснить переходом в линейный режим фокусировки [8, 9].

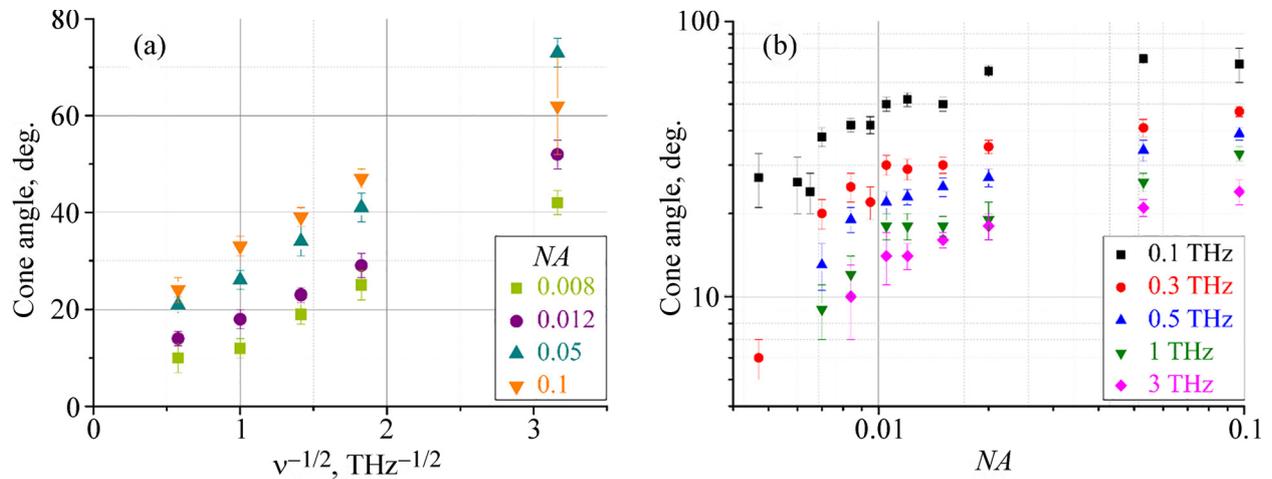


Рис. 3: Зависимость угла раствора конуса от обратного корня частоты терагерцового излучения для нескольких значений числовой апертуры (a) и от числовой апертуры на разных частотах (b).

Таким образом, в ходе эксперимента были получены угловые распределения различных спектральных компонентов терагерцового излучения, генерируемого плазмой филамента в широком диапазоне числовых апертур лазерного пучка. Показано, что углы распространения терагерцового излучения пропорциональны обратному корню частоты терагерцового излучения. Использование для фокусировки линзового телескопа позволило минимизировать различие фазового набега для разных числовых апертур. В таких условиях было показано, что рост числовой апертуры до 0.02 ведет к значительному увеличению угла раствора терагерцового конуса. При дальнейшем увеличении числовой апертуры рост этого угла существенно замедляется.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-02-00114.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. Couairon and A. Mysyrowicz, Phys. Rep. **441**(2-4), 47 (2007). DOI: 10.1016/j.physrep.2006.12.005.
- [2] H. Hamster, A. Sullivan, S. Gordon, et al., Phys. Rev. Lett. **71**(17), 2725 (1993). DOI: 10.1103/PhysRevLett.71.2725.
- [3] D. J. Cook and R. M. Hochstrasser, Opt. Lett. **25**(16), 1210 (2000). DOI: 10.1364/OL.25.001210.
- [4] C. D'Amico, A. Houard, M. Franco, et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 235002 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.235002.
- [5] A. P. Shkurinov, A. S. Sinko, P. M. Solyankin, et al., Phys. Rev. E **95**(4), 043209 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevE.95.043209.
- [6] A. V. Koribut, G. E. Rizaev, D. V. Mokrousova, et al., Opt. Lett. **45**(14), 4009 (2020). DOI: 10.1364/OL.394377.
- [7] L. V. Seleznev, G. E. Rizaev, D. V. Pushkarev, et al., JOSA B **38**(7), 2168 (2021). DOI: 10.1364/JOSAB.428379.
- [8] K. Lim, M. Durand, M. Baudelet, and M. Richardson, Scientific reports **4**(1), 1 (2014). DOI: 10.1038/srep07217.
- [9] D. Reyes, M. Baudelet, M. Richardson et al., Journal of Applied Physics **124**(5), 053103 (2018). DOI: 10.1063/1.5027573.

Поступила в редакцию 13 апреля 2022 г.

После доработки 19 мая 2022 г.

Принята к публикации 23 мая 2022 г.