

УДК 535-421,-45,-46,-541,-514.3, -512, 537.872, -868

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ШИРОКОПОЛОСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЗОННЫХ ПЛАСТИНОК ФРЕНЕЛЯ

А. А. Ушаков<sup>1,2</sup>, П. А. Чижов<sup>1</sup>, В. В. Букин<sup>1</sup>, С. В. Гарнов<sup>1</sup>

*В работе показана возможность управления диаграммой направленности выделенных частотных компонент спектра широкополосного терагерцового излучения с помощью внедрения в пучок зонных пластинок Френеля.*

**Ключевые слова:** терагерцовое излучение, терагерцовая визуализация, зонная теория Френеля.

*Введение.* Терагерцовое (ТГц) излучение представляет интерес в первую очередь для задач визуализации объектов [1]. Особый интерес при визуализации в последнее время связан с различными манипуляциями ТГц пучков [2–5]. Это дает возможность управлять расходимостью излучения для выделенных компонент ТГц спектра, что, в свою очередь, может позволить увеличить пространственное разрешение при визуализации объектов [6].

Целью данной работы являлось исследование возможности управления пространственным распределением полей терагерцового излучения для выделенных спектральных компонент с применением зонных пластинок Френеля.

*Схема эксперимента.* Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве источника оптической накачки применялась лазерная система на основе кристалла титан-сапфира (длительность импульса  $t = 40$  фс, длина волны лазерного излучения  $\lambda = 800$  нм, энергия лазерного импульса 2.7–3 мДж, диаметр гауссового пучка 12 мм (по уровню  $1/e^2$ ), частота следования импульсов 10 Гц, горизонтальная поляризация излучения). Далее лазерное излучение разделялось на 2 части, первая часть – основная, использовалась для накачки источника импульсов ТГц излучения, основанного на оптическом выпрямлении фемтосекундных импульсов с наклонным фронтом

<sup>1</sup> ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: ushakov.aleksandr@physics.msu.ru.

<sup>2</sup> МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 62.

интенсивности в кристалле ниобата лития [7]. Вторая часть излучения – зондирующая (содержит 1% энергии от исходного излучения), использовалась для регистрации ТГц излучения. Принцип детектирования ТГц излучения основан на линейном электрооптическом эффекте, при котором регистрируется изменение состояния поляризации оптического излучения под действием внешнего, квазипостоянного по отношению к оптическому, ТГц поля в кристалле ZnTe. Зондирующий импульс пропускаться через линию переменной задержки, после чего проходил через поляризатор с горизонтально ориентированной плоскостью пропускания, четвертьволновую пластинку и, после совмещения на лавсановой пленке, которая отражала оптическое и пропускала ТГц излучение, вместе с ТГц излучением направлялся в детектирующий электрооптический кристалл теллурида цинка ( $10 \times 10 \times 0.5$  мм<sup>3</sup>, вырез  $\langle 110 \rangle$ ). Для равномерной освещенности всей поверхности детектирующего кристалла между поляризатором и четвертьволновой пластинкой располагался телескоп, увеличивающий исходный размер пучка. Затем поверхность кристалла отображалась на матрицу цифровой камеры (Basler acA2040-25gm-NIR, 1", 2048×2048 пикселей) с помощью телескопа. Для определения изменения состояния поляризации оптического излучения под действием ТГц излучения после кристалла ZnTe внедрялся поляризатор с вертикально ориентированной плоскостью пропускания.

В ходе экспериментов проводилась регистрация изображений поверхности кристалла в присутствии ТГц полей  $I_{\text{sign}}(x, y, \tau)$  и в их отсутствие  $I_{\text{ref}}(x, y, \tau)$  для различных положений задержек между ТГц и зондирующим импульсами. Далее согласно формуле [8, 9]

$$E_{\text{THz}}(x, y, \tau) \sim \frac{I_{\text{sign}}(x, y, \tau) - I_{\text{ref}}(x, y, \tau)}{I_{\text{ref}}(x, y, \tau)} \quad (1)$$

проводилась обработка полученных изображений с целью извлечения величин напряженности ТГц полей  $E_{\text{THz}}(x, y, \tau)$  для каждого положения задержки. В результате такой обработки был получен массив значений напряженности в пространстве и времени (250 пространственных распределений поля  $2048 \times 2048$  пикселей с временным шагом 200 фс). Далее к этому массиву применялось дискретное преобразование Фурье, в результате которого были получены пространственные распределения для определенных частотных составляющих спектра ТГц излучения. Характерная временная форма импульсов ТГц излучения и восстановленный спектр представлены на рис. 2.

Для исследования модуляции пространственного распределения полей ТГц излучения вначале ТГц излучение из источника коллимировалось с помощью политетрафторэтиленовой (ПТФЭ) линзы (13) с фокусным расстоянием 6 см. Далее пучок с плоским

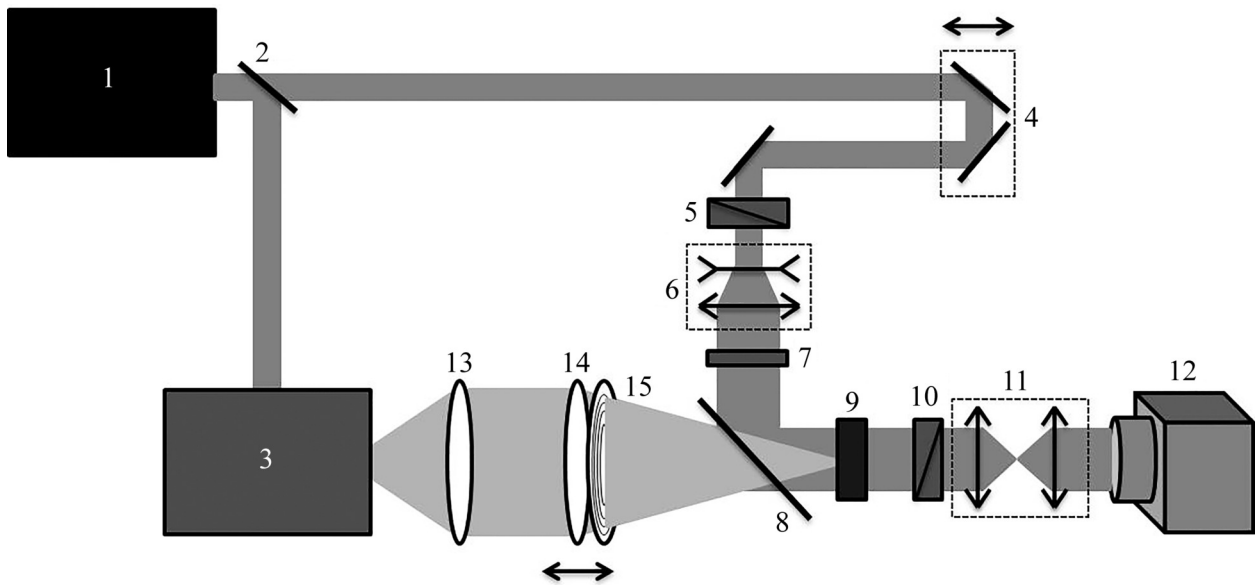


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: 1 – фс-лазер; 2 – светоделитель, 3 – источник ТГц излучения на основе кристалла ниобата лития, 4 – линия переменной задержки, 5 – поляризатор, 6 – телескоп, 7 – четвертьволновая пластинка, 8 – лавсановая пленка, 9 – кристалл  $ZnTe$ , 10 – поляризатор, 11 – телескоп, 12 – КМОП камера, 13 – ПТФЭ линза (фокусное расстояние 6 см), 14 – ПТФЭ линза (фокусное расстояние 15 см), 15 – зонная пластинка.

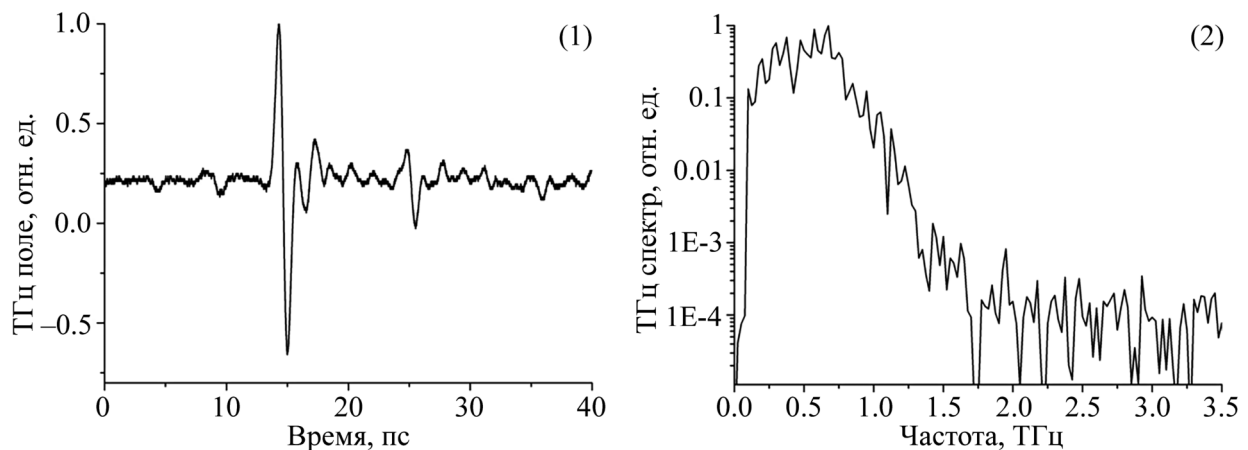


Рис. 2: Временная форма импульса ТГц излучения (1) и его спектр (2).

фронтом фокусировался в кристалл  $ZnTe$  с помощью второй ПТФЭ линзы (14) с фокусным расстоянием  $F_1 = 15$  см. С целью пространственной модуляции в пучок за линзой

14 независимо друг от друга внедрялись зонные пластинки Френеля, изображение которых представлено на рис. 3. Сами пластинки изготавливались из полиимидной пленки с нанесением на нее металлической фольги. Для расчета радиусов колец в зонных пластинках использовалось выражение [10]

$$r_n = \sqrt{(n+1)\lambda z}, \quad (2)$$

здесь  $r_n$  – радиус  $n$ -ой зоны Френеля,  $\lambda$  – длина волны излучения,  $z$  – расстояние между плоскостью отверстия, на котором идет дифракция, и точкой наблюдения на оси, проходящей по нормали через центр круглого отверстия. В случае, если открыты только четные зоны Френеля (или только нечетные), результат интерференции вторичных сферических волн согласно принципу Гюйгенса–Френеля будет приводить к возникновению максимума на оси в точке наблюдения  $z$ , что для определенной частоты эквивалентно действию линзы с фокусным расстоянием  $z$ . В нашей работе зонные пластинки являлись линзами с фокусными расстояниями  $F_2 = 20$  см для излучения на частотах 600 ГГц и 800 ГГц. Установка вплотную к линзе 14 зонной пластинки приводило к тому, что оптическая сила такой системы из двух линз была равна сумме оптических сил линзы 14 и зонной пластинки для выделенной частоты, под которую была рассчитана зонная пластинка. В этом случае фокусное расстояние для такой системы равно

$$F = \left[ \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} \right]^{-1} \approx 8.6 \text{ см.} \quad (3)$$



Рис. 3: Зонные пластинки для частот 800 ГГц (1) и 600 ГГц (2).

*Результаты и обсуждение.* Для экспериментальной проверки работы френелевских пластинок в ТГц-диапазоне регистрация временных форм импульсов ТГц излучения

проводилась сперва в фокальной плоскости линзы 14, затем в фокальной плоскости системы из линзы 14 и зонной пластинки как в присутствии зонных пластинок, так и без них. На рис. 4 показаны распределения полей ТГц излучения для частот 600 и 800 ГГц в вышеописанных плоскостях детектирования.

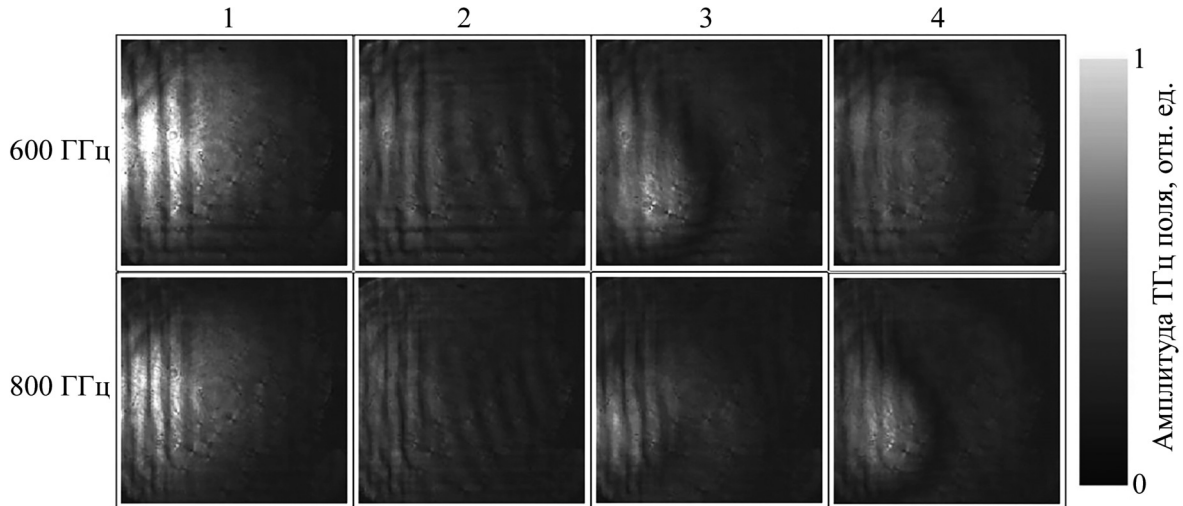


Рис. 4: Пространственные  $(x, y)$  распределения полей ТГц излучения для частот 600 и 800 ГГц в следующих плоскостях: (1) в фокальной плоскости линзы 14, без использования зонных пластинок; (2) на расстоянии  $F$  от линзы 14, без использования зонных пластинок; (3) на расстоянии  $F$  от линзы 14, внедрена зонная пластинка для излучения на частоте 600 ГГц; (4) на расстоянии  $F$  от линзы 14, внедрена зонная пластинка для излучения на частоте 800 ГГц.

В случае детектирования в фокальной плоскости линзы 14 (на расстоянии  $F_1$  от линзы 14) без использования зонных пластинок наблюдаются ярко выраженные максимумы для всех частот, что соответствует сфокусированному ТГц пучку в перетяжке. Распределения ТГц полей для всех частот на расстоянии  $F_2$  от линзы 14 без использования зонных пластинок демонстрируют равномерную освещенность всей поверхности кристалла ZnTe ТГц пучком, что соответствует расходящемуся излучению. Однако внедрение зонных пластинок приводит к увеличению напряженности ТГц поля для конкретной частоты в приосевой области, что является следствием спектрально-селективной фокусировки.

В итоге с помощью широкополосной методики электрооптического детектирования без пространственного сканирования, позволяющей визуализировать пространственно-временные и пространственно-спектральные распределения полей ТГц излучения, было

показано, что дифракционные эффекты позволяют фокусировать излучение для рассчитанных компонент ТГц спектра путем внедрения в ТГц пучок зонных пластинок Френеля. Ввиду того, что зонные пластинки вызывают фокусировку только для определенных спектральных компонент ТГц излучения, их применение позволяет управлять частотно-угловыми распределениями полей ТГц излучения, что может быть использовано в задачах по визуализации объектов.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН “Новые подходы к созданию и изучению экстремальных состояний вещества”. Проект № 6(2).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] B. B. Hu and M. C. Nuss, *Opt. Lett.* **20**, 1716 (1995).
- [2] X. Wang, Z. Xie, W. Sun, et al., *Opt. Lett.* **38**, 4731 (2013).
- [3] A. Minasyan, J. Degert, E. Freysz, et al., *Opt. Lett.* **42**, 41 (2017).
- [4] E. Minerbi, S. Keren-Zur, and T. Ellenbogen, *Nano Lett.* **19**, 6072 (2019).
- [5] M. Kulya, V. Semenova, A. Gorodetsky, et al., *Appl. Opt.* **58**, A90 (2018).
- [6] Y. Shang, X. Wang, W. Sun, et al., *Opt. Express* **27**, 14725 (2019).
- [7] J. Hebling, K.-L. Yeh, M. C. Hoffmann, et al., *J. Opt. Soc. Am. B* **25**, B6–B19 (2008).
- [8] A. A. Ushakov, P. A. Chizhov, V. V. Bukin, et al., *J. Opt. Soc. Am. B* **35**, 1159 (2018).
- [9] А. А. Ушаков, П. А. Чижов, В. В. Букин и др., *Квантовая электроника* **48**(5), 487 (2018).
- [10] С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин, *Физическая Оптика* (М., Наука, 1991), с. 261.

Поступила в редакцию 30 октября 2019 г.

После доработки 6 ноября 2019 г.

Принята к публикации 6 ноября 2019 г.