

Спектрально-селективная модуляция параметров пучков терагерцевого излучения

А.А.Ушаков, М.Матоба, Н.Немото, Н.Канда, К.Кониши, Н.А.Панов,
Д.Е.Шипило, П.А.Чижов, В.В.Букин, М.Кувата-Гоноками,
Дж.Юмото, О.Г.Косарева, С.В.Гарнов, А.Б.Савельев

Представлены результаты экспериментального исследования фокусировки широкополосного терагерцевого (ТГц) излучения с помощью линз и зонных пластинок Френеля. Проведено сравнение полученных данных с результатами численного моделирования. Показано, что использование линз для фокусировки ТГц излучения может приводить к возникновению кольцевой структуры в пространственных распределениях его интенсивности. Использование зонных пластинок Френеля позволяет изменять пространственное распределение интенсивности ТГц излучения на выделенных частотах спектра.

Ключевые слова: терагерцевое излучение, дифракция, электрооптическое детектирование, зонная пластинка Френеля.

1. Введение

Исследования в области профилирования пучков терагерцевого (ТГц) излучения [1, 2] позволяют получать информацию о физических процессах, протекающих при генерации и распространении электромагнитного излучения. Кроме того, потребность в измерении профиля интенсивности пучка возникает в связи с исследованием нелинейных ТГц эффектов, например с помощью методики z-сканирования [3]. Профилирование ТГц пучков, в первую очередь для лазерно-плазменных источников, проводилось с использованием как методики электрооптического детектирования [4], так и матричной ТГц камеры [5]. Позднее было продемонстрировано спектрально-селективное профилирование ТГц пучков, при котором с помощью набора узкополосных фильтров демонстриро-

вались профили интенсивности ТГц излучения на отдельных частотных компонентах [6]. Тем не менее остается не до конца решенным вопрос об оптимальных условиях фокусировки излучения накачки двухчастотного лазерного излучения в газовые среды с точки зрения направленности ТГц излучения [4, 7, 8]. Кроме того, в последнее время проводится достаточно большое количество исследований, посвященных управлению пространственным распределением ТГц излучения [9–12]. Одним из возможных способов спектрально-селективного управления пространственным распределением его интенсивности является применение френелевских зонных пластинок [9, 13, 14].

2. Эксперименты по измерению профиля ТГц пучков

2.1. Измерение профилей интенсивности ТГц излучения с помощью терагерцевой камеры

В настоящей работе профилирование пучка ТГц излучения проводилось с помощью регистрации двумерных распределений его интенсивности в различных плоскостях ТГц камерой [15]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Для создания лазерной плазмы использовалось излучение титан-сапфирового лазера (центральная длина волны 800 нм, длительность импульсов 35 фс, энергия импульсов 2.7 мДж, частота следования импульсов 1 кГц), которое пропусклось через нелинейный кристалл ВВО, где частично преобразовывалось во вторую гармонику (первый тип синхронизма, толщина кристалла 400 мкм, эффективность преобразования 13%). Затем излучение фокусировалось в воздухе внеосевым параболическим зеркалом с фокусным расстоянием $f = 190$ мм. Для эффективной генерации ТГц излучения излучение титан-сапфирового лазера пропусклось до параболического зеркала через пластинку-компенсатор дисперсии групповых скоростей и фазовую пластинку (полуволновая для первой гармоники и волновая для второй). Таким образом происходило формирование двухцветного импульса из-

А.А.Ушаков, В.В.Букин, С.В.Гарнов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: ushakov.aleksandr@physics.msu.ru

М.Матоба, Н.Немото, М.Кувата-Гоноками. Department of Physics, The University of Tokyo, 7 Chome-3-1 Hongo, Bunkyo City, Tokyo, Japan, 113-8654

Н.Канда. RIKEN Center for Advanced Photonics, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, Tokyo, Japan 351-0198; Photon Science Center, The University of Tokyo, 7 Chome-3-1 Hongo, Bunkyo City, Tokyo, Japan, 113-8654

К.Кониши. Institute for Photon Science and Technology, The University of Tokyo, 7 Chome-3-1 Hongo, Bunkyo City, Tokyo, Japan, 113-8654

Н.А.Панов, Д.Е.Шипило, О.Г.Косарева, А.Б.Савельев. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, и Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы, 1; Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

П.А.Чижов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Всероссийский институт научной и технической информации РАН, Россия, 125190 Москва, ул. Усиевича, 20

Дж.Юмото. Department of Physics, The University of Tokyo, 7 Chome-3-1 Hongo, Bunkyo City, Tokyo, Japan, 113-8654; Institute for Photon Science and Technology, The University of Tokyo, 7 Chome-3-1 Hongo, Bunkyo City, Tokyo, Japan, 113-8654

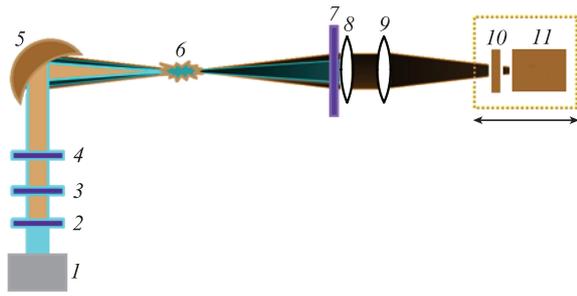


Рис.1. Схема экспериментальной установки по профилированию ТГц пучков:

1 – фемтосекундный лазер; 2 – кристалл ВВО; 3 – пластинка-компенсатор; 4 – фазовая пластинка; 5 – параболическое зеркало с $f = 190$ мм; 6 – плазма; 7 – экран из политетрафторэтилена (ПТФЭ); 8 – линза из материала Tsugurica с $f = 5$ или 10 см; 9 – линза из Tsugurica с $f = 10$ см; 10 – узкополосный ТГц фильтр; 11 – ТГц камера.

лучения на основной частоте и на частоте второй гармоники лазерного излучения, причем импульсы на обеих частотах совпадали по времени и по направлению поляризации в области перетяжки пучка. Далее ТГц излучение плазменного источника фокусировалось с помощью двух двояковыпуклых линз, изготовленных из материала Tsugurica (показатель преломления 1.52 в оптическом и ТГц диапазонах спектра) с фокусными расстояниями 10 или 5 см (линза 8) и 10 см (линза 9). В окрестности перетяжки ТГц пучка располагалась матрица ТГц камеры (массив из 320×240 микроболометров, размер пикселя 23.5×23.5 мкм [15]). Для предотвращения попадания оптического излучения на матрицу перед линзой 8 располагался экран из политетрафторэтилена (ПТФЭ), пропускающий ТГц излучение и рассеивающий оптическое. В различных плоскостях, перпендикулярных оси пучка, в окрестности его перетяжки с шагом в 1 мм были проведены измерения распределений интенсивности ТГц излучения. Для измерения пространственных распределений интенсивности в отдельных полосах в пределах ТГц спектра перед апертурой камеры устанавливались полосовые фильтры (центральные частоты пропускания 0.6, 0.8, 1.0, 1.3, 1.6 и 1.9 ТГц, ширина полосы ~ 0.1 ТГц, спектры пропускания представлены в работе [16]).

2.2. Измерение пространственных распределений полей ТГц излучения с помощью электрооптической методики

Для исследования спектрально-селективной фокусировки ТГц излучения использовалась установка, схема которой приведена на рис.2. Источником оптической накачки служила титан-сапфировая лазерная система (длительность импульсов 40 фс, энергия импульсов 2.7 мДж, частота следования импульсов 1 кГц, диаметр пучка 12 мм по уровню $1/e^2$). Измерение пространственного распределения напряженности электрического поля ТГц импульса основано на линейном электрооптическом эффекте. В эксперименте измерялась деполяризация импульсного зондирующего оптического излучения, прошедшего через кристалл ZnTe. Деполяризация возникала вследствие эффекта Поккейса в присутствии квазипостоянного (в пределах длительности фемтосекундного импульса) электрического поля ТГц излучения. Лазерное излучение делилось на две части: первая (основная) часть использовалась при формировании импульсов ТГц излучения в источнике. Для получения достаточно высокой

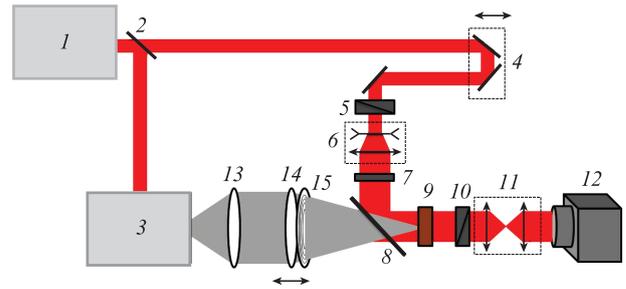


Рис.2. Схема экспериментальной установки:

1 – фемтосекундный лазер; 2 – светоделитель; 3 – источник ТГц излучения на основе кристалла ниобата лития; 4 – линия переменной задержки; 5 – поляризатор; 6 – телескоп; 7 – четвертьволновая пластинка; 8 – пленочный светоделитель; 9 – кристалл ZnTe; 10 – поляризатор; 11 – телескоп; 12 – КМОП-камера; 13 – линза из ПТФЭ ($f = 6$ см); 14 – линза из ПТФЭ ($f = 15$ см); 15 – зонная пластинка.

пиковой мощности этого излучения использовался источник, основанный на оптическом выпрямлении фемтосекундных импульсов излучения с наклонным фронтом интенсивности в кристалле ниобата лития [17]. Вторая часть – зондирующее излучение, составляющее $\sim 1\%$ полной энергии излучения, пропусклась через линию переменной задержки, затем через поляризатор, увеличивающий телескоп и четвертьволновую пластинку. Далее пучок эллиптически поляризованного излучения совмещался с ТГц пучком на светоделителе. Совмещенные пучки направлялись в электрооптический кристалл ZnTe (размер $10 \times 10 \times 0.5$ мм, вырез $\langle 110 \rangle$). Поверхность кристалла отображалась телескопом на матрицу цифровой камеры (Basler acA2040-25gm-NIR, 2048×2048 пикселей). Перед матрицей был расположен оптический поляризатор, пропускающий вертикально поляризованное излучение.

В ходе экспериментов регистрировались изображения кристалла в присутствии ТГц полей, $I_{\text{sign}}(x, y, \tau)$, и в их отсутствие, $I_{\text{ref}}(x, y, \tau)$. Такая регистрация проводилась для различных задержек между ТГц и зондирующим импульсами. Связь распределения напряженности электрического поля ТГц импульса с измеренными распределениями интенсивности задается следующим выражением [13, 18, 19]:

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

Обработка полученных изображений позволила измерить пространственно-временную зависимость напряженности электрического поля $E_{\text{THz}}(x, y, \tau)$. В результате был получен трехмерный массив значений E_{THz} размером $250 \times 2048 \times 2048$ точек в области $50 \times 10 \times 10$ пс·мм·мм. Далее к этому массиву применялось дискретное преобразование Фурье по временной координате, в результате чего были получены пространственные распределения спектральных компонент ТГц излучения. Получаемые распределения имели спектральную ширину 5 ТГц, частотный сдвиг между ними составлял 20 ГГц.

Формирование исследуемого импульса ТГц излучения происходило следующим образом: излучение генератора на основе ниобата лития коллимировалось с помощью линзы 13 с $f = 6$ см. Затем пучок фокусировался с помощью линзы 14 с $f = 15$ см. Для пространственной спектральной модуляции излучения за линзой 14 располагались различные зонные пластинки Френеля, изготов-

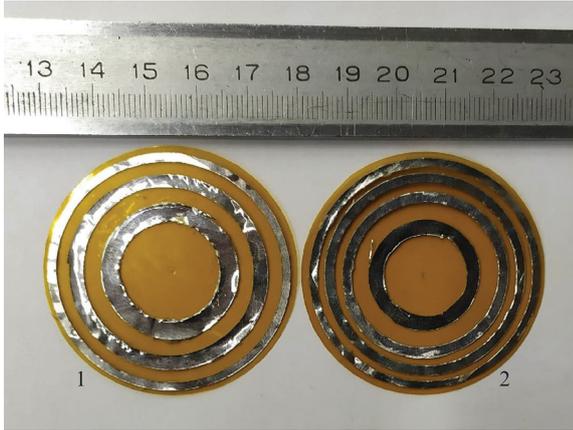


Рис.3. Зонные пластинки с фокусным расстоянием 20 см для излучения на частотах 600 (1) и 800 ГГц (2).

ленные путем наклеивания колец из алюминиевой фольги на полиимидную пленку. Радиусы колец в зонных пластинках были выбраны на основе выражения [20]

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

где r_n – радиус n -й зоны Френеля; z – фокусное расстояние для излучения на длине волны λ . В нашем случае использовались две зонные пластинки с фокусными расстояниями 20 см для излучения на частотах 600 и 800 ГГц ($\lambda z = 100$ и 75 мм^2 соответственно). Фотографии пластинок показаны на рис. 3. Нахождение зонной пластинки непосредственно за линзой 14 приводило к уменьшению фокусного расстояния такой оптической системы до 8.6 см для излучения на соответствующей частоте.

3. Результаты экспериментов

В эксперименте, рассмотренном в п.2.1, были измерены распределения интенсивности ТГц излучения, некоторые из которых представлены на рис.4. Для демонстрации полученных особенностей распределений интенсивности ТГц излучения при его фокусировке было проведено численное моделирование в рамках уравнения распространения в параксиальном приближении, которое решалось в фурье-пространстве:

$$\frac{\partial \hat{E}(k_x, k_y, z)}{\partial z} = i \frac{k_x^2 + k_y^2}{2c\omega_0} \hat{E}(k_x, k_y, z), \quad (3)$$

где $\hat{E}(k_x, k_y, z)$ – двумерный фурье-образ полей $E(x, y, z)$; ω_0 – исходная частота ТГц излучения; c – скорость света. Для расчетов в качестве источника был выбран гауссов пучок радиусом 100 мкм (данная величина сопоставима с поперечным размером самого плазменного канала и длиной волны излучения). Исходный пучок распространялся из геометрического фокуса линзы 8 (см. рис.1). Затем при прохождении через обе линзы в исходное излучение добавлялся параболический набег фазы, эквивалентный действию каждой из линз, а также использовалось ограничение пучка по апертуре линз. После этого проводилось построение профилей интенсивности ТГц излучения на выделенных частотах в фокальной плоскости линзы 9, а также до и после фокальной плоскости на расстояниях от нее 1.5 см. Распределения, представленные на рис.4, усреднены по частоте ω_0 с весами, соответствующими экспериментальным спектрам. Для моделирования зонной пластинки излучение после линзы 9 было промодулировано по амплитуде в соответствии с рассчитанными радиусами зон Френеля.

Числовая апертура оптических элементов в эксперименте была достаточно велика – достигала 0.3–0.5. Тем не менее для моделирования нашей задачи можно использовать параксиальное приближение, что было продемонстрировано ранее [21]. Это и обусловило выбор уравнения распространения (3) для расчета пространственного спектра ТГц излучения. Профили интенсивности ТГц излучения в плоскостях, соответствующих плоскостям, в которых проводились измерения, представлены на рис.4. Из результатов как экспериментов, так и численного моделирования следует, что существуют различия в профилях интенсивности в плоскостях, расположенных на одинаковых расстояниях от перетяжки фокусирующей линзы (до и после нее). Несмотря на то что основная часть ТГц излучения попадала в апертуру линзы 8 (что основывается на данных о диаграммах направленности этого излучения в дальней зоне [16]) и при этом имела унимодальную структуру с максимумом на оси, при распространении излучения все равно видны кольца, что является проявлением его дифракции на апертуре линзы. Подтверждает данный вывод тот факт, что струк-

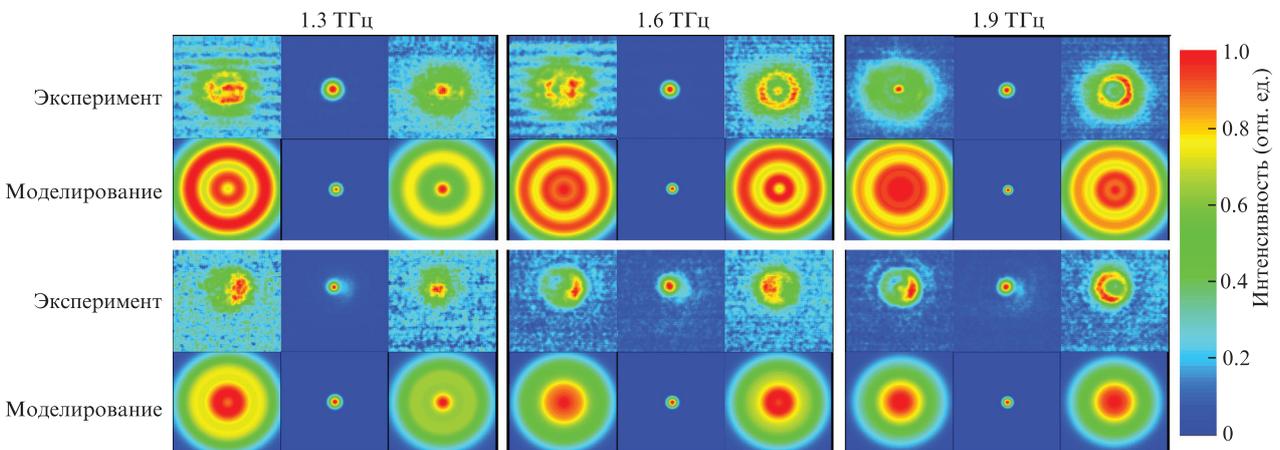


Рис.4. Экспериментально измеренные и рассчитанные численно профили интенсивности ТГц излучения для частот 1.3, 1.6 и 1.9 ТГц в фокальной плоскости линзы 9 (рис.1) и в плоскостях, расположенных на расстояниях 1.5 см от фокальной плоскости (до и после нее). Верхний ряд профилей получен при $f = 10$ и 10 см, нижний – при $f = 5$ и 10 см соответственно.

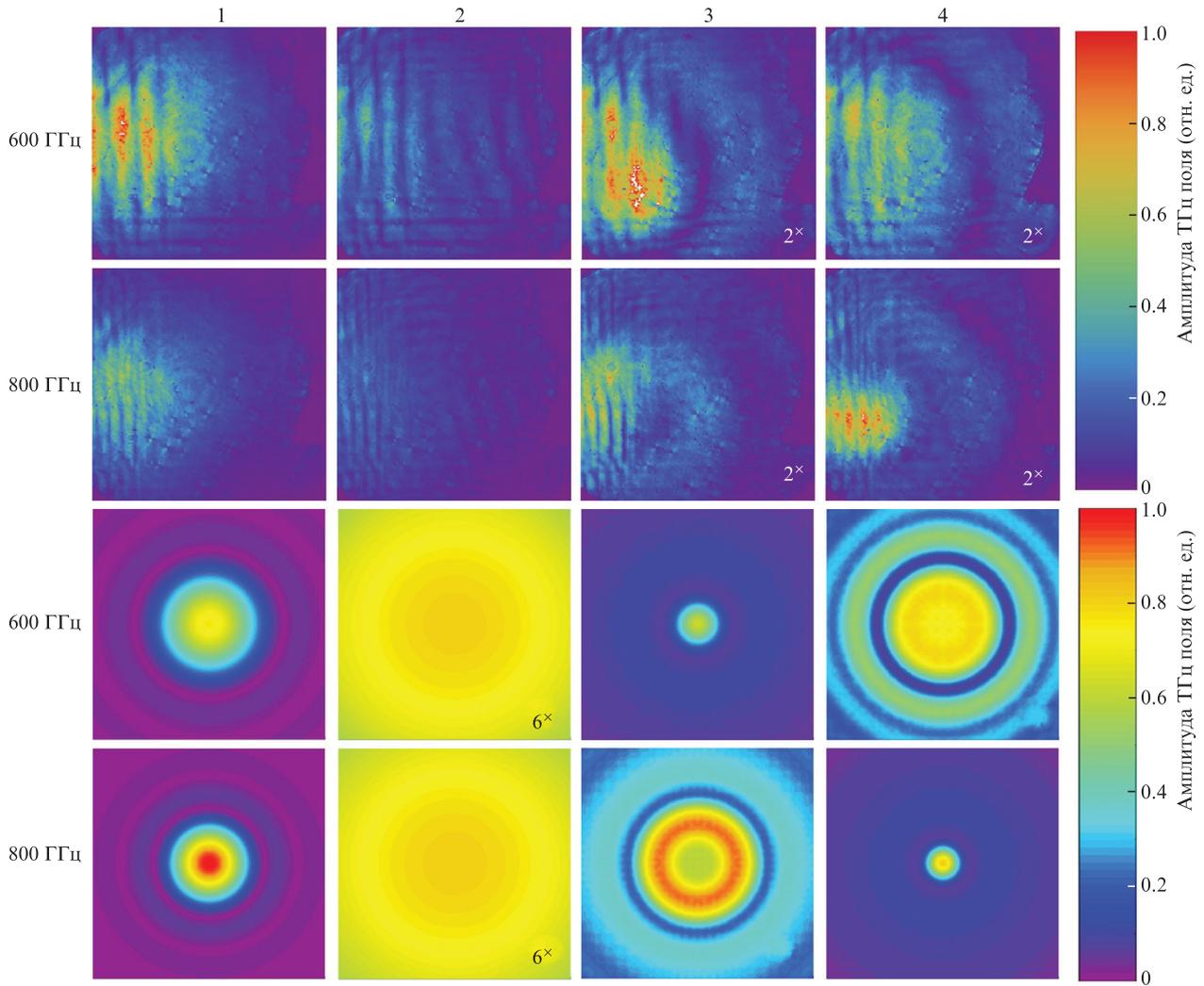


Рис.5. Экспериментально полученные (вверху) и рассчитанные численно (внизу) распределения (10×10 мм) полей ТГц излучения на частотах 600 и 800 ГГц в плоскостях x, y при $z = 15$ см (фокальная плоскость линзы 14 без использования зонных пластинок) (1); $z = 8.6$ см (фокальная плоскость системы из линзы 14 и зонной пластинки) в случае использования только линзы 14 (расходящийся ТГц пучок) (2); $z = 8.6$ см в случае использования линзы 14 и зонной пластинки с $f = 20$ см для излучения на частоте 600 ГГц (3); $z = 8.6$ см в случае использования линзы 14 и зонной пластинки с $f = 20$ см для излучения на частоте 800 ГГц (4).

тура профилей изменяется в зависимости от используемых для отображения линз. Другой возможной причиной возникновения колец могут быть сферические aberrации в линзах, которые не учитывались при моделировании.

В эксперименте с зонными пластинками, рассмотренном в п.2.2, были измерены двумерные распределения напряженностей электрических полей ТГц импульсов, представленные на рис.5.

При использовании только линзы 14 в плоскости $z = 15$ см наблюдается выраженный максимум для излучения на всех частотах, причем с уменьшением длины волны излучения размер пучка уменьшается, что согласуется с классической формулой из теории дифракции [20]:

$$\rho = \frac{\lambda f}{\pi d}, \quad (4)$$

где ρ – радиус пучка в перетяжке; d – диаметр пучка. В плоскости $z = 8.6$ см в отсутствие зонных пластинок диаметр пучка увеличивается, а амплитуда поля уменьшается. Установка зонной пластинки приводит к смещению фокальной плоскости для ТГц излучения на выделенной

частоте, что можно наблюдать на распределениях 3 и 4 (рис.5). При этом видно, что для излучения не на частоте, соответствующей зонной пластинке с $f = 20$ см, выраженного максимума не возникает, что позволяет спектрально управлять фокусировкой ТГц излучения. Видно также, что общая амплитуда поля излучения на выделенной частоте снижается, но остается сопоставимой с амплитудой в случае обычной фокусировки излучения линзой. Из полученных распределений видно, что в эксперименте диаметр пучка незначительно отличался от расчетного, что приводит к различиям между экспериментальными результатами и данными численного моделирования. Эти различия могут быть связаны также с дифракционными искажениями в связи с неидеальностью юстировки оптической системы. Тем не менее на пространственных распределениях 3 и 4 на рис.5 явно прослеживается качественное соответствие экспериментальных и численных результатов. Однако на экспериментально полученных распределениях присутствуют вертикальные полосы, которые не меняют своего положения и структуры при изменении конфигурации оптических элементов, что может быть связано со свойствами источника ТГц излучения

либо с неидеальностью юстировки экспериментальной установки.

4. Заключение

Нами проведены экспериментальное и численное исследование пространственных распределений амплитуд полей и интенсивностей ТГц излучения при его фокусировке зонными пластинками и линзами. Показано, что применение зонных пластинок позволяет управлять расходимостью излучения на выделенных частотах. Профилирование сфокусированных ТГц пучков из лазерно-плазменного источника выявило неоднородность пространственной структуры распределений интенсивности ТГц излучения, что является следствием дифракционных эффектов. Этот факт может стать принципиальным в экспериментах при z -сканировании для исследования нелинейного взаимодействия ТГц излучения с веществом.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Новые подходы к созданию и изучению экстремальных состояний вещества» (проект №6(2)), стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам (СП-500.2019.4, СП-2453.2018.2), РФФИ (грант №18-52-16020) и программы «Фотонная передовая сеть» Министерства образования, культуры, спорта, науки и техники (МЕХТ, Япония).

1. Klarskov P., Strikwerda A.C., Iwaszczuk K., Jepsen P.U. *New J. Phys.*, **15**, 075012 (2013).
2. Klarskov P., Strikwerda A.C., Wang T., Zalkovskij M., Jepsen P.U. *Proc. SPIE*, **8624**, 86240D (2013).
3. Chai X., Ropagnol X., Ovchinnikov A., Chefonov O., Ushakov A., Garcia-Rosas C.M., Isgandarov E., Agranat M., Ozaki T., Savel'ev A. *Opt. Lett.*, **43**, 5463 (2018).
4. Zhong H., Karpowicz N., Zhang X.-C. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 261103 (2006).
5. Klarskov P., Strikwerda A.C., Iwaszczuk K., Jepsen P.U. *New J. Phys.*, **15**, 075012 (2013).
6. Klarskov P., Zalkovskij M., Strikwerda A.C., Jepsen P.U. *Proc. CLEO: 2014*, 6–7 (2014).
7. Ushakov A.A., Panov N.A., Chizhov P.A., Shipilo D.E., Bukin V.V., Savel'ev A.B., Garnov S.V., Kosareva O.G. *Appl. Phys. Lett.*, **114**, 081102 (2019).
8. Ushakov A.A., Matoba M., Nemoto N., Kanda N., Konishi K., Chizhov P.A., Panov N.A., Shipilo D.E., Bukin V.V., Kuwata-Gonokami M., Yumoto J., Kosareva O.G., Garnov S.V., Savel'ev A.B. *JETP Lett.*, **106**, 706 (2017).
9. Wang X., Xie Z., Sun W., Feng S., Cui Y., Ye. J., Zhang Y. *Opt. Lett.*, **38**, 4731 (2013).
10. Shang Y., Wang X., Sun W., Han P., Ye. J., Feng S., Zhang Y. *Opt. Express*, **27**, 14725 (2019).
11. Kulya M., Semenova V., Gorodetsky A., Bespalov V.G., Petrov N.V. *Appl. Opt.*, **58**, 1 (2018).
12. Siemion A. *J. Infr., Millimet., Terahertz Waves*, **40**, 477 (2019).
13. Ушаков А.А., Чижов П.А., Букин В.В., Гарнов С.В. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **11**, 8 (2019) [*Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **46**, 336 (2019)].
14. Wiltse J. C. *Proc. SPIE*, **5411**, 127 (2004).
15. Nemoto N., Kanda N., Imai R., Konishi K., Miyoshi M., Kurashina S., Sasaki T., Oda N., Kuwata-Gonokami M. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, **6**, 175 (2016).
16. Ushakov A.A., Chizhov P.A., Andreeva V.A., Panov N.A., Shipilo D.E., Matoba M., Nemoto N., Kanda N., Konishi K., Bukin V.V., Kuwata-Gonokami M., Kosareva O.G., Garnov S.V., Savel'ev A.B. *Opt. Express*, **26**, 18202 (2018).
17. Hebling J., Yeh K.-L., Hoffmann M.C., Bartal B., Nelson K.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **25**, B6 (2008).
18. Ushakov A.A., Chizhov P.A., Bukin V.V., Savel'ev A.B., Garnov S.V. *J. Opt. Soc. Am. B*, **35**, 1159 (2018).
19. Ушаков А.А., Чижов П.А., Букин В.В., Гарнов С.В., Савельев А.Б. *Квантовая электроника*, **48**, 487 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 487 (2018)].
20. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. *Физическая оптика* (М.: Наука, 1991).
21. Fedorov V.Y., Chanal M., Grojo D., Tzortzakis S. *Phys. Rev. Lett.*, **117**, 043902 (2016).