СИСТЕМА ПОСТРОЕНИЯ ФАЗОВО-КОНТРАСТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

В. В. Букин[1], *С. В. Гарнов*[1], *А. Б. Савельев-Трофимов*[2], *А. А. Ушаков*[1,2], *П. А. Чижов*[1]

[1]Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, г. Москва
[2]Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Благодаря разработке источников терагерцового (ТГц) излучения появилась возможность создания новых инструментов для задач спектроскопии, томографии, построения изображений [1]. Импульсные источники ТГц излучения позволяют проводить измерения в спектроскопии с временным разрешением, например при помощи схемы электрооптического детектирования [2]. Электрооптический кристалл как детектор ТГц излучения успешно применяется для построения изображений в ТГц диапазоне [3]. Из-за поточечного пространственного сканирования исследуемых объектов в подобных схемах происходит существенное снижение скорости визуализации [3], что является недостатком такого метода. Кроме того особый интерес представляет исследование объекта, поглощение ТГц излучения в котором не отличается от поглощения в окружающей его среде. В этом случае обычная спектроскопия поглощения и основанный на ней принцип построения изображения оказываются неэффективными. Для таких исследований можно применять способ фазово-контрастного построения изображения [4]. Однако, на настоящий момент исследования с применением данной методики были продемонстрированы только для установок с монохроматическим излучением, что накладывает ряд ограничений на исследуемые объекты. В настоящей работе реализована схема построения фазово-контрастных изображений при просвечивании исследуемого объекта импульсным ТГц излучением и регистрации с использованием широкоаппертурного электрооптического кристалла, что позволяет избавиться от необходимости сканирования и получать спектральную информацию об исследуемом объекте.

Целью работы является создание и апробация стенда для построения фазово-контрастных изображений исследуемых объектов в ТГц диапазоне частот с применением электрооптического кристалла.

Источником оптического излучения служил титан-сапфировый лазер (центральная длина волны 775 нм, частота следования импульсов 10 Гц, длительность импульса 150 фс, энергия импульса 2,8 мДж, диаметр гауссова пучка 12 мм по уровню $1/e^2$, горизонтальная поляризация). Основная часть лазерного излучения использовалась для генерации ТГц излучения в ТГц источнике (см. рис. 1), основанном на оптическом выпрямлении фемтосекундного излучения с наклонным фронтом амплитуд в кристалле LiNbO3 [5]. ТГц излучение из источника коллимировалось тефлоновой линзой (f = 10 см). В пучок вносился исследуемый образец таким образом, чтобы он отображался тефлоновой линзой (f = 6 см) на поверхность детектирующего широкоаппертурного кристалла ZnTe (10×10×0,5 мм^3, вырез <110>). Вторая часть лазерного излучения – зондирующий импульс – пропускалась через линию переменной оптической задержки, четверть волновую пластинку, светофильтры и линзу, расширяющую пучок, после чего совмещалась с ТГц излучением на лавсановой пленке и направлялась в кристалл ZnTe. Плоскость детектирующего кристалла отображалась телескопом на матрицу КМОП-камеры (Basler acA2040-25gm-NIR, 1´´, 2048×2048). До телескопа на пути зондирующего пучка устанавливался поляризатор, пропускающий вертикально поляризованное излучение. Присутствие ТГц поля в кристалле вызывало просветление или затемнение изображения кристалла на ПЗС-камере, за счет линейного электрооптического эффекта [6].

Для обработки полученных изображений снималось 2 серии по 50 кадров в присутствии ТГц излучения (сигнальные) и в его отсутствии (теневые). Далее проводилось усреднение по каждой отдельной серии и из усредненных сигнальных вычитались значения усредненных теневых кадров, деленые на усредненные теневые. Затем проводилась пространственная фильтрация полученного изображения. Такие операции проводились для набора временных задержек (с шагом 125 фс) меж-

ду ТГц и сканирующим импульсами. Таким образом получалось двухмерное пространственно-временное распределение поля ТГц излучения. Такие распределения ТГц поля были получены как при пропускании ТГц излучения через исследуемый объект, так и в его отсутствии. Затем к полученным двухмерным пространственно-временным распределениям применялось дискретное Фурье преобразование по времени. Таким образом получалось двухмерное пространственно-спектральное распределение. Далее для различных частот из спектра ТГц импульса строились двумерные распределения разности фаз между случаями просвечивания исследуемого образца и без него. Таким образом было реализовано построение фазово-контрастных изображений в широком диапазоне частот ТГц импульса.

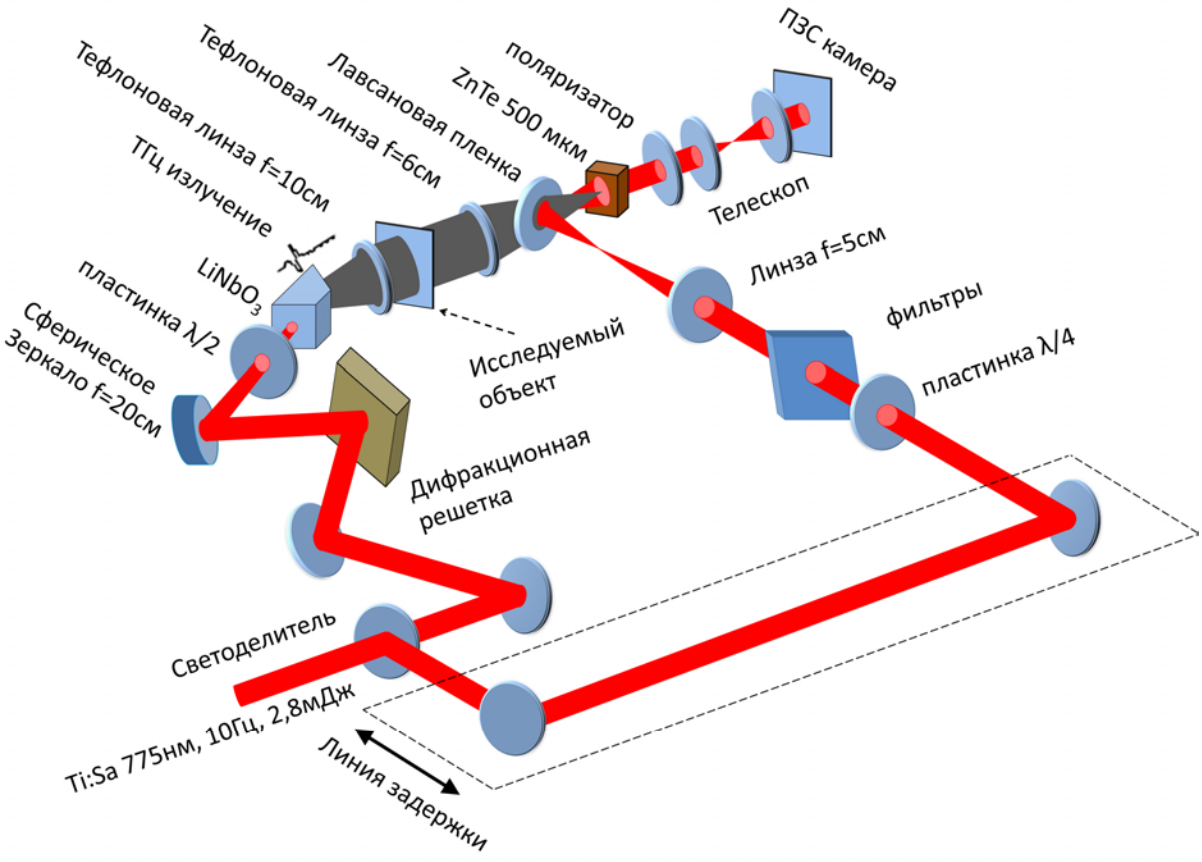

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Исследуемым образцом являлась тефлоновая пластинка, толщиной 1 мм, которая вставлялась в ТГц пучок таким образом, чтобы верхняя половина пучка проходила через нее, а нижняя распространялась в свободном пространстве. Характерные пространственно-временные распределения поля ТГц излучения представлены на рис. 2. В той области, где в ТГц пучок была помещена тефлоновая пластинка наблюдается более поздний приход фронта ТГц излучения, что связано с задержкой, вносимой тефлоновой пластинкой с показателем преломления большим, по сравнению с воздухом.

Для одной и той же точки в области, куда была помещена тефлоновая пластинка, временная форма ТГц импульса с образцом (синий цвет) и без него (красный цвет) представлена на рис. 3. По величине задержки между моментами прихода максимумов ТГц импульсов можно судить о толщине исследуемого образца, зная показатель преломления, либо наоборот. Однако в случае, если среда вносит существенное искажение во временную форму пропускаемого излучения (из-за наличия большой дисперсии в среде, выделенных линий поглощения), такой метод для изучения объектов может оказаться неприменимым. Поэтому необходимо использовать пространственно-спектральное распределение, полученное в результате обработки изображений, для которого можно

взять разность фаз для какой либо частоты из спектра ТГц излучения, пропускаемого через исследуемый образец и свободно распространяющегося в воздухе. В этом случае наличие такой границы станет доступным для детектирования. Для теоретических оценок полученных результатов было построено пространственно-временное распределение ТГц излучения, схожее с получаемым в эксперименте по внесению тефлоновой пластинки в ТГц пучок (рис. 4).

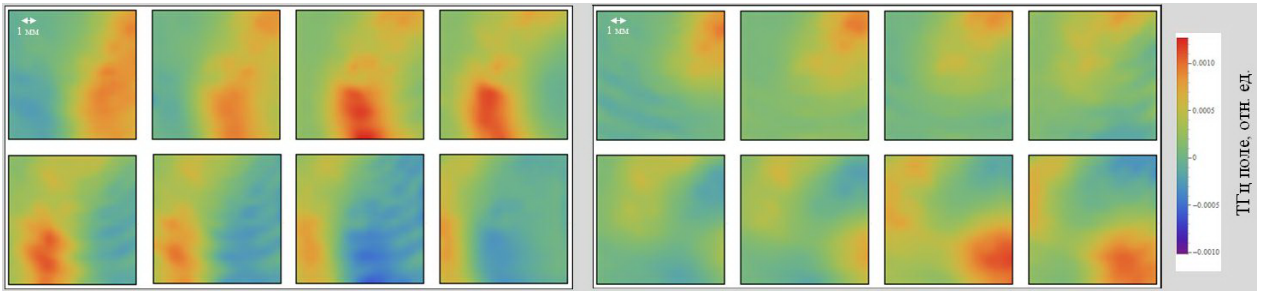

Рис. 2. Пространственно-временное распределение ТГц поля из кристалла ниобата лития в схеме с наклонным фронтом (задержка между изображениями 125 фс) с внесением тефлоновой пластинки в ТГц пучок (слева) и без нее (справа)

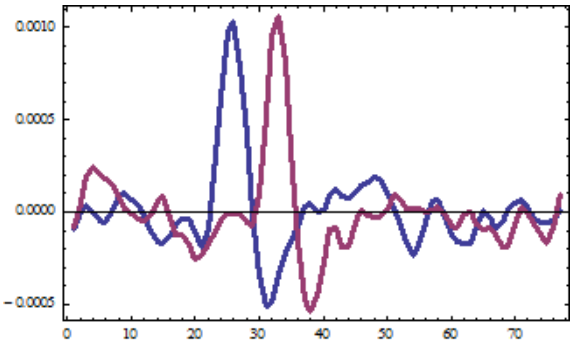

Рис. 3. Временная форма ТГц импульса в одной и той же точке с внесением тефлоновой пластинки (синяя) и без нее (красная)

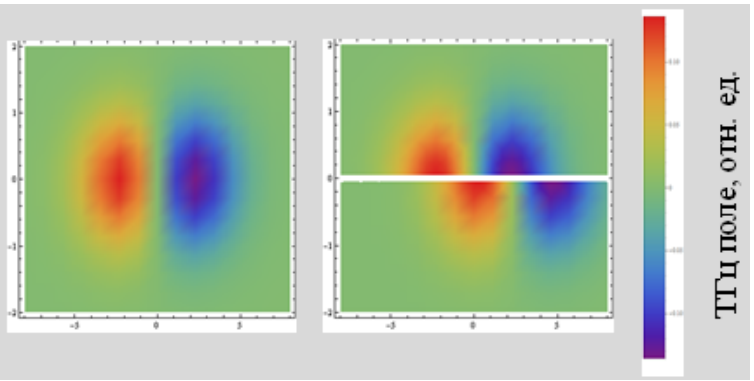

Рис. 4. Теоретически рассчитанное пространственно-временное распределение ТГц поля с внесением тефлоновой пластинки в ТГц пучок (справа) и без нее (слева)

Для частоты, соответствующей максимуму спектра ТГц излучения, изображение полученной в эксперименте разности фаз между ТГц импульсом, пропускаемым через тефлоновую пластинку и свободно распространяющемся в воздухе, представлено на рис. 5. На этом же рисунке представлены теоретически полученные значения разности фаз для той же частоты (без учета дифракции, дисперсии и поглощения), результаты которых хорошо согласуются с полученными экспериментальными результатами.

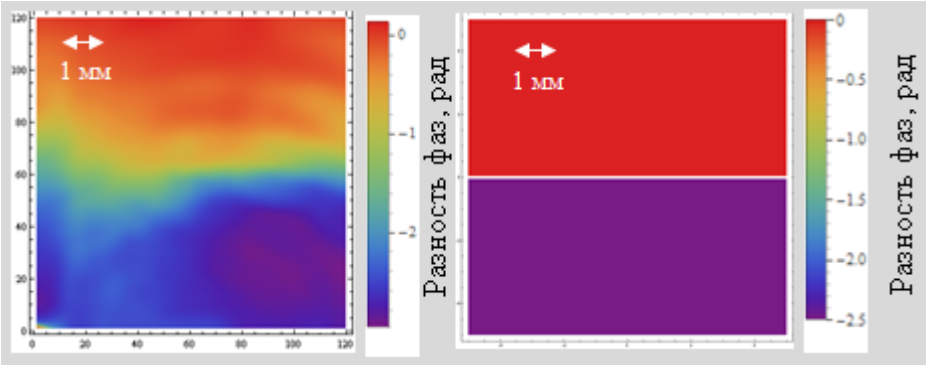

Рис. 5. Теоретически рассчитанное (справа) и экспериментально измеренное (слева) значения разности фаз ТГц поля для частоты, соответствующей максимуму спектра излучения ТГц источника, для пучка, распространяющегося в полностью свободном пространстве, и пучка, половина которого распространяется в свободном пространстве, а половина которого проходит через тефлоновую пластинку

Список литературы

1. Zhang X.-C., Xu J. Introduction to THz Wave Photonics (New York: Springer, 2010).
2. Wang S., Ferguson B., Abbott D. Zhang X.-C. J. Biol. Phys., 29 (2 – 3), 247 (2003).
3. Jiang Z, Zhang X., Member S. IEEE J. Quantum Electron., 36 (10), 1214 (2000).
4. Wang Y., Zhao Z., Chen Z., Zhang L., Kang K., Deng J. Applied Optics, 50 (35), 6453, (2011).
5. Hebling J., Yeh K.-L., Hoffmann M. C., Bartal B., Nelson K. A. J. Opt. Soc. Am. B, 25 (7), B6 (2008).
6. Zhang X.-C. Optics Express, 5 (11) 243, (1999).