

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ КОМПЛЕКСОМ ВЗАИМОДОПОЛНЯЮЩИХ МЕТОДИК

А. А. Ушаков, П. А. Чижов, В. В. Букин, Д. Е. Шипило, А. Б. Савельев-Трофимов, С. В. Гарнов

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

В последнее время появилась возможность создания новых инструментов для задач спектроскопии, томографии, построения изображений [1] в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот благодаря разработке источников этого излучения. 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 объектов при пропускании через них ТГц излучения с применением данной методики были продемонстрированы только для установок с монохроматическим излучением, что накладывает ряд ограничений на исследуемые объекты. Кроме того визуализация объектов со слабым поглощением возможна путем анализа временной формы импульса ТГц излучения. При распространении излучения через среду с показателем преломления, отличным от окружающей, возникает временная задержка, величину которой можно определить, сравнивая временные формы терагерцовых импульсов распространяющихся в присутствии образца и в его отсутствии [5]. В настоящей работе реализована схема построения изображений при просвечивании исследуемого объекта импульсным ТГц излучением тремя различными способами: путем анализа временной формы ТГц излучения, путем анализа кросс-корреляционной функции ТГц излучения и фазово-контрастным методом. Регистрация проводилась с использованием широкоапертурного электрооптического кристалла, что позволяет избавиться от необходимости сканирования и получать спектральную информацию об исследуемом объекте.

Целью работы является создание и апробация стенда для построения изображений исследуемых объектов в ТГц диапазоне частот различными методами 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 LiNbO_3 [6]. 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 широкоапертурного кристалла ZnTe ($10 \times 10 \times 0,5$ мм³, вырез $\langle 110 \rangle$). Вторая часть лазерного излучения – зондирующий импульс – пропусклась 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 [7].

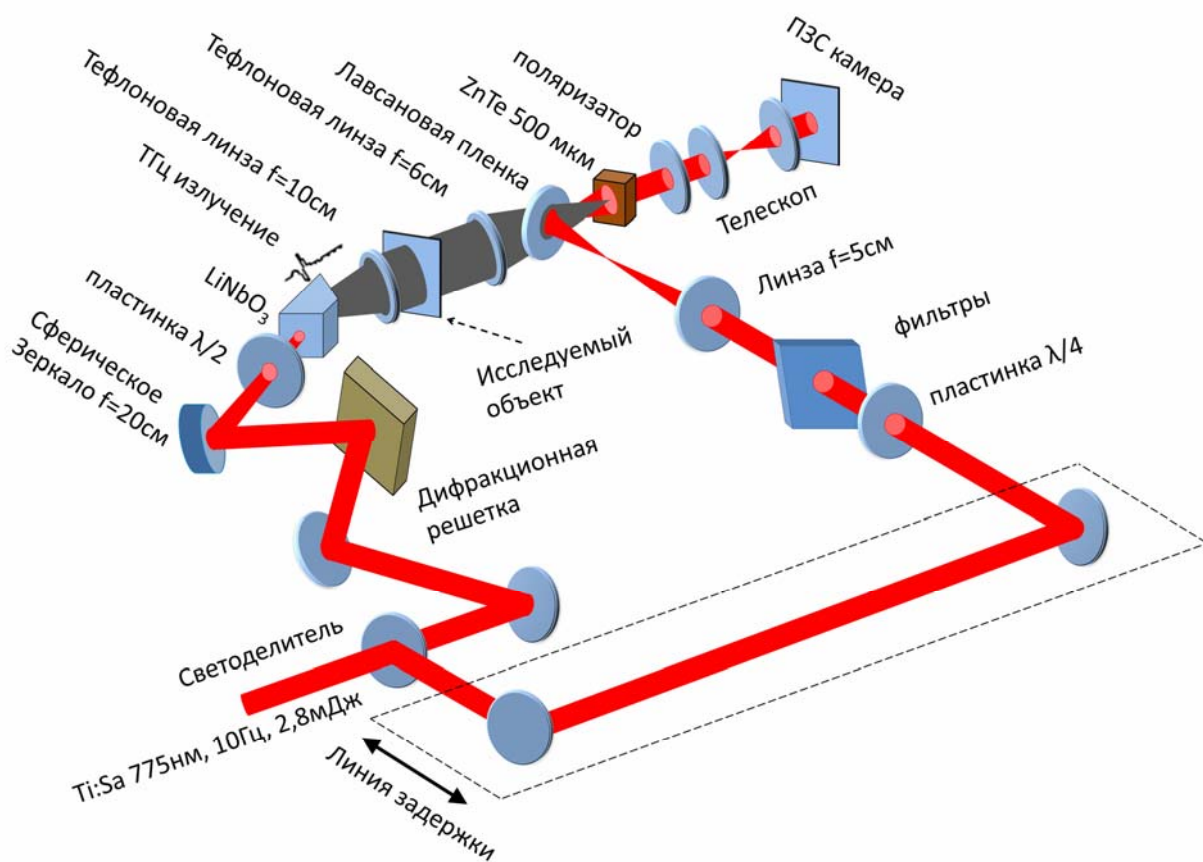


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для обработки полученных изображений снималось 2 серии по 50 кадров в присутствии ТГц излучения (сигнальные) и в его отсутствии (теньевые). Далее проводилось усреднение по каждой отдельной серии и из усредненных сигнальных вычитались значения усредненных теньевых кадров, деленные на усредненные теньевые. Затем проводилась пространственная фильтрация полученного изображения. Такие операции проводились для набора временных задержек (с шагом 125 фс) между 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. Первый способ визуализации основан на определении разности положений максимумов импульсов (задержки) терагерцового излучения в присутствии исследуемого объекта и в его отсутствии. Второй способ визуализации предполагает вычисление кросскорреляционной функции для импульсов терагерцового излучения, пропущенного через образец, и распространяющегося в его отсутствии. По положению максимума кросскорреляционной функции, соответствующего временной задержке, возникающей в образце, также возможно провести визуализацию. Для реализации фазово-контрастной визуализации к полученным двумерным пространственно-временным распределениям ТГц излучения 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.

Примером исследуемого образца в одном из экспериментов являлась тефлоновая пластинка толщиной 1 мм с вырезанным в ней символом «π». Характерные изображения исследуемого образца, реализованные различными способами визуализации, представлены на рис. 2. Зашумленность полученных изображений связана как с флуктуациями лазерного и терагерцового излучений, так и со сравнительно невысокой мощностью терагерцового излучения.



Рис. 2. Исследуемый образец (а) и его изображение, полученное методами времяпролетной (б), кросскорреляционной (в) и фазово-контрастной визуализации (г)

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. Ruffin A. B., Van Rudd J., Decker J., Sanchez-Palencia L., Le Hors L., Whitaker J. F., and Norris T. B. IEEE J. Quantum Electron., 38, 1110–1119 (2002).
6. Hebling J., Yeh K.-L., Hoffmann M.C., Bartal B., Nelson K.A. J. Opt. Soc. Am. B, 25 (7), B6 (2008).
7. Zhang X.-C. Optics Express, 5 (11) 243, (1999).