

# Измерение методом интерферометрии пространственно-временного распределения поля терагерцевых импульсов в электрооптическом кристалле

П.А.Чижов, А.А.Ушаков, В.В.Букин, С.В.Гарнов

*Предложена схема измерения пространственного распределения напряженности электрического поля терагерцевых импульсов в электрооптическом кристалле с применением оптической интерферометрии. Представлены полученные изображения распределений поля тестового источника со сферическим волновым фронтом.*

**Ключевые слова:** терагерцевое излучение, интерферометрия, электрооптическое детектирование.

## 1. Введение

Благодаря разработке источников ТГц излучения появилась возможность создания новых инструментов для задач спектроскопии, томографии, построения изображений и микроскопии [1–13]. Импульсные источники ТГц излучения позволяют проводить измерения в спектроскопии с временным разрешением, например при помощи схемы электрооптического детектирования [4, 6, 7]. Электрооптический кристалл как детектор ТГц излучения успешно применяется для построения изображений [9]. В работах [8, 12] использовались chirпированные импульсы, позволяющие за один импульс измерить весь временной профиль ТГц поля, что позволило сократить время получения изображения. Однако скорость визуализации определяется в основном временем, затраченным на пространственное сканирование объекта [9, 14], поэтому основным недостатком схемы электрооптического детектирования состоит в использовании кристаллов с малой апертурой. В настоящей работе реализована схема построения изображений на основе электрооптического кристалла с применением интерферометрической регистрации, что позволяет избавиться от необходимости сканирования.

## 2. Система построения изображений в терагерцевом диапазоне.

### Экспериментальная установка

Для генерации и регистрации ТГц излучения использовалось излучение лазерной системы Spectra Physics

**П.А.Чижов.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: puch@inbox.ru

**А.А.Ушаков.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: ushakov.aleksandr@physics.msu.ru

**В.В.Букин, С.В.Гарнов.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: vladimir.bukin@gmail.com, svgarinov@mail.ru

Поступила в редакцию 29 января 2015 г., после доработки – 13 февраля 2015 г.

Spitfire Pro XP (центральная длина волны 800 нм, частота следования импульсов 10 Гц, длительность импульса 40 фс, энергия импульса 2.5 мДж, диаметр гауссова пучка 12 мм по уровню  $1/e^2$ , горизонтальная поляризация). Лазерное излучение делилось на две части. Основная часть использовалась для генерации ТГц излучения в источнике, основанном на оптическом пробое воздуха двухцветными фемтосекундными лазерными импульсами [15]. Вторая часть лазерного излучения – зондирующий импульс – после прохождения линии переменной оптической задержки использовалась в стенде измерения напряженности электрического поля, показанном на рис. 1.

Принцип регистрации терагерцевого излучения основан на линейном электрооптическом эффекте. С этой целью ТГц импульс и зондирующий оптический импульс ( $\lambda = 800$  нм) направлялись на кристалл ZnTe ( $10 \times 10 \times 0.5$  мм, вырез (110); вертикальное направление в схеме соответствовало направлению  $\langle 001 \rangle$  в кристалле). При этом поляризация терагерцевого излучения была вертикальной, в то время как зондирующий импульс был поляризован под углом  $45^\circ$ . В результате электрооптического эффекта в оптически изотропном кристалле ZnTe наводилось двулучепреломление, причем в указанной геометрии эксперимента зондирующее излучение разделялось внутри кристалла на две волны (с вертикальной и горизонтальной поляризациями и одинаковыми интенсивностями), разность показателей преломления для которых линейно зависела от напряженности электрического поля ТГц импульса.

Неоднородное распределение напряженности поля по сечению кристалла приводило соответственно к неоднородному распределению разности фаз двух волн на выходе из кристалла. Задачей последующей схемы регистрации являлось построение на ПЗС-матрице интерференционной картины, несущей информацию о таком распределении разности фаз. С этой целью плоскость размещения

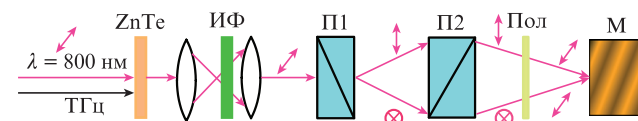


Рис. 1. Схема эксперимента: ИФ – интерференционный фильтр; П1 и П2 – призмы Воластона; Пол – пленочный поляризатор; М – матрица ПЗС-камеры.

электрооптического кристалла отображалась с помощью телескопа из двух одинаковых линз ( $f = 20$  см) на матрицу ПЗС-камеры (Basler acA2040-25gm-NIR, 1", 2048 × 2048). Внутри телескопа располагался интерференционный фильтр (центральная длина волны пропускания 795 нм, ширина на полувысоте 3 нм), который служил для увеличения времени когерентности зондирующего фемтосекундного импульса, что давало возможность наблюдать интерференционную картину с широкой областью контраста. Сама интерференционная картина формировалась интерферометром, состоящим из двух призм Волластона (с углами разведения лучей  $1.5^\circ$  и  $3^\circ$ ) и поляризатора, ориентированного под углом  $45^\circ$ . Использование двух призм с различными по величине и противоположными по знаку углами разведения лучей позволило сформировать в плоскости ПЗС-матрицы две ортогонально поляризованные волны, распространяющиеся под углом друг к другу и в то же время отображающие плоскость электрооптического кристалла без взаимного смещения. Расположенный после призм Волластона поляризатор предназначен для совмещения поляризации двух волн и, соответственно, для обеспечения их интерференции. В результате на матрице ПЗС-камеры формировалась интерференционная картина с периодом полос 30 мкм, что соответствовало углу схождения интерферирующих волн  $\alpha = 1.5^\circ$ . При

этом дополнительная разность фаз, обусловленная электрооптическим эффектом в кристалле ZnTe, приводила к смещению полос, т. е. к фазовой модуляции наблюдаемой картины.

### 3. Обработка полученных данных

В процессе эксперимента были получены интерферограммы как в присутствии ТГц импульса (сигнальные) так и без него (опорные). Для повышения отношения сигнал/шум для каждого времени задержки между оптическим и ТГц импульсами было сделано по 50 сигнальных и фоновых кадров. Для восстановления разности фаз применялась обработка интерферограмм, основанная на фильтрации в фурье-пространстве [16]. В результате обработки получалось двумерное изображение среднего изменения сдвига фазы из-за присутствия поля ТГц импульса. По сдвигу фазы можно вычислить напряженность ТГц поля  $E_{\text{THz}}$ . В соответствии с [17] в случае использования поляризации ТГц импульса и оптического излучения, ориентированных относительно кристаллографических осей ZnTe как в эксперименте,

$$E_{\text{THz}} = \frac{\Gamma\lambda}{\pi dn^3 r_{41}} \simeq 55\Gamma \text{ [кВ/см]}, \quad (1)$$

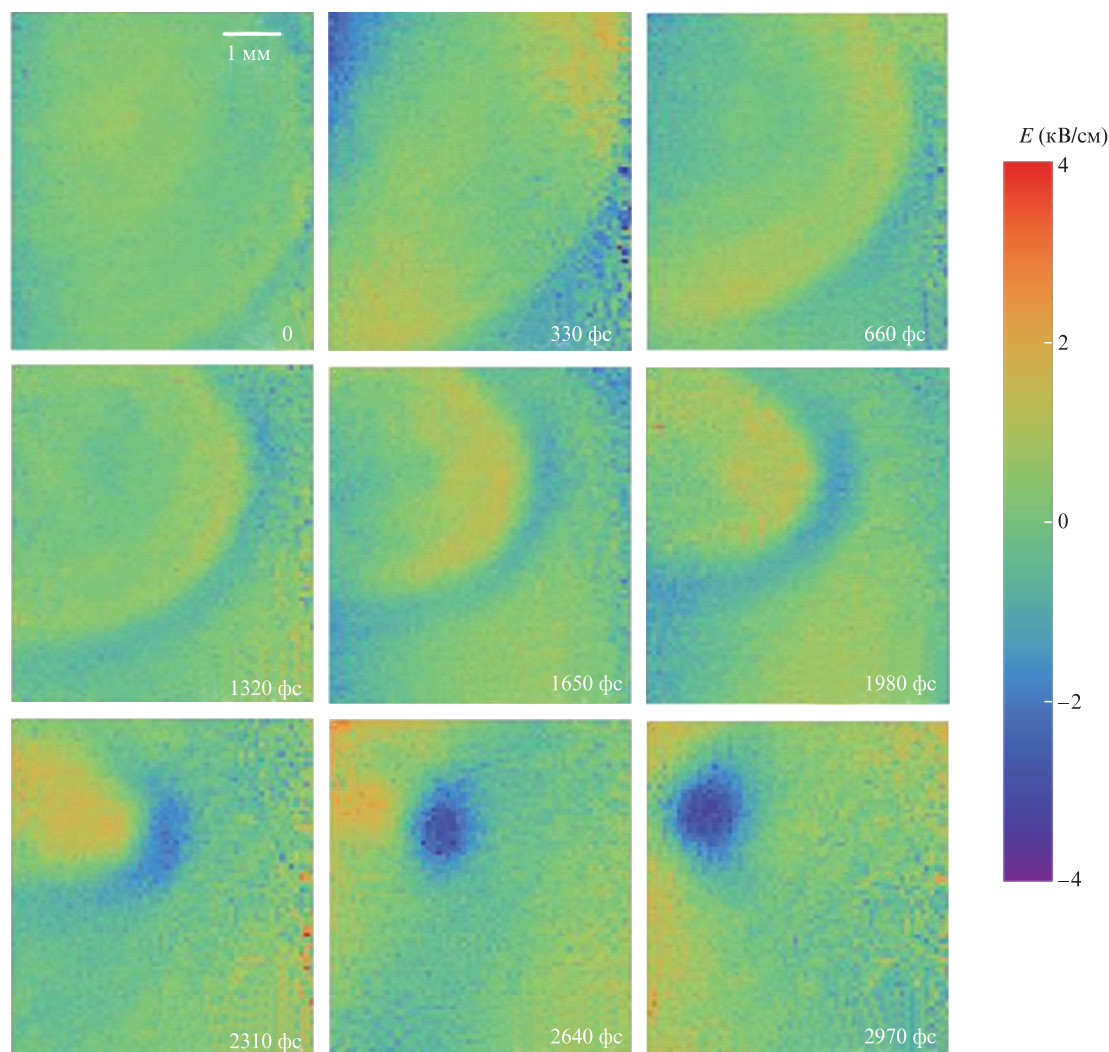


Рис.2. Изображения пространственного распределения напряженности электрического поля ТГц импульса для различных временных задержек.

где  $\Gamma$  – фазовый сдвиг из-за воздействия ТГц поля;  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения;  $n$  и  $r_{41}$  – показатель преломления и электрооптический коэффициент кристалла;  $d$  – толщина кристалла.

#### 4. Результаты

Полученные в ходе проведения экспериментов пространственно-временные профили напряженности поля ТГц импульса приведены на рис.2. Электрооптический кристалл размещался в плоскости, расположенной на расстоянии 1 см до геометрического фокуса тefлоновой линзы. Поскольку в этой области фокусируемое ТГц излучение имеет сферический волновой фронт, профили напряженности  $E_{\text{THz}}$  имеют форму колец, которые соответствуют сечениям сферического фронта ТГц излучения плоскостями зондирующего импульса. При увеличении времени задержки (т.е. при более позднем приходе зондирующего оптического импульса) диаметр кольца уменьшается, схлопываясь в пятно при касании зондирующим импульсом сходящегося сферического фронта ТГц импульса.

Среднеквадратичное значение шумовой составляющей разности фаз  $\delta\varphi$  вычислялось по области кадра, в которой отсутствовал сигнал. Полученное в результате значение  $\delta\varphi \simeq 5$  мрад эквивалентно шумовой напряженности электрического поля  $\delta E \simeq 280$  В/см. В работах [8, 9, 17] минимально детектируемое поле в схемах на основе теневой регистрации составляло  $\sim 100$  В/см. Основная причина снижения чувствительности в интерферометрической схеме – наличие механических вибраций, которые приводят к случайному смещению полос в интерференционной картине. Минимизация уровня механических вибраций должна позволить повысить уровень чувствительности описанной методики.

#### 5. Заключение

Предложена и реализована схема измерения пространственно-временного распределения напряженности элек-

трического поля ТГц импульсов. Полученные распределения поля от тестовых источников демонстрируют возможность применения подобной схемы в задачах визуализации и построения изображений в терагерцевом диапазоне, в том числе и при использовании относительно маломощных источников излучения.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» и стипендии Президента РФ для молодых ученых и аспирантов (проект СП-2391.2013.2).

1. Zhang X.-C., Xu J. *Introduction to THz Wave Photonics* (New York: Springer, 2010).
2. Mittleman D.M., Hunsche S., Boivin L., Nuss M.C. *Opt. Lett.*, **22** (12), 904 (1997).
3. Wynne K., Jaroszynski D.A. *Opt. Lett.*, **24** (1), 25 (1999).
4. Wang S., Ferguson B., Abbott D. Zhang X.-C. *J. Biol. Phys.*, **29** (2–3), 247 (2003).
5. Mittleman D.M., Gupta M., Neelamani R., Baraniuk R.G., Rudd J.V., Koch M. *Appl. Phys. B*, **68** (6), 1085 (1999).
6. Mittleman D.M., Jacobsen R.H., Nuss M.C. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2** (3), 679 (1996).
7. Peiponen K.-E., Zeitler J.A., Kuwata-Gonokami M. *Terahertz Spectroscopy and Imaging* (Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013).
8. Jiang Z., Zhang X., Member S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36** (10), 1214 (2000).
9. Jiang Z., Zhang X. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, **47** (12), 2644 (1999).
10. Oh S.J., Choi J., Maeng I., Park J.Y., Lee K., Huh Y.-M., Suh J.-S., Haam S., Son J.-H. *Opt. Express*, **19** (5), 4009 (2011).
11. Hu B.B., Nuss M.C. *Opt. Lett.*, **20** (16), 1716 (1995).
12. Jiang Z., Zhang X.-C. *Opt. Lett.*, **23** (14), 1114 (1998).
13. Kim K.Y., Yellampalle B., Taylor A.J., Rodriguez G., Glowina J.H. *Opt. Lett.*, **32** (14), 1968 (2007).
14. Kim K.Y., Yellampalle B., Rodriguez G., Averitt R.D., Taylor A.J., Glowina J.H. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 041123 (2006).
15. Cook D.J., Hochstrasser R.M. *Opt. Lett.*, **25** (16), 1210 (2000).
16. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1), 156 (1982).
17. Casalbuoni S., Schlarb H., Schmidt B., Schmüser P., Steffen B., Winter A. *Phys. Rev. Spec. Topics-Accelerators and Beams*, **11** (7), 072802 (2008).