

ПОЛУЧЕНИЕ ТОПОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА

М. С. Куля, Я. В. Грачев, В. Г. Беспалов

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

maxk2350@yandex.ru, gachev_y@mail.ru, victorbespaloff@gmail.com

Рассмотрены возможности экспериментальной установки регистрации временной формы импульсного ТГц излучения, отраженного от объектов (ТГц рефлектометр) для импульсной терагерцовой рефлектометрической томографии визуализации внутренней структуры объектов, прозрачных в ТГц диапазоне частот. Получены двух- и трехмерные топограммы тестового объекта, определены пределы разрешения данного метода. Выявлено, что пространственно-временная регистрация формы отраженных импульсов позволяет достаточно эффективно формировать топограммы поверхностей с глубиной рельефа в диапазоне от 1 до 1000 мкм.

Ключевые слова: импульсное терагерцовое излучение, томография, рефлектометрия, дефектоскопия.

1. Введение

Терагерцовым (ТГц) называют излучение, лежащее в интервале частот 0,1–10 ТГц, которое по длинам волн находится между инфракрасным и миллиметровым/ субмиллиметровым диапазонами от 0,03 мм до 3 мм. Исследования физики и техники ТГц излучения начались достаточно давно [1, 2], однако только с развитием фемтосекундной оптики и фотоники в данной области наметился значительный прогресс. На настоящее время достаточно хорошо разработаны методы получения и детектирования ТГц излучения как с использованием световых импульсов фемтосекундной длительности, так и с использованием бигармонического непрерывного лазерного излучения [3–6]. Следует отметить, что методы детектирования импульсного ТГц излучения позволяют регистрировать непосредственно временную форму электрического поля ТГц импульса, а путем Фурье-преобразования – комплексный спектр излучения, спектры пропускания или отражения веществ, а также диэлектрические проницаемости в данном диапазоне частот [7].

Формирование изображения, визуализация внутренней структуры объектов, неразрушающий контроль изделий, томография и голография в ТГц диапазоне частот представляют значительный интерес, как для научных, так и для практических применений [8–15]. Для получения пространственной информации в основном используется пиксельное сканирование, при котором происходит поточечная регистрация импульсных временных форм ТГц излучения в плоскости изображения объекта, в геометрии пропускания [8, 9, 14, 15] или отражения [10, 12, 13]. При дальнейшей компьютерной обработке полученных временных форм ТГц излучения возможно получение двумерного изображения [8, 12] или трехмерной картины объекта [10–15], а также комплексных спектров [9,10].

В [14, 15] рассмотрена схема регистрации временной формы импульсного ТГц излучения, отраженного от объектов (ТГц рефлектометр) и проведены предварительные эксперименты. В данной работе более подробно исследованы возможности схемы [14] для формирования изображения и визуализации внутренней структуры объектов.

2. Схема рефлектометра импульсного ТГц излучения

В оптической схеме (рис.1) лазерный пучок от фемтосекундного лазера FL-1 (параметры приведены в Таб.1), при помощи светоделительной пластины 1 разделяется на пробный пучок и пучок накачки. Пробный пучок системой зеркал $M1 - M3$ попадает в схему электрооптического детектирования, состоящую из электрооптического кристалла CdTe 9 вырезанного по направлению [110] фазосдвигающей пластины $\lambda/4$ 10, призмы Волластона 11 и балансного детектора 12. Разностный сигнал с балансного детектора, который пропорционален амплитуде электрического поля ТГц излучения приходящего на электрооптический кристалл в точке фокусировки пробного пучка и ТГц излучения линзой 8, усиливается на частоте работы оптико-механического модулятора 5 с помощью синхронного усилителя, переводится в цифровую форму в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) и записывается в память компьютера. Пучок накачки проходит через управляемую линию задержки 2, попадает в генератор ТГц излучения 3, состоящий из кристалла InAs, помещенного в магнитное поле специальной системы на постоянных магнитах из NdBFe [5] (магнитная индукция в рабочем зазоре 2,4 Тесла). За генератором расположены фильтры из фторопласта, поглощающего ИК излучение пучка накачки и не ослабляющие значительно ТГц излучение. Далее ТГц излучение коллимируется первым параболическим зеркалом 4, пройдя светоделительную пластину из высокоомного кремния 7, фокусируется вторым внеосевым параболическим зеркалом 4 на исследуемый объект 6, закрепленный на двухкоординатной управляемой микрометрической подвижке. ТГц излучение, отражаясь от объекта, собирается вторым внеосевым параболическим зеркалом 4 и после отражения от светоделительной пластины 7 фокусируется линзой 8 с фокусом 5 см на электрооптический детектор – кристалл CdTe. Записанные данные в память компьютера значений амплитуд ТГц электрического поля при изменении времени задержки между пробным и пучком накачки формируют массив, отражающий временную форму ТГц импульса.

Ниже в таблице 1 приведены основные характеристики данного лабораторного макета регистрации временной формы импульсного ТГц излучения, отраженного от объектов (рефлектометра импульсного ТГц излучения).

3. Методика и результаты измерений

Измерение временной формы терагерцового импульса, отраженного от объекта, осуществлялся изменением значения времени задержки между пучком накачки и пробным пучком с помощью линии задержки от 2 вплоть до 100 пс. ТГц импульс, отраженный от объекта в виде зеркальной поверхности металла, представлял собой один период синусоидальной структуры с положительным и отрицательным выбросами общей длительностью $\Delta\tau \sim 3$ пс, за которой следовали нерегулярные малоинтенсивные выбросы [14]. Таким образом, временная картина отражения от слоистой диэлектрической среды, в которую может проникать ТГц импульс, позволяла визуализировать внутреннюю структуру объекта по глубине с разрешением не хуже

$$\Delta d = \Delta\tau \cdot c/2n \leq 450 \text{ мкм}, \quad (1)$$

где c – скорость света, n – показатель преломления среды в ТГц диапазоне частот. Отражение ТГц импульса от границы раздела следующего внутреннего слоя объекта с другим показателем преломления вызывает появление во временной картине реплики исходного импульса, сдвинутой по времени. Таким образом, анализируя временную зависимость электрического поля ТГц отраженного сигнала $E(t)$, возможно визуализировать трехмерную внутреннюю структуру объекта.

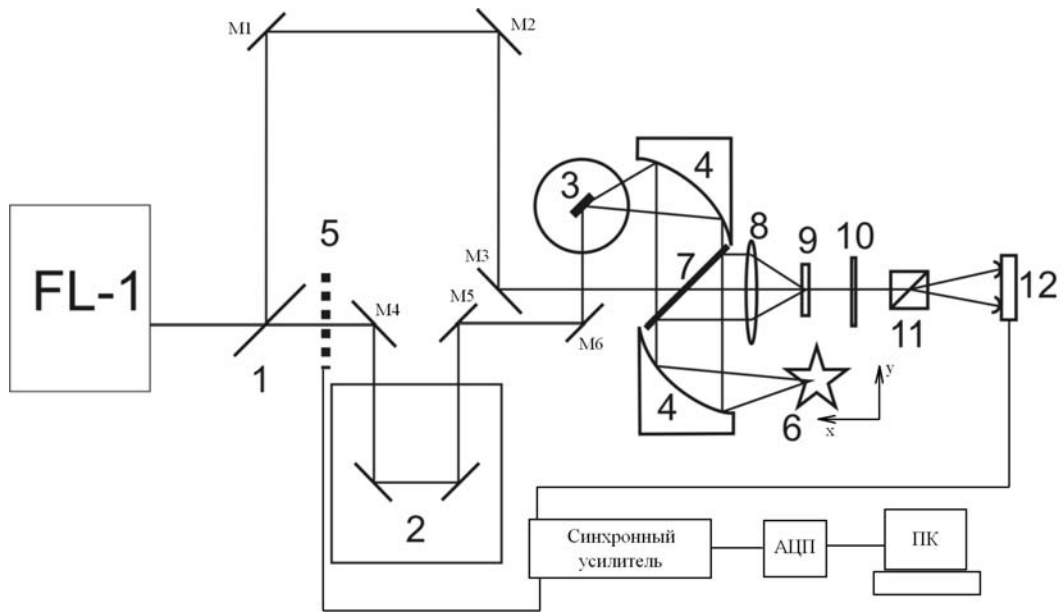


Рис. 1. Оптическая схема измерений отражения ТГц излучения от различных сред. FL-1 – лазер фемтосекундных импульсов на Yb:KYW; M1-M6 – зеркала с $R = 100\%$ при падении светового пучка под 45° ; 1 - светоделитель; 2 – оптическая линия задержки; 3 – генератор ТГц излучения на основе кристалла InAs; 4 - параболические зеркала; 5 – оптико-механический модулятор; 6 – объект исследования; 7 – светоделитель ТГц излучения на основе пластины из высокоомного кремния; 8 – линза из TPX с $f = 5$ см; 9 – электрооптический кристалл CdTe; 10 – ахроматическая четвертьволновая пластинка; 11 – призма Волластона; 12 – балансный детектор, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, ПК – персональный компьютер

Для тест-эксперимента была взята дискета 3.5", представляющая собой пластиковый корпус с толщиной стенок $\Delta l = 620$ мкм, и диск внутри, покрытый ферромагнитным слоем. Отражение от внутренней структуры дискеты представлено ниже на рис.2.

Первый по времени период синусоидальной структуры в отраженном сигнале с положительным и отрицательным выбросами соответствует отражению исходного ТГц импульса от границы воздух-стенка, следующий, обратной полярности (первая полуволна отрицательная), соответствует отражению стенка-воздух. Смена полярности связана с тем, что данные границы раздела различаются по соотношению показателей преломления – на первой границе переход происходит из менее плотной в более плотную оптическую среду, на второй наоборот – что приводит к сдвигу фазы на π между ними. Измеряя время между соответствующими максимумами данных структур и зная толщину стенки можно оценить показатель преломления материала в данном диапазоне частот исходя из (1): $n = \Delta t \cdot c / 2\Delta l \approx 2,18$. Это согласуется с данными по показателям преломления пластиков в этом диапазоне частот [4].

Третья временная структура на рис.2 представляет отражение от пластикового диска с ферромагнитным слоем толщиной 50 мкм. Очевидно, вследствие малой толщины, отражения импульсного ТГц излучения от передней и задней границы диска налагаются друг на друга и дают в результате два практически равных по амплитуде пика – положительный и отрицательный.

ТАБЛИЦА 1. Характеристики импульсного ТГц рефлектометра

Лазер накачки FL-1	
Активная среда	Yb:KYW
Средняя выходная мощность, Вт на длине волны 1040 нм	$\geq 1,4$
Частота повторения импульсов, МГц 2)	75
Энергия в одиночном импульсе, нДж	> 13
Длительность импульса по полувысоте, фс	~ 150
Спектральная ширина линии, нм	~ 5
Качество луча	$TEM_{00}; M^2 \leq 1.5$
Диаметр пучка	5 мм
Стабильность выходного излучения, %	≤ 3
Поляризация	Линейная (горизонтальная)
Характеристики ТГц излучения	
Длительность импульса, пс	3
Средняя мощность ТГц излучения, мкВт	30 ± 3
Спектральный диапазон, ТГц, мкм	$0,6 \div 1,7$ $5000 \div 176$
Длина волны в максимуме спектральной кривой, мкм	370
Диаметр сфокусированного ТГц пучка на объекте, мм	1
Частота повторения импульсов, МГц	75
Характеристики приемной системы	
Чувствительность, пВт	~ 1
Отношение сигнал/шум по амплитуде электрического поля ТГц импульса	~ 100
Частота оптико-механического модулятора	470 Гц

Следует отметить, что положение границы среды по глубине может быть определено со значительно большей точностью, чем по (1). Это связано с тем, что точность положения абсолютного максимума амплитуды соответствующей синусоидальной структуры определяется временным шагом в отраженном ТГц сигнале, и, соответственно разрешением по координате, зависящей от шага перемещения оптической линии задержки. Минимальный шаг перемещения в нашей схеме составлял 5 мкм (~ 17 фс), что и соответствует минимально возможному пространственно-временному разрешению.

Для исследования возможности получения двух- и трехмерных топограмм поверхности объектов с использованием рефлектометра импульсного ТГц излучения была взята металлическая подложка 20×20 мм² с вырезанной на поверхности объемной крестообразной структурой глубиной 2,5 мм, после чего она покрывалась слоем эпоксидного «Рохіро!», поверхность которого была зачищена после застывания. Данный объект был закреплен на двухкоординатной управляемой микрометрической подвижке, фокусировка ТГц пучка производилась в один из углов объекта, далее производилось измерение временной формы отраженного импульса. В дальнейшем объект передвигался по координате x на $\delta = 2$ мм и измерение повторялось в новой точке, после сдвига объекта на полную ширину по x ,

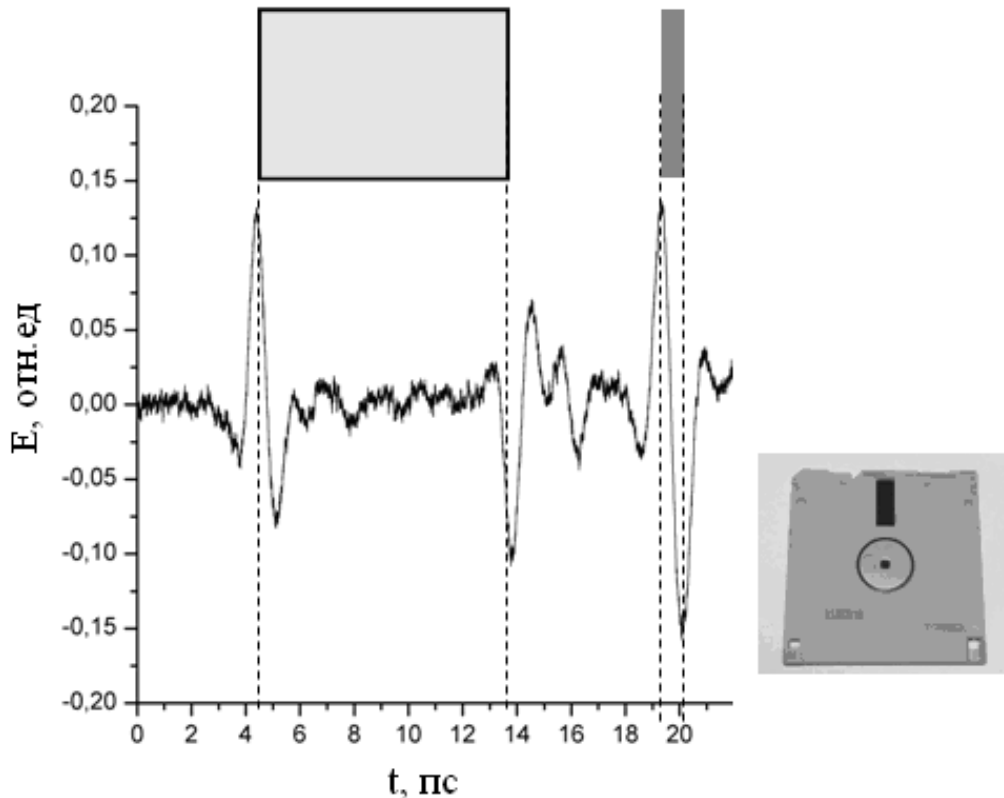


Рис. 2. Структура флоппи диска и отражение ТГц импульсов от границ раздела. Вверху в виде серых прямоугольников обозначены стенки и диск. Для определенности, положение границы среды связывалось с абсолютным максимумом соответствующей синусоидальной структуры

производился сдвиг на $\delta = 2$ мм по x и цикл повторялся. Сдвиг $\delta = 2$ мм выбирался исходя из диапазона длин волн ТГц излучения источника и диаметра сфокусированного пучка на объекте (см. Таб.1).

На рис.3. показаны временные формы отраженных ТГц импульсов в двух различных по топологии точках объекта. На рис.3а и б первый импульс представляет собой отражение от передней поверхности диэлектрика, второй импульс это отражение от задней металлической поверхности; следует отметить, что полярность у них одинаковая, что обусловлено сдвигом фазы на π исходного сигнала как при отражении от раздела воздух-эпоксидный клей, так и при отражении от поверхности металла. По времени, для точки (а) разность между максимумами двумя отраженными импульсами составляет около 10 пс, а для точки (б) около 20 пс, что свидетельствует о существенно различной глубине внутреннего рельефа.

Комбинируя данные измерений по координате x можно получить двумерные картины распределения поля $E(x, y_i, t)$ в различных слоях по координате y_i (рис.4,5) Из графиков наглядно видны плоскости отражения ТГц импульсов от рельефа образца. Передний фронт соответствует отражению от поверхности диэлектрика, задний фронт — отражению от металла.

Далее комбинируя двумерные зависимости $E(x, t)$ и рассчитав глубину проникновения импульса по положению максимума амплитуды второго импульса (рис. 3 отражение от задней металлической поверхности) можно получить топограмму объекта или контурных

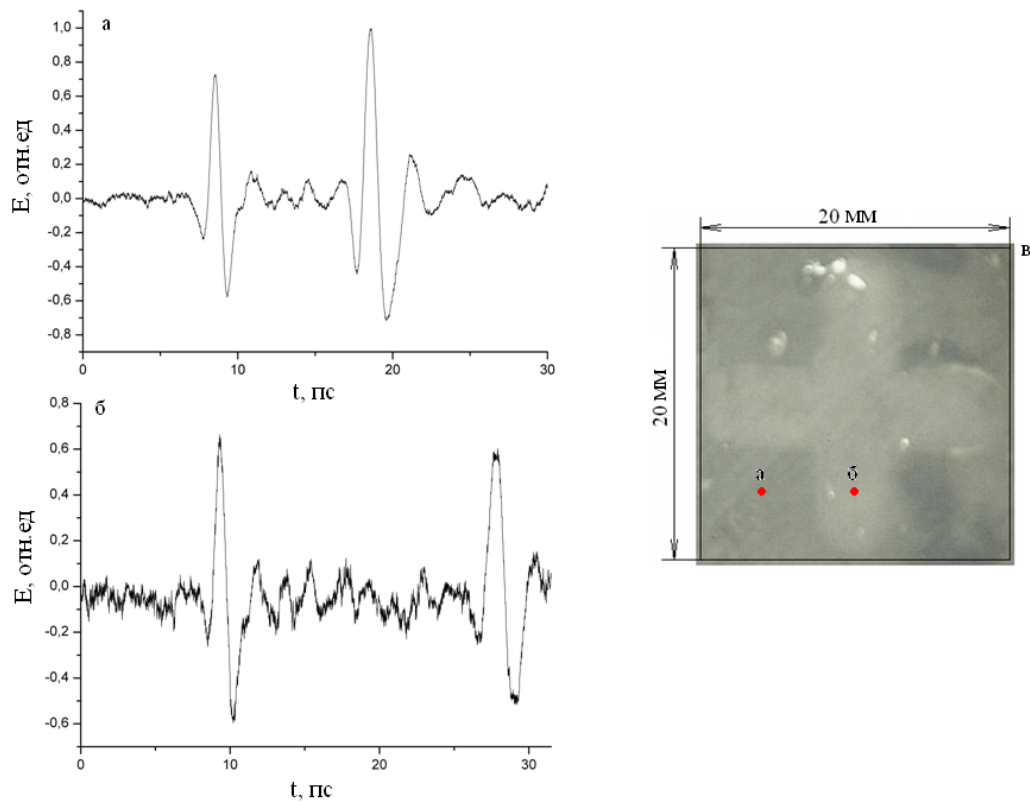


РИС. 3. а - отражение импульсов в точке а где нет углубления, б - отражение импульсов в точке б где есть углубление, в - внешний вид исследуемого образца с отмеченными характерными точками а и б

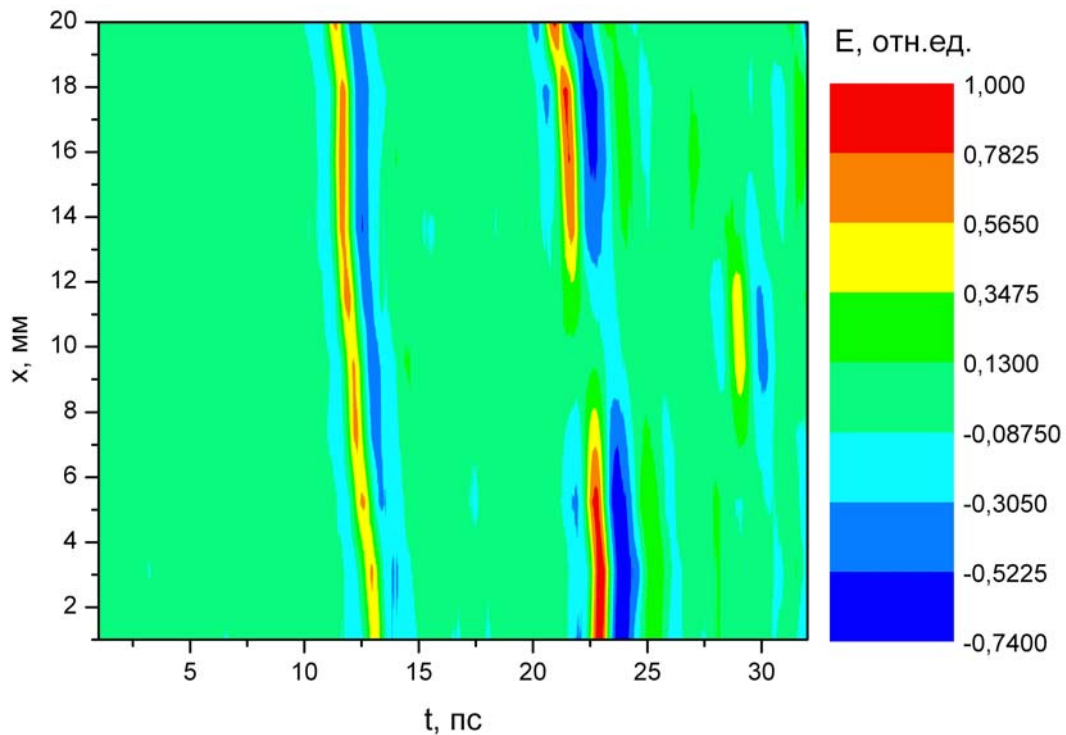


РИС. 4. Изображения слоя образца в срезе $y=2\text{мм}$

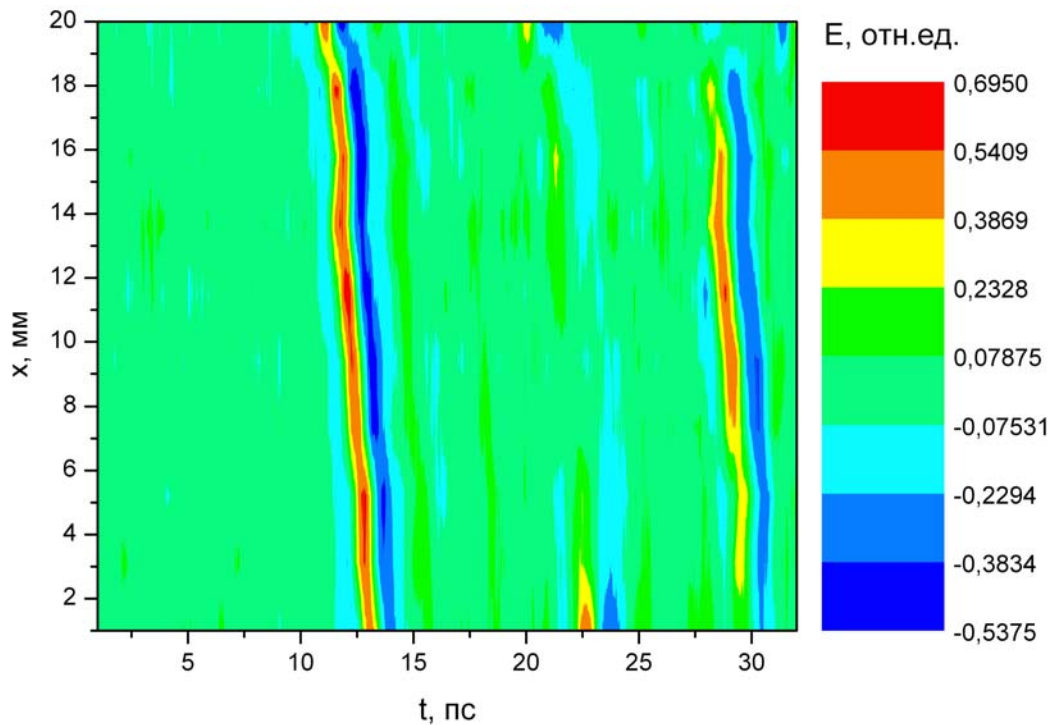


Рис. 5. Изображения слоя образца в срезе $y = 6$ мм

карт рельефа поверхности, на котором каждый контур представляет собой геометрическое место точек поверхности, имеющих некоторую постоянную высоту над фиксированной поверхностью (рис.6) Разрешение по глубине, для наглядности представления рельефа, в данном случае было выбрано 35 мкм и было значительно больше теоретического предела в 5 мкм и задавалось с помощью компьютерной обработки. Регистрация рельефа поверхности объекта или его деформаций больших по величине 1. . . 10 мкм, где прямая голографическая интерферометрия слишком чувствительна, обычно реализуется с использованием источников в видимом диапазоне спектра с помощью методов голографических топограмм или спекл-интерферометрии. Таким образом, пространственно-временная регистрация формы импульсного ТГц излучения, отраженного от объектов позволяет достаточно эффективно формировать топограммы поверхностей в диапазонах от 1 до 1000 мкм.

4. Заключение

Проведены исследования возможностей экспериментальной установки регистрации временной формы импульсного ТГц излучения, отраженного от различных объектов. Приведены подробные характеристики установки с описанием схемы и методики проведения измерений. Показано, что анализируя временную зависимость электрического поля ТГц отраженного сигнала $E(t)$, возможно визуализировать трехмерную внутреннюю структуру объекта. Результаты тест-эксперимента по отражению от внутренней структуры дискеты 3.5", представляющую собой пластиковый корпус и диск внутри, показали возможность определения распределения диэлектрических слоев по глубине, а также показателя преломления в ТГц диапазоне частот. Отмечено, что положение границы среды по глубине может быть определено с пространственно-временным разрешением соответствующим минимальному шагу перемещения линии задержки (5 мкм, 17 фс). Получены двух- и трехмерные

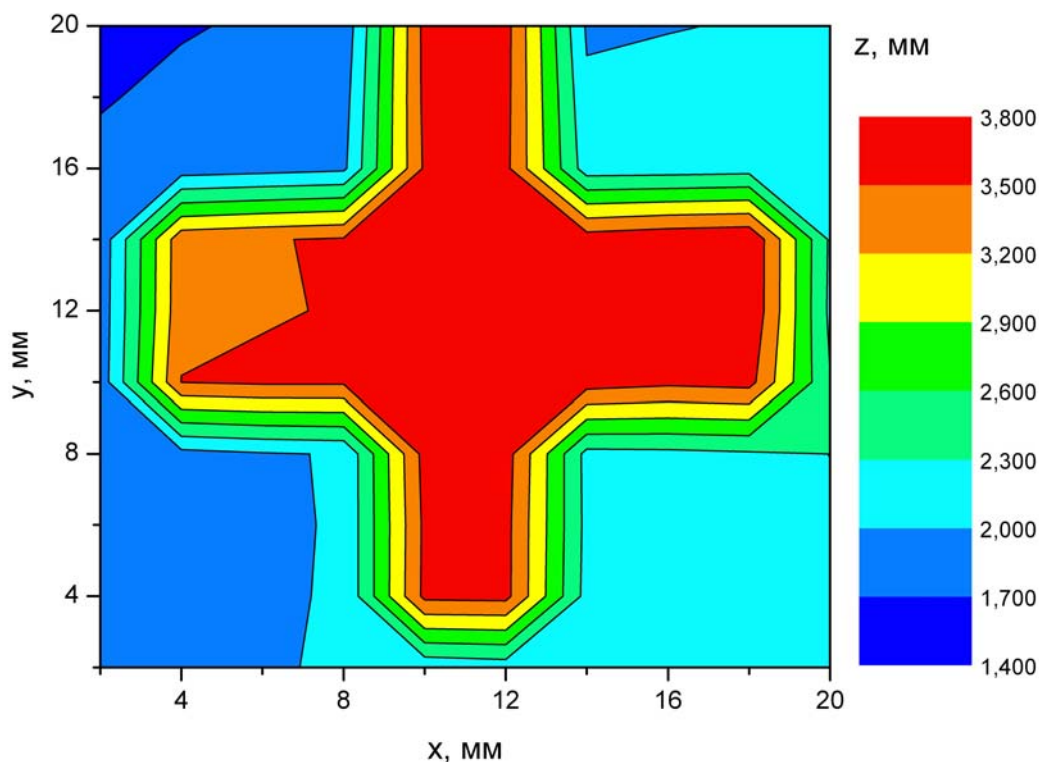


РИС. 6. Восстановленная топограмма исходного объекта

топограммы металлической подложки с вырезанной на её поверхности объемной крестообразной структурой, покрытой слоем эпоксидного клея. Выявлено, что пространственно-временная регистрация формы импульсного ТГц излучения, отраженного от объектов позволяет достаточно эффективно формировать топограммы поверхностей с глубиной рельефа в диапазоне от 1 до 1000 мкм.

Работа выполнена в рамках работы по госконтракту № 16.513.11.3070 от 19 апреля 2011 года.

Литература

- [1] Glagolewa-Arkadiewa A. Short electromagnetic waves of wavelength up to 82 microns. // *Nature*. — 1924. — V. 113, № 2844. — P. 640.
- [2] Геккер И. В., Юрьев В. И. Субмиллиметровые волны. — М: Госэнергиздат, 1961. — 60 с.
- [3] Zhang X.C., Xu J. Introduction to THz wave photonics. — NY.: Springer, 2009. — 246 p.
- [4] Lee Yun-Shik. Principles of terahertz science and technology. Springer Science+Business Media, LLC, XII 2009, 340 p.
- [5] Беспалов В. Г., Городецкий А. А., Денисюк И. Ю. и др. Методы генерации сверхширокополосных терагерцовых импульсов фемтосекундными лазерами. // *Оптический журнал*. — 2008. — Т.75, № 10. — С. 636–642.
- [6] Matsuura S., Tani M. and Sakai K. Generation of coherent terahertz radiation by photomixing in dipole antennas. // *Applied Physics Letter*. — 1997. — V. 70, № 5. — P. 559–561.
- [7] Cheville R. A., Reiten M. T., O'Hara J., Grischkowsky D. R. THz time domain sensing and imaging. // *Proc. SPIE: Terahertz for Military and Security Applications II*. — 2004. — № 5411. — P. 196–206.
- [8] Hu B.B. and Nuss M.C. Imaging with terahertz waves // *Optics Letters*. — 1995. — V. 20, № 16 — P. 1716–1718.
- [9] Mittleman D., Jacobsen R., Nuss M.C. T-Ray Imaging. // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. — 1996. — V. 2, № 3. — P. 679–692.

- [10] Woodward R.M., Cole B.E., Wallace V.P., Pye R.J., Arnone D.D., Linfield E.H., Pepper M. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue. // *Phys. Med. Biol.*— 2002. —V. 47, № 21 — P. 3853–3863.
- [11] Wang S. and Zhang X-C. Pulsed terahertz tomography. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 2004. — 37, R1-36. — P. 964.
- [12] Bespalov V.G., Gorodetsky A.A. THz Pulse Holography. // *Journal of Holography and Speckle.* — 2009. — V. 5, № 1. — P. 62–66.
- [13] Chen Chia-Chu, Lee Dong-Joon, Pollock Tresa, Whitaker John F. Pulsed-terahertz reflectometry for health monitoring of ceramic thermal barrier coatings. // *Opt. Express.* — 2010. — V. 18, № 4. — P. 3477–3486.
- [14] Куля М.С., Грачев Я.В., Городецкий А.А., Беспалов В.Г. Спектрально-временная эволюция электрического поля терагерцового импульса при дифракции Фраунгофера на щели. // *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.* — 2011. — №6(76). — С. 22–27.
- [15] Беспалов В.Г., Городецкий А.А., Грачев Я.В., Козлов С.А., Новоселов Е.В. Импульсный терагерцовый рефлектометр. // *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.* — 2011. — № 1(71). — С. 19–24.