

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2021.5.3.001

УДК 621.317.328

Терагерцовый сканирующий рефлектометр для визуализации строения полимерных конструкций в аддитивном производстве

А. И. Бердюгин, А. В. Бадьин ✉, Р. П. Гурский,
Е. А. Трофимов, Г. Е. Кулешов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

✉ thzlab@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты разработки и практического применения в аддитивном производстве системы рефлектометрии объектов в терагерцовом диапазоне частот для анализа структуры. Для непрерывной генерации электромагнитного излучения применялась лампа обратной волны, в качестве детектора использовался акустооптический преобразователь (Ячейка Голея). Управление рефлектометром реализовано с персонального компьютера через модуль ввода-вывода L-card E154 и штатный цифро-аналоговый преобразователь спектрометра СТД-21. Тестирование системы произведено на частоте 874 ГГц на образце композиционной конструкции, изготовленной методом 3D-печати.

Ключевые слова

рефлектометр, терагерцовое излучение, имиджинг, визуализация, неоднородный объект

Для цитирования

Бердюгин А. И., Бадьин А. В., Гурский Р. П., Трофимов Е. А., Кулешов Г. Е. Терагерцовый сканирующий рефлектометр для визуализации строения полимерных конструкций в аддитивном производстве. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(3):207–224. DOI: 10.15826/urej.2021.5.3.001.

Terahertz Scanning Reflectometer for Structure Visualization of Polymer Constructions in Additive Manufacturing

A. I. Berdyugin, A. V. Badin ✉, R. P. Gursky, E. A. Trofimov,
G. E. Kuleshov

National Research Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk,
634050, Russia

✉ thzlab@mail.ru

Abstract

The results of the development and practical application of a quasi-optical system for reflectometry of objects in the terahertz frequency range for analyzing the structure in additive manufacturing of objects

© Бердюгин А. И., Бадьин А. В., Гурский Р. П.,
Трофимов Е. А., Кулешов Г. Е., 2021

are presented. A backward-wave oscillator is used for continuous generation of electromagnetic radiation; an acousto-optic converter (Golay cell) is applied as a detector. The reflectometer is controlled by personal computer through the L-card E154 input-output module and the standard digital-to-analog converter of the STD-21 spectrometer. The system is tested at the frequency of 874 GHz on the 3D-printed composite structure sample. Our paper is terahertz reflectometer with a source of continuous monochromatic electromagnetic radiation based on a backward wave oscillator is presented. The purpose of this work in creating a scanning THz reflectometer is considered to have been achieved. At the same time, the following tasks are solved: a quasi-optical scheme of the reflectometer is selected and assembled; the hardware part of the system (all mechanisms and components) is implemented; a program for controlling the radiation intensity registration system is adapted for this task; the test sample is manufactured using 3D printing technology, the THz reflectometer is tested. The obtained practical results of registration of the two-dimensional distribution of the reflection coefficient show that the use of THz radiation is promising for visualizing the structure of structures obtained by additive technology. Further development of the project is planned by changing the construction of the positioning mechanism, which will provide micrometric calibration of the sample holder relative to the diaphragm. The use of the quasi-optical scheme of the two-beam interferometer for recording the phase distribution and amplitude of reflected THz radiation will allow obtaining information about the spatial location of defects (inhomogeneities) of products obtained by additive technology.

Keywords

reflectometer, terahertz radiation, imaging, visualization, inhomogeneous object

For citation

Berdyugin A. I., Badin A. V., Gursky R. P., Trofimov E. A., Kuleshov G. E. Terahertz Scanning Reflectometer for Structure Visualization of Polymer Constructions in Additive Manufacturing. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(3):207–224. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.3.001.

Введение

Визуализация электрофизических свойств материалов на сегодняшний день осуществляется посредством методов, где в качестве инструмента воздействия с исследуемым объектом используются рентгеновское излучение [1], излучение видимого диапазона частот [2], ультразвук [3] и терагерцовое (ТГц) излучение [4]. Большие достижения в применении ТГц-излучения получены при исследовании наноразмерных объектов, выполняемые с помощью лазерной эмиссионной микроскопии [5]. Подобный интерес обусловлен прежде всего тем, что квант ТГц-излучения не является ионизирующим [6]. Важными аспектами при

проведении экспериментальных исследований являются простота построения систем визуализации и относительная дешевизна компонентов в сравнении с техникой рентгеновского диапазона; безопасность для биологических объектов [7].

ТГц-диапазон частот расположен в промежутке между микроволновым и инфракрасным участком электромагнитного спектра в диапазоне частот 0,1–10 ТГц. Излучение ТГц-диапазона обладает рядом уникальных свойств. Так, многие молекулы имеют спектр поглощения или рассеяния в ТГц-диапазоне, а это означает, что ТГц-излучение можно использовать в качестве неионизирующей альтернативы использованию рентгеновского излучения для создания изображений внутреннего строения объекта. Кроме того, излучение ТГц-диапазона частот обладает высокой проникающей способностью через тонкие диэлектрические среды [8].

Интенсивное развитие аддитивного производства за последнее десятилетие привело к упрощению автоматизированного процесса создания элементной базы сверхвысокочастотной (СВЧ) и крайне высокочастотной (КВЧ) техники. Одним из самых распространенных сегодня методов 3D-печати является послойное наплавление композиционных полимеров с модифицированными электрофизическими свойствами. Это позволило производить аддитивной технологией СВЧ- и КВЧ-конструкции (антенны [9, 10], волноводы [11, 12], фильтры [13, 14], поляризаторы [15], аттенюаторы [16], поглотители [17, 18]). Как правило, материалом для таких конструкций служит полимер с углеродными наноразмерными включениями (высокодисперсный углерод, нанотрубки, графит, графен). Для анализа внутренней структуры конструкций после процесса 3D-печати представляет интерес использовать рефлектометрию ТГц-диапазона.

Импульсная ТГц спектроскопия с разрешением во времени (THz time-domain spectroscopy) сегодня чаще всего используется для исследования внутренней структуры материалов [19–21]. Отраженный от объекта ТГц-импульс несет избыточный объем информации как о спектральных особенностях, так и о его внутренней структуре, однако процессы многократного рассеяния и дифракции на внутренней структуре образца затрудняют обработку результатов и не позволяют сделать однозначный вывод о его внутреннем строении [22]. В отличие от импульсных источников ТГц-излучения, применяемых в спектрометрах с временным разрешением, для визуализации распределения отраженного излучения от исследуемых объектов с высокой электропроводностью требуется применение монохроматиче-

ских источников непрерывного излучения высокой мощности (> 10 мВт). Одним из путей решения данной задачи является создание сканирующего рефлектометра, для которого источником ТГц-излучения будет служить лампа обратной волны (ЛОВ). Для достижения указанной цели необходимо решить ряд задач: разработать схему рефлектометра, собрать аппаратную часть системы, написать управляющее программное обеспечение, провести тестирование рефлектометра.

Измерительные системы, где в качестве источника электромагнитного излучения используется ЛОВ, обладают высокой линейностью динамического диапазона (параметр, имеющий первостепенное значение при зондировании высокопроводящих (сильно поглощающих) материалов) на всем участке ТГц-спектра [23]. На сегодняшний день рефлектометрические системы ТГц-визуализации на базе ЛОВ активно применяются в области медицины для оценки содержания воды в роговице глаза [24–26], в сфере обеспечения безопасности при поиске металлических и диэлектрических предметов под одеждой людей [27], в аэрокосмической отрасли (дефектоскопия композиционных материалов) [28]. Это подчеркивает актуальность развития систем визуализации объектов в аддитивном производстве с использованием непрерывного ТГц-излучения.

Сканирующий рефлектометр

В данной работе для ТГц-рефлектометра была выбрана квазиоптическая схема (рис. 1) на основе тефлоновых линз, сетчатого делителя пучка, параболического зеркала, предметного столика и моторизованного механизма двумерного позиционирования объекта [29].

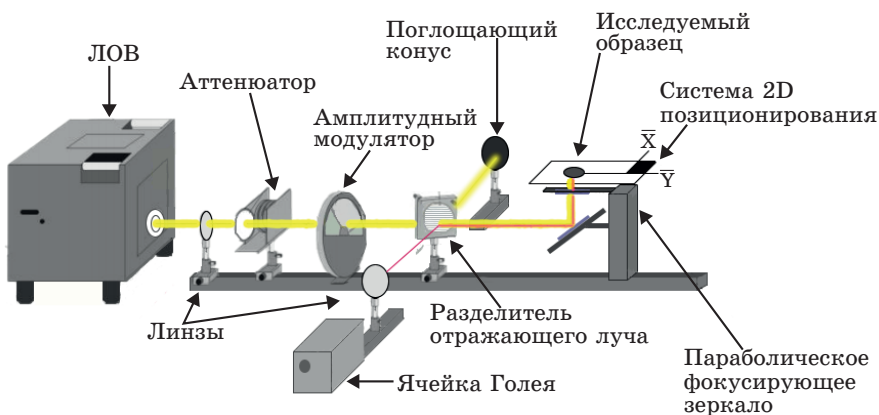


Рис. 1. Схема рефлектометра терагерцового диапазона
Fig. 1. Experimental setup of terahertz reflectometer

Управление элементами ТГц-рефлектометра организовано с персонального компьютера (ПК) через штатный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) спектрометра СТД-21 и модуль ввода-вывода E-154 фирмы L-card. Генерация монохроматического ТГц излучения осуществляется лампой обратной волны (ЛОВ), детектирование производится акустооптическим преобразователем (ячейкой Голея). Амплитудная модуляция с частотой 23 Гц реализована механическим секционнным прерывателем. Фокусировка ТГц-пучка производилась тефлоновыми линзами. Для согласования мощности излучения ЛОВ с динамическим диапазоном детектора использовались пленочные аттенюаторы. Функциональная схема установки рефлектометра терагерцового диапазона приведена на рис. 2.

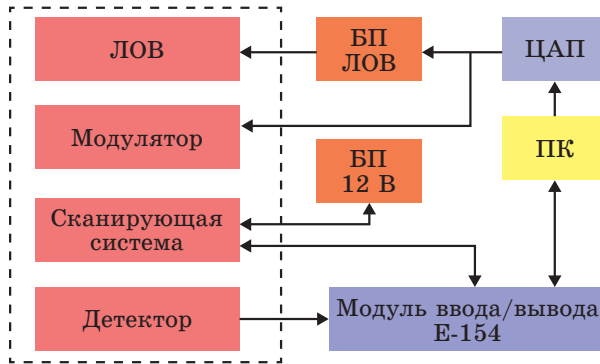


Рис. 2. Функциональная схема установки рефлектометра терагерцового диапазона

Fig. 2. Functional scheme of the experimental setup of terahertz reflectometer

Настройка частоты генератора ТГц-рефлектометра реализована через управление высоковольтным напряжением катода ЛОВ от управляемого источника напряжения (БП ЛОВ на рис. 2) путем подачи с ЦАП постоянного напряжения в диапазоне ± 10 В. Зависимость напряжения катода ЛОВ от управляющего напряжения с ЦАП приведена на рис. 3.

С модуля ЦАП также подается сигнал управления механическим прерывателем. Оцифровка сигнала детектора производится 12-битным аналого-цифровым преобразователем модуля ввода/вывода E-154 фирмы L-card (Россия). Исследуемый объект помещается в моторизированную двумерную систему позиционирования, которая осуществляет перемещение его вдоль металлической диафрагмы. Расчет матрицы значений коэффициента отражения от плоского материала определяется согласно выражению (1):

$$R(x, y) = \frac{I(x, y)}{I_0}, \quad (1)$$

где $I(x, y)$ – интенсивность излучения в точке измерения с координатами (x, y) , I_0 – интенсивность излучения при калибровке отражения от медной пластины.

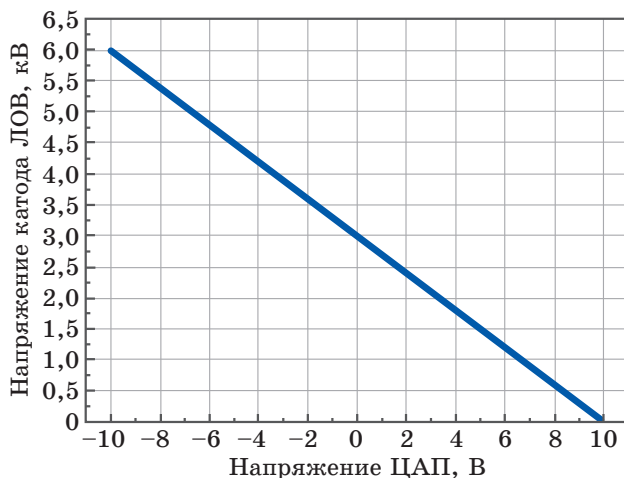


Рис. 3. Зависимость напряжения катода ЛОВ от напряжения на выходе ЦАП

Fig. 3. Dependence of the BWO cathode voltage on the voltage at the DAC output

Программа управления терагерцовым рефлектометром написана в среде LabVIEW на основе разработанной ранее программы для системы регистрации двумерного распределения интенсивности электромагнитного излучения [30]. С целью адаптации программного обеспечения для настоящей задачи была добавлена функция определения опорного сигнала, а также для удобства использования оператором вывод на экран прогресса сканирования. Кроме того, внесены изменения, улучшающие общую производительность программы. Блок-схемы алгоритмов программы управления и подпрограммы сканирования приведены на рис. 4 и 5, соответственно.

Программа позволяет производить калибровку как механизма позиционирования (установка «нуля» по координатам XU), так и уровня опорного сигнала (при отражении от медного зеркала). В программе реализованы алгоритм сбора матрицы значений интенсивности отраженного ТГц-излучения в заданной двумерной области, пересчет в матрицу коэффициентов отражения согласно (1), а также вывод результата графически на диаграмме интенсивности и сохранение в файл.

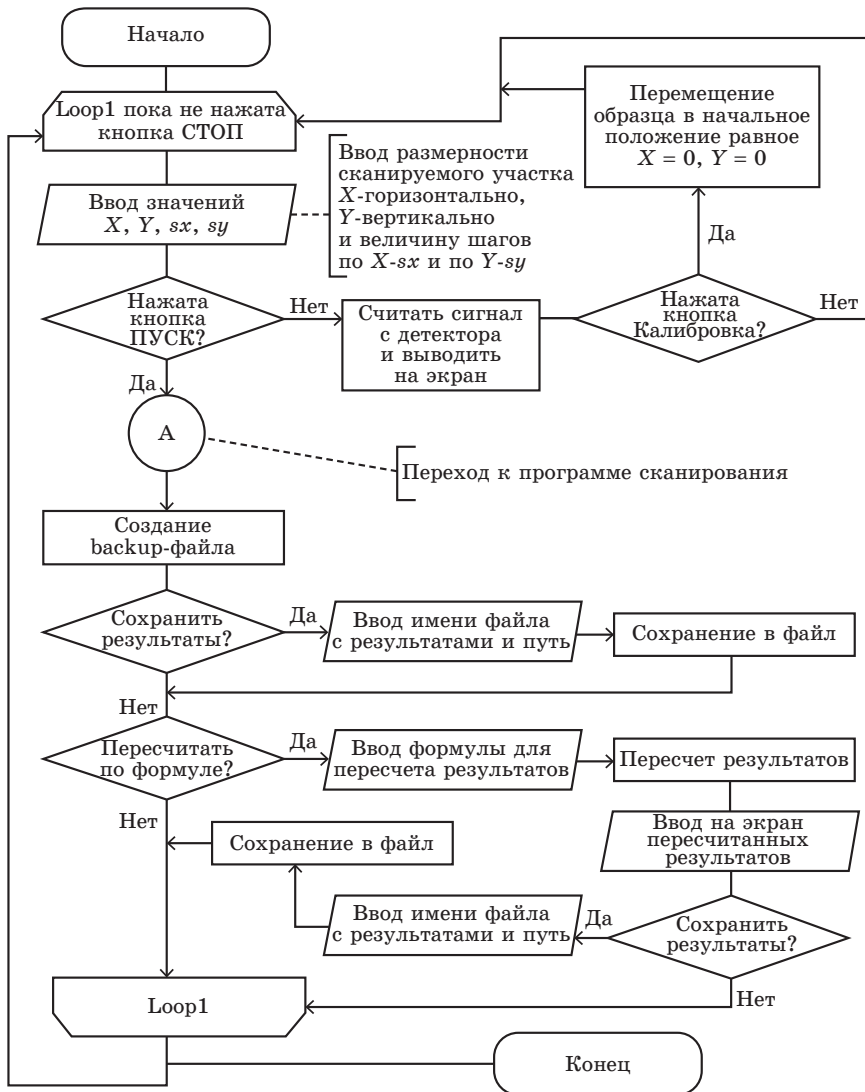


Рис. 4. Блок-схема программы управления ТГц-рефлектометром

Fig. 4. Block diagram of the THz reflectometer control program

Программа обладает следующим функционалом: запуск процесса сканирования с отображением текущего результата в режиме реального времени; аварийная остановка сканирования; сохранение полученных результатов в текстовый файл с разрешением *.lvm; расчет матрицы коэффициентов отражения и сохранение их в файл; калибровка положения механизма позиционирования (перемещение держателя образца до момента срабатывания концевых выключателей); отображение ампли-

туды сигнала с детектора (если не запущено сканирование) для определения уровня опорного напряжения при расчете коэффициентов отражения согласно выражению (1). Алгоритм сканирования заключается в заполнении одномерного массива из Y/sy числа элементов (где Y – размер области сканирования по вертикали, sy – шаг сканирования по вертикали) значениями интенсивности отраженного излучения от образца в соответствующих точках и в заполнении двумерного массива из X/sx числа одномерных массивов Y/sy (где X – размер области по горизонтали, sx – шаг сканирования по горизонтали).

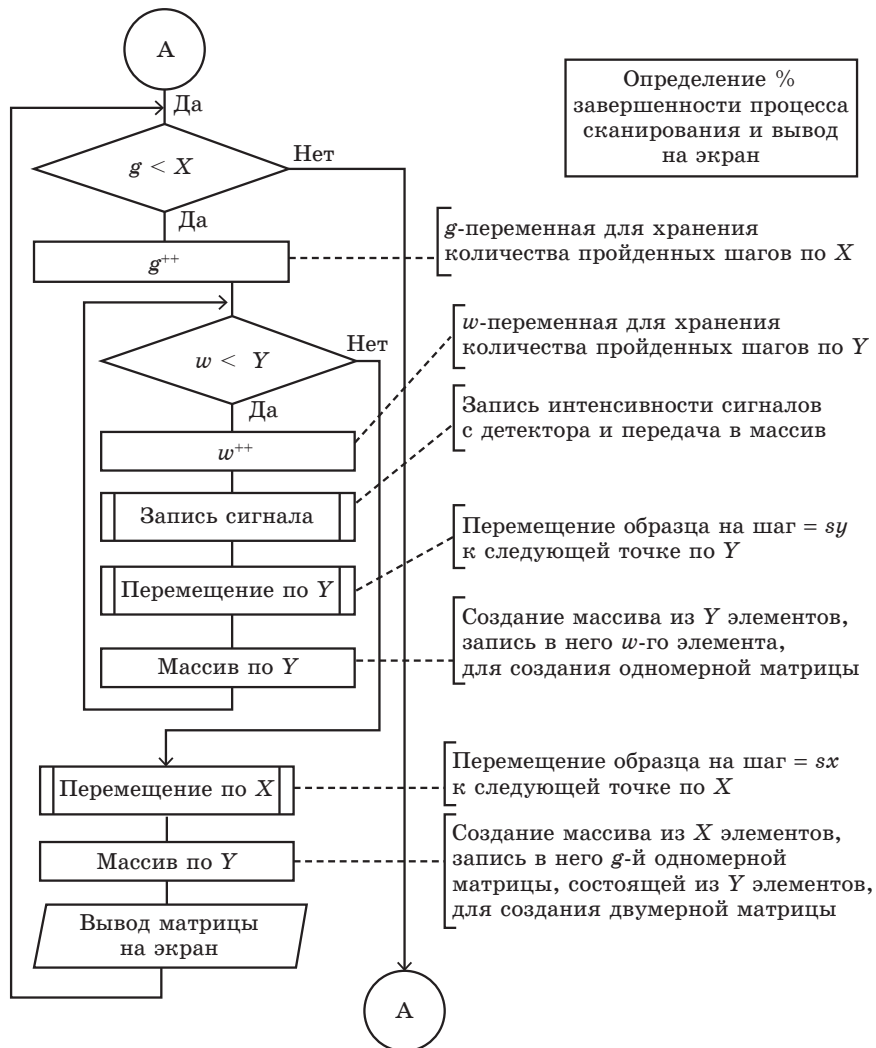


Рис. 5. Блок-схема подпрограммы сканирования ТГц-рефлектометра
Fig. 5. Block diagram of the THz reflectometer scanning subprogram

Объекты тестирования

В качестве объекта тестирования ТГц-рефлектометра был изготовлен методом 3D-печати цилиндр с расположенным внутри массивом сферических полостей, заполненных воздухом (рис. 6).

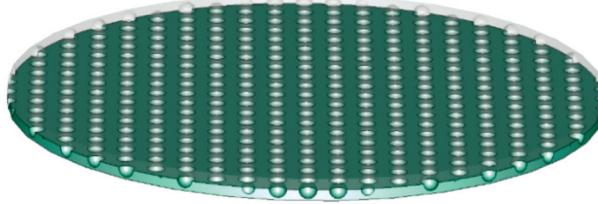


Рис. 6. 3D-модель тестовой детали
Fig. 6. 3D-model of the test sample

В качестве материала для 3D-печати была использована композиционная нить диаметром 1,7 мм на основе акрилонитрил-бутадиенстирола и углеродных нановолокн. Среднее значение диэлектрической проницаемости данного материала в диапазоне частот 800–900 ГГц составляет $\epsilon = 6,37$, $\text{tg}\delta = 0,13$. Толщина тестового образца составляла 1,4 мм. Воздушные сферы располагались с периодом 2 мм по всему периметру тестовой детали.

Для определения фактического размера пор внутри готовой тестовой детали была применена цифровая оптическая микроскопия среза (рис. 7).

Средний диаметр воздушных пор составил 780 мкм.

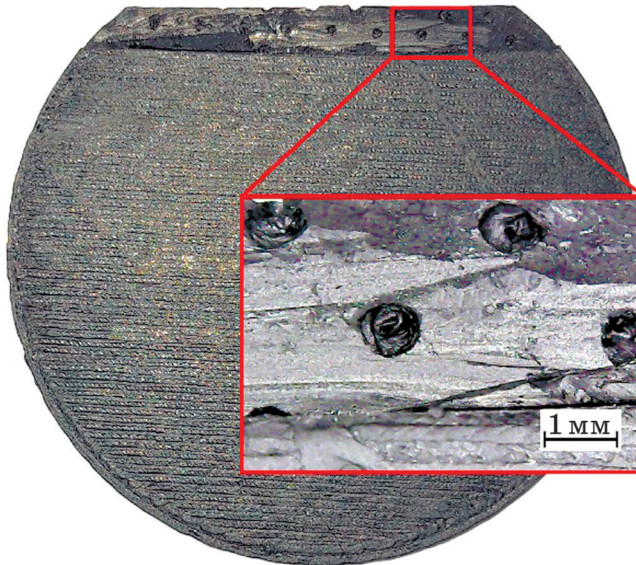


Рис. 7. Микрофотография тестовой конструкции
Fig. 7. 3D-model of the test sample

Результаты

В эксперименте с помощью ТГц-рефлектометра с различными диаметрами диафрагмы (3 и 4 мм) исследуемый образец был просканирован в области 35х35 мм с шагом 100 и 80 мкм по осям X и Y , соответственно. Образцы размещались в держателе механизма позиционирования параллельно диафрагме.

По результатам эксперимента получены распределения значений отклика электромагнитного излучения на частоте 874 ГГц, отразившегося от исследуемого объекта. Для представления результатов в качестве коэффициента отражения согласно (1) перед проведением процесса сканирования и после него записывалась величина I_0 , характеризующая интенсивность сигнала детекторам при отражении ТГц-излучения от медного зеркала. Для случая с диафрагмой диаметром 3 мм I_0 составила 1,6 В, а для диафрагмы в 4 мм I_0 составила 3,67 В (с аттенюатором 10 %). Во втором эксперименте (рис. 9) во время сканирования был установлен аттенюатор, пропускающий 30 % мощности для согласования мощности падающего на образец излучения с динамическим диапазоном детектора и АЦП. Полученное после пересчета результатов распределение коэффициента отражения тестовой детали на частоте 874 ГГц при диафрагмах 3 и 4 мм приведено на рис. 8 и 9 соответственно.

Для того чтобы иметь возможность оценить более детально неоднородности тестового образца ТГц-изображения подверглись процедуре фильтрации интенсивности (рис. 8б и 9б). Это позволило выделить воздушные поры на фоне остальной части образца. Например, на рис. 8б показана только часть значений коэффициента отражения, которые удовлетворяют условию $R(x, y) > 0,19$.

Анализ полученных результатов показывает, что уменьшение размера диафрагмы до размеров ТГц-пучка позволяет увеличить контрастность картины распределения электромагнитного отклика за счет локализации ТГц-пучка. Меньшая по диаметру диафрагма обеспечивает большее значение коэффициента отражения, $R = 0,37$ (рис. 8а) в отличие от $R = 0,32$ (рис. 9а). Периодичность расположения воздушных пор в тестовой конструкции определялась как расстояние между соседними минимумами в распределениях интенсивности отраженного ТГц-излучения. Фильтрация распределения коэффициента отражения по интенсивности позволила дополнительно повысить контрастность изображения (рис. 8 и 9). Наличие волнообразных полос в верхней части изображений (рис. 8), вероятно, обусловлено интерференцией за счет зазора между диафрагмой и образцом на крае тестового объекта ввиду несовершенства механизма по-

зиционирования. Так как длина волны в эксперименте довольно мала (~340 мкм), для борьбы с данным явлением требуется конструктивная реализация крепежа объекта в держателе с микрометрическим контролем зазора и перекося между образцом и диафрагмой.

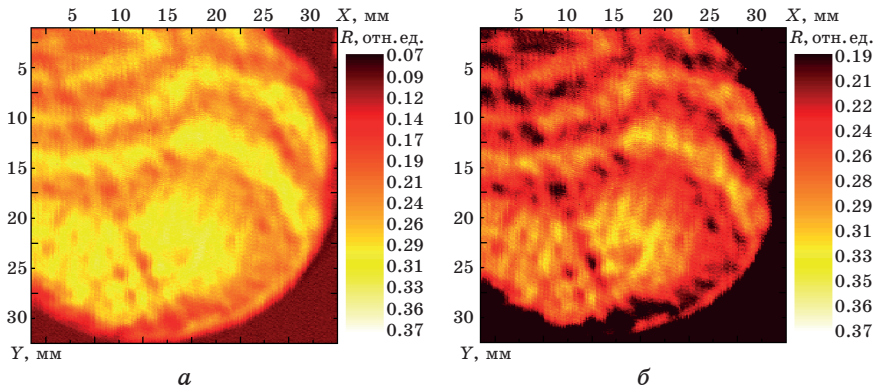


Рис. 8. Распределение коэффициента отражения от тестовой детали на частоте 874 ГГц, полученное рефлектометром с диафрагмой диаметром 3 мм: *a* – исходное изображение; *б* – с применением фильтрации интенсивности

Fig. 8. Reflectance distribution of the test sample at 874 GHz, obtained by the reflectometer with the 3 mm diaphragm: *a*) original image; *b*) intensity filtering

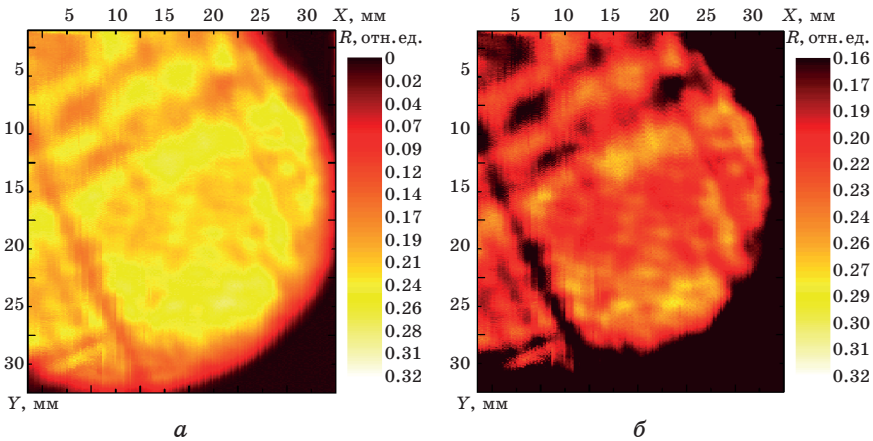


Рис. 9. Распределение коэффициента отражения от тестовой детали на частоте 874 ГГц, полученное рефлектометром с диафрагмой диаметром 4 мм: *a* – исходное изображение; *б* – с применением фильтрации интенсивности

Fig. 9. Reflectance distribution of the test sample at 874 GHz, obtained by the reflectometer with the 4 mm diaphragm: *a*) original image; *b*) intensity filtering

В напечатанном на 3D-принтере тестовом объекте после измерения с помощью оптического цифрового микроскопа диаметр пор составил 780 мкм, период повторения пор – 2,86 мм. Анализ ТГц-изображения (рис. 8б) с целью вычисления расстояний между центрами пор заключался в определении расстояния между минимумами распределения коэффициентов отражения полученного изображения. В результате на ТГц-изображении был определен период повторяемости пор (2,8 мм) тестового образца, изготовленного по аддитивной технологии. Полученные значения взаимно коррелируют с результатами, зафиксированные посредством оптической микроскопии.

Заключение

Таким образом, представлен терагерцовый рефлектометр с источником непрерывного монохроматического электромагнитного излучения на основе ЛЮВ. Цель настоящей работы в создании сканирующего ТГц-рефлектометра считается достигнутой. При этом были решены следующие задачи: выбрана и собрана квазиоптическая схема рефлектометра; реализована аппаратная часть системы (все механизмы и узлы); адаптирована для настоящей задачи программа для управления системой регистрации интенсивности излучения; изготовлен с помощью технологии 3D-печати тестовый образец, при диагностике которого была осуществлена апробация ТГц-рефлектометра. Полученные практические результаты регистрации двухмерного распределения коэффициента отражения показывают перспективность использования ТГц-излучения для визуализации структуры конструкций, получаемых аддитивной технологией. Дальнейшее развитие проекта планируется за счет изменения конструкции механизма позиционирования, которая обеспечит микрометрическую калибровку держателя образца относительно диафрагмы. Применение квазиоптической схемы двулучевого интерферометра для регистрации распределения фазы и амплитуды отраженного ТГц-излучения позволит получить информацию о пространственном расположении дефектов (неоднородностей) изделий, получаемых аддитивной технологией.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-1709.2020.8.

Acknowledgments

The reported study is founded by grant of the president of the Russian Federation for state support of young Russian scientists МК-1709.2020.8

Список литературы

1. Cao C., Toney M.F., Sham T.-K., Harder R., Shearing P.R., Xiao X., Wang J. Emerging X-ray imaging technologies for energy materials. *Materials Today*. 2020;34:132–147. DOI: 10.1016/j.mattod.2019.08.011
2. Luker G.D., Luker K.E. Optical imaging: current applications and future directions. *Journal of Nuclear Medicine*. 2008;49(1):1–4. DOI: 10.2967/jnumed.107.045799
3. Haar G. Ultrasonic imaging: safety considerations. *Interface Focus*. 2011;1(4):686–697. DOI: 10.1098/rsfs.2011.0029
4. Supriya M., Samuel A.V. Terahertz technology: A Review on dental perspective. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 2020;12(10):1320–1325. Available at: <https://www.jpsr.pharmainfo.in/Documents/Volumes/vol12issue10/jpsr12102013.pdf>
5. Mittleman D.M. Perspective: Terahertz science and technology. *Journal of Applied Physics*. 2017;122(23):230901. DOI: 10.1063/1.5007683
6. Mattsson M.O., Simky M. Emerging medical applications based on non-ionizing electromagnetic fields from 0 Hz to 10 THz. *Medical Devices: Evidence and Research*. 2019;12:347–368. DOI: 10.2147/MDER.S214152
7. Son J.H., Oh S.J., Cheon H. Potential clinical applications of terahertz radiation. *Journal of Applied Physics*. 2019;125(19):190901. DOI: 10.1063/1.5080205
8. Markl D., Wang P., Ridgway C., Karttunen A.-P., Chakraborty M., Bawuah P. et al. Characterization of the pore structure of functionalized calcium carbonate tablets by terahertz time-domain spectroscopy and X-ray computed microtomography. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2017;106(6):1586–1595. DOI: 10.1016/j.xphs.2017.02.028
9. Chen Q., Chen X., Xu K. 3-D Printed Fabry–Perot Resonator Antenna with Paraboloid-Shape Superstrate for Wide Gain Bandwidth. *Applied Sciences*. 2017;7(11):1134. DOI: 10.3390/app7111134
10. von Bieren A., de Rijk E., Ansermet J.-Ph., Macor A. Monolithic metal-coated plastic components for mm-wave applications. In: *2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), Tucson, AZ, 14–19 Sept. 2014*. 2014, pp. 1–2. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2014.6956222
11. Wu Z., Liang M., Ng W.-R., Gehm M., Xin H. Terahertz horn antenna based on hollow-core electromagnetic crystal (EMXT) structure. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2012;60(12):5557–5563. DOI: 10.1109/TAP.2012.2211318
12. D’Auria M., Otter W.J., Hazell J., Gillatt B.T.W., Long-Collins C., Ridler N.M., Lucyszyn S. 3-D printed metal-pipe rectangular waveguides. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2015;5(9):1339–1349. DOI: 10.1109/TCPMT.2015.2462130
13. Guo C., Shang X., Lancaster M.J., Xu J. A 3-D printed lightweight X-band waveguide filter based on spherical resonators. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2015;25(7):442–444. DOI: 10.1109/LMWC.2015.2427653
14. Cai F., Khan W.T., Papapolymerou J. A low loss X-band filter using 3-D polyjet technology. In: *2015 IEEE MTT-S International*

Microwave Symposium, Phoenix, 17–22 May 2015. 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2015.7166895

15. Bodazhkov D.S., Kremzer R.A., Badin A.V. Polarization properties in EHF range of carbon-containing compositional structures obtained by 3D printing method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;511(1):012026. DOI: 10.1088/1757-899X/511/1/012026

16. Arbaoui Y., Laur V., Maalouf A., Quéffélec P., Passerieux D., Delias A., Blondy P. Full 3-D printed microwave termination: A simple and low-cost solution. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2015;64(1):271–278. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2504477

17. Кремзер Р.А., Бадин А.В. Поглотители КВЧ-излучения, полученные по аддитивной технологии. *Электронные средства и системы управления*. 2018;1(1):333–335.

18. Dorozhkin K.V., Kuleshov G.E., Badin A.V., Gering M.O., Simonova K.V. Selective EHF absorber based on BaFe₁₂O₁₉ hexaferrite. *ITM Web of Conferences*. 2019;30(4):07006. DOI: 10.1051/itmconf/20193007006

19. Wang Q., Xie L., Ying Y. Overview of imaging methods based on terahertz time-domain spectroscopy. *Applied Spectroscopy Reviews*. 2021. DOI: 10.1080/05704928.2021.1875480

20. Lin H., Russell B.P., Bawuah P., Zeitler J.A. Sensing water absorption in hygrothermally aged epoxies with terahertz time-domain spectroscopy. *Analytical Chemistry*. 2021;93(4):2449–2455. DOI: 10.1021/acs.analchem.0c04453

21. Li J., Mengu D., Yardimci N.T., Luo Y., Li X., Veli M., et al. Diffractive network-based single-pixel machine vision. In Proceedings SPIE Volume 11804, Emerging Topics in Artificial Intelligence (ETAI) 2021; 118040A (2021) DOI: 10.1117/12.2594415

22. 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;11(1):19–23. Режим доступа: https://ntv.ifmo.ru/ru/article/337/impulsnyy_teragercovyy_reflektometr.htm

23. Gorshunov B.P., Volkov A.A., Prokhorov A.S., Spektor I.E. Methods of terahertz-subterahertz BWO spectroscopy of conducting materials. *Physics of the Solid State*. 2008;50(11):2001. DOI: 10.1134/S1063783408110012

24. Иомдина Е.Н., Селиверстов С.В., Сианосян А.А., Теплякова К.О., Русова А.А., Гольцман Г.Н. Терагерцевое сканирование для оценки содержания воды в роговице и склере. *Современные технологии в медицине*. 2018;10(4):143–150. DOI: 10.17691/stm2018.10.4.17

25. Кекконен Э.А., Коновко А.А., Ли Ю.С., Ли И.-М., Ожередов И.А., Парк К.Х. и др. Оценка степени гидратации тканей глазной поверхности методом терагерцевой рефлектометрии. *Квантовая электроника*. 2020;50(1):61–68. Режим доступа: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=qe&paperid=17178&option_lang=rus

26. Kucheryavenko A.S., Chernomyrdin N.V., Gavidush A.A., Alekseeva A.I., Nikitin P.V., Dolganova I.N., et al. Terahertz dielectric

spectroscopy and solid immersion microscopy of ex vivo glioma model 101.8: brain tissue heterogeneity. *Biomedical Optics Express*. 2021;12(8):5272–5289. DOI: 10.1364/BOE.432758

27. Perov A. N., Zaytsev K. I., Fokina I. N., Karasik V. E., Yakovlev E. V., Yurchenko S. O. BWO based THz imaging system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014;486(1):012027. DOI: 10.1088/1742-6596/486/1/012027

28. Lu T., Yuan H., Zhang Z., Wu T., Zhang C., Zhao Y. Experimental 210GHz terahertz nondestructive testing for aerospace composite materials. In: *2016 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, 12–16 Jan. 2016*. IEEE; 2016, pp. 714–717. DOI: 10.1109/IBCAST.2016.7429960

29. Badin A. V., Berdyugin A. I., Vigovskii V. Y., Dunaevskii G. E. System of automated measurement of electromagnetic response of anisotropic materials in quasi-optical beams. In: *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Erlagol, 29 June – 3 July 2017*. IEEE; 2017, pp. 301–304. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981760

30. Zhakupov S. N., Badin A. V., Berdugin A. I. Automated quasioptical system for EHF imaging of heterogeneous materials with subwavelength resolution. In: *2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, 18–20 April 2019*. IEEE; 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729563

References

1. Cao C., Toney M. F., Sham T.-K., Harder R., Shearing P. R., Xiao X., Wang J. Emerging X-ray imaging technologies for energy materials. *Materials Today*. 2020;34:132–147. DOI: 10.1016/j.mattod.2019.08.011

2. Luker G. D., Luker K. E. Optical imaging: current applications and future directions. *Journal of Nuclear Medicine*. 2008;49(1):1–4. DOI: 10.2967/jnumed.107.045799

3. Haar G. Ultrasonic imaging: safety considerations. *Interface Focus*. 2011;1(4):686–697. DOI: 10.1098/rsfs.2011.0029

4. Supriya M., Samuel A. V. Terahertz technology: A Review on dental perspective. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 2020;12(10):1320–1325. Available at: <https://www.jpsr.pharmainfo.in/Documents/Volumes/vol12issue10/jpsr12102013.pdf>

5. Mittleman D. M. Perspective: Terahertz science and technology. *Journal of Applied Physics*. 2017;122(23):230901. DOI: 10.1063/1.5007683

6. Mattsson M. O., Simky M. Emerging medical applications based on non-ionizing electromagnetic fields from 0 Hz to 10 THz. *Medical Devices: Evidence and Research*. 2019;12:347–368. DOI: 10.2147/MDER.S214152

7. Son J. H., Oh S. J., Cheon H. Potential clinical applications of terahertz radiation. *Journal of Applied Physics*. 2019;125(19):190901. DOI: 10.1063/1.5080205

8. Markl D., Wang P., Ridgway C., Karttunen A.-P., Chakraborty M., Bawuah P. et al. Characterization of the pore structure of functionalized calcium carbonate tablets by terahertz time-domain spectroscopy and

X-ray computed microtomography. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2017;106(6):1586–1595. DOI: 10.1016/j.xphs.2017.02.028

9. Chen Q., Chen X., Xu K. 3-D Printed Fabry–Perot Resonator Antenna with Paraboloid-Shape Superstrate for Wide Gain Bandwidth. *Applied Sciences*. 2017;7(11):1134. DOI: 10.3390/app7111134

10. von Bieren A., de Rijk E., Ansermet J.-Ph., Macor A. Monolithic metal-coated plastic components for mm-wave applications. In: *2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), Tucson, AZ, 14–19 Sept. 2014*. 2014, pp. 1–2. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2014.6956222

11. Wu Z., Liang M., Ng W.-R., Gehm M., Xin H. Terahertz horn antenna based on hollow-core electromagnetic crystal (EMXT) structure. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2012;60(12):5557–5563. DOI: 10.1109/TAP.2012.2211318

12. D’Auria M., Otter W.J., Hazell J., Gillatt B.T. W., Long-Collins C., Ridler N.M., Lucyszyn S. 3-D printed metal-pipe rectangular waveguides. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2015;5(9):1339–1349. DOI: 10.1109/TCPMT.2015.2462130

13. Guo C., Shang X., Lancaster M.J., Xu J. A 3-D printed lightweight X-band waveguide filter based on spherical resonators. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2015;25(7):442–444. DOI: 10.1109/LMWC.2015.2427653

14. Cai F., Khan W.T., Papapolymerou J. A low loss X-band filter using 3-D polyjet technology. In: *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Phoenix, 17–22 May 2015*. 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2015.7166895

15. Bodazhkov D.S., Kremzer R.A., Badin A.V. Polarization properties in EHF range of carbon-containing compositional structures obtained by 3D printing method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;511(1):012026. DOI: 10.1088/1757-899X/511/1/012026

16. Arbaoui Y., Laur V., Maalouf A., Quïffïlec P., Passerieux D., Delias A., Blondy P. Full 3-D printed microwave termination: A simple and low-cost solution. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2015;64(1):271–278. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2504477

17. Kremzer R.A., Badin A.V. EHF radiation absorbers obtained by additive technology. *Elektronnyye sredstva i sistemy upravleniya*. 2018;1(1):333–335. (In Russ.)

18. Dorozhkin K.V., Kuleshov G.E., Badin A.V., Gering M.O., Simonova K.V. Selective EHF absorber based on BaFe₁₂O₁₉ hexaferrite. *ITM Web of Conferences*. 2019;30(4):07006. DOI: 10.1051/itmconf/20193007006

19. Wang Q., Xie L., Ying Y. Overview of imaging methods based on terahertz time-domain spectroscopy. *Applied Spectroscopy Reviews*. 2021. DOI: 10.1080/05704928.2021.1875480

20. Lin H., Russell B.P., Bawuah P., Zeitler J.A. Sensing water absorption in hygrothermally aged epoxies with terahertz time-domain

spectroscopy. *Analytical Chemistry*. 2021;93(4):2449–2455. DOI: 10.1021/acs.analchem.0c04453

21. Li J., Mengu D., Yardimci N.T., Luo Y., Li X., Veli M., et al. Diffractive network-based single-pixel machine vision. In Proceedings SPIE Volume 11804, Emerging Topics in Artificial Intelligence (ETAI) 2021; 118040A (2021) DOI: 10.1117/12.2594415

22. Bepalov V.G., Gorodetsky A.A., Grachyov Ya.V., Kozlov S.A., Novosyolov Ye.V. Pulse terahertz reflectometer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2011;11(1):19–23. (In Russ.) Available at: https://ntv.ifmo.ru/ru/article/337/impulsnyy_teragercovyy_reflektometr.htm

23. Gorshunov B.P., Volkov A.A., Prokhorov A.S., Spektor I.E. Methods of terahertz-subterahertz BWO spectroscopy of conducting materials. *Physics of the Solid State*. 2008;50(11):2001. DOI: 10.1134/S1063783408110012

24. Iomdina E.N., Seliverstov S.V., Sianosyan A.A., Teplyakova K.O., Rusova A.A., Goltsman G.N. Terahertz Scanning for Evaluation of Corneal and Scleral Hydration. *Sovremennye tehnologii v medicine = Modern Technologies in Medicine*. 2018;10(4):143–150. (In Russ.) DOI: 10.17691/stm2018.10.4.17

25. Kekkonen E.A., Konovko A.A., Lee E.S., Lee I.-M., Park K.H., Ozheredov I.A., et al. Assessment of the degree of hydration of ocular surface tissues using THz reflectometry. *Quantum Electronics*. 2020. 2020;50(1):61–68. DOI: 10.1070/QEL17213

26. Kucheryavenko A.S., Chernomyrdin N.V., Gavdush A.A., Alekseeva A.I., Nikitin P.V., Dolganova I.N., et al. Terahertz dielectric spectroscopy and solid immersion microscopy of ex vivo glioma model 101.8: brain tissue heterogeneity. *Biomedical Optics Express*. 2021;12(8):5272–5289. DOI: 10.1364/BOE.432758

27. Perov A.N., Zaytsev K.I., Fokina I.N., Karasik V.E., Yakovlev E.V., Yurchenko S.O. BWO based THz imaging system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014;486(1):012027. DOI: 10.1088/1742-6596/486/1/012027

28. Lu T., Yuan H., Zhang Z., Wu T., Zhang C., Zhao Y. Experimental 210GHz terahertz nondestructive testing for aerospace composite materials. In: *2016 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, 12–16 Jan. 2016*. IEEE; 2016, pp. 714–717. DOI: 10.1109/IBCAST.2016.7429960

29. Badin A.V., Berdyugin A.I., Vigovskii V.Y., Dunaevskii G.E. System of automated measurement of electromagnetic response of anisotropic materials in quasi-optical beams. In: *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Erlagol, 29 June – 3 July 2017*. IEEE; 2017, pp. 301–304. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981760

30. Zhakupov S.N., Badin A.V., Berdugin A.I. Automated quasioptical system for EHF imaging of heterogeneous materials with subwavelength resolution. In: *2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, 18–20 April 2019*. IEEE; 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729563

Информация об авторах

Бердюгин Александр Игоревич, младший научный сотрудник лаборатории терагерцовых исследований Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; email: alekcahdr@gmail.com

Бадьин Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории терагерцовых исследований Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; email: thzlab@mail.tsu.ru

Гурский Ростислав Петрович, студент радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; e-mail: bravo8172@mail.ru

Трофимов Егор Александрович, студент радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; e-mail: zverezhuck@mail.ru

Кулешов Григорий Евгеньевич, доцент радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; e-mail: grigrey03@gmail.com

Information about the authors

Aleksandr I. Berdyugin, Research assistant of Terahertz laboratory, National Research Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia; e-mail: alekcahdr@gmail.com

Alexander V. Badin, Senior researcher of Terahertz laboratory, National Research Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia; e-mail: thzlab@mail.tsu.ru

Rostislav P. Gursky, Student, National Research Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia; e-mail: bravo8172@mail.ru

Trofimov A. Egor, Student, National Research Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia; e-mail: zverezhuck@mail.ru

Kuleshov E. Grigorii, assistant professor, Faculty of Radiophysics, National Research Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia; e-mail: grigrey03@gmail.com

Поступила / Received: 29.07.2021

Принята в печать / Accepted: 01.09.2021