

## **ВОСКОТОЧНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ИМПУЛЬСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

**К.И. Зайцев, А.А. Гавдуш, В.Е. Карасик, С.О. Юрченко**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: kirzay@gmail.com; arsantiquaag@gmail.com; karassik@bmstu.ru;  
st.yurchenko@mail.ru

*Рассмотрена актуальная проблема решения некорректной обратной задачи, связанной с восстановлением терагерцовых спектральных оптических характеристик образца на основе результатов его исследования с помощью терагерцовой импульсной спектроскопии. Разработан алгоритм восстановления спектрального комплексного показателя преломления однородного образца в виде плоскопараллельной пластинки. Алгоритм имеет преимущества перед существующими методами решения данной задачи, в частности, он позволяет исследовать образцы с низким показателем преломления и (или) малой толщиной, а также существенно снижает требования к точности априорного измерения толщины среды. За счет наличия в алгоритме процедуры программного уточнения толщины алгоритм позволяет корректно восстанавливать оптические характеристики образца при точности измерения его толщины не менее  $\pm 100,0$  мкм, что более чем на порядок смягчает требования классических методов решения данной задачи. Восстановление терагерцовых спектральных характеристик образца выполнено путем минимизации функционала ошибки, построенного на основе экспериментально зарегистрированного комплексного амплитудного коэффициента пропускания и комплексного амплитудного коэффициента пропускания математической модели, описывающей образец в виде квазирезонатора Фабри–Перо. Разработанный метод реализован программно; проведена его экспериментальная апробация.*

**Ключевые слова:** терагерцовые технологии, импульсная терагерцовая спектроскопия, некорректная обратная задача электродинамики, терагерцовые оптические характеристики, комплексный показатель преломления среды.

## **HIGHLY ACCURATE RECONSTRUCTION OF SPECTRAL OPTICAL CHARACTERISTICS OF A MEDIUM USING TERAHERTZ PULSED SPECTROSCOPY**

**K.I. Zaytsev, A.A. Gavidush, V.E. Karasik, S.O. Yurchenko**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: kirzay@gmail.com; arsantiquaag@gmail.com; karassik@bmstu.ru;  
st.yurchenko@mail.ru

*Solving the inverse ill-posed problem is considered, which is connected with reconstruction of spectral optical properties of the sample based on results of its investigation using terahertz pulsed spectroscopy. A novel algorithm for determination of the spectral complex refractive index of a flat sample is developed. In contrast to the existing methods for solving this problem, the developed technique allows studying the samples with low refractive index and (or) small thickness. At the same time the required accuracy of the a priori determination of sample thickness is significantly reduced. Since the algorithm has the procedure for numerical refinement of sample thickness, it provides the correct reconstruction of optical characteristics*

*of the sample with an accuracy of the sample thickness measurement no worse than  $\pm 100 \mu\text{m}$ . This imprecision is much smaller than the ordinary technique permits. Reconstruction of THz optical properties of the sample is implemented by means of the error functional minimization. The functional is based on two functions: experimental complex transfer function of the sample and quasi-Fabry-Perot-model of the sample transfer function. The algorithm is programmed and experimentally approved.*

**Keywords:** terahertz technology, terahertz pulsed spectroscopy, inverse ill-posed problem of electrodynamics, terahertz spectral characteristics, complex refractive index of medium.

**Введение.** Диапазон частот терагерцового (ТГц) излучения расположен между инфракрасной (ИК) и микроволновой областями электромагнитного спектра: 0,1... 10 ТГц [1, 2]. ТГц-излучение обладает уникальными особенностями: низкой ионизирующей способностью; высокой проникающей способностью; специфическими механизмами поглощения веществом. Поглощение ТГц-излучения средой обусловлено изменениями, происходящими в спектре энергетических уровней молекулы вещества и связанными с вращательными и колебательными степенями свободы молекулы. Перечисленные особенности делают ТГц-оптотехнику уникальным инструментом для решения многочисленных фундаментальных и прикладных задач. Особый интерес представляют исследования диэлектрических свойств воды, водных растворов электролитов и биологических тканей с помощью ТГц-спектроскопии. Указанные среды имеют богатый спектр вращательных и колебательных уровней, претерпевающий существенные изменения при изменениях условий окружающей среды [5–7]. На микроволновую и ТГц-области шкалы электромагнитных волн приходится существенная часть реликтового излучения космоса [8].

ТГц изображающие системы и ТГц-спектроскопия могут использоваться для решения задач обеспечения безопасности жизнедеятельности человека в общественных местах [9], для неразрушающего контроля полимерных конструкционных материалов [10–12], для ранней неинвазивной диагностики заболеваний организма человека (онкологических заболеваний кожи [13, 14], груди [15, 16] и кишечника [17]), ожогов [18], деминерализации зубной эмали [19, 20], а также для неразрушающих исследований объектов искусства [21].

С момента первых упоминаний об электромагнитном ТГц-излучении Г. Рубенсом, изучавшим тепловое ТГц-излучение абсолютно черного тела в 1897 г. [22], а также Глаголевой-Аркадьевой, разработавшей в 1924 г. сравнительно мощный источник ТГц-волн [23], главной проблемой ТГц-оптотехники является отсутствие эффективных методов генерации и детектирования ТГц-волн. Несмотря на наличие успешных разработок в области элементной базы ТГц-оптотехники, связанных с использованием новейших материалов при создании ТГц-источников, детекторов и модуляторов [24–26], в настоящее время

эта проблема чрезвычайно актуальна. Эффективность методов генерации и детектирования электромагнитного излучения, используемых в ИК- и радиочастотной областях шкалы электромагнитных волн, существенно снижается при попытке их применения в ТГц-диапазоне.

Существенный прорыв в области ТГц-оптотехники связан с появлением ТГц импульсной спектроскопии в 1975 г. в результате исследований Д. Аустона, который изучал эффект фотопереключения в полупроводнике под действием ультракоротких лазерных импульсов оптического диапазона [27]. Бурное развитие данный вид спектроскопии получил в 1990-х годах, что было обусловлено появлением коммерческих высокостабильных фемтосекундных лазеров. Принцип регистрации ТГц спектральных характеристик образца основан на его зондировании коротким импульсом ТГц-излучения и регистрации отраженного или прошедшего через объект сигнала — временного профиля напряженности электрического ТГц-поля — с высоким временным разрешением (не менее 50 фс). Короткий импульс ТГц-излучения имеет широкий частотный спектр 0,1...3,0 ТГц, а иногда и до 25 ТГц (при выполнении генерации и регистрации импульсов ТГц-излучения в плазменном разряде воздуха). Это обстоятельство позволяет анализировать спектральные характеристики образца с применением аппарата фурье-анализа [28, 29], а также проводить томографические исследования внутренней структуры объектов [30–32]. Достоинство ТГц импульсной спектроскопии — возможность регистрации информации о спектре амплитуды и фазы ТГц-волны в ходе единственного измерения, и соответственно, возможность вычисления спектральных оптических характеристик образца по результатам измерения без привлечения критерия Крамерса–Кронига. Недостаток импульсной спектроскопии — сравнительно низкая точность регистрируемых спектральных характеристик как по частотной координате, так и по амплитуде, что связано в первую очередь с недостаточно развитой методологией спектроскопических исследований. Согласно изложенному, задача разработки новых методов восстановления спектральных оптических характеристик объекта с помощью ТГц импульсной спектроскопии весьма актуальна.

Существующие алгоритмы решения обратной задачи электродинамики, связанной с восстановлением оптических характеристик однородных сред с помощью ТГц импульсной спектроскопии основаны на математической обработке двух сигналов, один из которых проходит через пустую кювету ТГц-спектрометра, а другой — через кювету, содержащую образец [29, 33–36]. При использовании классических методов восстановления оптических характеристик образца,

предполагающих регистрацию частотного спектра основного импульса спектрометра, прошедшего сквозь образец, возникают трудности, связанные с невозможностью корректной интерпретации результатов измерений сигнала образца при появлении в сигнале образца вспомогательных импульсов — импульсов-спутников. Эти импульсы, обусловленные многократными переотражениями излучения в образце, формируются в случае низкого показателя преломления и (или) малой толщины исследуемой среды и зачастую не могут быть исключены из сигнала обычной оконной фильтрацией без внесения существенных искажений в спектр сигнала. В процессе выполнения спектроскопических ТГц-исследований также имеются трудности, связанные с необходимостью высокоточного априорного измерения толщины образца, причем точность измерений толщины для классических методов не должна быть менее  $\pm(5 \dots 10)$  мкм.

В настоящей работе описан новый метод интерпретации ТГц спектроскопических измерений, позволяющий восстанавливать спектральные зависимости ТГц оптических характеристик образцов в виде плоскопараллельной пластинки, даже в случае их малой толщины и (или) низкого показателя преломления. Разработанный алгоритм снижает требуемую точность априорного измерения толщины образца до  $\pm(50 \dots 100)$  мкм, что на порядок ниже точности, необходимой для корректного применения классических методов решения указанной задачи.

**Экспериментальная установка.** Для выполнения спектральных исследований использовался импульсный ТГц-спектрометр  $z\Omega$  minZ, в котором генерация импульсов ТГц-излучения осуществляется в фотопроводящей антенне, изготовленной из кристалла LT-GaAs, а регистрация временного профиля напряженности электрического ТГц-поля — в электрооптическом детекторе, построенном на основе кристалла ZnTe. В качестве фемтосекундного излучения накачки выступала вторая гармоника Yb-волоконного фемтосекундного лазера с длительностью импульса 80 фс и частотой следования импульсов 50 МГц. Аналогичная схема спектрометра была применена в работах [28–32, 37, 38]. Не вдаваясь в подробности описания устройства и принципа действия экспериментальной установки, перейдем к рассмотрению разработанного метода решения обратной задачи.

**Разработанный алгоритм.** При получении основных математических соотношений работы были приняты следующие допущения.

1. Существенное условие применимости предложенного алгоритма — отличный от нуля коэффициент пропускания образца в интересующей нас области частот  $[\nu_{t\min}, \nu_{t\max}]$ .

2. Минимальная толщина образца, при которой алгоритм позволяет получать корректное решение, должна удовлетворять условию

$$l \gg l_{\min} = \frac{c_0}{2\nu_{t\max}n_{\min}}, \quad (1)$$

где  $c_0$  — скорость света в вакууме;  $\nu_{t\max}$  — максимальная частота в спектре сигнала системы;  $n_{\min}$  — минимальный показатель преломления среды в рабочем спектральном диапазоне системы  $[\nu_{\min}, \nu_{\max}]$ . Для получения условия (1) необходимо, чтобы период следования переотраженных импульсов в сигнале образца  $\tau_{rep} = 2ln_{\min}/c_0$  значительно превышал длительность одного импульса  $\tau_{pulse} = 1/\nu_{\max}$ . При спектральном рабочем диапазоне значений системы  $[0, 1, 3, 0]$  ТГц и минимальном показателе преломления среды  $n_{\min} = 1,5$  отн. ед. минимальная толщина образца должна составлять  $l \gg 50$  мкм.

3. Оптические характеристики образца должны быть постоянны по объему, а шероховатости поверхностей плоскопараллельной пластинки и флуктуации толщины образца не должны превышать значения  $\delta l = \lambda_{\min}/20 = c/(20\nu_{\max}) = 5,0$  мкм, что позволит исключить влияние рассеяния электромагнитных волн на оптических неоднородностях объекта.

4. Для вывода основных математических соотношений настоящей работы использовались формулы Френеля для случая нормального падения электромагнитной волны на границу раздела сред 1 и 2:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{12}(\nu_t) &= \frac{\tilde{n}_2(\nu_t) - \tilde{n}_1(\nu_t)}{\tilde{n}_1\nu_t + \tilde{n}_2\nu_t}; \\ \tilde{T}_{12}(\nu_t) &= \frac{2\tilde{n}_1(\nu_t)}{\tilde{n}_1(\nu_t) + \tilde{n}_2(\nu_t)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\tilde{n}_1(\nu_t)$  и  $\tilde{n}_2(\nu_t)$  — спектральные комплексные показатели преломления сред. Использовался также закон Бугера – Ламберта – Бера, описывающий ослабление амплитуды электромагнитной волны и ее фазовый набег при прохождении через диссипативную среду:

$$\begin{aligned} \tilde{E}(z, \nu_t) &= \tilde{E}(0, \nu_t) \tilde{P}_1(\nu_t); \\ \tilde{P}_1(\nu_t) &= \exp\left(-j \frac{2\pi\nu_t}{c_0} \tilde{n}_1(\nu_t) z\right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\tilde{E}(0, \nu_t)$  и  $\tilde{E}(z, \nu_t)$  — комплексная амплитуда электромагнитной волны в начале координатной оси  $OZ$  и в координате  $z$ ;  $z$  — пространственная координата, совпадающая с направлением распространения волны;  $\tilde{P}_1(\nu_t)$  — оператор преобразования комплексной амплитуды поля.

5. Применение формул Френеля для случая нормального падения волны на границу раздела двух сред накладывает ограничение на погрешность ориентации исследуемого образца в кювете ТГц импульсного спектрометра. Допустимая погрешность угловой ориентации образца в кювете спектрометра не должна превышать  $3,0^\circ \dots 5,0^\circ$ . В таком случае погрешность регистрации спектральных характеристик не превысит допустимое значение 1,0%.

**Описание алгоритма. Фильтрация сигналов.** Пусть в ходе экспериментальных исследований зарегистрированы два сигнала:

- 1) опорный сигнал  $E_r(t)$ , прошедший через пустую кювету спектрометра;
- 2) сигнал образца  $E_s(t)$ , прошедший через кювету с исследуемым образцом.

Обозначим  $\tilde{E}_r(\nu_t)$  и  $\tilde{E}_s(\nu_t)$  — фурье-спектры базового сигнала и сигнала образца.

Сигналы спектрометра, кроме основного ТГц-импульса и импульсов-спутников, обусловленных многократными переотражениями излучения в образце, содержат паразитные флуктуации поля, возникающие от систематических погрешностей прибора. Эти погрешности могут вносить искажения в вычисляемые спектральные характеристики. Исключить влияние систематических искажений можно путем использования процедуры оконной фильтрации сигналов:

$$E'(t) = E(t) H(t - t'), \quad (4)$$

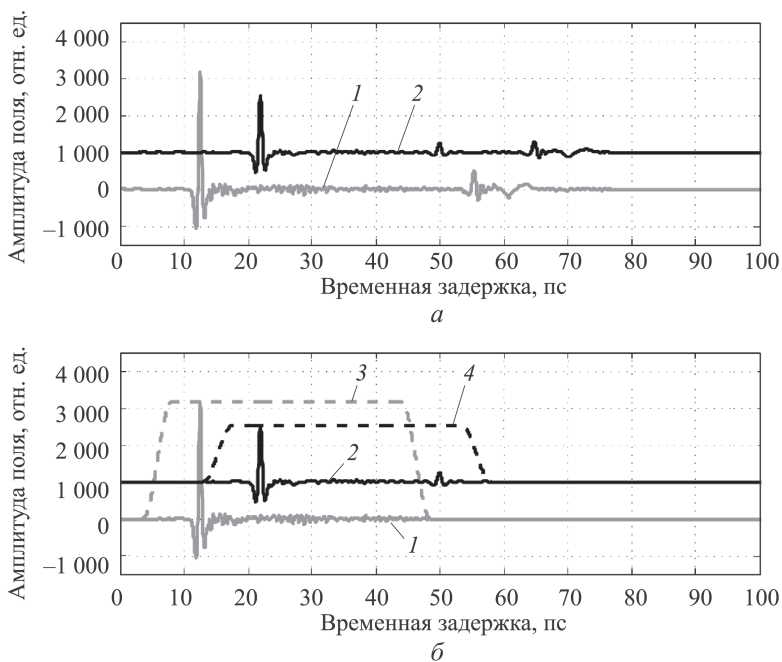
где  $E(t)$  и  $E'(t)$  — сигналы спектрометра до и после выполнения оконной фильтрации;  $H(t - t')$  — оконный фильтр, центрированный в точке  $t'$  оси времени.

Для построения оконного фильтра  $H(t - t')$  может быть применен любой фильтр, используемый для предобработки интерферограмм в ИК-фурье-спектроскопии [39]. В настоящей работе воспользуемся адаптивным фильтром Дж. Тьюки [40]:

$$H(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{Ta} \left( t - \frac{aT}{2} \right) \right) \right], & 0 < t \leq \frac{a}{2}; \\ 1, & \frac{a}{2} < t \leq 1 - \frac{a}{2}; \\ \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{Ta} \left( t - T + \frac{aT}{2} \right) \right) \right], & 1 - \frac{a}{2} < t \leq 1, \end{cases} \quad (5)$$

где  $T$  — размер окна фильтра;  $a$  — параметр крутизны краев фильтра. Экспериментально установлено, что для анализа сигналов ТГц импульсной спектроскопии удобно использовать значение параметра





**Рис. 1. Сигналы импульсного ТГц-спектрометра до (а) и после (б) применения процедуры оконной фильтрации паразитных шумовых всплесков:**

1 – базовый сигнал; 2 – сигнал образца; 3 – базовый фильтр; 4 – фильтр сигнала

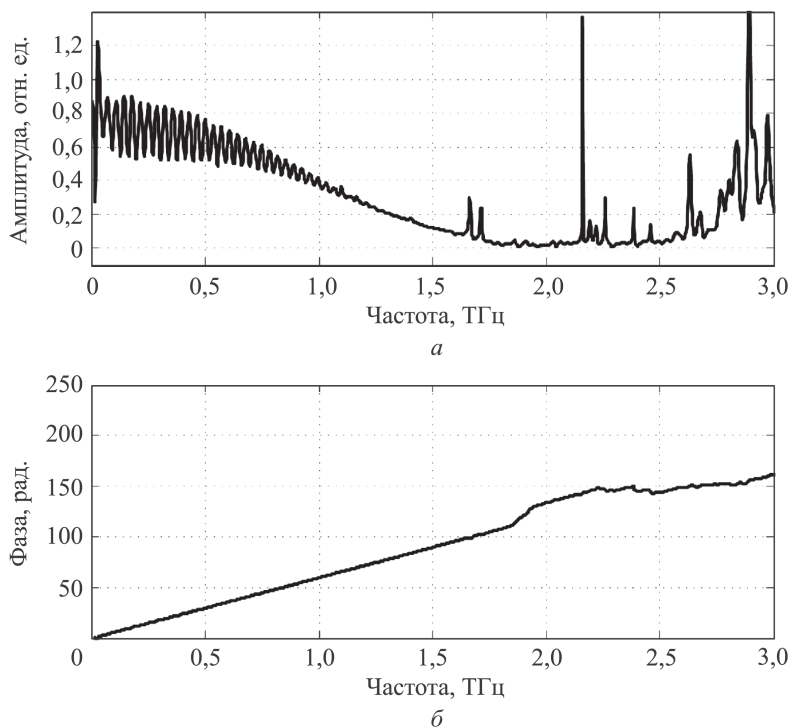
гладкости краев фильтра  $a = 0,2$  и ширину фильтра  $T = 45$  пс. Разработан метод автоматического позиционирования оконного фильтра относительно главного импульса сигнала ТГц импульсного спектрометра. Опорный сигнал (кривая 1) и сигнал образца (кривая 2) до и после применения к ним процедуры оконной фильтрации паразитных шумовых всплесков приведены на рис. 1.

Сигнал образца получен при изучении тестовой керамической плоскопараллельной пластинки толщиной 1,37 мм и содержит как основной ТГц-импульс, так и первый импульс-спутник. После фильтрации паразитных всплесков ТГц-поля в сигнале образца по-прежнему присутствуют обе информативные составляющие сигнала, тогда как систематическая погрешность полностью исключена.

*Вычисление экспериментального коэффициента пропускания.* Зная комплексные амплитудные фурье-спектры опорного сигнала  $\tilde{E}_r(\nu_t)$  и сигнала образца  $\tilde{E}_s(\nu_t)$ , можно определить комплексный амплитудный коэффициент пропускания образца:

$$\tilde{H}_{exp}(\nu_t) = \frac{\tilde{E}_s(\nu_t)}{\tilde{E}_r(\nu_t)}. \quad (6)$$

Результат вычисления экспериментального коэффициента пропускания для тестового керамического образца приведен на рис. 2 в виде



**Рис. 2. Зависимость модуля (а) и фазы (б) комплексного амплитудного коэффициента пропускания тестового керамического образца от частоты**

зависимостей модуля  $\left| \tilde{H}_{exp}(\nu_t) \right|$  и фазы  $\varphi \left\{ \tilde{H}_{exp}(\nu_t) \right\}$  передаточной функции от частоты.

Очевидно наличие модуляций в амплитудном коэффициенте пропускания, что обусловлено интерференцией двух волн, формирующих сигнал образца. Кривые модуля и фазы передаточной функции содержат шумовые всплески, приводящие к превышению модулем передаточной функции физически допустимого значения 1,0 отн. ед. С одной стороны, эти искажения обусловлены низкой мощностью сигнала спектрометра в указанных диапазонах значений частоты, с другой — существенным влиянием флуктуаций концентрации водяных паров на пути ТГц-пучка при выполнении измерений. Для апробации разрабатываемого алгоритма ограничимся рассмотрением диапазона значений частоты 0,1...1,7 ТГц, исключив тем самым влияние перечисленных выше факторов на восстанавливаемые спектральные зависимости ТГц оптических характеристик образца.

Задачу вычисления спектральных ТГц оптических характеристик образца можно свести к поиску таких оптических характеристик плоскопараллельной пластинки, при которых теоретический комплексный коэффициент пропускания образца  $\tilde{H}_{th}(\nu_t, \tilde{n}(\nu_t), l)$  будет наиболее близок к экспериментальному комплексному коэффициенту



пропускания  $\tilde{H}_{exp}(\nu_t)$ . Процесс поиска комплексного спектрального показателя преломления вещества может быть реализован в виде минимизации некоторого функционала ошибки  $Err$  относительно функции  $\tilde{n}(\nu_t)$ . При данном подходе к процессу вычисления оптических характеристик необходимо решить две задачи. Одна задача связана с заданием физико-математической модели ТГц спектрального коэффициента пропускания образца  $\tilde{H}_{th}(\nu_t, \tilde{n}, l)$ , а другая — с определением метода построения функционала ошибки  $Err$ .

**Модель образца.** Для вывода теоретического комплексного коэффициента пропускания плоскопараллельной пластинки воспользуемся моделью квазирезонатора Фабри – Перо (рис. 3). Полагая, что излучение падает на границы раздела сред воздух–образец и образец–воздух нормально, используем формулы Френеля (2) и закон Бугера – Ламберта – Бера (3) для описания прохождения излучения через исследуемый образец.

Пусть  $\tilde{E}_0(\nu_t)$  — комплексная амплитуда электромагнитной волны на выходе источника импульсов ТГц-спектрометра. Обозначим  $\tilde{n}_0(\nu_t)$  и  $\tilde{n}_1(\nu_t)$  — комплексные показатели преломления воздуха и образца. Комплексная амплитуда первого ТГц-импульса, прошедшего через образец и достигшего ТГц-детектора, имеет вид

$$\tilde{E}_0(\nu_t) \tilde{P}_0(L - l, \nu_t) \tilde{T}_{01}(\nu_t) \tilde{P}_1(l, \nu_t) \tilde{T}_{10}(\nu_t),$$

амплитуда первого импульса-спутника —

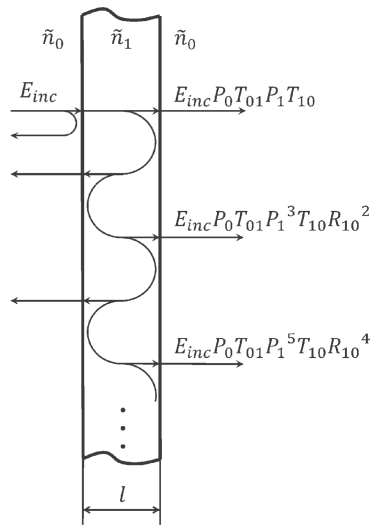
$$\tilde{E}_0(\nu_t) \tilde{P}_0(L - l, \nu_t) \tilde{T}_{01}(\nu_t) \tilde{P}_1^3(l, \nu_t) \tilde{T}_{10}(\nu_t) \tilde{R}_{10}^2(\nu_t),$$

амплитуда второго импульса-спутника —

$$\tilde{E}_0(\nu_t) \tilde{P}_0(L - l, \nu_t) \tilde{T}_{01}(\nu_t) \tilde{P}_1^5(l, \nu_t) \tilde{T}_{10}(\nu_t) \tilde{R}_{10}^4(\nu_t) \text{ и т.д.,}$$

где  $l$  — толщина образца;  $L$  — длина оптического пути при прохождении излучения через пустую кювету ТГц-спектрометра. Суммарная комплексная амплитуда электромагнитной волны в плоскости ТГц-детектора составляет

$$\begin{aligned} \tilde{E}_s^{th}(\nu_t) = & \tilde{E}_0(\nu_t) \tilde{P}_0(L - l, \nu_t) \tilde{T}_{01}(\nu_t) \tilde{P}_1(\nu_t) \tilde{T}_{10}(\nu_t) \times \\ & \times \left\{ 1 + \sum_{i=1}^k \left( \tilde{P}_1^2(l, \nu_t) \tilde{R}_{10}^2(\nu_t) \right)^i \right\}, \quad (7) \end{aligned}$$



**Рис. 3. Модель образца в виде квазирезонатора Фабри – Перо**

где  $k$  — число импульсов-спутников;  $i$  — порядковый номер импульса-спутника, проходящего через среду. При выводе теоретической передаточной функции образца ограничимся конечным числом импульсов-спутников  $k$ , причем число импульсов-спутников  $k$  сигнала  $E_s(t)$  может быть определено программно путем его цифровой обработки.

Если волна  $\tilde{E}_0(\nu_t)$  проходит через пустую кювету спектрометра, комплексная амплитуда электромагнитного поля на детекторе имеет вид

$$\tilde{E}_r^{th}(\nu_t) = \tilde{E}_0(\nu_t) \tilde{P}_0(L, \nu_t). \quad (8)$$

Теоретический комплексный амплитудный коэффициент пропускания образца может быть определен как

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{th}(\nu_t, \tilde{n}_0, \tilde{n}_1, l, k) &= \frac{\tilde{E}_s^{th}(\nu_t)}{\tilde{E}_r^{th}(\nu_t)} = \\ &= \tilde{P}_0(-l, \nu_t) \tilde{T}_{01}(\nu_t) \tilde{P}_1(\nu_t) \tilde{T}_{10}(\nu_t) \left\{ 1 + \sum_{i=1}^k \left( \tilde{P}_1^2(l, \nu_t) \tilde{R}_{10}^2(\nu_t) \right)^i \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя выражения для операторов  $\tilde{P}_0$ ,  $\tilde{P}_1$ ,  $\tilde{T}_{01}$ ,  $\tilde{T}_{10}$  и  $\tilde{R}_{10}$  в выражение (9), получаем

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{th}(\nu_t, \tilde{n}_0, \tilde{n}_1, l, k) &= \\ &= \frac{4\tilde{n}_0(\nu_t) \tilde{n}_1(\nu_t)}{(\tilde{n}_0(\nu_t) + \tilde{n}_1(\nu_t))^2} \exp\left(-j \frac{2\pi\nu_t}{c_0} (\tilde{n}_1(\nu_t) - \tilde{n}_0(\nu_t)) l\right) \times \\ &\times \left\{ 1 + \sum_{i=1}^k \left( \exp\left(-j \frac{2\pi\nu_t}{c_0} \tilde{n}_1(\nu_t) l\right) \frac{(\tilde{n}_0(\nu_t) - \tilde{n}_1(\nu_t))^2}{(\tilde{n}_0(\nu_t) + \tilde{n}_1(\nu_t))^2} \right)^i \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Задав математическую модель теоретической комплексной передаточной функции образца, перейдем к выбору метода построения функционала ошибки  $Err$ , характеризующего различие теоретического  $\tilde{H}_{th}(\nu_t, \tilde{n}_0, \tilde{n}_1, l, k)$  и экспериментального  $\tilde{H}_{exp}(\nu_t)$  коэффициентов пропускания.

*Процедура поиска оптических характеристик.* Предположим, что известны комплексный показатель преломления воздуха  $\tilde{n}_0(\nu_t) = 1,0 + j \cdot 0$ , число импульсов-спутников  $k = k'$  в сигнале образца и априорная оценка толщины образца  $l$ , определенная с низкой точностью  $\pm (100 \dots 200)$  мкм. Опишем процедуру поиска оценки оптических характеристик образца следующим выражением:

$$\tilde{n}_1(\nu_t) = \arg \min_{\tilde{n}_1(\nu_t)} \{Err(\nu_t, \tilde{n}_1(\nu_t))\}, \quad (11)$$

где

$$Err(\nu_t, \tilde{n}_1(\nu_t)) = \xi M(\nu_t, \tilde{n}_1(\nu_t)) + \eta A(\nu_t, \tilde{n}_1(\nu_t)). \quad (12)$$

Слагаемые  $M(\nu_t, \tilde{n}_1(\nu_t))$  и  $A(\nu_t, \tilde{n}_1(\nu_t))$ , учитывающие влияние рас- согласования модулей и фаз экспериментальной и теоретической пе- редаточных функций, определяются по выражениям

$$\begin{aligned} M(\nu_t, \tilde{n}_1(\nu_t)) &= \left| \left| \tilde{H}_{th}(\nu_t, \tilde{n}_1(\nu_t)) \right| - \left| \tilde{H}_{exp}(\nu_t) \right| \right|; \\ A(\nu_t, \tilde{n}_1(\nu_t)) &= \left| \varphi \left\{ \tilde{H}_{th}(\nu_t, \tilde{n}_1(\nu_t)) \right\} - \varphi \left\{ \tilde{H}_{exp}(\nu_t) \right\} \right|. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь  $\xi$  и  $\eta$  — коэффициенты, позволяющие управлять вкладом сла- гаемых  $M(\nu_t, \tilde{n}_1(\nu_t))$  и  $A(\nu_t, \tilde{n}_1(\nu_t))$  в функцию ошибки  $Err$ , причем экспериментально установлено, что лучшие результаты восстано- вления оптических характеристик (одинаковая относительная точность восстановления действительной и мнимой частей комплексного пока- зателя преломления среды  $\tilde{n}_1(\nu_t)$ ) удастся получить при соотношении коэффициентов  $\xi = 0,1\eta$ .

Для удобства перейдем к описанию оптических характеристик сре- ды через некомплексные величины: спектральный показатель прелом- ления  $n_1(\nu_t)$  и спектральный удельный коэффициент амплитудного поглощения излучения средой  $\alpha_1(\nu_t)$ . Связь  $n_1(\nu_t)$  и  $\alpha_1(\nu_t)$  с  $\tilde{n}_1(\nu_t)$  имеет вид

$$\tilde{n}_1(\nu_t) = n_1(\nu_t) - j \frac{c}{2\pi\nu_t} \alpha_1(\nu_t). \quad (14)$$

Процесс поиска оценки оптических характеристик (минимизации функционала ошибки) связан с перебором всех возможных значе- ний функций  $n_1(\nu_t)$  и  $\alpha_1(\nu_t)$  в рабочем спектральном диапазоне  $[\nu_{t\min}, \nu_{t\max}]$ , с вычислением для всего множества значений функций  $n_1(\nu_t)$ ,  $\alpha_1(\nu_t)$  значений функционала ошибки  $Err(\nu_t, n_1(\nu_t), \alpha_1(\nu_t))$  и последующим поиском глобального минимума этого функционала по этим функциям. Очевидно, что подобный подход к определению оптических характеристик требует выполнения большого объема вы- числений, соответственно, существенных затрат машинного времени. Поэтому необходимо, по возможности, ограничить область перебира- емых значений оптических характеристик  $n_1(\nu_t)$  и  $\alpha_1(\nu_t)$ . Функцио- нал ошибки может иметь несколько минимумов по функциям  $n_1(\nu_t)$  и  $\alpha_1(\nu_t)$ , с учетом этого важно ограничивать диапазон возможных изме- нений оптических характеристик для исключения ошибочной оценки оптических характеристик, обусловленной нахождением побочного минимума функционала.

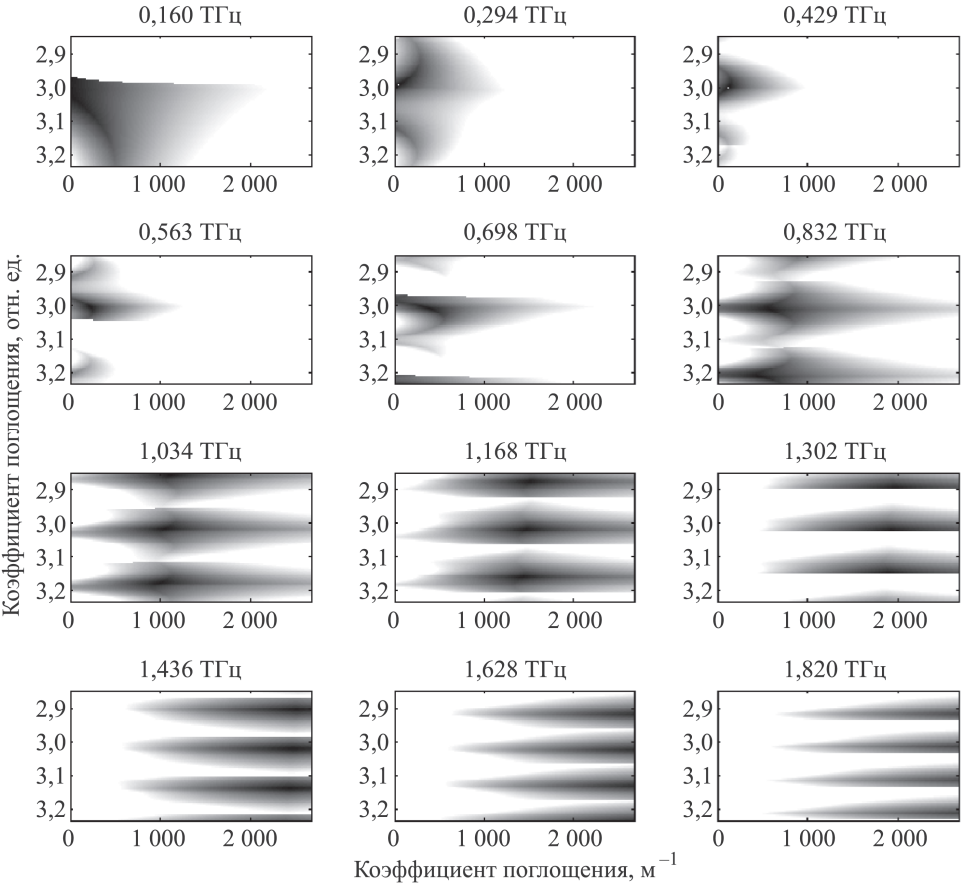
Ограничим диапазон возможных вариаций значений  $n_1(\nu_t)$  интервалом  $[n_{1mid} - \Delta n_1, n_{1mid} + \Delta n_1]$ , где  $n_{1mid}$  и  $\Delta n_1$  задаются выражениями

$$n_{1mid} = 1 + \frac{c_0}{2\pi l} \left( \frac{d}{d\nu_t} \varphi \left\{ \tilde{H}_{exp}(\nu_t) \right\} \right) \Big|_{\nu_t=0,5 \text{ ТГц}} ; \quad (15)$$

$\Delta n_1 = 0,2n_{1mid}$ . Диапазон возможных изменений значений  $\alpha_1(\nu_t)$  ограничим интервалом  $[0, 2\alpha_{1mid}]$ , где

$$\alpha_{1mid} = -\frac{1}{l} \ln \left| \frac{\max_t \{E_{sample}(t)\}}{\max_t \{E_{ref}(t)\}} \right|. \quad (16)$$

Пример функционала ошибки, рассчитанного для тестового керамического образца, приведен на рис. 4 в виде отдельных сечений функционала по частотной оси в диапазоне значений частоты 0,16... 1,82 ТГц. Высоким яркостям изображений, иллюстрирующим сечения функционала, соответствует большее рассогласование экспериментальной и теоретической передаточных функций. Рассматриваемые



**Рис. 4.** Функционал ошибки тестового керамического образца в виде отдельных сечений по частотной координате

мый функционал ошибки имеет один глобальный минимум в области низких частот в пределах заданной области вариаций значений  $n_1(\nu_t)$  и  $\alpha_1(\nu_t)$ . При переходе к высоким частотам число минимумов функционала возрастает. Для исключения возможных ошибок при поиске глобального минимума  $Err(\nu_t, n_1(\nu_t), \alpha_1(\nu_t))$  будем выполнять минимизацию функционала следующим образом:

1) на начальном этапе необходимо осуществить поиск глобального минимума в сечении функционала ошибки на низкой частоте, например  $\nu_{t_0} = 0,4$  ТГц, перебрав при этом все возможные значения оптических характеристик модельного коэффициента пропускания образца в пределах заданных интервалов (выражения (15) и (16));

2) найдя значения функций  $n_1(\nu_{t_0})$  и  $\alpha_1(\nu_{t_0})$  при частоте  $\nu_{t_0}$ , воспользуемся ими в качестве начального приближения для поиска значений оптических характеристик в сечении функционала ошибки на соседней более высокой частоте  $\nu_{t_1} = \nu_{t_0} + \Delta\nu_t$ , где  $\Delta\nu_t$  — инкремент частоты;

3) переходя на более высокие частоты  $\nu_{t_{i+1}} = \nu_{t_i} + \Delta\nu_t$ , минимизируем функционал ошибки вплоть до верхней границы рабочего спектрального диапазона  $\nu_{t_{\max}}$ , принимая значения функций  $n_1(\nu_{t_i})$  и  $\alpha_1(\nu_{t_i})$  в качестве начального приближения для поиска значений  $n_1(\nu_{t_i} + \Delta\nu_t)$  и  $\alpha_1(\nu_{t_i} + \Delta\nu_t)$ ;

4) для области низких частот сигнала ( $\nu_t < \nu_{t_0}$ ) необходимо выполнять ту же процедуру минимизации функционала ошибки в различных его сечениях, но с декрементом частоты  $\nu_{t_{i+1}} = \nu_{t_i} - \Delta\nu_t$ . Минимизацию необходимо выполнять до нижней границы рабочего спектрального диапазона  $\nu_{t_{\min}}$ , принимая значения  $n_1(\nu_{t_i})$  и  $\alpha_1(\nu_{t_i})$  в качестве начального приближения для поиска значений  $n_1(\nu_{t_i} - \Delta\nu_t)$  и  $\alpha_1(\nu_{t_i} - \Delta\nu_t)$ .

Следовательно, минимизацию по всему заданному множеству значений функций  $n_1(\nu_t)$  и  $\alpha_1(\nu_t)$  (выражения (15) и (16)) необходимо проводить лишь для первого сечения функционала ошибки  $\nu_{t_0}$ , тогда как для остальных сечений окно поиска можно существенно сузить, что позволит сократить требуемое количество вычислений.

*Программное уточнение толщины образца.* Одно из существенных преимуществ настоящего алгоритма восстановления спектральных ТГц оптических характеристик — отсутствие необходимости точного априорного знания толщины образца  $l$ . Точность априорного определения толщины может составлять всего  $\pm(0,1 \dots 0,2)$  мм, что на порядок ниже по сравнению с требованиями, предъявляемыми классическими алгоритмами. Смягчение требования к априорной оценке точности связано с наличием в разработанном алгоритме процедуры программного уточнения толщины.

В случае неверной оценки  $l$  описанная выше процедура восстановления спектральных характеристик будет определять функции  $n_1(\nu_t)$  и  $\alpha_1(\nu_t)$ , искаженные сильными периодическими модуляциями. Значения искажений зависят от погрешности определения толщины и минимальны, когда оценка толщины пластинки близка к ее истинной толщине. Для решения программного утолщения толщины предложено использовать следующую процедуру:

1) толщина образца  $l$  измеряется со сравнительно низкой точностью  $\pm \Delta l$ , после чего задается интервал ее возможных вариаций  $[l - \Delta l, l + \Delta l]$  с дискретным шагом  $\delta l \leq 2,0$  мкм;

2) в соответствии с описанной выше процедурой минимизации функционала ошибки выполняется восстановление спектральных оптических характеристик образца для всего массива толщин  $[l - \Delta l, l + \Delta l]$ , в результате чего рассчитываются функции  $n_1(\nu_t, l)$  и  $\alpha_1(\nu_t, l)$ ;

3) на основе цифровой обработки  $n_1(\nu_t, l)$  и  $\alpha_1(\nu_t, l)$  вычисляется критерий гладкости кривых спектральных оптических характеристик образца

$$R(l) = \left[ \int_{\nu_{t\min}}^{\nu_{t\max}} \left[ \zeta \left( \frac{\partial n_1(\nu_t, l)}{\partial \nu_t} \right)^2 + \varsigma \left( \frac{\partial \alpha_1(\nu_t, l)}{\partial \nu_t} \right)^2 \right] d\nu_t \right]^{-1}, \quad (17)$$

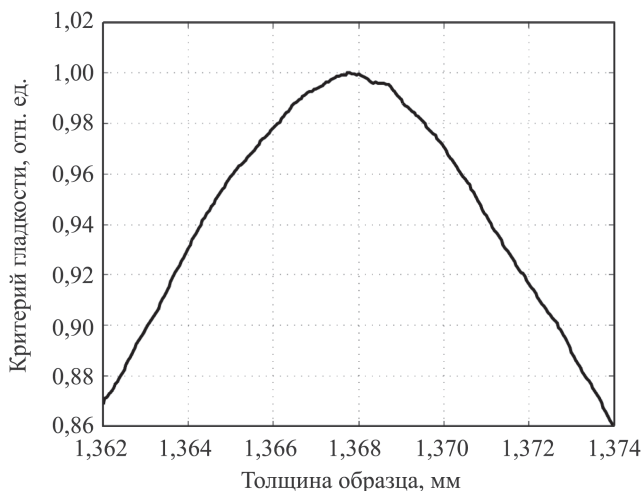
где  $\zeta$  и  $\varsigma$  — коэффициенты, регулирующие вклад функций  $n_1(\nu_t, l)$  и  $\alpha_1(\nu_t, l)$  в критерий  $R(l)$ ; экспериментально установлено, что наилучших результатов оценки толщины можно достичь при  $\zeta = 10\varsigma$ ;

4) в качестве оценки толщины образца принимаем ту толщину, для которой критерий гладкости (17) максимален:

$$l = \arg \max_l \{R(l)\}. \quad (18)$$

Пример вычисления критерия гладкости (17) для тестового керамического образца приведен на рис. 5. На представленной функции наблюдается ярко выраженный глобальный максимум  $R(l)$ . Точность определения толщины образца в соответствии с предложенным критерием может достигать десятых долей микрометра.

**Апробация алгоритма.** Проведена апробация разработанного алгоритма, включавшая в себя экспериментальные исследования тестового керамического образца № 1 толщиной 1,37 мм, образца из арсенида галлия толщиной 1,19 мм и керамического образца № 2 толщиной 0,46 мм. Рассмотренные образцы и условия проведения эксперимента удовлетворяли перечисленным выше требованиям, что позволило корректно использовать созданный алгоритм для обработки зарегистрированных спектрометром сигналов. Восстановленные спектральные



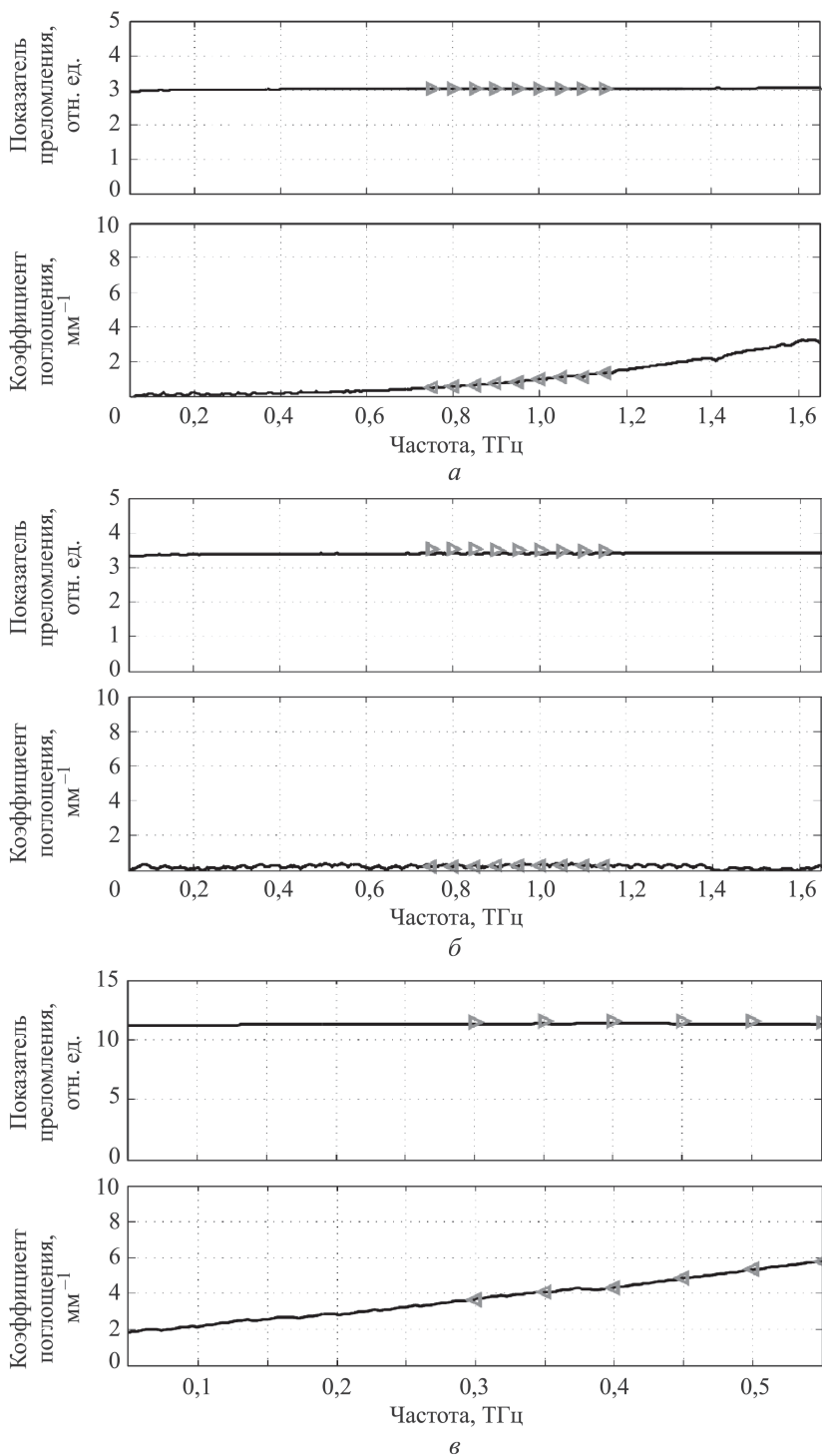
**Рис. 5. Пример вычисления критерия гладкости (6) для тестового керамического образца**

зависимости ТГц оптических характеристик образцов приведены на рис. 6. На кривые нанесены результаты исследований тех же образцов с помощью ТГц-спектроскопии на лампах обратной волны [41–43].

Спектральные области частот, в которых удалось зарегистрировать оптические характеристики, различны для четырех образцов. Образцы № 1 и образцы из арсенида галлия оказались прозрачными во всем выбранном спектральном диапазоне 0,1... 1,7 ТГц, а образец № 2 — в узком спектральном диапазоне 0,1... 0,6 ТГц. Для исследования оптических характеристик непрозрачных образцов необходимо анализировать отраженное от поверхности образца излучение, используя модифицированную методику, соответствующую данному виду измерений. Характер зарегистрированных спектральных оптических характеристик различен: показатели преломления сред практически не зависят от частоты, тогда как спектральные коэффициенты удельного поглощения излучения преимущественно возрастают с увеличением частоты. Значение спектрального коэффициента поглощения излучения образцом из арсенида галлия оказалось малым.

Оптические характеристики тестовых сред, зарегистрированные с помощью ТГц импульсной спектроскопии и ТГц-спектроскопии на лампах обратной волны совпадают. Относительная погрешность определения спектральных ТГц оптических характеристик зависит от нескольких факторов, в том числе и от остаточной погрешности определения толщины образца. Верификация предложенного алгоритма, основанная на сравнении результатов исследования оптических характеристик тестовых образцов двумя видами спектроскопий, позволяет заключить следующее: предложенный метод является работоспособным, позволяя обеспечивать точность определения оптических харак-





**Рис. 6.** Спектральные оптические характеристики тестовых керамического образца № 1 (*а*), образца из арсенида галлия (*б*) и керамического образца № 2 (*в*), зарегистрированные с помощью ТГц импульсной спектроскопии (сплошная линия) и ТГц-спектроскопии на лампах обратной волны ( $\blacktriangle$ )

теристик не менее 1,0...2,0%, что превосходит точность классических алгоритмов решения такой обратной задачи.

Отметим, что ТГц импульсный спектрометр позволил зарегистрировать спектральные характеристики образцов в существенно более широком диапазоне значений частоты по сравнению с ТГц-спектроскопией на лампах обратной волны. Это обусловлено принципиальными ограничениями спектроскопии на лампах обратной волны, связанными с трудоемкостью и длительностью измерений оптических характеристик образца в широком спектральном диапазоне. Зарегистрированные характеристики были получены с использованием одной лампы, генерирующей квазимонохроматическое перестраиваемое в пределах узкой полосы частот электромагнитное излучение. Так, для обеспечения возможности измерений в широком спектральном диапазоне 0,05...1,20 ТГц (предельное значение для данного метода исследований) требуется использовать около 10 ламп обратной волны.

Направления дальнейших исследований в рамках совершенствования методологии ТГц импульсной спектроскопии будут связаны с разработкой комплекса методов исследования спектральных ТГц оптических характеристик твердых и жидких сред как на основе анализа их спектральных коэффициентов пропускания, так и обработки сигналов, отраженных образцами. Актуальна задача развития методов томографического исследования пространственного распределения оптических характеристик различных сред на основе обработки временных сигналов ТГц импульсной спектроскопии. Отметим важность исследований единственности и устойчивости методов решения некорректно поставленных обратных задач ТГц-спектроскопии, чему также будет уделено внимание.

**Заключение.** Рассмотрен новый алгоритм решения обратной задачи, связанной с высокоточным восстановлением спектральных зависимостей ТГц оптических характеристик однородного образца в виде плоскопараллельной пластинки, на основе обработки сигнала ТГц импульсного спектрометра. Алгоритм позволяет существенно снизить требования к априорному знанию толщины образца, обязательному для классических алгоритмов решения рассматриваемой обратной задачи, а также в отличие от общепринятых алгоритмов позволяет исследовать образцы с низким показателем преломления и (или) малой толщиной.

Рассмотрены основные ограничения, накладываемые на объект исследования принятой в настоящей работе физико-математической моделью образца, имеющей вид квазирезонатора Фабри – Перо. Предложена процедура поиска оптических характеристик среды в ходе минимизации функционала ошибки, построенного на результатах экспериментальных спектроскопических исследований образца и

физико-математической модели среды. Введена процедура программного уточнения толщины образца в процессе вычисления его спектральных оптических характеристик. Проведена экспериментальная апробация разработанного алгоритма на основе исследования тестовых образцов. Рассмотрены направления дальнейших исследований в рамках разработки методологии ТГц импульсной спектроскопии.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (гранты № 14-02-00781, № 14-08-31124 и № 14-08-31102).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lee Y.-S. Principles of terahertz science and technology. NY.: Springer, 2009.
2. Brundermann E., Hubers H.-W., Kimmitt M.F. Terahertz techniques. NY.: Springer, 2009.
3. Mittleman D.M., Nuss M.C., Colvin V.L. Terahertz spectroscopy of water in inverse micelles // Chem. Phys. Lett. 1997. Vol. 275. No. 3–4. P. 332–338. DOI: 10.1016/S0009-2614(97)00760-4.
4. Nazarov M.M., Shkurinov A.P., Kuleshov E.A., Tuchin V.V. Terahertz time-domain spectroscopy of biological tissues // Quantum Electron. 2008. Vol. 38. No. 7. P. 647–654. DOI:10.1070/QE2008v038n07ABEH013851.
5. Yurchenko S.O., Kryuchkov N.P. The structure and spectral properties of two-dimensional dipole systems // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 486: 012031. DOI:10.1088/1742-6596/486/1/012031.
6. Bunkin N.F., Suyazov N.V., Shkirin A.V., Yurchenko S.O. Structure of the nanobubble clusters of dissolved air in liquid media // Journal of Biological Physics. 2012. Vol. 38. No. 1. P. 121–152. DOI: 10.1007/s10867-011-9242-8.
7. Aliev I.N., Yurchenko S.O. Evolution of perturbations of a charged interface between immiscible inviscid fluids in the interelectrode gap // Fluid Dynamics. 2010. Vol. 45. No. 5. P. 817–826. DOI:10.1134/S0015462810050145.
8. Finkel M.I., Maslennikov S.N., Gol'tsman G.N. The concept of the receiving complex for the “millimetron” space radio telescope // Radiophysics and Quantum Electronics. 2007. Vol. 50. No. 10–11. P. 837–846. DOI:10.1007/s11141-007-0075-z.
9. Murrill S.R., Franck C.C., Espinola R.L., Petkie D.T., De Lucia F.C., Jacobs E.L. Enhanced terahertz imaging system performance analysis and design tool for concealed weapon identification // Proceedings of SPIE Homepage. 2011. Vol. 8188. Article id. 81880J. P. 1–15. DOI:10.1117/12.898371.
10. Stoik C.D., Bohn M.J., Blackshire J.L. Nondestructive evaluation of aircraft composites using transmissive terahertz time domain spectroscopy // Optics Express. 2008. Vol. 16. No. 21. P. 17039–17051. DOI:10.1364/OE.16.017039.
11. Karpowicz N., Dawes D., Perry M.J., Zhang X.-C. Fire damage on carbon fiber materials characterization by THz waves // Proceedings of SPIE Homepage. 2006. Vol. 6212. Article id. 81880J. P. 1–17. DOI:10.1117/12.665852.
12. Yakovlev E.V., Zaytsev K.I., Fokina I.N., Karasik V.E., Yurchenko S.O. Nondestructive testing of polymer composite materials using THz radiation // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 486: 012008. DOI:10.1088/1742-6596/486/1/012008.
13. Wallace V.P., Woodward R.M., Fitzgerald A.J., Pickwell E., Pye R.J., Arnone D.D. Terahertz pulsed imaging of cancers // Proceedings of SPIE. 2003. Vol. 4949. P. 353–359. DOI:10.1117/12.500121.
14. Zaytsev K.I., Kudrin K.G., Koroleva S.A., Fokina I.N., Volodarskaya S.I., Novitskaya E.V., Perov A.N., Karasik V.E., Yurchenko S.O. Medical diagnostics using terahertz pulsed spectroscopy // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 486: 012014. DOI:10.1088/1742-6596/486/1/012014.

15. Fitzgerald A.J., Wallace V.P., Jimenez-Linan M., Bobrow L., Pye R.J., Purushotham A.D., Arnone D.D. Terahertz pulsed imaging of human breast tumors // *Radiology*. 2006. Vol. 239. No. 2. P. 533–540. DOI:10.1148/radiol.2392041315.
16. Ashworth P.C., Pickwell-MacPherson E., Provenzano E., Pinder S.E., Purushotham A.D., Pepper M., Wallace V.P. Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer // *Optics Express*. 2009. Vol. 17. No. 15. P. 12444–12454. DOI:10.1364/OE.17.012444.
17. Reid C. Spectroscopic methods for medical diagnosis at terahertz wavelength. Ph.D. Thesis. University College London. 2009. 194 p.
18. Arbab M.H., Dickey T.C., Winebrenner D.P., Chen A., Klein M.B., Mourad P.D. Terahertz reflectometry of burn wounds in a rat model // *Biomedical optics express*. 2011. Vol. 2. No. 8. P. 2339–2347. DOI:10.1364/BOE.2.002339.
19. Pickwell E., Wallace V.P., Cole B.E., Ali S., Longbottom C., Lynch R.J.M., Pepper M. A comparison of terahertz pulsed imaging with transmission microradiography for depth measurement of enamel demineralization in vitro // *Caries Research*. 2007. Vol. 41. No. 1. P. 49–55. DOI:10.1159/000096105.
20. Володарская С.И., Зайцев К.И., Карасик В.Е., Новицкая Е.В., Фокина И.Н. Экспериментальное обоснование возможности ранней диагностики кариозного поражения эмали зуба с помощью терагерцовой спектроскопии // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2013. № 2. С. 33–47.
21. Younus A., Caumes J.-P., Salort S., Chassagne B., Pradère C., Dautant A., Ziéglé A., Abraham E. Continuous millimeter-wave imaging scanner for art conservation science // *Advances in Optical Technologies*. 2011. Article ID 275682. P. 1–9. DOI:10.1155/2011/275682.
22. Rubens H., Nichols E.F. Heat rays of great wave length // *APS JOURNALS ARCHIVE. Phys. Rev. Series I.4.314*. 1897. Vol. 4. No. 4. P. 314–323. DOI:10.1103/PhysRevSeriesI.4.314.
23. Glagolyeva-Arkadyeva A. Short electromagnetic waves of wave-length up to 82 microns // *Nature*. 1924. Vol. 113. Iss. 2844. 640 G. DOI:10.1038/113640a0.
24. Ryzhii V., Otsuji T., Ryzhii M., Leiman V.G., Yurchenko S.O. Effect of plasma resonances on dynamic characteristics of double graphene-layer optical modulator // *J. Appl. Phys.* 2012. Vol. 112. Iss. 10. P. 104507. DOI:10.1063/1.4766814.
25. Ryzhii V., Otsuji T., Ryzhii M., Ryabova N., Yurchenko S.O., Mitin V., Shur M.S. Graphene terahertz uncooled bolometer // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2013. Vol. 46. No. 6: 065102. DOI:10.1088/0022-3727/46/6/065102.
26. Ryzhii V., Otsuji T., Ryzhii M., Leiman V.G., Yurchenko S.O. Hydrodynamic model for electron-hole plasma in graphene // *J. Appl. Phys.* 2012. Vol. 111. No. 8: 083715. DOI: 10.1063/1.4705382.
27. Auston D.H. Picosecond Optoelectronic Switching and Gating in Silicon // *Applied Physics Letters*. 1975. Vol. 26. No. 3. P. 101–103. DOI: 10.1063/1.88079.
28. Zaytsev K.I., Fokina I.N., Fedorov A.K., Yurchenko S.O. Sensing of phase transition in medium with terahertz pulsed spectroscopy // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. Vol. 486: 012024. DOI:10.1088/1742-6596/486/1/012024.
29. Zaytsev K.I., Gavdush A.A., Lebedev S.P., Yurchenko S.O. Novel algorithm for Sample material parameter determination using THz time-domain spectrometer signal processing // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. Vol. 486: 012018. DOI:10.1088/1742-6596/486/1/012018.
30. Zaytsev K.I., Karasik V.E., Fokina I.N., Alekhovich V.I. Invariant embedding technique for medium permittivity profile reconstruction using terahertz time-domain spectroscopy // *Optical Engineering*. 2013. Vol. 52. No. 6: 068203. DOI:10.1117/1.OE.52.6.068203.
31. Алехнович В.И., Зайцев К.И., Карасик В.Е. Восстановление профиля диэлектрической проницаемости среды с помощью терагерцовой спектроскопии // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2013. № 2. С. 50–66.

32. Zaytsev K.I., Chernomyrdin N.V., Alekhnovich V.I. Novel technique for medium permittivity profile reconstruction using THz pulsed spectroscopy // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. Vol. 486: 012010. DOI:10.1088/1742-6596/486/1/012010.
33. Grischkowsky D., Keiding S., Vanexter M. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors // *J. Opt. Soc. Am. B*. 1990. Vol. 7. No. 10. P. 2006–2015. DOI:10.1364/JOSAB.7.002006.
34. Duvillaret L., Garet F., Coutaz J.-L. Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy // *Appl. Opt.* 1999. Vol. 38. No. 2. P. 409–415. DOI:10.1364/AO.38.000409.
35. Dorney T., Baraniuk R., Mittleman D. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy // *J. Opt. Soc. Am. A*. 2001. Vol. 18. No. 7. P. 1562–1571. DOI: 10.1364/JOSAA.18.001562.
36. Pupeza I., Wilk R., Koch M. Highly accurate optical material parameter determination with THz time-domain spectroscopy // *Optics Express*. 2007. Vol. 15. No. 7. P. 4335–4350. DOI:10.1364/OE.15.004335.
37. Wilmink J., Ibey B., Tongue T., Schulkin B., Laman N., Peralta X., Roth C., Cerna C., Rivest B., Grundt J., Roach W. Development of a compact terahertz time-domain spectrometer for the measurement of the optical properties of biological tissues // *Journal of Biomedical Optics*. 2011. Vol. 16. No. 4: 047006. DOI:10.1117/1.3570648.
38. Redo-Sanchez A., Salvatella G., Galceran R., Roldos E., Garcia-Reguero J.-A., Castellari M., Tejada J. Assessment of terahertz spectroscopy to detect antibiotic residues in food and feed matrices // *Analyst*. 2011. Vol. 136. No. 8. P. 1733–1738. DOI:10.1039/c0an01016b.
39. Kochikov I.V., Morozov A.N., Fufurin I.L. Numerical procedures for substances identification and concentration calculation in the open atmosphere by processing a single ftr measurement // *Computer Optics*. 2012. Vol. 36. No. 4. P. 554–561.
40. Harris F.J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*. 1978. Vol. 66. No. 1. P. 51–83. DOI:10.1109/PROC.1978.10837.
41. Kozlov G.V., Volkov A.A. Coherent source submillimeter wave spectroscopy // *Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids. Topics in Applied Physics*. 1998. No. 74. P. 51–109. DOI:10.1007/BFb0103420.
42. Gorshunov B., Volkov A., Spektor I., Prokhorov A., Mukhin A., Dressel M., Uchida S., Loidl A. Terahertz BWO-spectroscopy // *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves*. 2005. Vol. 26. No. 9. P. 1217–1240. DOI:10.1007/s10762-005-7600-y.

## REFERENCES

- [1] Lee Y.-S. *Principles of terahertz science and technology*. NY., Springer, 2009.
- [2] Brundermann E., Hubers H.-W., Kimmitt M.F. *Terahertz techniques*. NY., Springer, 2009.
- [3] Mittleman D. M., Nuss M. C., Colvin V. L. Terahertz spectroscopy of water in inverse micelles. *Chem. Phys. Lett.*, 1997, vol. 275, no. 3–4, pp. 332–338. DOI: 10.1016/S0009-2614(97)00760-4
- [4] Nazarov M.M., Shkurinov A.P., Kuleshov E.A., Tuchin V.V. Terahertz time-domain spectroscopy of biological tissues. *Quantum Electron.*, 2008, vol. 38, no. 7, pp. 647–654. DOI:10.1070/QE2008v038n07ABEH013851
- [5] Yurchenko S.O., Kryuchkov N.P. The structure and spectral properties of two-dimensional dipole systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 486: 012031. DOI:10.1088/1742-6596/486/1/012031
- [6] Bunkin N.F., Suyazov N.V., Shkirin A.V., Yurchenko S.O. Structure of the nanobubble clusters of dissolved air in liquid media. *Journal of Biological Physics*, 2012, vol. 38, no. 1, pp. 121–152. DOI: 10.1007/s10867-011-9242-8



- [7] Aliev I.N., Yurchenko S.O. Evolution of perturbations of a charged interface between immiscible inviscid fluids in the interelectrode gap. *Fluid Dynamics*, 2010, vol. 45, no. 5, p. 817–826. DOI:10.1134/S0015462810050145
- [8] Finkel M.I., Maslennikov S.N., Gol'tsman G.N. The concept of the receiving complex for the “millimetron” space radio telescope. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2007, vol. 50, no. 10-11, pp. 837–846. DOI:10.1007/s11141-007-0075-z
- [9] Murrill S.R., Franck C.C., Espinola R.L., Petkie D.T., De Lucia F.C., Jacobs E.. Enhanced terahertz imaging system performance analysis and design tool for concealed weapon identification. *Proceedings of SPIE Homepage*, 2011, vol. 8188, article id. 81880J, pp. 1–15.
- [10] Stoik C.D., Bohn M.J., Blackshire J.L. Nondestructive evaluation of aircraft composites using transmissive terahertz time domain spectroscopy. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 21, pp. 17039–17051. DOI:10.1364/OE.16.017039
- [11] Karpowicz N., Dawes D., Perry M.J., Zhang X.-C. Fire damage on carbon fiber materials characterization by THz waves. *Proceedings of SPIE Homepage*, 2006, vol. 6212, article id. 81880J, pp. 1–17. DOI:10.1117/12.665852
- [12] Yakovlev E.V., Zaytsev K.I., Fokina I.N., Karasik V.E., Yurchenko S.O. Nondestructive testing of polymer composite materials using THz radiation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 486: 012008. DOI:10.1088/1742-6596/486/1/012008
- [13] Wallace V.P., Woodward R.M., Fitzgerald A.J., Pickwell E., Pye R.J., Arnone D.D. Terahertz pulsed imaging of cancers // *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 4949, pp. 353–359. DOI:10.1117/12.500121
- [14] Zaytsev K.I., Kudrin K.G., Koroleva S.A., Fokina I.N., Volodarskaya S.I., Novitskaya E.V., Perov A.N., Karasik V.E., Yurchenko S.O. Medical diagnostics using terahertz pulsed spectroscopy. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 486: 012014. DOI:10.1088/1742-6596/486/1/012014
- [15] Fitzgerald A.J., Wallace V.P., Jimenez-Linan M., Bobrow L., Pye R.J., Purushotham A.D., Arnone D.D. Terahertz pulsed imaging of human breast tumors. *Radiology*, 2006, vol. 239, no. 2, pp. 533–540. DOI:10.1148/radiol.2392041315
- [16] Ashworth P.C., Pickwell-MacPherson E., Provenzano E., Pinder S.E., Purushotham A.D., Pepper M., Wallace V.P. Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer. *Optics Express*, 2009, vol. 17, no. 15, pp. 12444–12454. DOI:10.1364/OE.17.012444
- [17] Reid C. Spectroscopic methods for medical diagnosis at terahertz wavelength. Ph. D. Thesis. London, University College, 2009. 194 p.
- [18] Arbab M.H., Dickey T.C., Winebrenner D.P., Chen A., Klein M.B., Mourad P.D. Terahertz reflectometry of burn wounds in a rat model. *Biomedical optics express*, 2011, vol. 2, no. 8, pp. 2339–2347. DOI:10.1364/BOE.2.002339
- [19] Pickwell E., Wallace V.P., Cole B.E., Ali S., Longbottom C., Lynch R.J.M., Pepper M. A comparison of terahertz pulsed imaging with transmission microradiography for depth measurement of enamel demineralization in vitro. *Caries Research*, 2007, vol. 41, no. 1, pp. 49–55. DOI:10.1159/000096105
- [20] Volodarskaya S.I., Zaytsev K.I., Karasik V.E., Novitskaya E.V., Fokina I.N. Experimental justification the ability of tooth enamel early cariosity diagnosis with terahertz spectroscopy. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2013, no. 2, pp. 33–47 (in Russ.).
- [21] Younus A., Caumes J.-P., Salort S., Chassagne B., Pradère C., Dautant A., Zièglè A., Abraham E. Continuous millimeter-wave imaging scanner for art conservation science. *Advances in Optical Technologies*, 2011, article ID 275682, pp. 1–9. DOI:10.1155/2011/275682
- [22] Rubens H., Nichols E.F. Heat Rays of Great Wave Length. *APS JOURNALS ARCHIVE. Phys. Rev. Series I.4.314*, 1897, vol. 4, no. 4, pp. 314–323. DOI:10.1103/PhysRevSeriesI.4.314

- [23] Glagolyeva-Arkadyeva A. Short electromagnetic waves of wave-length up to 82 Microns. *Nature*, 1924, vol. 113, iss. 2844, 640 G.
- [24] Ryzhii V., Otsuji T., Ryzhii M., Leiman V.G., Yurchenko S.O. Effect of plasma resonances on dynamic characteristics of double graphene-layer optical modulator. *J. Appl. Phys.*, 2012, vol. 112, iss. 10: 104507. DOI:10.1063/1.4766814
- [25] Ryzhii V., Otsuji T., Ryzhii M., Ryabova N., Yurchenko S.O., Mitin V., Shur M.S. Graphene terahertz uncooled bolometer. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2013, vol. 46, no. 6: 065102. DOI:10.1088/0022-3727/46/6/065102
- [26] Ryzhii V., Otsuji T., Ryzhii M., Leiman V.G., Yurchenko S.O. Hydrodynamic model for electron-hole plasma in graphene. *J. Appl. Phys.*, 2012, vol. 111, no. 8: 083715. DOI: 10.1063/1.4705382
- [27] Auston D.H. Picosecond Optoelectronic Switching and Gating in Silicon // *Applied Physics Letters*, 1975, vol. 26, no. 3, pp. 101–103. DOI: 10.1063/1.88079
- [28] Zaytsev K.I., Fokina I.N., Fedorov A.K., Yurchenko S.O. Sensing of phase transition in medium with terahertz pulsed spectroscopy. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 486: 012024. DOI:10.1088/1742-6596/486/1/012024
- [29] Zaytsev K.I., Gavdush A.A., Lebedev S.P., Yurchenko S.O. Novel algorithm for sample material parameter determination using THz time-domain spectrometer signal processing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 486: 012018. DOI:10.1088/1742-6596/486/1/012018
- [30] Zaytsev K.I., Karasik V.E., Fokina I.N., Alekhovich V.I. Invariant embedding technique for medium permittivity profile reconstruction using terahertz time-domain spectroscopy. *Optical Engineering*, 2013, vol. 52, no. 6: 068203. DOI:10.1117/1.OE.52.6.068203
- [31] Alekhovich V.I., Zaytsev K.I., Karasik V.E. Medium dielectric permittivity profile reconstruction using terahertz time-domain spectroscopy. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2013, no. 2, pp. 50–66 (in Russ.).
- [32] Zaytsev K.I., Chernomyrdin N.V., Alekhovich V.I. Novel technique for medium permittivity profile reconstruction using THz pulsed spectroscopy. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 486: 012010. DOI:10.1088/1742-6596/486/1/012010
- [33] Grischkowsky D., Keiding S., Vanexter M. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1990, vol. 7, no. 10, pp. 2006–2015. DOI:10.1364/JOSAB.7.002006
- [34] Duvillaret L., Garet F., Coutaz J.-L. Highly precise determination of Optical Constants and sample thickness in Terahertz Time-Domain Spectroscopy. *Appl. Opt.*, 1999, vol. 38, no. 2, pp. 409–415.
- [35] Dorney T., Baraniuk R., Mittleman D. Material parameter estimation with Terahertz Time-Domain Spectroscopy. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2001, vol. 18, no. 7, pp. 1562–1571. DOI: 10.1364/JOSAA.18.001562
- [36] Pupeza I., Wilk R., Koch M. Highly accurate optical material parameter determination with THz time-domain spectroscopy. *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 7, pp. 4335–4350. DOI:10.1364/OE.15.004335
- [37] Wilmink J., Ibey B., Tongue T., Schulkin B., Laman N., Peralta X., Roth C., Cerna C., Rivest B., Grundt J., Roach W. Development of a compact terahertz time-domain spectrometer for the measurement of the optical properties of biological tissues. *Journal of Biomedical Optics*, 2011, vol. 16, no. 4: 047006
- [38] Redo-Sanchez A., Salvatella G., Galceran R., Roldos E., Garcia-Reguero J.-A., Castellari M., Tejada J. Assessment of terahertz spectroscopy to detect antibiotic residues in food and feed matrices. *Analyst*, 2011, vol. 136, no. 8, pp. 1733–1738. DOI:10.1039/c0an01016b
- [39] Kochikov I.V., Morozov A.N., Fufurin I.L. Numerical procedures for substances identification and concentration calculation in the open atmosphere by processing a single fir measurement. *Computer Optics*, 2012, vol. 36, no. 4, pp. 554–561.



- [40] Harris F.J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 1978, vol. 66, no. 1, pp. 51–83. DOI:10.1109/PROC.1978.10837
- [41] Kozlov G.V., Volkov A.A. Coherent source submillimeter wave spectroscopy. *Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids. Topics in Applied Physics*, 1998, no. 74, pp. 51–109. DOI:10.1007/BFb0103420
- [42] Gorshunov B., Volkov A., Spektor I., Prokhorov A., Mukhin A., Dressel M., Uchida S., Loidl A. Terahertz BWO-spectroscopy. *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, vol. 26, no. 9, pp. 1217–1240. DOI: 10.1007/s10762-005-7600-y

Статья поступила в редакцию 23.10.2013

Кирилл Игоревич Зайцев — младший научный сотрудник НОЦ “Фотоника и ИК-техника” при МГТУ им. Н.Э. Баумана, аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 20 научных работ в области терагерцовых технологий, терагерцовой импульсной спектроскопии, биомедицинских приложений терагерцовой техники, некорректных обратных задач оптики, вычислительной электродинамики, фотонных кристаллов, локализованных нелинейных оптических эффектов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

K.I. Zaytsev — junior researcher of Research and Educational Centre “Photonics and IR Technology” at the Bauman Moscow State Technical University, postgraduate student of “Laser and Optical-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 20 publications in the field of terahertz technologies, terahertz pulsed spectroscopy, biomedical applications of terahertz technology, ill-posed inverse problems of optics, computational electrodynamics, photonic crystals, localized nonlinear optical effects.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Арсений Алексеевич Гавдуш — инженер НОЦ “Фотоника и ИК-техника” при МГТУ им. Н.Э. Баумана, студент четвертого курса кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор пяти научных работ в области терагерцовых технологий, терагерцовой импульсной спектроскопии, физики конденсированного состояния, обратных задач оптики.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

A.A. Gavgush — engineer of Research and Educational Centre “Photonics and IR Technology” at the Bauman Moscow State Technical University, 4-year student of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of five publications in the field of terahertz technologies, terahertz pulsed spectroscopy, condensed matter physics, inverse problems of optics.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Валерий Ефимович Карасик — д-р техн. наук, профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы”; директор НОЦ “Фотоника и ИК-техника” при МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 190 научных работ в области лазерных систем видения, терагерцовых изображающих систем.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.E. Karasik — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Laser and Optical-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University, director of Research and Educational Centre “Photonics and IR technology” at the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 190 publications in the field of laser systems of vision, terahertz imaging systems.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Станислав Олегович Юрченко — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана; доцент кафедры “Ракетно-космические композиционные конструкции” МГТУ им. Н.Э. Баумана; заведующий лабораторией “Терагерцовая оптотехника” НОЦ “Фотоника и ИК-техника” при МГТУ им. Н.Э. Баумана; председатель Совета молодых ученых и специалистов МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области теоретической физики, физики конденсированного состояния, физики неравновесных и нелинейных систем.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

S.O. Yurchenko — Cand. Sci. (Phys.-Math.), assoc. professor of “Physics” department, assoc. professor of “Rocket-and-Space Composite Structures” department of the Bauman Moscow State Technical University, head of “Terahertz Opto-Technology” laboratory of Research and Educational Centre “Photonics and IR Technology” at the Bauman Moscow State Technical University. Chairman of the Council of Young Scientists and Specialists at the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 30 publications in the field of theoretical physics, condensed matter physics, physics of non-equilibrium and nonlinear systems.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.