

УДК 535.36

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО МНОГОЧАСТОТНОГО ИСТОЧНИКА
ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕЩЕСТВ
ПО СПЕКТРАЛЬНО-АМПЛИТУДНОМУ АНАЛИЗУ
РАССЕЯННОГО ПОЛЯ**

В. Н. Аксенов¹, А. А. Ангелуц^{1}, А. В. Балакин^{1,2}, Е. М. Максимов³,
И. А. Ожередов¹, А. П. Шкуринов^{1,2}*

¹ Физический факультет и Международный лазерный центр МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва;

² Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН —
филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, г. Шатура;

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

Показана возможность применения многочастотного терагерцового источника для идентификации веществ по анализу относительных амплитуд рассеянного объектом терагерцового излучения. Представлены результаты экспериментального исследования рассеяния квазимонохроматического излучения двухчастотного терагерцового квантово-каскадного лазера поверхностью образцов, содержащих включения поглощающих веществ. Показано, что спектральные особенности поглощения этих веществ в терагерцовом диапазоне частот проявляются в вариациях амплитуд волн на частотах 3,0 и 3,7 ТГц, рассеянных исследуемыми образцами.

ВВЕДЕНИЕ

Современные способы и средства дистанционного исследования и идентификации веществ основаны на различных физических методах, часто — на использовании лазерных источников, работающих в разных частотных диапазонах [1, 2]. Одним из перспективных подходов к решению этих задач является анализ спектра терагерцового излучения после его взаимодействия с исследуемым веществом. Перспективность этого подхода обусловлена известными предпосылками, такими как контролируемая прозрачность преград в виде сухих тканей, бумаги, наличие полос в спектрах поглощения многих веществ в диапазоне до 10 ТГц [3–5] и неинвазивный характер воздействия этого излучения на животных и человека [6]. Несмотря на интенсивные исследования в этом направлении, информативность данного метода в полной мере до сих пор не определена, что во многом связано как с недостаточным уровнем элементной и компонентной базы фотоники и оптоэлектроники терагерцового диапазона частот, так и с отсутствием практических подходов к решению задач.

Основным ограничением применения методов терагерцовой спектроскопии при решении задач идентификации является влияние свойств «преградных» материалов на достоверность получаемой спектральной информации об интересующих материалах. При анализе спектральных особенностей вещества на практике необходимо учитывать влияние рассеяния зондирующего излучения на неоднородностях объекта исследования на измеряемые сигналы [7]. Это влияние проявляется в уменьшении уровня принимаемого сигнала и в искажении спектров пропускания и отражения исследуемых веществ, расположенных за «преградами» [8]. Более того, иногда наблюдаемые из-за влияния неоднородности «преградного» материала искажения спектров отражения настолько

* angeluts@physics.msu.ru

велики, что приводят к невозможности идентификации вещества по его спектру [9]. Необходимо отметить, что в том случае, когда исследуемое вещество представляет неоднородную плёнку, нанесённую на поверхность с высоким коэффициентом отражения, например металл, информативность спектрального анализа отражённой компоненты терагерцового сигнала, диффузно рассеянной на неоднородностях нанесённой плёнки, посторонних включениях или неидеальностях поверхности, существенно зависит от угла регистрации. При малых углах регистрации спектр сигнала качественно повторяет спектр поглощения, однако при увеличении угла наблюдения и отстройке от угла зеркального отражения на $30^\circ \div 50^\circ$ регистрируемый сигнал не превышает уровень шума [10].

К сожалению, до сих пор мало изучен более актуальный случай, когда анализируемое вещество нанесено на шероховатую поверхность среды с небольшим коэффициентом отражения, например, на ткань или бумагу. Для таких объектов характерным свойством является высокая дисперсия размеров рассеивающих структур — от единиц до сотен микрометров. Теория, пригодная для практики, для этого случая ещё не развита, но работы в этом направлении уже ведутся. Так, например, в работе [11] методом Монте-Карло было проведено моделирование рассеяния на случайно-неоднородной поверхности и приведены результаты лабораторных экспериментов по регистрации спектров отражённого от поверхности наждачной бумаги терагерцового излучения. Моделирование получило дальнейшее развитие в работе [12], где был проведён численный анализ диффузного отражения в случае рассеяния на группах одинаковых цилиндрических случайным образом распределённых в пространстве частиц.

При создании измерительной системы, основанной на анализе рассеянного сигнала, крайне важным является выбор источника зондирующего терагерцового излучения. Ранние экспериментальные исследования процессов рассеяния в терагерцовом диапазоне частот проводились преимущественно на импульсных широкополосных лазерных системах [12, 13], в которых используется преобразование фемтосекундного лазерного излучения видимого диапазона в терагерцовое излучение. При несомненных достоинствах таких систем они имеют и ряд существенных недостатков, препятствующих их практическому применению, например небольшую спектральную яркость, низкую (не более $1 \div 2$ ТГц) частоту излучения и необходимость применения линии задержки для реализации корреляционной методики сбора информации. Появление в последние годы непрерывных и импульсно-периодических квазимонохроматических источников терагерцового излучения на основе квантово-каскадных лазеров (ККЛ) [14] и современных лазеров с оптической накачкой [15] позволило начать разработку многочастотных диагностических систем, настроенных по частоте на «окна прозрачности» атмосферы в частотном диапазоне до 5 ТГц, что существенно снижает потери излучения при распространении в воздухе.

С точки зрения практического применения несомненный интерес вызывает возможность использования терагерцовых ККЛ для выявления опасных веществ из заранее известного перечня на одежде и/или упаковке. Исходя из вышеприведённых литературных данных, например [9, 10], может создаться впечатление, что наличие поглощающего вещества на сильно неоднородной поверхности обнаружить не удастся, если угол наблюдения превышает 30° , а размеры неоднородностей — нескольких десятков микрометров, т.е. в наиболее часто реализуемой на практике ситуации метод дистанционной диагностики, основанный на регистрации терагерцового излучения, рассеянного на одежде со следами опасных веществ, не даёт информативного результата.

Целью проводимого исследования является поиск подходов к идентификации веществ с помощью анализа рассеянного терагерцового излучения от поверхности образцов, содержащих эти вещества. В данной работе мы решаем задачу экспериментального и численного исследования обратного рассеяния терагерцового излучения образцами с квазипериодической структурой с нанесёнными на их поверхность или внедрёнными в их объём малыми количествами вещества с ха-

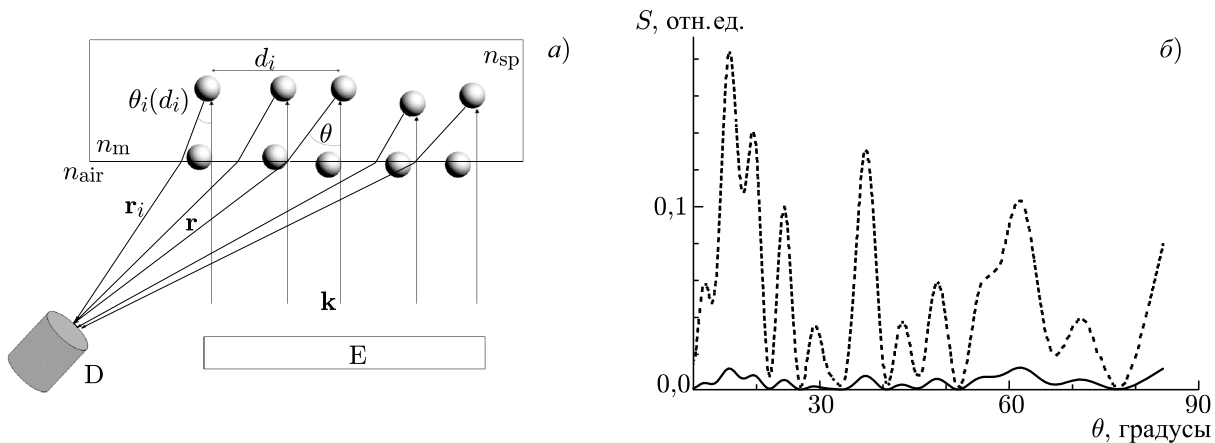


Рис. 1. Модель рассеивающей среды (а) и график угловой зависимости функции рассеяния в случае наличия (показатель преломления $n_{sp} = 1,76 - 0,11i$; пунктирная линия) и отсутствия (сплошная линия) поглощения в материале сфер (б)

ракторными особенностями в спектре поглощения. При проведении экспериментов в качестве источника зондирующего излучения используется двухчастотный ККЛ с частотами 3,0 и 3,7 ТГц. Важность обсуждения данного предмета исследования заключается в необходимости формирования объективных представлений о практических возможностях применения вновь развиваемых диагностических методик.

1. РАССЕЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДОЙ

Для описания рассеяния терагерцового излучения воспользуемся моделью Ми для почти равномерно распределённых в вакууме диэлектрических сфер (см. рис. 1), что позволит дать качественное описание картины рассеяния. Мы предполагаем, что для интерпретации результатов данной работы количественное согласие с моделью не требуется. Воспользуемся результатами, приведёнными, например, в книге [16]. В общем виде решение находится разложением электромагнитного поля по сферическим гармоникам. Падающая на объект исследования электромагнитная волна поляризует частицу, и её переменный электрический дипольный момент пропорционален напряжённости электрического поля падающего излучения. Изменение дипольного момента на частоте внешней волны приводит к излучению света с частотой падающего излучения и характерной для диполя диаграммой направленности. Если характерный размер частиц близок к длине волны света, необходимо учесть интерференцию волн, излучаемых различными участками поверхности частицы.

Основным параметром модели является безразмерный радиус сфер — величина $x = |\mathbf{k}|a$, где $\mathbf{k}$ — волновой вектор подающего излучения, a — радиус сферы. При малых x говорят о рассеянии Рэлея, в то время как рассеянию Ми соответствует $x > 1$. Одним из результатов моделирования является угловое распределение интенсивности рассеянного излучения в дальней зоне. Это распределение существенно зависит от соотношения комплексных показателей преломления сфер и среды, в которой они находятся.

В сферических координатах (r, θ, ϕ) электрическое поле рассеянного излучения имеет ненулевые компоненты $E_{r\theta}$ и $E_{r\phi}$. Воспользуемся введёнными в [16] функциями рассеяния S_1 и S_2 , описывающими рассеянное электрическое поле $\mathbf{E}_r$ в дальней зоне:

$$E_{r\theta} = -\frac{\exp(ikr)}{ikr} \cos(\phi) S_2(x, m, \cos \theta), \quad E_{r\phi} = \frac{\exp(ikr)}{ikr} \sin(\phi) S_1(x, m, \cos \theta), \quad (1)$$

где напряжённость электрического поля падающей волны принята равной 1; $E_{r\theta}$ — компонента рассеянного электрического поля, которая лежит в плоскости рассеяния, образованной волновым вектором падающего излучения $\mathbf{k}$ и направлением регистрации, $E_{r\phi}$ — компонента, ортогональная плоскости рассеяния, $r = |\mathbf{r}|$ — модуль радиус-вектора от рассеивающей точки до точки регистрации, ϕ — угол между вектором электрического поля падающей волны и плоскостью рассеяния, θ — угол между векторами $\mathbf{k}$ и $\mathbf{r}$, m — отношение показателей преломления сфер и среды, окружающей их. Полученные в результате решения выражаются через функции Бесселя с полуцелым индексом и полиномы Лежандра [16].

В описанном ниже эксперименте падающее излучение поляризовано перпендикулярно плоскости рассеяния и $\phi = 90^\circ$, т.е. компонента $E_{r\theta} = 0$. Из дальнейшего рассмотрения её можно исключить и сосредоточиться на расчёте только функции рассеяния S_1 . Если при этом происходит только один акт рассеяния, то поляризация рассеянного излучения совпадает с поляризацией падающего. Данный факт следует из теории; кроме того, поляризация детектируемого излучения была нами измерена в эксперименте, описанном ниже.

На рис. 1а схематично показана рассматриваемая модельная среда, представляющая собой набор сфер с одинаковым радиусом из поглощающего вещества, находящихся в однородной среде из прозрачного материала. Будем предполагать, что сферы расположены периодически, но расстояние между ними d случайно варьируется в пределах $\pm 10\%$. Излучение от источника E падает по нормали к поверхности рассеивателя, а излучение, рассеянное под углом θ , регистрируется детектором D . В численных расчётах учитываются вариации угла рассеяния θ_i и оптического пути r_i для разных сфер (i — номер сферы). Здесь под углом θ понимается угол для центральной части рассеивающей области, т.к. его вариации в пределах образца для выбранной геометрии эксперимента невелики.

Алгоритм расчёта функций рассеяния для одной частицы подробно описан в работе [17]. Там же приведены тексты программ, позволяющие вычислить функцию рассеяния $S_1(\cos \theta)$ при задании в качестве исходных данных размера частицы x и относительного показателя преломления m для каждого угла наблюдения θ . При численном моделировании нами были использованы программные модули [17].

В дополнение к алгоритму [17] нами было учтено, что среда состоит из нескольких центров рассеяния, находящихся на расстояниях d_i от центральной части рассеивающего объекта (см. рис. 1). Эти центры находятся в диэлектрической среде с плоской границей среда–воздух, на которой рассеянное излучение преломляется и при некоторых углах испытывает полное внутреннее отражение. Кроме того, учтено, что часть рассеивателей может находиться на поверхности. Таким образом, в точке наблюдения результирующее поле представляет собой сумму полей, излучаемых каждой частицей. Это поле зависит от расстояния до каждого рассеивателя и его окружения:

$$E_{\Sigma}(\theta) = \sum_{i,j} E(\theta_{ij}, r_i, m_j), \quad (2)$$

где $m_1 = n_{sp}/n_m$, $m_2 = n_{sp}/n_{air}$; n_{sp} , n_m и n_{air} — показатели преломления сфер, окружающей их среды и воздуха соответственно. Угол наблюдения θ_{ij} для каждой частицы является функцией нескольких параметров: θ, r_i, m_j, d_i . Индекс $j = 1$ или 2 обозначает рассеяние в объёме или на поверхности соответственно. В приведённом выражении поле $E(\theta_{ij}, r_i, m_j)$ от одного рассеивателя рассчитывается по формуле (1). В результате получается сложная картина распределения интенсивности рассеянного излучения по углам, пример которой можно видеть на рис. 1б.

В программе численного моделирования в качестве входных параметров задаются комплексные показатели преломления, размер рассеивателей, среднее расстояние между ними d . В программе можно менять число рассеивателей, расстояние до точки наблюдения, диапазон изме-

нения величины d и некоторые другие параметры. Результатом работы программы является таблица, показывающая зависимость интенсивности рассеяния в точке наблюдения от угла наблюдения.

На рис. 16 показана рассчитанная угловая зависимость рассеянного излучения и проиллюстрировано влияние поглощения на картину рассеяния. Видно, что в случае отличной от нуля мнимой части показателя преломления величина рассеянного сигнала увеличивается более чем на порядок. При этом картина рассеяния качественно почти не меняется.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ

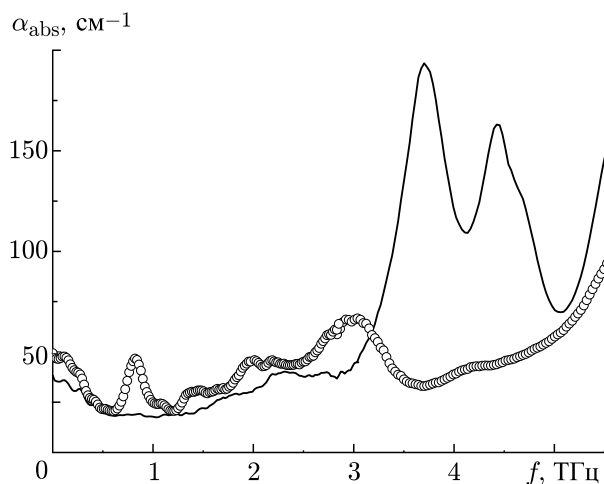
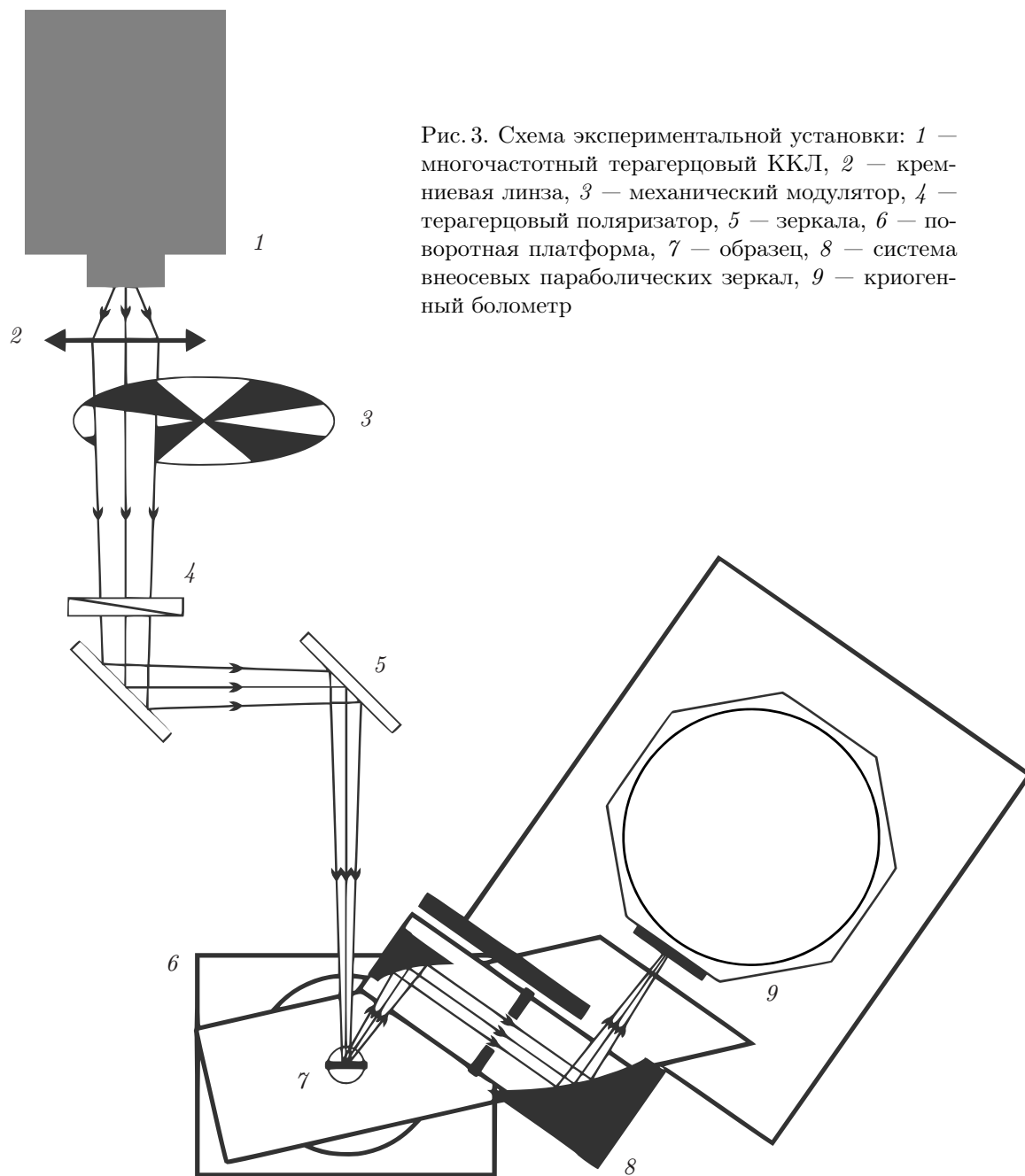


Рис. 2. Спектры поглощения веществ А (сплошная линия) и В (символы $\circ$)

В качестве поглощающих веществ, имеющих индивидуальные спектральные особенности поглощения в терагерцовом диапазоне, были использованы 2,4,6-тринитрометилбензол (далее вещество А) и циклотриметилентринитрамин (далее вещество В). Спектры поглощения этих веществ в терагерцовом диапазоне показаны на рис. 2. Видно, что один из максимумов поглощения вещества А соответствует частоте 3,7 ТГц, тогда как максимум поглощения вещества В — частоте 3,0 ТГц. Также было использовано вещество, содержащее А и В в равных пропорциях (далее вещество АВ).

Экспериментальное исследование рассеяния терагерцового излучения проводилось на объектах двух типов. Первый тип (модельные объекты) — это таблетки разной толщины, представляющие собой смесь 25 % вещества А и 75 % материала полихром-1 — порошка из политетрафторэтилена. Этот порошок состоял из частиц двух фракций. Каждая фракция была представлена частицами размером от 0,25 до 0,5 мм и от 0,5 до 1,0 мм соответственно. Форма таблеток и условия прессования всех образцов были одинаковые и составляли: давление $p = 1500$ атм, время прессования $t = 1$ мин.

Ко второму типу относились приближённые к реальным объекты двух видов: 1) лоскуты ткани с нанесёнными на них веществами А, В и АВ; 2) фрагменты упаковочного картона с нанесёнными на его поверхность теми же веществами. Нанесение веществ проводилось механическим способом путём натирания тканевых или картонных основ брикетами, изготовленными из веществ А, В или АВ. Средняя поверхностная концентрация веществ А, В и АВ не превышала 20 мкг/см^2 . Ткань была изготовлена из хлопчатобумажного волокна и имела выраженную квазипериодическую структуру. Диаметр нитей ткани составлял примерно 300 и 800 мкм, а эти нити, в свою очередь, были сформированы из волокон с диаметром 10 мкм. Картон не имел периодической структуры и представлял собой прессованную смесь волокон с диаметром от 10 до 50 мкм, клея и наполнителя. Существенные отличия в структурах поверхности ткани и картона предполагают и отличия в характере рассеяния на них, что тоже представляет значительный интерес в практических приложениях.



3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. В качестве источника излучения использовался терагерцовый ККЛ на базе двух полупроводниковых элементов производства компании «LongWavePhotonics» (США) излучающих на частотах 3,0 ТГц и 3,7 ТГц соответственно, установленных в вакуумной камере на металлической платформе, охлаждаемой до 46 К. Терагерцовое излучение представляло собой последовательность импульсов с длительностью 1 мкс, следующих с частотой 100 кГц. Средняя мощность излучения составляла 80 и 30 мкВт для частот 3,0 и 3,7 ТГц соответственно.

Пучок терагерцового излучения, выходящего из ККЛ (см. рис. 3), коллимировался с помощью кремниевой линзы 2 с диаметром 35 мм и фокусным расстоянием 50 мм, установленной на 3-координатном линейном трансляторе непосредственно перед выходным окном вакуумной камеры ККЛ. С помощью пары плоских металлических зеркал 5 терагерцовое излучение направлялось на образец 7, установленный перпендикулярно падающему пучку. Размер пучка на образце на уровне половины максимума амплитуды излучения составлял $4,2 \times 3,0$ мм для излучения на частоте 3,0 ТГц и $3,0 \times 2,5$ мм на частоте 3,7 ТГц. Поляризатор 4, установленный перед первым плоским зеркалом, позволял селективировать линейную компоненту поляризации излучения. Плоскость поляризации падающего излучения была выбрана перпендикулярно плоскости рис. 3. Степень поляризации падающего на образец излучения как на частоте 3,0 ТГц, так и на 3,7 ТГц составляла 100:1.

Излучение, рассеянное на образце 7, собиралось с помощью системы 8, которая была установлена на механизированной поворотной платформе 6, позволяющей с высокой точностью устанавливать необходимые углы регистрации в плоскости рис. 3.

Система 8 представляла собой два внеосевых параболических зеркала, ирисовую диафрагму и защитный экран. Оба параболических зеркала имели одинаковые числовые апертуры, но разные фокусные расстояния, $f_1 = 50,8$ мм и $f_2 = 101,6$ мм. Первое зеркало использовалось для коллимирования регистрируемого рассеянного излучения, которое, пройдя через ирисовую диафрагму, с помощью второго параболического зеркала фокусировалось в детектор 9. Диафрагма ограничивала телесный угол, в котором происходил сбор рассеянного излучения, тем самым определяя угловое разрешение системы. В экспериментах был выбран диаметр диафрагмы 10 мм, что обеспечивало угловое разрешение 6° . В системе сбора был дополнительно установлен защитный экран, препятствующий попаданию в детектор терагерцового излучения, которое отражалось при вращении системы сбора от различных её компонентов. В качестве детектора использовался кремниевый криогенный болометрический приёмник, установленный в криостате HDL-5 производства компании «Infrared Laboratories» (США), с входной апертурой 12,5 мм и предусилителем модели LN-6/С. Эквивалентная мощность шума болометра при рабочей температуре 4,2 К составляла $1,2 \cdot 10^{-13}$ Вт/Гц^{1/2}. В состав детектора входил набор спектральных фильтров, позволяющий уменьшить влияние паразитных засветок. Для увеличения отношения сигнал/шум регистрация сигнала детектора осуществлялась синхронным усилителем SR-810 (производитель «Stanford Research System»), для работы которого терагерцовое излучение модулировалось механическим прерывателем 3 с частотой 300 Гц. Постоянная времени выходного фильтра синхронного усилителя была выбрана равной 300 мс. Экспериментальная установка позволяла регистрировать рассеянное излучение в диапазоне углов от 25° до 180° в плоскости рис. 3, при этом при $\theta = 25^\circ \div 90^\circ$ детектировалось терагерцовое излучение, рассеянное «назад», значение $\theta = 90^\circ$ соответствовало положению детектора, совпадающему с плоскостью образца, а $\theta = 180^\circ$ — случаю регистрации прошедшего через образец терагерцового излучения.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ НА МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ

Для обоснования возможности использования модели рассеяния излучения на поверхности неоднородной среды, содержащей поглощающее вещество, были проведены оценки состояния поляризации излучения, рассеянного от образцов для ряда углов наблюдения θ . Для этого в системе сбора рассеянного терагерцового излучения перед диафрагмой приёмной системы был помещён анализатор (на рис. 3 не показан). Вертикально поляризованное излучение на одной из двух частот ККЛ падало по нормали на поверхность образца. Измерялась зависимость мощности те-

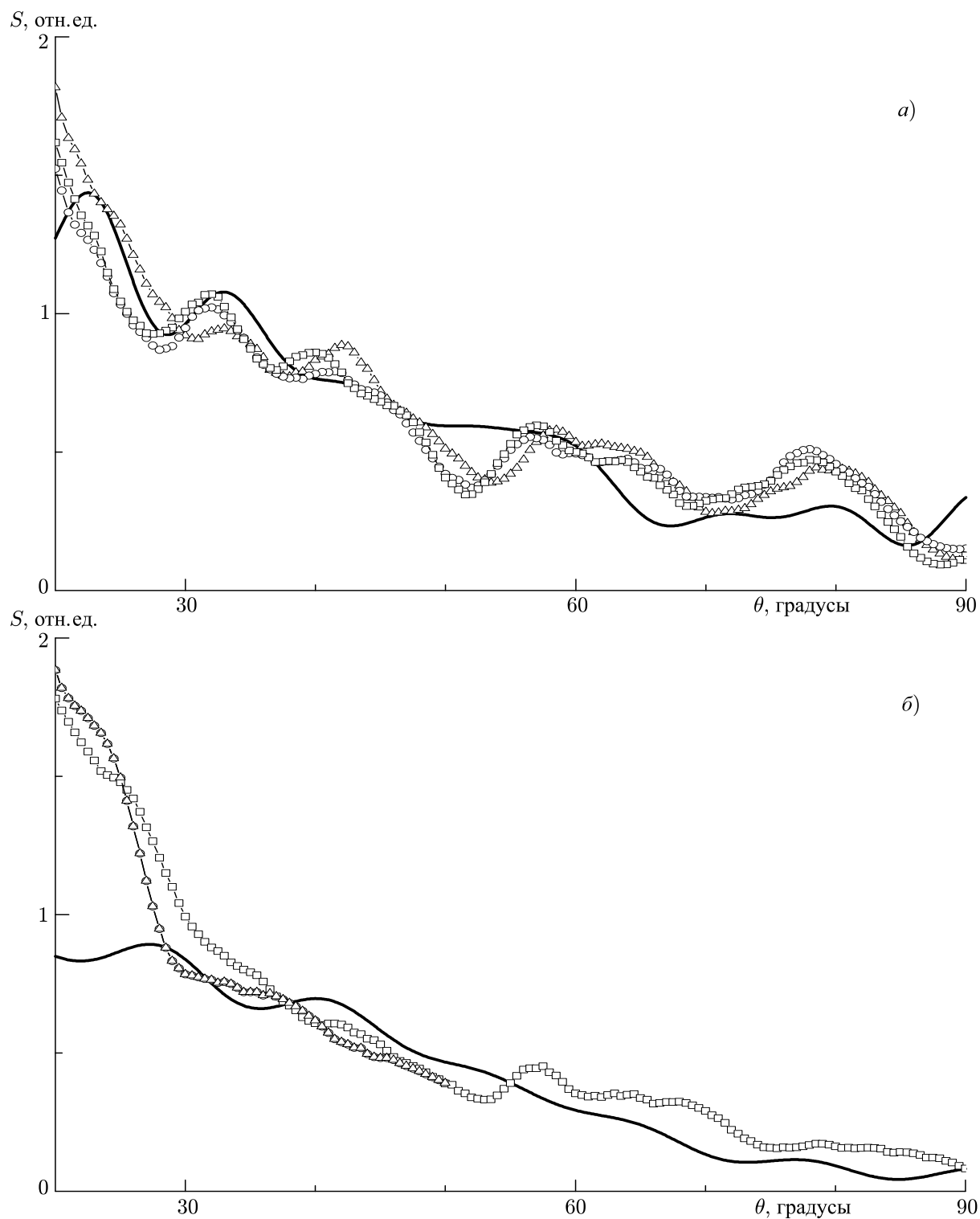


Рис. 4. Графики угловой зависимости эффективности обратного рассеяния терагерцового излучения таблетками на частотах 3,7 ТГц (а) и 3,0 ТГц (б). Различные символы соответствуют различным экспериментальным реализациям, сплошные линии — модели

рагерцового сигнала от угла поворота анализатора, отсчитываемого от оси поляризатора.

Во всех проведённых измерениях экспериментальные значения хорошо описываются законом

Малюса. Поляризация рассеянного излучения линейна, а её плоскость совпадает с плоскостью поляризации падающего излучения. Таким образом, наблюдаемое рассеяние связано только с наличием рассеивателей на поверхности образца, и вклад в него вторичного рассеяния (перерассеяния) минимален.

Для получения индикатрисы рассеяния регистрировалось угловое распределение в горизонтальной плоскости отражённого сигнала. Измеренная эффективность рассеяния, т. е. отношение мощностей зарегистрированного сигнала обратного рассеяния и падающего излучения, в зависимости от угла регистрации представлена на рис. 4. Принимая во внимание, что диаметр исследуемых таблеток составлял 10 мм, освещаемая пучком терагерцового излучения площадь в зависимости от используемой частоты излучения составляла от $1/5$ до $1/3$ всей площади поверхности образца. Это позволило минимизировать влияние неоднородности распределения порошка вещества А в смеси, из которой была спрессована таблетка.

Графики рассчитанных по предложенной модели рассеяния зависимостей индикатрисы от угла регистрации для терагерцового излучения на двух частотах ККЛ также приведены на рис. 4 сплошными линиями. Исходя из условий эксперимента и характеристик образца, для моделирования были взяты следующие параметры: показатели преломления вещества А составляли $n_{sp} = 1,78 - 0,064i$ (на частоте 3,0 ТГц) и $1,76 - 0,11i$ (на частоте 3,7 ТГц); показатель преломления среды, в которой распределено поглощающее вещество, равен $n_m = 1,43$ (на обеих частотах); размеры поглощающих частиц взяты равными 60 мкм, среднее расстояние между частицами 210 мкм. Последние два параметра были подобраны из соображений максимального соответствия теоретических кривых экспериментальным при частоте зондирующего излучения 3,7 ТГц. Неполное количественное совпадение теории и эксперимента, скорее всего, связано с более сложной структурой образцов, отличающейся от выбранной модели большей вариацией размеров рассеивателей и расстояний между ними.

В угловой зависимости рассеянного терагерцового излучения (см. рис. 4) присутствует набор максимумов. Их число и амплитуды однозначно связаны с параметрами рассеивающей среды. Численный эксперимент показывает, что число этих максимумов растёт с увеличением размеров частиц, начиная с радиуса 60 мкм. До этого размера распределение интенсивности рассеяния относительно гладкое. Несовпадение угловых зависимостей на разных частотах (сплошные кривые на рис. 4) обусловлено различием параметра x для этих частот.

Сравнение графиков на рис. 4а и б демонстрирует влияние величины поглощения среды на амплитуду рассеянного сигнала. Вследствие того, что поглощение вещества А на частоте 3 ТГц в два раза меньше, уровни рассеянного сигнала на частотах 3,0 и 3,7 ТГц заметно отличаются.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ НА ОБРАЗЦАХ ТКАНИ И КАРТОНА

Как уже отмечалось, наибольший интерес с точки зрения практических приложений представляет случай рассеяния терагерцового излучения на объектах, структура и состав которых максимально приближены к реальным. Для обоснования выбора рабочего угла наблюдения было проведено исследование индикатрисы для терагерцового излучения, рассеянного реальными объектами, в качестве которых были взяты описанные выше лоскуты хлопчатобумажной ткани и фрагменты упаковочного картона. Для этого приёмная часть установки (см. рис. 3) поворачивалась вокруг вертикальной оси, лежащей на поверхности объекта, и для каждого угла регистрировался рассеянный объектом сигнал. Ирисовая диафрагма (см. рис. 3) была максимально открыта, чтобы повысить светосбор.

График угловой зависимости экспериментально измеренной индикатрисы рассеяния изображён на рис. 5 (мощность рассеянного сигнала, регистрируемого болометром, нормирована на мощность излучения, падающего на образец). Приведённые данные показывают, что в диапазоне углов от 40° до 70° величина рассеянного сигнала примерно постоянна и зеркальная компонента отражённого излучения не вносит заметного вклада в регистрируемый сигнал.

Проведённый в статье [12] численный эксперимент показал, что наличие в объекте исследования структурных элементов с размерами больше или порядка длины волны приводит к появлению в индикатрисе рассеяния особенностей вблизи направлений, близких к нормали, что связано с дифракцией на периодической структуре объекта. При углах $\theta > 10^\circ \div 15^\circ$ вклад дифрагировавшего сигнала в индикатрису можно считать минимальным. Для случая рэлеевского рассеяния можно воспользоваться моделью вторичного дипольного источника, изложенной в работе [18].

Телесный угол при вершине конуса, совпадающей с рассеивателем, с углом раствора α , опирающегося на первое внеосевое параболическое зеркало системы регистрации, равен $\Omega = 2\pi [1 - \cos(\alpha/2)]$. В нашем случае $\alpha = 28^\circ$. При углах наблюдения $\theta > \theta_c = 90^\circ - \alpha/2$ эффективный телесный угол, в котором собирается рассеянное излучение, начинает уменьшаться. Можно переписать изменение телесного угла в изменение площади апертуры S . Тогда величина эффективности светового сбора запишется как $I_s S(\theta)$. Подставим сюда значения необходимых параметров, найдём её численные значения. В расчётах учитывалось только обратное рассеяние и не принималась во внимание угловая зависимость величины I_s . На рис. 5 точками показана расчётная угловая зависимость величины эффективности светового сбора. Для удобства сопоставления с экспериментальными данными эта величина нормировалась на максимальное значение и умножалась на R при $\theta = 76^\circ$. Уменьшение рассеянного сигнала на рис. 5 при углах $\theta > 76^\circ$ частично объясняется снижением эффективности светового сбора оптической системы. Отличия от картины рассеяния модельными образцами, приведённой выше, вызваны как уменьшением углового разрешения системы, так и существенными отличиями структуры образцов.

В дальнейших исследованиях угол наблюдения θ не менялся и был выбран равным 60° . Для каждого образца ткани и картона проводилось не менее 12 измерений сигнала рассеяния. Перед каждым измерением образец снимался и заново устанавливался в держатель. Проводилась статистическая обработка результатов измерений: вычислялось среднее значение и стандартное отклонение. Статистические погрешности измерений составляли примерно 10 и 20 % для образцов, изготовленных на тканевой и картонной основе соответственно. Большая погрешность измерений во втором случае вызвана большой чувствительностью рассеянного сигнала к вариациям угла падения и наблюдения при многократных установках образца.

Полученные данные представлены в виде гистограмм на рис. 6 и 7. Приведённые на них значения R_{rel} рассеянного сигнала нормированы на величину сигнала от чистой ткани или картона.

Для образцов на тканевой основе рассеяние на образце А на частоте 3,0 ТГц в полтора раза интенсивнее рассеяния на чистой ткани (см. рис. 6) и ещё сильнее отличается от рассеяния других образцов. Для образцов В и АВ зарегистрировано меньшее по сравнению с чистой тка-

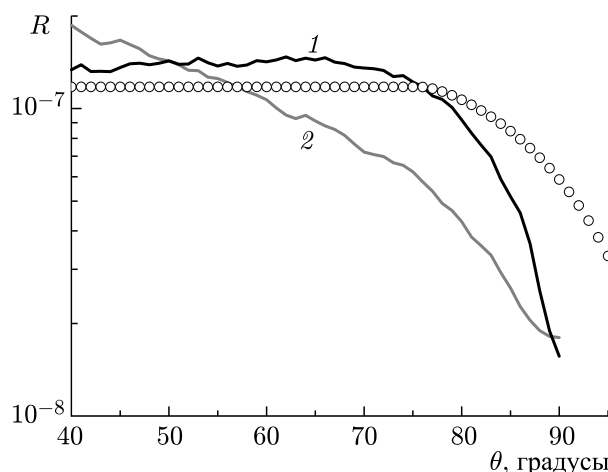


Рис. 5. Графики угловой зависимости рассеяния терагерцового излучения тканью (линия 1), картоном (2) и величины светосбора внеосевого параболического зеркала системы регистрации (символы o)

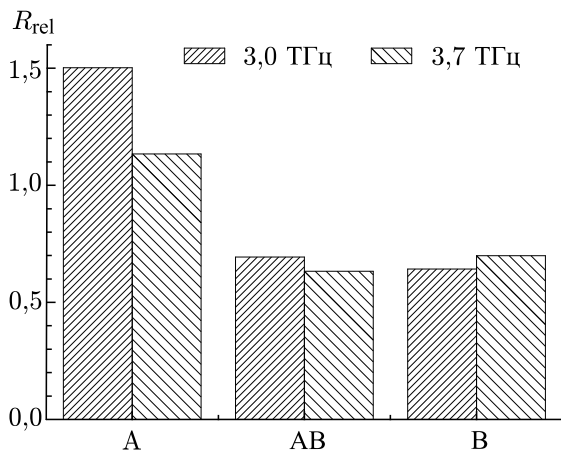


Рис. 6. Относительная величина рассеянного терагерцового сигнала для образцов на тканевой основе

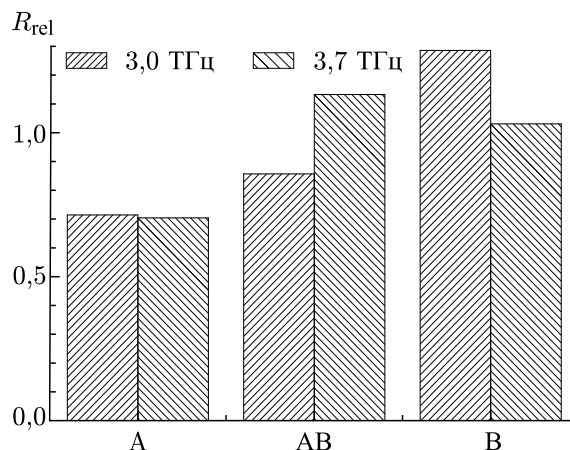


Рис. 7. Относительная величина рассеянного терагерцового сигнала для образцов на картонной основе

нию рассеяние, при этом его частотная зависимость для этих образцов выражена слабее. Можно ожидать, что ввиду идентичности тканевой основы диаграммы направленности рассеянного излучения у всех образцов должны быть похожи, в то время как различия амплитуд сигналов для разных образцов можно связать лишь с нанесёнными на них веществами.

Результаты, полученные для образцов на картонной основе (см. рис. 7), отличаются тем, что величина R_{rel} для образца А меньше аналогичной величины для чистого картона и не имеет заметной спектральной зависимости. Для остальных образцов (В и АВ) можно утверждать, что в выбранных условиях рассеянный на них сигнал в пределах ошибок измерений мало отличается от сигнала, рассеянного на чистой основе. Как и для предыдущей серии, спектральная зависимость рассеяния образцов В и АВ очень слабая. Наблюдаемые на рис. 6 и 7 отличия могут быть связаны с наличием спектральной зависимости эффективности рассеяния для ткани и картона. Кроме того, как показал численный эксперимент, существенное значение имеет соотношение показателей преломления основы (ткани или картона) и «загрязняющего» вещества. При близких значениях их показателей преломления вклад нанесённых веществ в картину рассеяния незначительный. Ввиду сложности среды, а также отсутствия информации об оптических характеристиках основы (ткани и картона) численное моделирование для этой серии экспериментов не проводилось.

Стоит отметить, что при использовании только двух частот зондирования, 3,0 и 3,7 ТГц, о взаимной идентификации веществ А и В на произвольных рассеивающих основах строго говорить нельзя. Это связано с влиянием спектральной неоднородности коэффициента рассеяния той основы, на которую нанесены вещества. Однако можно утверждать, что интенсивности рассеянного излучения от образцов с веществами отличаются от интенсивностей сигналов, рассеянных чистой основой, на величины, превышающие ошибку измерений. Для повышения достоверности выявления веществ необходимо использовать дополнительные частоты ККЛ, например 2,0 ТГц. На этой частоте различие в спектрах поглощения/отражения веществ А и В незначительно, что может быть использовано для нормировки и улучшения сравнительного анализа рассеянного сигнала. Стоит заметить, что увеличение числа частот в ККЛ-источнике практически реализуется путём установки дополнительных излучающих полупроводниковых элементов с необходимыми частотами генерации.

Для надёжной интерпретации результатов измерения в целях идентификации веществ из заранее известного перечня необходимо использовать частоты ККЛ, соответствующие спектраль-

ным «отпечаткам пальцев» вещества. Стоит заметить, что одновременный сравнительный анализ нескольких веществ также возможен при выборе дополнительных частот ККЛ-источника.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально установлено, что поляризация рассеянного назад от образца линейно поляризованного терагерцового излучения сохраняется при всех исследованных углах рассеяния, что является косвенным подтверждением того, что вклад в это излучение многократного рассеяния минимален. Это позволяет использовать для описания экспериментов относительно простую модель рассеяния Ми.

Исследованы индикатрисы обратного рассеяния от таблеток с мелкодисперсной структурой и показано качественное согласие с модельными расчётами для сред с показателями преломления $1,78 - 0,064i$ на частоте 3,0 ТГц и $1,76 - 0,11i$ на частоте 3,7 ТГц. Оценён фактор влияния поглощения рассеивающей среды на интенсивность рассеянного сигнала и его угловое распределение. В угловой зависимости рассеянного терагерцового излучения присутствует набор максимумов. Их число и амплитуды однозначно связаны с параметрами рассеивающей среды: комплексным показателем преломления поглощающих включений, их размером и периодом расположения. Вследствие того, что поглощение вещества А на частоте 3 ТГц в два раза меньше, уровни рассеянного сигнала на частотах 3,0 и 3,7 ТГц заметно отличаются.

Экспериментально исследованы индикатрисы обратного рассеяния на образцах ткани и картона. Определено, что оптимальные для идентификации веществ углы наблюдения находятся в диапазоне $30^\circ \div 70^\circ$. При фиксированном угле наблюдения 60° статистическая погрешность измерения для разных образцов ткани и картона не превышает 10 и 20 % соответственно. При этом имеются статистически подтверждаемые различия в характере обратного рассеяния для «загрязнённых» и «чистых» образцов.

Проведены исследования рассеяния монохроматического терагерцового излучения поверхностями модельных неоднородных сред, содержащими поглощающее вещество. Показана потенциальная применимость данного метода для создания практических терагерцовых систем дистанционного зондирования и идентификации. Доказана перспективность применения многочастотных ККЛ-источников излучения для этих целей.

Показано, что чувствительность к загрязнителям поверхности сохраняется для различных длин волн независимо от типа рассеивающей поверхности. Однако информативность и достоверность определения вещества существенно зависит от типа поверхности и условий эксперимента, к которым относится выбор углов облучения и регистрации, длин волн зондирования, и, возможно, других условий. Для существенного увеличения информативности диагностики и удобства оптимизации может быть рекомендован метод «цветного» терагерцового зрения, который был предложен нами ранее [19]. Результаты данной работы могут быть использованы для создания методики идентификации веществ по анализу рассеянного от них терагерцового излучения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-29-09593 и 15-29-03900). Авторы благодарны Е. А. Аксенову за плодотворное обсуждение результатов работы и предоставление образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скворцов Л. А. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. С. 1.
2. Wallin S., Pettersson A., Östmark H., et al. // Anal. Bioanal. Chem. 2009. V. 395. P. 259.

3. Davies A. G., Burnett A. D., Fan W., et. al. // *Materials Today*. 2008. V. 11. P. 18.
4. Чжан С. Ч., Шю Д. Терагерцовая фотоника. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2016. 348 с.
5. Bernier M., Garet F., Coutaz J. L., et. al. // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2016. V. 6. P. 442.
6. Ангелуц А. А., Гапеев А. Б., Есаулюков М. Н. и др. // *Квантовая электроника*. 2014. Т. 44. С. 247.
7. Palka N. // *Acta Phys. Pol. A*. 2012. V. 122. P. 854.
8. Dikmelik Y., Spicer J. B., Fitch M. J., et al. // *Opt. Lett.* 2006. V. 31, No. 24. P. 3653.
9. Ortolani M., Lee J. S., Schade U., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 93. Art. no. 081906.
10. Suter J. D., Bernacki B., Phillips M. C. // *Appl. Phys. B*. 2012. V. 108. P. 965.
11. Schecklman S., Zurk L. M., Henry S. C., et al. // *J. Appl. Phys.* 2011. V. 109, No. 9. Art. no. 094902.
12. Dolganova I. N., Yurchenko S. O., Karasik V. E., et al. // *Intern. J. High Speed Electronics and Systems*. 2015. V. 24. Art.no. 1520002.
13. Zurk L. M., Orlowski B., Winebrenner D. P., et al. // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2007. V. 24. P. 2238.
14. Scalari G., Walther C., Fischer M., et al. // *Laser Photonics Rev.* 2009. V. 3. P. 45.
15. Pagies A., Ducournau G., Lampin J.-F. // *APL Photonics*. 2016. V. 1. Art. no. 031302.
16. Bohren C. F., Huffman D. R. *Absorption and scattering of light by small particles*. New York: Wiley, 1998. 544 p.
17. Mätzler C. *MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption*. Institut für Angewandte Physik. Res. Report No. 2002-08. Bern: Schweiz, 2002. 19 p.
18. Аналитическая лазерная спектроскопия / под ред. Н. Оменетто. М.: Мир, 1982. 606 с.
19. Ангелуц А. А., Балакин А. В., Евдокимов М. Г. и др. // *Квантовая электроника*. 2014. Т. 44. С. 614.

Поступила в редакцию 18 октября 2017 г.; принята в печать 15 ноября 2017 г.

APPLICATION OF A TERAHERTZ MULTI-FREQUENCY RADIATION SOURCE BASED ON QUANTUM-CASCADE LASERS FOR IDENTIFICATION OF SUBSTANCES BASING ON THE AMPLITUDE-SPECTRAL ANALYSIS OF THE SCATTERED FIELD

V. N. Aksenov, A. A. Angeluts, A. V. Balakin, E. M. Maksimov, I. A. Ozheredov, and A. P. Shkurinov

We demonstrate the possibility of using a multi-frequency terahertz source to identify substances basing on the analysis of relative amplitudes of the terahertz waves scattered at the object. The results of studying experimentally the scattering of quasi-monochromatic radiation generated by a two-frequency terahertz quantum-cascade laser at the surface of samples containing inclusions of absorbing substances are presented. It is shown that the spectral features of absorption of these substances within the terahertz frequency range manifest themselves in variations of the amplitudes of the waves at frequencies of 3.0 and 3.7 THz, which are scattered at the samples under consideration.