УДК 621.385.6

# РЕГИСТРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ С МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

В. Г. Андреев<sup>1</sup>, В. А. Вдовин<sup>2</sup>, Ю. К. Калынов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова;
<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва;
<sup>3</sup> Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

В работе иследовалась возможность применения термоакустического детектора для регистрации мощного импульсного излучения на частотах 0,55; 0,68 и 0,87 ТГц. Преобразование электромагнитной волны в акустическую происходит в структуре, состоящей из плёнки хрома с толщиной 10 нм, нанесённой на кварцевую подложку, и слоя иммерсионной жидкости, находящейся в контакте с плёнкой. Показано, что при микросекундной (3÷10 мкс) длительности импульса форма сигнала, регистрируемая термоакустическим детектором, с хорошей точностью соответствует производной от профиля принимаемого импульса. Для регистрации электромагнитного излучения в диапазоне 0,5÷0,9 ТГц можно использовать упрощённую конструкцию термоакустического детектора, в которой прозрачная кварцевая подложка находится в контакте со слоем воды или этанола.

## введение

Освоение мощными электровакуумными приборами терагерцового диапазона 0,3÷10 ТГц стимулирует поиск эффективных способов регистрации мощного электромагнитного излучения в этой спектральной области. Для регистрации излучения в терагерцовом диапазоне используются как типичные радиотехнические приёмники излучения (а именно диоды на основе контакта металл—полупроводник с барьером Шоттки), так и устройства, применяемые в оптике (термоэлементы, пироэлектрические приёмники, болометры и оптико-акустические приёмники). Основная задача регистратора или детектора импульсного терагерцового излучения состоит в его преобразовании в низкочастотный электрический отклик. Регистратор должен быть широкополосным, иметь достаточное быстродействие для отображения формы терагерцового импульса, высокую чувствительность, устойчивость к перегрузкам и быть простым и удобным в использовании.

В настоящее время в терагерцовом диапазоне в силу своей простоты наиболее широко применяются выпрямляющие детекторы с точечным прижимным контактом [1] и планарные диоды с барьером Шоттки [2, 3]. Чрезвычайно малая инерционность, сравнительно высокая чувствительность, небольшие габариты и работоспособность при обычных температурах способствуют широкому использованию таких диодов для регистрации излучения, по крайней мере, до частоты 2 ТГц. Однако диоды не способны выдерживать мощность более 50÷100 мВт, что вызывает неудобство при регистрации мощного излучения.

Регистраторы, пришедшие из инфракрасного диапазона, по принципу действия являются тепловыми детекторами. К их преимуществам относятся широкополосность и высокая чувствительность, но, как правило, они находят применение в измерительных приёмниках, где не требуется высокое быстродействие. Современные болометры [4] имеют сравнительно небольшую инерционность порядка 1 мкс, но являются дорогими и громоздкими приборами.

Термоакустический детектор [5] использует эффект возбуждения акустического импульса при локальном нагреве жидкости, поглощающей энергию электромагнитного излучения, и свободен

В. Г. Андреев, В. А. Вдовин, Ю. К. Калынов

628

от этих недостатков. Такой детектор успешно применялся для регистрации сверхвысокочастотных (СВЧ) импульсов с длительностями от 2 до 120 нс на частотах 1÷30 ГГц [6]. При длительности импульса 120 нс форма сигнала, регистрируемая термоакустическим детектором, полностью соответствовала форме сигнала с контрольного детектора СВЧ импульсов. Отклик термоакустического детектора на более короткие импульсы с длительностями 2 и 5 нс представлял собой импульс с длительностью 18 нс, что обусловлено ограниченной частотной полосой акустического приёмника.

Данная работа посвящена исследованию термоакустического детектора как регистратора импульсов терагерцового излучения с микросекундной длительностью.

# 1. ПРИНЦИП РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИЯ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА

Отличительной особенностью детектора, исследуемого в данной работе, является применение в нём поглотителя в виде структуры, состоящей из металлической плёнки с нанометровой толщиной, нанесённой на кварцевую подложку, и слоя иммерсионной жидкости, находящегося в контакте с плёнкой (рис. 1). Выбор металлических плёнок с толщиной порядка нескольких нанометров обусловлен их способностью эффективно поглощать энергию электромагнитного излучения в широком диапазоне частот [7, 8]. В частности, для алюминиевой плёнки, напылённой на кварцевую подложку, максимум коэффициента поглощения составляет 60 % и наблюдается при толщине плёнки от 2 до 3 нм [8] на частотах 3÷30 ГГц. Эффект аномально высокого поглощения в плёнках с нанометровой толщиной позволил применить его для создания термоакустического детектора импульсов с наносекундной длительностью в СВЧ диапазоне. Генерация акустического



Рис. 1. Схема термоакустического детектора: 1 — кварцевая пластина, 2 — металлическая плёнка, 3 — слой иммерсионной жидкости, 4 — пьезоплёнка из поливинилиденфторида (ПВДФ), 5 — широкополосный усилитель, 6 — цилиндрический корпус

импульса в системе кварц—металлическая плёнка—иммерсионная жидкость происходит в два этапа [9]. На первом этапе энергия СВЧ волны поглощается в тонкой плёнке, что и сопровождается выделением тепла. Затем тепло практически мгновенно диффундирует в жидкость, тепловое расширение которой и формирует акустический сигнал.

Для того, чтобы акустический сигнал повторял форму электромагнитного импульса, необходимо выполнение условия

$$l_{\rm abs}/v_{\rm s} \ll \tau,$$
 (1)

где  $\tau$  — длительность электромагнитного импульса,  $v_{\rm s}$  — скорость звука,  $l_{\rm abs}$  — размер области тепловыделения. Физически это означает, что размер области тепловыделения должен быть настолько маленьким, чтобы механическое напряжение, возникающее вследствие нагрева, успевало релаксировать за время, значительно меньшее, чем длительность импульса. При использовании слоистой структуры поглощение электромагнитной энергии происходит в тонкой плёнке, что приводит к её нагреву. Тепловая энергия, выделяющаяся в плёнке, диффундирует в жидкость и

кварцевую подложку на глубину  $l_{\rm abs} = 2\sqrt{\chi_i \tau}$ , где  $\chi_i$  — коэффициент теплопроводности жидкости или кварца. Тогда неравенство (1) можно записать в виде

$$4\chi_i/v_{\rm s}^2 \ll \tau. \tag{2}$$

Для воды из формулы (2) следует оценка минимальной длительности импульса в 3 пс. Тепловые потоки в кварц и в жидкость примерно одинаковы, однако основной вклад в генерацию акустического сигнала даёт именно жидкость. Это связано с тем, что величина  $\beta v_s^2/C_p$  ( $\beta$  — коэффициент теплового расширения,  $C_p$  — удельная теплоёмкость), определяющая эффективность термоакустического преобразования, для воды в 4 раза больше, чем для кварца. Кроме того, температура в воде повышается больше, чем в кварце, поскольку глубина прогретой области  $l_{\rm abs}$  в воде меньше почти в 2 раза вследствие её меньшей теплопроводности.

Расчётный рабочий диапазон частот термоакустического датчика лежит в пределах от 3 ГГц до 3 ТГц и определяется конструкцией входной слоистой структуры и свойствами поглощающего материала [5]. Нижняя граница 3 ГГц достаточно условна и зависит от диаметра входного окна датчика и плотности СВЧ энергии на поверхности поглощающей плёнки. Верхняя граница 3 ТГц определяется условием

$$\delta \gg l_0,\tag{3}$$

где  $\delta$  — толщина скин-слоя материала поглотителя,  $l_0$  — средняя длина свободного пробега электронов проводимости в металле при комнатной температуре.

В алюминии, используемом в работе [5], длина свободного пробега электронов при комнатной температуре составляет 16 нм. Толщина скин-слоя на частоте f может быть вычислена по известной формуле  $\delta = (\pi f \mu \mu_0 \sigma)^{-1/2}$ , где  $\sigma$  — проводимость металла,  $\mu$  — магнитная проницаемость,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м. На частоте 3 ТГц толщина скин-слоя в алюминии составляет около 50 нм, что лишь в 3 раза превышает длину свободного пробега электрона. Поэтому, чтобы уменьшить  $l_0$ , вместо алюминиевой плёнки нами использовались плёнки хрома. Для хрома длина свободного пробега электронов  $l_0 \approx 0,8$  нм, а толщина скин-слоя на частоте 3 ТГц есть  $\delta \approx 120$  нм. Таким образом, неравенство (3) для плёнок из хрома заведомо выполняется.

Измерения свойств тонких плёнок хрома, проведённые на частоте 38 ГГц, показали, что плёнка имеет коэффициент поглощения 50÷60 % при её толщине 5÷20 нм [10]. Предварительные измерения в диапазоне 0,5÷2 ТГц свидетельствуют об аналогичных зависимостях оптических коэффициентов от толщины плёнок хрома, напылённых на кварцевые подложки. Таким образом, теоретические оценки и результаты измерений показывают, что термоакустический детектор может применяться для регистрации электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне частот.

### 2. СХЕМА И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве источника терагерцового излучения использовался гиротрон с большой орбитой [11], работающий на 2-й и 3-й циклотронных гармониках (рис. 2*a*). Гиротрон генерирует импульсы излучения с длительностью 8 мкс с частотой повторения 0,1 Гц в диапазоне 0,55÷1,0 ТГц на четырёх дискретных частотах: 0,55 и 0,68 ТГц при работе на 2-й циклотронной гармонике и 0,87 и 1,0 ТГц при работе на 3-й циклотронной гармонике. Настройка на каждую из частот осуществляется изменением индукции магнитного поля в резонаторе гиротрона. Средняя по импульсам пиковая мощность выходного излучения на указанных частотах составляет 1,0; 1,8; 0,3 и 0,4 кВт соответственно. Гиротрон оснащён встроенным квазиоптическим преобразователем, позволяющем выводить его излучение в виде волнового пучка. Последний преобразуется встроенной системой фокусировки и может дополнительно сжиматься внешней фокусирующей системой. Термоакустический детектор располагался в фокусе соответствующих систем фокусировки



Рис. 2. Терагерцовый гиротрон с большой орбитой (*a*) и виды сверху экспериментальной установки с дополнительной двухзеркальной фокусирующей системой (*б*) и без дополнительной системы фокусировки (*в*). Здесь 1— гиротрон с большой орбитой, 2— контрольный детектор, 3— ответвитель малой части выходного излучения на контрольный детектор, 4— дополнительная фокусирующая система, 5— термоакустический детектор

выходного излучения гиротрона. В первом случае апертура детектора располагалась в фокусе встроенной фокусирующей системы гиротрона (рис. 26) на расстоянии 160 мм от выходного окна. При этом диаметр области засветки составлял около 20 мм, что соответствовало диаметру апертуры детектора. Во втором случае апертура детектора располагалась в фокусе дополнительной двухзеркальной фокусирующей системы (рис. 26). При этом засвечивалась лишь малая часть апертуры детектора — пятно с диаметром около 2 мм. Область засветки определялась по уровню  $\exp(-1)$  от максимума плотности потока энергии в поперечном сечении пучка. Сигнал сравнения регистрировался контрольным детектором, на который специальным ответвителем отводилась малая часть выходного излучения (рис. 26, 6). В качестве контрольного регистратора использовался быстродействующий планарный детектор с барьером Шоттки, работающий в режиме внешнего смещения [3].

Приёмное окно исследуемого термоакустического детектора (рис. 1) представляло собой кварцевую пластину с диаметром 20 мм и с толщиной 2 мм, покрытую с внутренней стороны плёнкой хрома с толщиной 10 нм. Металлическая плёнка контактировала со слоем жидкости. В плёнке и граничащей с ней жидкости терагерцевое излучение преобразовывалось в акустический импульс, который регистрировался с помощью широкополосного акустического приёмника. Толщина слоя иммерсионной жидкости варьировалась для различных длительностей электромагнитного импульса в интервале 2,5÷10 мм. Слой жидкости обеспечивал временну́ю задержку акустического импульса, что позволяло избежать влияния сильной электромагнитной наводки в момент генера-

ции терагерцового импульса. С другой стороны, изменение толщины слоя жидкости практически не влияло на временной профиль прошедшего через него акустического импульса ввиду малого коэффициента затухания генерируемого в жидкости ультразвука.

Акустический импульс регистрировался пьезоплёнкой из поливинилиденфторида (ПВДФ) с толщиной 28 мкм, приклеенной на поверхность материала с акустическим импедансом, близким к импедансу этой пьезоплёнки. Чувствительность акустического приёмника составляла 5 мкВ/Па в полосе частот порядка 20 МГц и определялась резонансом в толщине ПВДФ-плёнки и её пьезоэлектрическими модулями. Электрический сигнал, снимаемый с пьезопреобразователя, усиливался широкополосным усилителем и подавался на вход цифрового осциллографа. Выходное сопротивление усилителя составляло 50 Ом для согласования с коаксиальным кабелем. Акустический приёмник и усилитель конструктивно находились в металлическом цилиндре с диаметром 60 мм и высотой 100 мм. Конструкция приёмного окна термоакустического детектора позволяла оперативно менять тип и толщину жидкости, а также использовать пластины с плёнками различной толщины.

В процессе измерений изменялся диаметр пучка падающего терагерцового излучения и варьировалась толщина слоя иммерсионной жидкости, в качестве которой использовались дистиллированная вода, этанол, а также, в ряде случаев, перфторметилдекалин. Длительность СВЧ импульса варьировалась от 11,5 мкс до минимальной возможной длительности 3 мкс, определяемой возможностями модулятора импульсов ускоряющего напряжения гиротрона. Основная часть измерений проводилась при полной засветке приёмного окна термоакустического детектора с диаметром 20 мм для уменьшения влияния дифракционной расходимости акустического импульса.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В ходе исследования профили импульсов с длительностями 4,8 и 8 мкс регистрировались термоакустическим детектором с плёнкой хрома с толщиной 10 нм, контактирующей с этанолом, и сравнивались с импульсами, зарегистрированными контрольным детектором (рис. 3*a*). Время распространения акустической волны через слой этанола с толщиной 4 мм составляло 3,3 мкс и обусловливало соответствующую задержку сигнала с термоакустического детектора. Для удобства сравнения импульс с контрольного детектора сдвигался по времени на 3,3 мкс до совпадения его начала с началом импульса с термоакустического детектора.

Профиль импульса с контрольного детектора имеет униполярный вид с плавными фронтами, в то время как импульс с термоакустического детектора имеет биполярный вид. Длительности импульсов с обоих детекторов совпадают, если измерять длительность от начала до максимума положительного пика. Такую особенность импульса с термоакустического детектора можно объяснить дифракционными эффектами. Для импульса с длительностью  $\tau$  характерным пространственным масштабом можно считать длину  $v_{\rm s}\tau$ , где  $v_{\rm s}$  — скорость звука в среде. Дифракционная длина определяется выражением

$$L_{\rm D} = \frac{\pi a^2}{v_{\rm s} \tau} \ll d,\tag{4}$$

где a — радиус засветки поверхности кварцевой пластины, d — толщина слоя иммерсионной жидкости. Для характерных параметров эксперимента:  $v_{\rm s} = 1,2$  мм/мкс для этанола, a = 5 мм,  $\tau = 10$  мкс, — дифракционная длина составляет 6 мм. Толщина слоя жидкости, равная  $2,5\div10$  мм, сравнима с  $L_{\rm D}$ . Поэтому для расчёта точного профиля импульса нужно решать параболическое уравнение дифракции [12, 13]. Для качественных оценок можно предположить, что профиль импульса с термоакустического детектора близок к производной от исходного профиля на входе

В. Г. Андреев, В. А. Вдовин, Ю. К. Калынов

632



Рис. 3. Формы импульсов, зарегистрированные термоакустическим детектором (*a*), и их интегралы (*б*) при использовании в последнем слоя этанола с толщиной 4 мм. Длительность импульсов составляла 4,8 мкс (кривые 1) и 8 мкс (кривые 2) на частоте 0,55 ТГц. Сигналы контрольного детектора отмечены дополнительной буквой «с» к номеру кривой: 1 с и 2с. Левая координатная ось соответствует напряжению на термоакустическом детекторе, правая — на контрольном детекторе

в среду. Поэтому для восстановления исходного профиля импульса сигнал с термоакустического детектора должен быть проинтегрирован по времени. Профили импульсов, полученные в результате такой процедуры, с хорошей точностью соответствуют профилям импульсов с контрольного детектора (рис. 36).

Аналогичные зависимости напряжения на термоакустическом детекторе от времени были получены при использовании воды в качестве иммерсионной жидкости (рис. 4). В этом случае сигнал с контрольного детектора задерживался на 1,7 мкс, т.е. на время распространения звука в слое воды с толщиной 2,5 мм. Амплитуда акустического импульса для воды была в несколько раз меньше, чем для этанола, что объясняется более низкой эффективностью термоакустического преобразования воды.

Вода и этанол, используемые в наших измерениях, достаточно хорошо поглощают электромагнитное излучение терагерцевой области частот. Поэтому термоакустический эффект в таких жидкостях можно использовать для непосредственной регистрации импульсов излучения без применения дополнительного поглотителя в виде тонкой металлической плёнки. Для проверки такого способа регистрации пластинка с плёнкой была заменена кварцевой пластинкой с такой же толщиной но без покрытия. Схема измерения



Рис. 4. Форма импульса, зарегистрированного термоакустическим детектором (кривая 1) и интеграл от него по времени (кривая 2). В термоакустическом детекторе использовался слой воды с толщиной 2,5 мм. Кривая 3 — импульс, зарегистрированный контрольным детектором. Длительность импульса составляла 4 мкс на частоте 0,55 ТГц

же толщиной, но без покрытия. Схема измерений была полностью аналогичной.

Поскольку акустический импеданс пластины значительно выше импеданса жидкости, то создавались условия генерации униполярного акустического импульса [12]. Дифракционные эффекты в слое жидкости приводили к трансформации униполярной формы импульса в биполярную.

633



Рис. 5. Интегралы от импульсов, зарегистрированных термоакустическим детектором при использовании слоя воды (a) и этанола ( $\delta$ ) с одной и той же толщиной 2,5 мм (кривые 1). Длительность импульса излучения составляла 4 мкс (a) и 10 мкс ( $\delta$ ) на частоте 0,68 ТГц. Кривые 2 — импульсы, зарегистрированные контрольным детектором

Формы сигналов с термоакустического детектора в данном эксперименте были получены на частоте излучения 0,68 ТГц при использовании слоёв воды и этанола с толщиной 2,5 мм (рис. 5). Соответствующие задержки, обусловленные временем распространения акустического импульса через слои воды и этанола, составили 1,7 и 2,1 мкс соответственно. Для удобства сравнения импульсы с контрольного детектора сдвинуты на рисунке на соответствующее время задержки.

Форма и длительность импульсов с термоакустического и контрольного детекторов в этом случае практически совпали. Полученный результат хорошо согласуется с нашими оценками. Подставляя коэффициент поглощения излучения на частоте 0,68 ТГц, для воды равный  $\mu_a = 180 \text{ см}^{-1}$  [14], в первый член неравенства (1), получим оценку  $l_{abs}/v_s = 1/(\mu_a v_s) = 3,7$  нс, которая оказывается значительно меньше длительности импульса (равной 10 мкс) и длительности его фронта. Следовательно, терагерцовый импульс может быть зарегистрирован даже в отсутствие плёнки, и его форма будет соответствовать форме акустического импульса. Ситуация с этанолом, где  $\mu_a = 70 \text{ см}^{-1}$  [15], аналогична. Однако в этаноле эффективность генерации выше, чем в воде, поэтому его использование предпочтительнее при регистрации менее мощных импульсов.

Следует отметить, что эффект сильного поглощения излучения на частоте 0,68 ТГц в воде и этаноле может использоваться для измерения полной энергии излучения [16]. В соответствующих экспериментах излучение поглощалось в жидкости, что приводило к её тепловому расширению и подъёму её уровня в тонком капилляре.

Как уже отмечалось, для термоакустической генерации следует использовать жидкости с высоким коэффициентом поглощения излучения. В жидкостях с малым поглощением термоакустический эффект наблюдаться практически не будет. В качестве жидкости с малым поглощением излучения использовался перфторметилдекалин. Электромагнитный импульс на частоте 0,55 ТГц проходил через слой перфторметилдекалина и возбуждал сигнал без какой-либо временной задержки непосредственно в пьезоприёмнике (рис. 6, кривая 2). При введении пластинки с плёнкой хрома генерировался акустический импульс, причём его задержка, равная 6 мкс, соответствовала времени распространения звука через слой перфторметилдекалина с толщиной 4 мм (рис. 6, кривая 1). Интеграл от профиля импульса с термоакустического детектора (кривая 4 на рис. 66) хорошо соответствует виду импульса, зарегистрированного контрольным детектором

В. Г. Андреев, В. А. Вдовин, Ю. К. Калынов

634



Рис. 6. Формы импульсов, зарегистрированные термоакустическим детектором (a) при использовании слоя перфторметилдекалина с толщиной 4 мм. Слой жидкости накрыт пластиной с плёнкой хрома (кривая 1) и прозрачной для излучения пластиной (кривая 2). Панель (6) — импульс, зарегистрированный контрольным детектором (кривая 3), и интеграл от сигнала 1 (кривая 4)

(кривая 3). На рисунке импульс с контрольного детектора сдвинут на 6 мкс для удобства его сравнения с импульсом с термоакустического детектора.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как и ожидалось, эксперименты подтвердили возможность использования термоакустического детектора для регистрации импульсов излучения терагерцового диапазона и показали широкополосность детектора, его достаточное быстродействие и способность работать с мощностями киловаттного уровня. Особенностью регистрации импульсов с микросекундной длительностью является то, что детектируемая форма импульса является производной от исходной формы импульса. Поэтому требуется либо проводить численное интегрирование регистрируемого сигнала, либо использовать интегратор с заданными параметрами. Экспериментально показана возможность упрощения конструкции приёмного окна термоакустического детектора за счёт исключения нанесённой на кварцевую пластину металлической плёнки при использовании воды и этанола в качестве иммерсионной жидкости для регистрации излучения в терагерцовом диапазоне частот.

Авторы благодарны Л. В. Лубяко за внимание к работе и полезные замечания. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12–08–00921).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Стафеев В.И. // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44, вып. 5. С. 577.
- 2. Microwave semiconductor devices and their circuit applications / Ed. by H. A. Watson. New York: McGraw-Hill Book Company, 1969.
- Tretyakov M. Yu., Tretyakova S. E., Fedorenko E. F. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2007. V. 28, No. 10. P. 839.
- 4. Bolometers / Ed. by A. G. Unil Perera. Croatia: InTech, 2012.
- 5. Андреев В. Г., Вдовин В. А. // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 2. С. 81.
- Андреев В. Г., Вдовин В. А., Афанасьев К. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 8. С. 653.

- Bolakis C., Grbovic D., Lavrik N. V., Karunasiri G. // Opt. Express. 2010. V. 18, No. 14. Art. no. 14488.
- Андреев В. Г., Вдовин В. А., Воронов П. С. // Письма в Журн. техн. физ. 2003. Т. 29, вып. 22. С. 68.
- 9. Андреев В. Г., Вдовин В. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 10–11. С. 1006.
- 10. Андреев В. Г., Вдовин В. А., Сотников В. А. // Труды XII Всерос. школы-семинара «Физика и применения микроволн», Звенигород, 2009. Ч. 4. С. 4.
- 11. Братман В. Л., Калынов Ю. К., Мануилов В. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 7. С. 525.
- 12. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
- Andreev V.G., Ponomarev A.E., Karabutov A.A., Oraevsky A.A. // Proc. SPIE. 2002. V. 4619. P. 153.
- 14. Xu J., Plaxco K. W., Allen S. J. // J. Chem. Phys. 2006. V. 124. Art. no. 036101.
- 15. Kitahara H., Yagi T., Mano K., et al. // J. Korean Phys. Soc. 2005. V. 46. P. 82.
- Glyavin M. Yu., Luchinin A. G., Nusinovich G. S., et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. Art. no. 153503.

Поступила в редакцию 26 июня 2013 г.; принята в печать 30 сентября 2013 г.

### RECORDING OF TERAHERTZ PULSES OF MICROSECOND DURATION USING THE THERMOACOUSTIC EFFECT

V. G. Andreev, V. A. Vdovin, and Yu. K. Kalynov

We consider the possibility of using a thermoacoustic detector (TAD) for recording of high-power pulse radiation at frequencies of 0.55, 0.68, and 0.87 THz. Electromagnetic wave is transformed into an acoustic wave in a structure consisting of a 10-nm thick chromium film deposited on a quartz substrate and a layer of the immersion liquid that is in contact with the film. It is shown that for the pulse of microsecond duration  $(3-10 \,\mu\text{s})$  the waveform detected by the thermoacoustic detector is matched with high accuracy to the derivative of the terahertz pulse profile. For recording of electromagnetic radiation in the 0.5–0.9 THz frequency range it is possible to employ the simplified design of TAD, in which a transparent quartz substrate is in contact with a layer of water or ethanol.