

УДК 621.385.6

ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

В. Г. Андреев¹, В. А. Вдовин², Ю. К. Калынов³

¹ Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

² ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

³ Институт Прикладной физики РАН

Получена 11 декабря 2012 г.

Аннотация. Рассматривается конструкция и принцип действия термоакустического детектора для измерения микросекундных импульсов терагерцевого диапазона. Работа детектора основана на эффекте генерации акустических сигналов при поглощении электромагнитных импульсов в слоистой структуре: радиопрозрачная подложка – поглотитель - иммерсионная жидкость. В качестве поглотителя используется пленка хрома нанометровой толщины, напыленная на кварцевую подложку. В пленке и граничащей с ней жидкости происходит преобразование терагерцевого излучения в акустический импульс, который принимается широкополосным акустическим приемником и затем регистрируется цифровым осциллографом. Представлены результаты по регистрации лабораторным макетом термоакустического детектора микросекундных импульсов терагерцевого диапазона, полученных на гиротроне с большой орбитой.

Ключевые слова: термоакустический детектор, терагерцевые микросекундные импульсы, генерация акустического сигнала, тонкие металлические пленки нанометровой толщины, гиротрон.

Abstract. The design and general concept of operation of a thermoacoustic detector for measurements of terahertz microsecond pulses are discussed. Operation of the detector is based on effect of acoustic signal generation when electromagnetic pulses are

absorbed in the layered structure: radiotransparent substrate – absorber – immersion liquid. Thin metallic film of nanometer thickness sputtered onto the quartz substrate is used as an absorber. The transformation of electromagnetic radiation into acoustic pulse is performed in the film and in the liquid contacting with the film. The acoustic pulse is detected by the broadband acoustic transducer and registered with a digital oscilloscope. Application of the laboratory prototype of the thermoacoustic probe was for detection of terahertz microsecond pulses generated by the large-orbit gyrotron is discussed.

Keywords: thermoacoustic detector, terahertz microsecond pulses, acoustic signal generation, thin metallic film of nanometer thickness, gyrotron.

Введение

Рассматривается конструкция и принцип действия термоакустического детектора для измерения микросекундных импульсов терагерцевого диапазона. За основу конструкции был взят детектор, разработанный для регистрации СВЧ импульсов [1]. Действие детектора основано на термоакустическом эффекте [2]. Поглощение электромагнитного импульсного излучения в среде приводят к ее локальному нагреву, в результате чего возникают механические напряжения, приводящие к возбуждению акустического импульса. Форма акустического импульса определяется как свойствами поглотителя, так и временным профилем электромагнитного сигнала. Отличительной особенностью детектора, использованного в данной работе, является применение поглотителя в виде структуры, состоящей из металлической пленки нанометровой толщины, нанесенной на кварцевую подложку и слоя иммерсионной жидкости, находящегося в контакте с пленкой. Выбор металлических пленок толщиной порядка нескольких нанометров обусловлен их способностью эффективно поглощать падающее электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн [3,4]. Детектор на основе слоистой структуры, состоящей из кварцевой подложки, алюминиевой пленки толщиной 3.5 нм и иммерсионной жидкости, в

качестве которой использовалась дистиллированная вода и этанол, был успешно применен для регистрации СВЧ импульсов с длительностью от 2 до 120 нс на длинах волн 0.8 и 3 см [5].

В работе [1] дан подробный анализ работы термоакустического детектора и приведены теоретические оценки диапазона частот и длительностей импульсов, где данный детектор может быть использован. В частности указано, что расчетный рабочий диапазон частот термоакустического датчика лежит в пределах 3 ГГц - 3 ТГц и определяется конструкцией входной слоистой структуры и свойствами поглощающего материала, в данном случае – алюминиевой пленкой. Нижняя граница 3 ГГц достаточно условна и зависит от поперечных размеров входного окна датчика и плотности СВЧ энергии на поверхности поглощающей пленки. Верхняя граница 3 ТГц определяется условием:

$$\delta \gg l_0, \quad (3)$$

где δ - толщина скин-слоя материала поглотителя, l_0 - средняя длина свободного пробега электронов проводимости в металле при комнатной температуре. В алюминии длина свободного пробега электронов при комнатной температуре составляет 16 нм. Толщина скин-слоя на частоте f может быть вычислена по известной формуле: $\delta = (\pi f \mu \mu_0 \sigma)^{-\frac{1}{2}}$, где σ – проводимость металла, μ – 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 вместо алюминиевой пленки в настоящей работе использовались пленки хрома. Для хрома длина свободного пробега электронов $l_0 \approx 0.8$ нм, а толщина скин-слоя на частоте 3 ТГц составляет $\delta \approx 120$ нм, т.е. неравенство (3) для пленок хрома заведомо выполняется. В работе [6] измерения оптических коэффициентов тонких пленок хрома проведены на частоте 38 ГГц, и показано, что пленка имеет коэффициент поглощения 50 – 60 % в диапазоне толщин 5 - 20 нм. Сейчас у нас имеются неопубликованные данные измерений в

диапазоне 0.5 – 2 ТГц, показывающие аналогичные зависимости оптических коэффициентов от толщины пленок хрома, напыленных на кварцевые подложки. Таким образом, теоретические оценки и результаты измерений показывают, что термоакустический детектор может быть использован для регистрации электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне частот.

Схема и описание термоакустического детектора

Основные элементы детектора схематично показаны на рис. 1. Электромагнитное излучение направлялось на кварцевую пластину 1 диаметром 20 мм и толщиной 2 мм. На противоположной стороне кварцевой пластины была напылена пленка хрома 2. В измерениях была использована пластина с толщиной пленки 10 нм. Металлическая пленка контактировала со слоем жидкости 3. В пленке и граничащей с ней жидкости происходило преобразование терагерцового излучения в акустический импульс, который регистрировался с помощью широкополосного акустического приемника 4. Толщина слоя иммерсионной жидкости варьировалась в зависимости от длительности электромагнитного импульса в пределах 2.5 - 10 мм. Такой слой жидкости обеспечивал временную задержку акустического импульса, что позволяло избежать влияния сильных электромагнитных наводок в момент генерации терагерцового импульса. С другой стороны, такая толщина слоя жидкости практически не влияла на временной профиль прошедшего через него акустического импульса ввиду малого коэффициента затухания ультразвука на частотах, соответствующих спектральному составу регистрируемого импульса. Акустический импульс регистрировался пьезопленкой ПВДФ (поливинилиденфторид) толщиной 28 мкм, приклеенной на поверхность материала с акустическим импедансом, близким к импедансу ПВДФ. Акустический приемник позволял регистрировать акустические сигналы с чувствительностью 5 мкВ/Па в полосе порядка 20 МГц, что определялось резонансом в толщине ПВДФ пленки и ее пьезоэлектрическими

модулями. Электрический сигнал с пьезопленки ПВДФ усиливался широкополосным усилителем 5 и подавался на вход цифрового осциллографа. Выходное сопротивление усилителя составляло 50 Ом для обеспечения согласования с коаксиальным кабелем. Акустический приемник и усилитель конструктивно находились в металлическом цилиндре 6 диаметром 60 мм и высотой 100 мм. Элементы 1 – 3 были съемными, что позволяло оперативно менять вид и толщину жидкости, а также использовать пластины с пленками различной толщины.

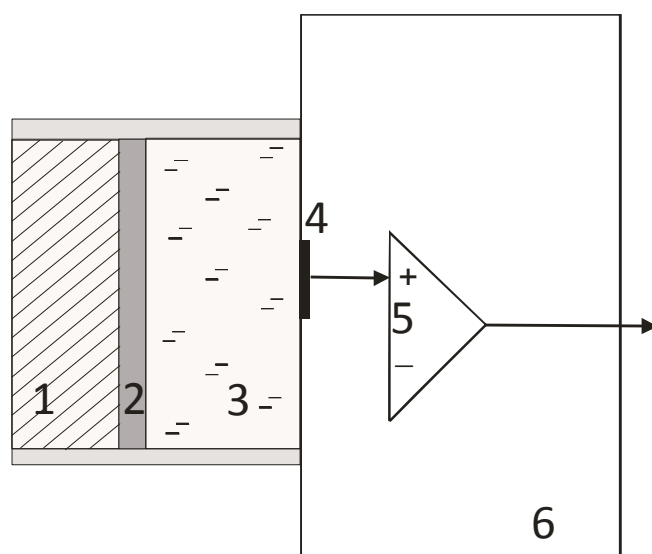


Рис. 1. Основные элементы термоакустического детектора. 1 – кварцевая пластина, 2 – металлическая пленка, 3 – слой иммерсионной жидкости, 4 – пьезопленка ПВДФ, 5 – широкополосный усилитель, 6 – цилиндрический корпус.

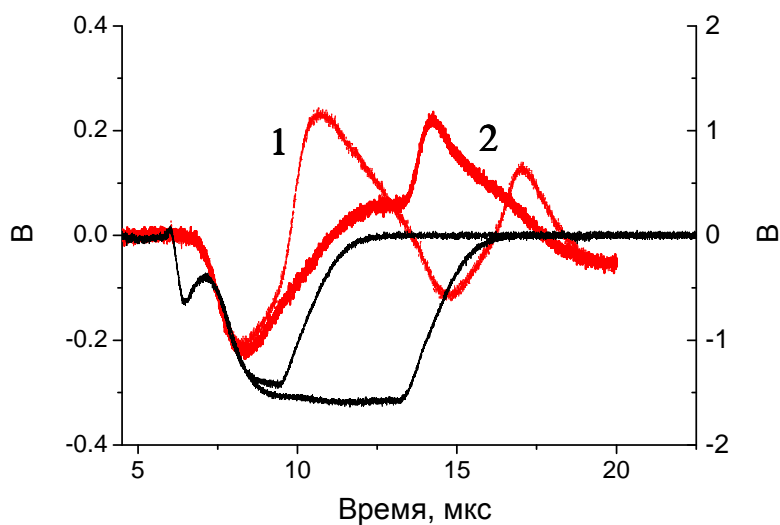
Схема измерений

В качестве источника излучения использовался гиротрон с большой орбитой (ГБО), работающий на 2-й и 3-й циклотронных гармониках. Гиротрон генерирует импульсы излучения длительностью 3 – 11,5 мкс с частотой повторения 0.1 Гц на частотах 0.55 и 0.68 ТГц при работе на 2-й циклотронной гармонике [7]. Настройка на каждую из частот осуществляется изменением величины индукции

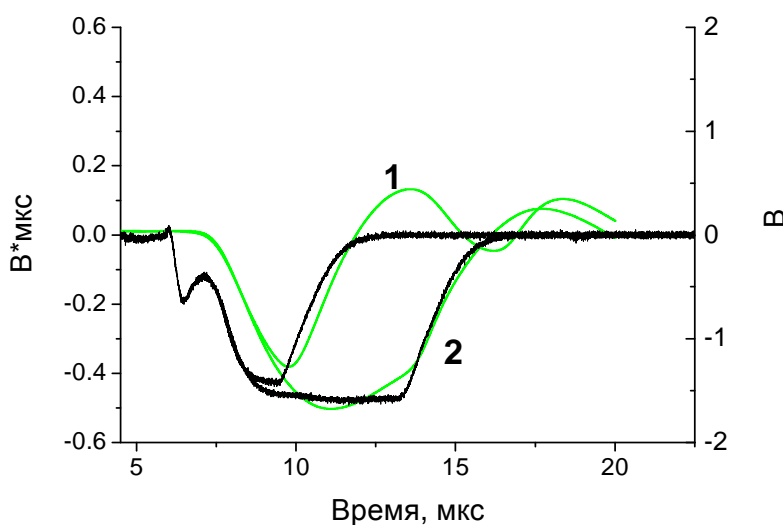
магнитного поля в резонаторе гиротрона. Мощность выходного излучения на указанных частотах составляет 1.0, 1.8, 0.3, 0.4 кВт, соответственно. Гиротрон оснащен встроенным квазиоптическим преобразователем, что позволяет выводить излучение из гиротрона в виде волнового пучка. Термоакустический детектор располагался в фокусе соответствующих систем фокусировки выходного излучения гиротрона. В первом случае апертура детектора располагалась в фокусе дополнительной двухзеркальной фокусирующей системы, при этом засвечивалась малая часть апертуры детектора - область с диаметром около 2 мм. Во втором случае апертура детектора располагалась в фокусе встроенной фокусирующей системы гиротрона на расстоянии 160 мм от выходного окна, при этом диаметр области засветки составлял около 20 мм, что соответствовало диаметру апертуры детектора. Область засветки определялась по уровню e^{-1} соответствующей поперечной структуры излучения.

Результаты измерений

На рис.2а показаны профили импульсов, зарегистрированные термоакустическим детектором ТАД при использовании пленки хрома толщиной 10 нм, контактирующей с этанолом. В процессе измерений изменялся диаметр пучка падающего терагерцевого излучения и варьировалась толщина слоя иммерсионной жидкости, в качестве которой использовалась дистиллированная вода и этанол. Длительность импульса варьировалась от 11.5 мкс до минимально возможной 3 мкс. При длительности импульса менее 3 мкс происходил срыв генерации.



а



б

Рис 2. Профили импульсов, зарегистрированные термоакустическим детектором ТАД (а) и их интегралы (б). Использовался слой этанола толщиной 4 мм. Сигналы контрольного детектора показаны сплошной линией. Длительность импульсов составляла 4.8 мкс (1) и 8 мкс (2) на частоте 550 ГГц.

Основная часть измерений проведена при полной засветке приемного окна ТАД (20 мм), чтобы уменьшить влияние дифракционной расходимости акустического импульса. Для сравнения, на Рис.2 показаны профили импульсов, зарегистрированные контрольным детектором КД. Профили импульсов, приведенные на рис.2 были получены при длительностях 4.8 и 8 мкс и диаметре падающего излучения 20 мм.

Время распространения акустической волны через слой этанола толщиной 4 мм составляло 3.3 мкс, что приводило к соответствующей задержке сигнала термоакустического детектора. Для удобства сравнения импульс КД на Рис.2 приведен с задержкой на 3.3 мкс, поэтому начало импульсов, зарегистрированных ТАД и КД, совпадало на обоих графиках. Вид профиля импульса ТАД отличается от профиля КД. Профиль электромагнитного импульса однополярный с плавными фронтами, в то время как импульс ТАД имеет двуполярный вид. Длительность импульса ТАД совпадает с длительностью КД, если измерять длительность от начала до максимума положительного пика. Такие особенности импульса ТАД объясняется дифракционными эффектами. Для импульса длительностью τ характерным пространственным масштабом можно считать $v_s \tau$, где v_s - скорость

звука в среде. Дифракционная длина $L_D = \frac{\pi a^2}{v_s \tau}$, где a – радиус излучающей

поверхности. В нашем случае это радиус пятна терагерцевого излучения на поверхности кварцевой пластины. Для характерных масштабов эксперимента ($v_s=1.2$ мм/мкс - этанол, $a=5$ мм, $\tau=10$ мкс) дифракционная длина составляет 6 мм. Толщина слоя жидкости 2.5 – 10 мм, что сравнимо с L_D , т.е. для расчета профиля импульса необходимо решать параболическое уравнение дифракции [2,8]. Для качественных оценок можно считать, что профиль акустического импульса на приемнике близок к производной от исходного профиля на входе в среду. На рис. 2б показаны интегралы от профилей ТАД, приведенных на рис.2а. Интегральные кривые с достаточно хорошей точностью соответствуют профилям КД. Отметим,

что возникает дополнительная задержка интегральных кривых, что необходимо учитывать при сравнении профилей импульсов.

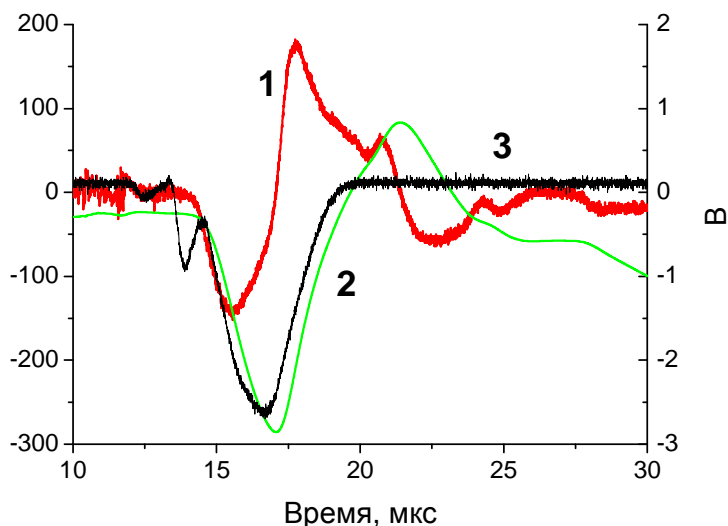


Рис. 3. Профиль импульса, зарегистрированный термоакустическим детектором 1 и его интеграл 2. Использовался слой воды толщиной 2.5 мм. Кривая 3 - импульс, зарегистрированный КД. Длительность импульса составляла 4 мкс на частоте 550 ГГц.

Аналогичные зависимости были получены при использовании воды в качестве иммерсионной жидкости (рис.3). Здесь сигнал КД задержан на 1.7 мкс – время распространения звука в слое воды толщиной 2.5 мм. Амплитуда акустического импульса в несколько раз меньше, чем была зарегистрирована в этаноле, что объясняется более низкой эффективностью термоакустического преобразования.

В работе [5] было продемонстрировано, что термоакустический датчик на основе нанометровой пленки, граничащей с иммерсионной жидкостью с хорошей точностью воспроизводит профиль огибающей импульсов с несущей частотой 1-30 ГГц и длительностью 40 -300 нс. В настоящей работе показано, что аналогичный подход может быть использован для импульсов терагерцевого

диапазона. Особенностью регистрации импульсов микросекундной длительности является то, что детектируемая форма импульса является производной от исходной формы огибающей импульса. Поэтому требуется либо проводить численное интегрирование регистрируемого сигнала, либо использовать интегратор с заданными параметрами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 12-08-00921.

Литература

1. В.Г. Андреев, В.А. Вдовин // ПТЭ. 2009. №2. С. 81-85.
2. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
3. Андреев В.Г., Вдовин В.А., Воронов П.С. // Письма в ЖТФ. 2003. Т.29. В.22. С. 68.
4. В.Г. Андреев, В.А. Вдовин//Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т.48. № 10-11. С. 1006.
5. В.Г. Андреев, В.А. Вдовин, К.В. Афанасьев, А.А. Ельчанинов, А.И. Климов. Испытания термоакустического датчика мощных микроволновых импульсов. Известия ВУЗов, Радиофизика, 2009, т.52. № 8, 653-659.
6. В.Г. Андреев, В.А. Вдовин, В.А. Сотников. Исследование оптических коэффициентов нанометровых пленок хрома на кварцевой подложке. Труды XII Всероссийской школы-семинара «Физика и применения микроволн». Звенигород, Московская обл. 2009. Часть 4. С. 4 – 6.
7. В.Л. Братман, Ю.К. Калынов, В.Н. Мануилов Субтерагерцовые и терагерцовые гиротроны с большой орбитой // Изв.ВУЗов Радиофизика, 2009, т.52, № 7, сс.525-535.
8. Andreev V.G., Ponomarev A.E., Karabutov A.A, Oraevsky A.A. Detection of optoacoustic transients with rectangular transducer of finite dimensions. Proc. SPIE 2002, v.4619, 153-162.