

ДАТЧИК ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ МОЩНЫХ СВЧ-ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

В.Г. Андреев¹, В.А. Вдовин²

¹*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия;*

²*ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва, Россия*

E-mail: vdv@cplire.ru

Приводится описание принципа действия, конструкция и результаты испытаний неохлаждаемого помехоустойчивого датчика мощных СВЧ-импульсов, генерируемых сильноточными ускорителями. Работа датчика основана на эффекте генерации акустических сигналов при поглощении СВЧ-импульсов в слоистой структуре, где в качестве поглотителя используется тонкая металлическая пленка нанометровой толщины. Датчик располагается в свободном пространстве и предназначен для регистрации СВЧ-импульсов длительностью 1...500 нс в диапазоне частот 3...300 ГГц с частотой следования до 5 кГц. Чувствительность датчика при регистрации импульса с длительностью 10 нс составила 0,5 В/мДж.

1. ВВЕДЕНИЕ

Регистрация формы огибающей мощных СВЧ-импульсов наносекундной длительности обычно осуществляется охлаждаемыми [1] и неохлаждаемыми [2] полупроводниковыми детекторами на горячих носителях. Временное разрешение детектора ограничивается, в основном, параметрами измерительной цепи и обычно составляет ~1 нс [3]. К недостаткам таких датчиков можно отнести использование жидкого азота (охлаждаемые детекторы), трудности, возникающие при регистрации излучения короткого миллиметрового диапазона, а также проблемы, связанные с высокой средней мощностью, выделяющейся на полупроводниковом кристалле за счет тока смещения при регистрации импульсов с частотой следования >100 Гц. В последнее время подобные детекторы используются для измерения субнаносекундных импульсов СВЧ-излучения, хотя это связано с определенными трудностями и требует применения специальных мер [4].

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Рассматривается детектор микроволнового излучения, принцип работы которого основан на использовании термоакустического эффекта [5]. Подобные устройства уже применяются для регистрации импульсов лазерного излучения в видимом и инфракрасном диапазонах [6]. Действие такого устройства основано на том, что при поглощении электромагнитного излучения в среде возникают механические напряжения, приводящие к возбуждению акустического импульса, форма которого определяется как свойствами поглотителя, так и временным профилем электромагнитного сигнала. В работе [7] показано, что термоакустический эффект может быть использован для регистрации СВЧ-импульсов наносекундной длительности, а также определены условия, при которых акустический импульс, возникающий при термоакустическом преобразовании, полностью воспроизводит форму огибающей СВЧ-сигнала.

Отличительной особенностью предлагаемой схемы является использование слоистой структуры, состоящей из радиопрозрачного окна, поглощающей среды в виде металлической пленки нанометровой

толщины и жидкости. Выбор металлических пленок толщиной порядка нескольких нанометров обусловлен их способностью эффективно поглощать падающее электромагнитное излучение.

В работах [8, 9] экспериментально показано, что при нормальном падении СВЧ-излучения на структуру "кварцевая подложка-АI-пленка-воздух" поглощение СВЧ-энергии составляло ~50% падающей энергии излучения. На длине волны 8 мм максимум коэффициента поглощения наблюдался при толщине пленки 2...3 нм. Принципиально важным оказалось то, что коэффициент отражения при этом ~40%, в то время как толстый АI-слой отражает 99.8% падающего излучения. Коэффициент прохождения не превышал 10%, что уменьшало возможность паразитной акустической генерации в граничащей с пленкой жидкости. В случае, когда пленка граничит с жидкостью, величина максимума коэффициента поглощения определяется диэлектрической проницаемостью жидкости [10]. В частности, максимум поглощения СВЧ-энергии в одной и той же АI-пленке, но граничащей с водой или этиловым спиртом, составляет 23 и 50% соответственно.

3. КОНСТРУКЦИЯ ДАТЧИКА

Принципиальная схема датчика изображена на Рис.1. СВЧ-импульс через радиопрозрачное кварцевое стекло 1 падал на АI-пленку 2, напыленную на внутреннюю поверхность кварцевого стекла. АI-пленка контактировала со слоем жидкости 3, толщина которого составляла 3...5 мм. В пленке и граничащей с ней жидкости происходило преобразование СВЧ-излучения в акустический импульс, который регистрировался с помощью широкополосного акустического приемника 4.

При выполнении условий [7]

$$\alpha^{-1} \ll c_2 \tau_{\text{имп}} \quad (1)$$

и $(\rho c)_1 \gg (\rho c)_2$ акустический импульс по форме идентичен импульсу микроволнового излучения, где α – коэффициент поглощения СВЧ-волны, $\tau_{\text{имп}}$ – длительность СВЧ-импульса, ρ – плотность среды, c – скорость звука в среде, индексы 1 и 2 относятся к пленке и жидкости соответственно.

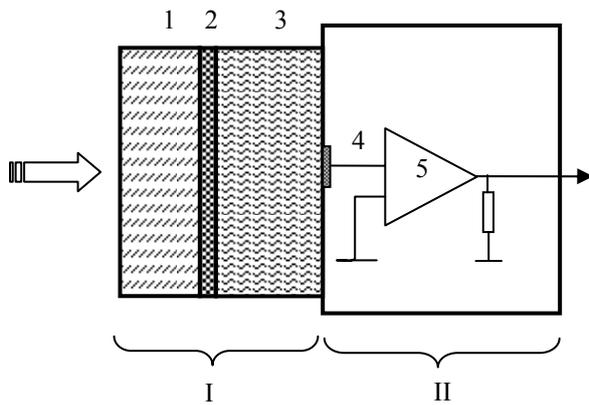


Рис.1. Схема датчика

Сигнал, зарегистрированный приемником 4, подавался на вход предусилителя 5, который находился в непосредственной близости от приемника. Конструктивно и приемник, и предусилитель располагались в одном и том же корпусе. Предусилитель имел малую входную емкость (≤ 2 пФ) и малый уровень входных шумов. Выходное сопротивление предусилителя составляло 50 Ом, что позволяло передавать сигнал практически без потерь по длинному коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением 50 Ом на осциллограф. Конструктивно датчик выполнен в виде цилиндра $\varnothing 60 \times 100$ мм. Диаметр входного радиопрозрачного окна составляет 20 мм.

4. ИСПЫТАНИЕ ДАТЧИКА

Испытания проводились следующим образом. Акустический датчик располагался в зоне диаграммы направленности излучающей антенны СВЧ-генератора (см. Рис.1). СВЧ-импульс направлялся на входное окно датчика. В экспериментах использовалась трехслойная структура с толщиной алюминиевой пленки 3,5 нм. Al-пленка контактировала со слоем дистиллированной воды толщиной 4 мм. Такой слой воды обеспечивал временную задержку акустического импульса на 2,67 мкс, что позволяло избежать влияния сильных электромагнитных наводок в момент генерации СВЧ-импульса. С другой стороны, такая толщина слоя воды практически не влияла на временной профиль прошедшего через него акустического импульса ввиду малого коэффициента затухания ультразвука на частотах, соответствующих спектральному составу регистрируемого импульса.

В качестве акустического приемника использовалась ПВДФ-пленка толщиной 28 мкм, приклеенная на поверхность материала с акустическим импедансом, близким к импедансу ПВДФ. Использованный приемник позволял регистрировать акустические сигналы в полосе ~ 20 МГц с чувствительностью 5 мкВ/Па, что определялось толщиной резонансом ПВДФ-пленки и ее пьезоэлектрическими модулями. Сигнал приемника регистрировался цифровым осциллографом Tektronix 3032, синхронизация которого осуществлялась импульсом тока СВЧ-генератора.

Экспериментальная проверка схемы регистрации СВЧ-импульсов наносекундной длительности проводилась с использованием релятивистского генератора поверхностной волны миллиметрового диапа-

зона, имеющегося в ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН [11]. Этот генератор обеспечивал импульсы излучения мощностью до 3 МВт с длиной волны ~ 8 мм. Энергия в импульсе не превышала 1 мДж.

На Рис.2 представлены сигналы, зарегистрированные датчиком на горячих носителях U_1 (1) и термоакустическим датчиком U_2 (2), нормированные на максимальные значения U_0 . Для обоих графиков масштаб по временным осям одинаковый; сигнал U_2 сдвинут на 2750 нс (верхняя временная ось) в связи с задержкой прихода акустического импульса.

Длительность огибающей СВЧ-импульса, зарегистрированная Ge-детектором на горячих носителях (кривая 1) по уровню 0,5 от пикового значения, составила $5,2 \pm 0,4$ нс, что определялось длительностью импульса тока.

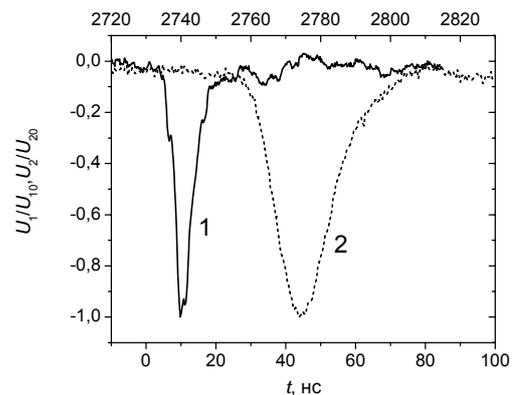


Рис.2. Осциллограммы сигналов

Профиль сигнала, зарегистрированный акустическим датчиком, показан штриховой линией (кривая 2). Акустический сигнал имел форму однополярного импульса длительностью 18 ± 2 нс, измеренной по уровню 0,5. Однополярность обеспечивалась тем, что поверхность воды, где происходил основной процесс термоакустического преобразования, граничила с твердым телом, акустический импеданс которого значительно выше, чем у воды.

Ограниченность полосы пропускания акустического приемника не позволила воспроизвести форму огибающей СВЧ-импульса, представленную на Рис.2 сплошной линией. Длительность фронта акустического импульса на уровне 20 нс соответствует полосе пропускания приемника, равной, как уже отмечалось ранее, 20 МГц.

Аналогичные по форме акустические импульсы зарегистрированы в случае, когда в качестве жидкости, граничащей с Al-пленкой, использован этиловый спирт. Однако чувствительность датчика в этом случае оказалась почти на порядок выше, что позволило зарегистрировать СВЧ-импульс на расстоянии 20 см от выхода рупора, когда плотность электромагнитной энергии значительно уменьшилась вследствие сферической расходимости.

Это объясняется тем, что комбинация теплофизических параметров $\Gamma = \beta c_0^2 / c_p$ (β – коэффициент объемного расширения жидкости, c_0 – скорость звука, c_p – удельная теплоемкость), которая определяет эффективность термоакустического преобразования, в 6 раз выше для спирта по сравнению с водой [5]. Кроме того, коэффициент поглощения СВЧ-

излучения в структуре "кварц-Al-пленка-жидкость" в 2 раза выше, чем в случае, когда в качестве жидкости используется этиловый спирт.

5. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДАТЧИКА

Рассмотрим более детально особенности и потенциальные возможности описываемого датчика. Конструкцию датчика функционально и конструктивно можно разделить на две части (см. Рис.1): I – систему преобразования СВЧ-сигнала в акустический импульс; II – систему приема и регистрации акустического сигнала. Изменяя параметры обеих частей, можно варьировать характеристики датчика в зависимости от конкретной задачи.

5.1. ШИРОКОПОЛОСНОСТЬ

Длина волны λ регистрируемого СВЧ-излучения лежит в диапазоне 1...30 мм. Нижняя граница 1 мм определяется следующим условием. В [12] теоретически показано, что зависимости оптических коэффициентов для используемой трехслойной структуры сохраняют свой вид для длин волн, толщина скин-слоя которых значительно превышает среднюю длину свободного пробега электронов проводимости в металле при комнатной температуре.

Поскольку для большинства металлов средняя длина свободного пробега электронов при комнатных температурах лежит в пределах 10...50 нм, то такие зависимости справедливы для длин волн ≥ 1 мм. В частности, это означает, что коэффициент поглощения СВЧ-энергии в указанном диапазоне длин волн не зависит от частоты, и эффективность термоакустического преобразования останется постоянной. Это одно из преимуществ описываемого датчика по сравнению с детекторами на горячих носителях, которые проектируются на определенный, достаточно узкий частотный диапазон.

Верхняя граница 30 мм достаточно условна и определяется поперечными размерами входного окна датчика и плотностью СВЧ-энергии на поверхности поглощающей пленки. С увеличением длины волны растет расходимость СВЧ-излучения и, соответственно, плотность энергии падает. Однако при обеспечении достаточно высокой чувствительности (например, при использовании этилового спирта), датчик может быть использован и для более длинных волн.

5.2. ЧАСТОТА СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ

Датчик можно использовать как для регистрации одиночных импульсов, так и периодической последовательности импульсов. Частота повторения импульсов может быть ограничена сверху только требованием отвода тепла из области преобразования СВЧ-энергии в акустический импульс. Для предлагаемой конструкции с использованием дистиллированной воды тепловая постоянная времени не превышает 0.1 мс, поэтому такой датчик может быть применен для регистрации импульсов, следующих с частотой повторения ≤ 5 кГц. Однако надо иметь в виду, что средняя поглощаемая мощность не должна быть очень высокой, поскольку повышенное тепло-

выделение приведет к нагреву слоистой структуры. Поскольку теплофизические параметры являются функциями температуры, то ее изменение приведет к некоторой нестабильности регистрируемых импульсов. Однако это можно решить либо путем уменьшения плотности энергии на поверхности датчика, либо принудительным охлаждением конструкции.

5.3. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ

Помехоустойчивость обеспечивается тем, что регистрируемый сигнал задерживается на несколько микросекунд (время пробега сигнала по жидкости) относительно времени максимальных электромагнитных наводок. Это хорошо видно на Рис.2, где приведены отнормированные импульсы, зарегистрированные обоими детекторами. Относительный уровень помех на акустическом импульсе ниже, чем на импульсе, зарегистрированном детектором на горячих носителях.

5.4. ДЛИТЕЛЬНОСТЬ СВЧ-ИМПУЛЬСА

Регистрируемая длительность СВЧ-импульсов находится в пределах 0.1...500 нс. Нижняя граница определяется условием (1): при длительности СВЧ-импульса 0.1 нс толщина прогреваемого слоя в воде составляет $l_v = \alpha^{-1} \approx 7.5$ нм, а звук пробежит за время длительности импульса расстояние $c_2 \tau_{\text{имп}} = 150$ нм, что значительно превышает величину α^{-1} . Поэтому условие (1) выполняется, и форма акустического импульса адекватно воспроизводит огибающую СВЧ-сигнала. Неравенство (1) выполняется и для длительности импульса 10 пс, но при этой длительности величина $l_v = \alpha^{-1} = 2.5$ нм становится сравнимой с толщиной металлической пленки, и механизм генерации становится более сложным, что может отразиться на форме генерируемого импульса. Верхняя граница определяется средней тепловой мощностью, рассеиваемой в жидкости и прилегающих стенках. Для редко повторяющихся сигналов длительность импульсов может достигать 300 нс.

Несмотря на то, что термоакустический механизм, в принципе, позволяет осуществить регистрацию субнаносекундных импульсов, при этом возникают труднопреодолимые технические трудности детектирования короткого акустического импульса. Минимальная толщина ПВДФ-пленки, которую выпускает промышленность, составляет 9 мкм, что в принципе обеспечивает полосу 120 МГц и возможность регистрации импульсов длительностью несколько наносекунд. Продвижение в область более коротких импульсов требует разработки широкополосных гиперзвуковых преобразователей. Для этой цели перспективными являются преобразователи, изготовленные на базе оптических интерферометров. Акустический сигнал изменяет показатель преломления среды в оптическом интерферометре, что приводит к изменению его резонансной частоты и, соответственно, выходного сигнала. Оптические резонаторы выполняются либо в виде микроколец, либо в виде плоскопараллельных слоев, и могут быть использованы для регистрации сигналов субнаносекундной длительности.

5.5. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Чувствительность термоакустического детектора определяется акустическим датчиком, его шумами, а также свойствами слоистой структуры. Чувствительность датчика с ПВДФ-пленкой толщиной 28 мкм и водой в качестве жидкости, контактирующей с Al-пленкой, составила 0.5 В/мДж. В расчетах использовалась длительность импульса, равная 10 нс. При использовании этилового спирта чувствительность на порядок выше.

Минимально детектируемый СВЧ-сигнал определяется из условия равенства амплитуды акустического импульса величине среднеквадратичного шумового давления, возникающего на пьезопреобразователе вследствие теплового шума, либо вследствие воздействия внешней электромагнитной помехи. По оценкам, воздействие помех на 2 порядка превышало уровень теплового шума и создавало на акустическом датчике среднеквадратичное давление ~40 кПа или электрическое напряжение 20 мВ. При этом минимальная энергия СВЧ-импульса длительностью 10 нс, регистрируемая термоакустическим датчиком, составила 0.04 мДж.

Таким образом, термоакустические детекторы в настоящее время могут быть использованы для регистрации формы огибающей СВЧ-импульсов с длительностью 10...100 нс. При этом такие преимущества детектора как широкополосность, высокая чувствительность, регистрация импульсов с большой частотой следования, простота конструкции и работа при комнатной температуре, обеспечат ему применение в физике и технике СВЧ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 07-08-00415.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.И. Климов. Диагностика мощных наносекундных импульсов СВЧ-излучения // *Изв. вузов. Физика*. 1996, №12, с.98-109.
2. M. Dagys, Z. Kancleris, R. Simniskis, et al. The Resistive Sensor: A Device for High-Power Microwave Pulsed Measurements // *IEEE Antennas and Propagation Mag (43)*. 2001, №5, p.64-78.
3. М.Д. Райзер, Л.Е. Цопп. Детектирование и измерение мощности СВЧ-излучения наносекундной длительности // *Радиотехника и электроника*. 1975, т.20, №8, с.1691.
4. С.Д. Коровин, Г.А. Месяц, В.В. Ростов и др. Высокоэффективная генерация импульсов субнаносекундной длительности в релятивистской ЛОВ миллиметрового диапазона // *Письма в ЖТФ*. 2002, в.2(28), с.81-89.
5. В.Э. Гусев, А.А. Карабутов. *Лазерная оптоакустика*. М.: «Наука», 1991.
6. А.А. Oraevsky, А.А. Karabutov, V.G. Andreev // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. 2003, v.50, p.1383.
7. V.G. Andreev, А.А. Karabutov, V.A. Vdovin. Basic principles of thermo-acoustic energy and temporal profile detection of microwave pulses // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"* (39). 2001, №5, p.24-26.
8. В.Г. Андреев, В.А. Вдовин, П.С. Воронов. Экспериментальное исследование поглощения волн миллиметрового диапазона в тонких металлических пленках // *Письма в ЖТФ*. 2003, т.29, в.22, с.68.
9. V.G. Andreev, V.A. Vdovin, P.S. Voronov. Thin-film thermoacoustic detector for a registration of microwave pulses of nanosecond duration // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2004, №2, p.200-202.
10. В.Г. Андреев, В.А. Вдовин. Генерация акустических волн мощными СВЧ-импульсами с использованием тонких металлических пленок // *Изв. вузов. Радиофизика (48)*. 2005, №10-11, с.1006-1011.
11. А.М. Афонин, В.А. Вдовин, В.И. Канавец и др. Нестационарные процессы в генераторе поверхностной волны миллиметрового диапазона // *Радиотехника и электроника (32)*. 1987, №1, с.118-126.
12. Г.В. Розенберг. *Оптика тонкослойных покрытий*. М.: «Физматгиз», 1958.

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

A SENSOR FOR RECORDING HIGH-POWER MICROWAVE PULSES ON BASIS OF THE THERMOACOUSTIC EFFECT

V.G. Andreev, V.A. Vdovin

The operating principle, design and results of testing of an uncooled noise-immune sensor of the high-power microwave pulses generated by high-current accelerators is described. The sensor operation is based on the effect of acoustic signal generation when microwave pulses are absorbed in a layer structure, in which a thin metal nanometer-thick film is used as an absorber. The sensor is placed in a free space and intended to detect microwave pulses with ~1 to 500 ns durations in a 3 to 300 GHz frequency band with a pulse repetition rate of up to 5 kHz. For 10 ns-long pulses, the sensor sensitivity is 0.5 V/mJ.

ДАТЧИК ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ ПОТУЖНИХ СВЧ-ІМПУЛЬСІВ НА ОСНОВІ ТЕРМОАКУСТИЧНОГО ЕФЕКТУ

В.Г. Андреев, В.А. Вдовин

Дано опис принципу дії, конструкція й результати випробувань неохолоджуваного перешкодо сталого датчика потужних СВЧ-імпульсів, генерованих потужнострумівими прискорювачами. Робота датчика заснована на ефекті генерації акустичних сигналів при поглинанні СВЧ-імпульсів у шаруватій структурі, де як поглинач використовується тонка металева плівка нанометрової товщини. Датчик розташовується у вільному просторі і призначений для реєстрації СВЧ-імпульсів тривалістю 1...500 нс у діапазоні частот 3...300 ГГц із частотою проходження до 5 кГц. Чутливість датчика при реєстрації імпульсу з тривалістю 10 нс склала 0,5 В/мДж.