

НАНОМЕТРОВЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ В ДАТЧИКАХ МОЩНЫХ СВЧ ИМПУЛЬСОВ

В.А.Вдовин

ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

E-mail: vdv@cplire.ru

Рассматриваются вопросы использования нанометровых металлических пленок в качестве поглотителей микроволнового излучения в датчиках, принцип работы которых основан на термоакустическом эффекте. Теоретически и экспериментально (на частоте 37.5 ГГц) исследовано поведение коэффициентов отражения, прохождения и поглощения тонкой алюминиевой пленки, напыленной на кварцевую подложку. Показано, что при толщине пленки 2-3 нм наблюдается максимум поглощения волны. При этом величина коэффициента поглощения в максимуме зависит от коэффициентов преломления сред, граничащих с пленкой. Представлены зарегистрированные профили акустических сигналов, возбужденных в алюминиевых пленках СВЧ импульсами с длительностью 5 нс. Наиболее эффективное преобразование отмечено при толщине пленки, равной 3.5 нм.

В работе [1] был предложен метод регистрации огибающей СВЧ импульсов наносекундной длительности, основанный на эффекте генерации звуковых импульсов при поглощении электромагнитной волны. Метод основан 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. Там же были определены условия, при которых акустический импульс, возникающий при термоакустическом преобразовании, полностью воспроизводит форму огибающей СВЧ сигнала. Реализация этого метода привела к созданию принципиально нового детектора огибающей импульсов микроволнового излучения [2].

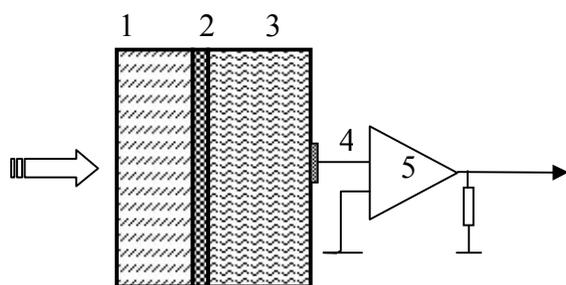


Рис.1. Схема датчика для регистрации формы СВЧ импульса

Принципиальная схема датчика изображена на рис.

1. Отличительной особенностью рассматриваемой конструкции является использование слоистой структуры, состоящей из радиопрозрачного окна, поглощающей среды в виде металлической пленки нанометровой толщины и жидкости. Импульс СВЧ через радиопрозрачное кварцевое стекло 1 падает на металлическую пленку 2, напыленную на внутреннюю поверхность кварцевого стекла 1. Алюминиевая пленка контактирует со слоем жидкости 3. В пленке и граничащей с ней жидкости происходит преобразование СВЧ излучения в акустический импульс. При выполнении условий [1]:

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

и $(\rho c)_2 \gg (\rho c)_3$ 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 2 и 3 относятся к пленке и жидкости, соответственно. Условие (1) означает, что длительность СВЧ импульса много больше времени распространения акустического сигнала в поглощающем слое, что равносильно условию поглощения микроволнового излучения в очень тонком слое. Это условие требует использование материалов с сильным поглощением на небольшой толщине.

В работе [1] впервые в качестве поглотителей СВЧ энергии предлагалось использовать именно тонкие металлические пленки. Специфические свойства таких пленок при взаимодействии их с электромагнитным излучением были замечены давно. Особенно такие свойства наблюдаются при прохождении излучения через металлическую пленку, толщина которой много меньше толщины скин-слоя. Несмотря на то, что ослабления электрического поля в пленке из-за малости ее толщины практически не происходит, пленка оказывается сильно отражающей и имеет максимум поглощения. В случае, когда толщина пленки сравнима с длиной свободного пробега электронов в толстом слое металла, дли-

на свободного пробега в тонкой пленке определяется в основном уже не взаимодействием с кристаллической решеткой, а отражениями от границ.

Теоретический анализ поведения оптических коэффициентов для случая нормального падения плоской волны на трехслойную структуру типа диэлектрик-металлическая пленка-диэлектрик, дает следующие зависимости [3]:

$$R = \frac{\left((n_3 - n_1) + 2 \frac{d}{b} \right)^2}{\left((n_3 + n_1) + 2 \frac{d}{b} \right)^2}, \quad T = \frac{4n_1 n_3}{\left((n_3 + n_1) + 2 \frac{d}{b} \right)^2}, \quad A = \frac{8 \frac{d}{b} n_1}{\left((n_3 + n_1) + 2 \frac{d}{b} \right)^2}, \quad (2)$$

где d – толщина пленки, $b = c/2\pi\sigma$, c – скорость света в вакууме, σ – удельная проводимость металла по постоянному току, n_1 и n_3 – коэффициенты преломления диэлектрических сред, соответственно, до и после пленки. Заметим, что оптические коэффициенты пленок, толщина которых много меньше толщины скин-слоя (рассматриваемый случай), не зависят от частоты.

В формулах (2) коэффициент b зависит от толщины пленки через проводимость σ : $b = c/2\pi\sigma(d)$. Удельная проводимость тонкого слоя σ связана с удельной проводимостью того же вещества в массивном образце σ_0 соотношением: $\sigma = \sigma_0 l/l_0$,

где l – длина свободного пробега электрона в тонкой пленке, а σ_0 и l_0 – соответственно, удельная проводимость и средняя длина свободного пробега электрона в бесконечно толстом образце.

Учет размерных эффектов, связанных с отражением электронов на границах пленки, приводит к следующим выражениям для σ в случае однородной по толщине металлической пленки [3]:

$$\sigma(d) = \begin{cases} \sigma_0(1 - (l_0/4d)), & d > l_0 \\ \sigma_0(d/l_0)((3/4) + (1/2)\ln(l_0/d)), & d \leq l_0 \end{cases}. \quad (3)$$

В формуле (3) не учтено явление диффузионного рассеяния электронов проводимости на границах кристаллитов, роль которого увеличивается с уменьшением толщины пленки (в диапазонах толщин порядка 10 нм). Учет этого обстоятельства приводит к выражению [3]:

$$\sigma(d) = \sigma_0(d/2l_0)(1 + \ln(l_0/d)), \quad \text{для толщин } d < l_0. \quad (4)$$

Отметим, как следует из формул (2), что коэффициенты R , T и A не зависят от частоты и определяются только свойствами самого металла.

Экспериментальные исследования свойств металлических пленок в СВЧ диапазоне проводились с алюминиевой пленкой, нанесенной на поверхность кварцевого стекла. Исследуемые пленки алюминия были получены методом термического испарения в вакууме. Пленки напылялись на кварцевые стекла толщиной 2.3 мм. Выбор алюминия в качестве материала для напыления объяснялся следующими соображениями. Прочность сцепления алюминиевых пленок со стеклом очень велика, эти пленки являются довольно твердыми и коррозионно стойкими из-за постоянного присутствия самопроизвольно возникающей на воздухе поверхностной пленки окиси алюминия. (Это было важно для случая их использования, т.к. они контактируют с водой). Равномерное распределение пленки по толщине на поверхности стекла достигалось путем использования точечного испарителя, расположенного на большом расстоянии от подложки. Это позволило получить пленки с разбросом по толщине не более 5 %. Толщина пленки контролировалась профилометром Talystep с точностью до 5 Å.

Схема измерений характеристик пленок с использованием генератора P2-65 позволяла одновременно фиксировать коэффициенты отражения и прохождения. Коэффициент поглощения A рассчитывался по формуле:

$A = 1 - R - T$, где R – коэффициент отражения, $R = P_{\text{отр}} / P_{\text{пад}}$, T – коэффициент прохождения, $T = P_{\text{пр}} / P_{\text{пад}}$; $P_{\text{пад}}$, $P_{\text{отр}}$, $P_{\text{пр}}$ – мощности, соответственно, падающей, отраженной и прошедшей волн.

Теоретические и экспериментальные зависимости оптических коэффициентов R , T и A представлены на рис.2. Экспериментальные зависимости получены на частоте 37.5 ГГц (длина волны 8 мм). Исследовались два варианта падения СВЧ волны на стеклянную пластину с пленкой. Вариант 1: излучение падало со стороны металлической пленки, что соответствует случаю трехслойной структуры – воздух - пленка - стекло. Вариант 2: излучение падает из стекла (структура: стекло – пленка - воздух). Результаты измерений оптических коэффициентов в зависимости от толщины пленки представлены на рис. 2. Измерения проводились в диапазоне толщин от 1.7 нм до 15 нм. Изготовление пленок с толщиной менее 1.5 нм было связано с большими техническими трудностями, и результаты измерений при малых толщинах имели большие погрешности. При толщине пленки более 15 нм значения коэффициентов отражения и пропускания практически не изменялись. Коэффициент отражения металлической пленки монотонно увеличивался с ростом ее толщины, приближаясь практически к единичному значению. Соответственно коэффициент пропускания пленки практически обращался в нуль при толщине пленки 6 – 8 нм. При этом значения коэффициента пропускания были практически одинаковы при падении волны на пленку из воздуха (рис. 2а) и из стеклянной подложки (рис. 2б). Коэффициент поглощения волны имел максимум в области 2 – 3 нм, причем измеренная величина максимального коэффициента поглощения при падении волны со стороны стекла ($A_m = 0.49$) превышало значение полученного максимального коэффициента поглощения при падении волны со стороны воздуха ($A_m = 0.34$). Погрешность измерения коэффициентов в экспериментах не превышала 5-7%.

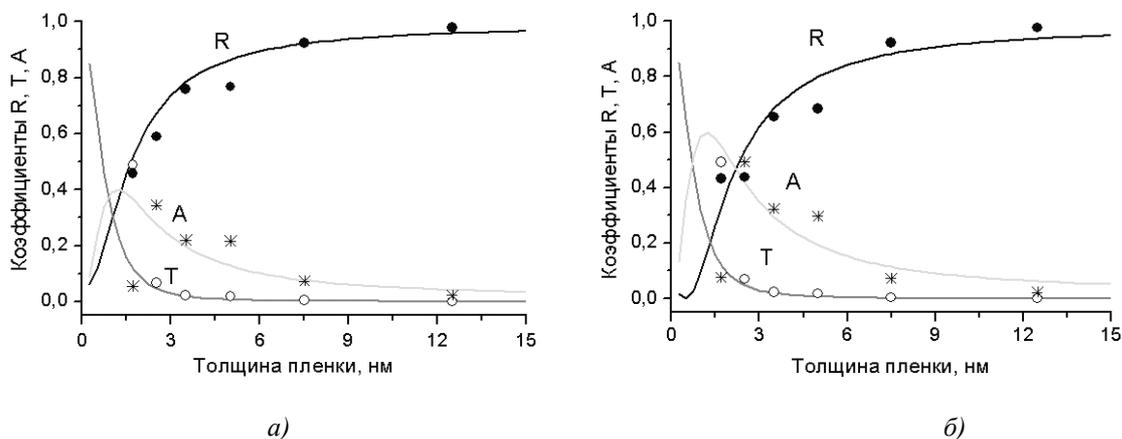


Рис. 2. Зависимость оптических коэффициентов алюминиевой пленки от ее толщины с учетом материала подложки. Теоретические зависимости показаны сплошными линиями, экспериментальные результаты представлены соответствующими символами (● - R , ○ - T , * - A):

а) - излучение падает непосредственно на поверхность металлической пленки, что соответствует случаю трехслойной структуры: воздух ($n_1 = 1$) – пленка - стекло ($n_3 = 1.5$).

б) - излучение со стороны стекла, структура: стекло ($n_1 = 1.5$) – пленка - воздух ($n_3 = 1$).

Полученные экспериментальные результаты и теоретические кривые имеют хорошее соответствие. В диапазоне значений для пленок с толщиной до 3 нм наблюдается небольшое расхождение экспериментальных и теоретических данных и смещение максимума поглощения. Это может быть объяснено следующим образом. При малой толщине пленки сильно сказываются два фактора. Во-первых, в пленках с толщиной до 1.5 нм присутствует окись алюминия. Во-вторых, до 5 нм проявляется “островковая” структура металлических пленок. Оба этих фактора существенно влияют на проводимость и уменьшают ее величину. Это влияние можно учесть, подставляя в формулу (4) не σ_0 , а $k \cdot \sigma_0$, где $k < 1$.

Таким образом, напыленные на стеклянной подложке пленки алюминия можно использовать в качестве поглотителей в датчиках импульсов СВЧ излучения.

Испытания пленок в датчике микроволнового излучения проводились следующим образом. Акустический датчик располагался в волновом поле передающей антенны СВЧ генератора (рис.1). СВЧ импульс направлялся на входное окно датчика и через кварцевое стекло 1 падал на алюминиевую пленку 2, напыленную на внутреннюю поверхность стекла. В экспериментах использовались трехслойные структуры с пленками толщиной 2.5, 3.5 и 5.0 нм. Алюминиевая пленка контактировала со слоем жидкости 3. В пленке и граничащей с ней жидкости происходило преобразование СВЧ излучения в акустический импульс, который регистрировался с помощью широкополосного акустического приемника 4. Толщина слоя дистиллированной воды составляла 4 мм. Такой слой воды обеспе-

чивал 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 пьезопленка ПВДФ 28 мкм приклеенная на поверхность материала с акустическим импедансом, близким к импедансу ПВДФ. Использованный приемник позволял регистрировать акустические сигналы в полосе порядка 20 МГц с чувствительностью 5 мкВ/Па, что определялось резонансом в толщине ПВДФ пленки и ее пьезоэлектрическими модулями. Сигнал приемника регистрировался цифровыми осциллографами.

Источником импульсов СВЧ излучения являлся релятивистский генератор поверхностной волны миллиметрового диапазона [4]. Эта установка обеспечивала импульсы излучения мощностью до 3 МВт с длиной волны порядка 8 мм. Энергия в импульсе не превышала 5 мДж. Форма огибающей СВЧ импульса, зарегистрированная охлаждаемым жидким азотом германиевым детектором на горячих носителях, представлена на рис.3а.

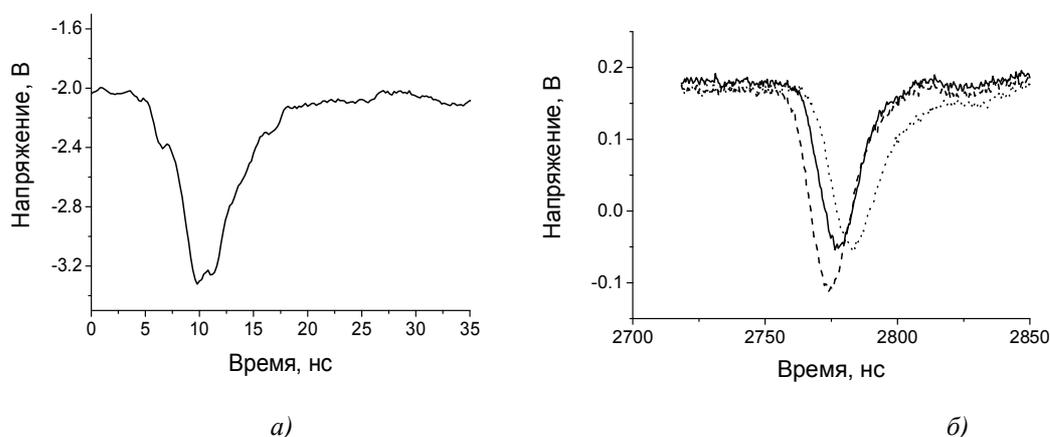


Рис. 3. Профили зарегистрированных сигналов: а) огибающая СВЧ импульса, зарегистрированная детектором на горячих носителях; б) профили акустических импульсов, полученные при различной толщине пленки, сплошная линия соответствует толщине 2.5 нм, штриховая – 3.5 нм, пунктирная – 5.0 нм

Длительность огибающей СВЧ импульсов, измеренная по уровню 0.5 от пикового значения составляла 5.2 ± 0.4 нс, что определялось длительностью импульса тока. Акустический датчик располагался на расстоянии 10 см от конической рупорной антенны генератора диаметром 40 мм. Профили зарегистрированных акустических сигналов показаны на рис.3б. Импульсы имеют время задержки порядка 2.7 мкс по отношению к импульсу, зарегистрированному детектором на горячих носителях, что обусловлено распространением акустического импульса через слой воды толщиной 4 мм. Акустические сигналы имеют одинаковую форму однополярного импульса длительностью около 20 нс, измеренной по уровню 0.5, что соответствует полосе пропускания приемника, равной 20 МГц. Амплитуда сигналов несколько различается, что соответствует различным уровням поглощения при данных толщинах пленок. Наиболее эффективное преобразование в данном случае получается при толщине пленки, равной 3.5 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.Г., Вдовин В.А., Карабутов А.А.//Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т.46. № 8-9. С. 787.
2. В.Г. Андреев, В.А. Вдовин // ПТЭ. 2009. №2. С. 81-85.
3. Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. М. Физматгиз. 1958. 570 с.
4. Афонин А.М., Вдовин В.А., Канавец В.И. и др.//РЭ. 1987. Т. 31. № 1. С. 118.