

УДК 532.4,621.372.413

## МИКРОВОЛНОВЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ТОЛЩИНЫ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОКРЫТИЙ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ОБЪЕМНЫМ РЕЗОНАТОРОМ АСИММЕТРИЧНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ

© В. В. Волков, М. А. Суслин<sup>1</sup>*Статья поступила 16 февраля 2016 г.*

Рассмотрено использование асимметричных возмущений в цилиндрическом объемном резонаторе с основным колебанием  $H_{011}$  для определения толщины и диэлектрической проницаемости покрытия на металле. Проведен численный анализ пространственных флуктуаций электрического поля  $H_{011}$  методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics для пустой и возмущенной полостей. Исследования проведены с помощью оригинальной установки с использованием скалярного измерителя P2M-18. Конструкция резонатора предусматривала фильтрацию паразитных колебаний. Предложены варианты измерительных схем с возмущенной и пустой полостями для проверки используемого метода.

**Ключевые слова:** цилиндрический объемный резонатор; покрытие на металле; электромагнитное поле.

Для ряда областей науки и техники актуальна задача измерения толщины и диэлектрических свойств покрытий на металле, а также контроля полупроводниковых пленок, защитных лакокрасочных покрытий на низкоомных подложках и др. По измеренной совместно с толщиной диэлектрической проницаемости покрытия можно косвенным путем определить и другие физические характеристики материала: плотность, содержание компонентов в гетерогенных системах, влажность, степень полимеризации и старения, механические параметры, радиопрозрачность и др. [1].

В работе [2] предложен способ определения диэлектрической проницаемости и толщины покрытий на металле с использованием СВЧ-электромагнитного поля бегущей поверхностной волны над поверхностью диэлектрик – металл. Искомые параметры находят по коэффициенту затухания, измеренного к нормали поверхности диэлектрик – металл на двух длинах волн. Недостаток метода — сложность создания СВЧ электромагнитного поля бегущей волны типа  $E$  в одномодовом режиме (длина волны должна быть соизмерима с толщиной покрытия).

СВЧ измерительные средства с цилиндрическим резонаторным преобразователем  $E$ -типа, например с колебанием  $E_{012}$ , позволяют измерять и толщину, и электропроводность пленок [3]. Однако при устранении гальванического контакта между боковой и торцевой стенками продольная составляющая поверхностного тока на боковой стенке резонатора разрывается, что ведет к неконтролируемому изменению резонансной частоты и добротности колебания  $E_{012}$ .

Устранение гальванического контакта между боковой и торцевой стенками в резонаторных измерителях  $H$ -типа, например с колебаниями  $H_{011}$  и  $H_{013}$ , кольцевой ток не меняет. Но при этом показания прибора зависят только от толщины пленки [3].

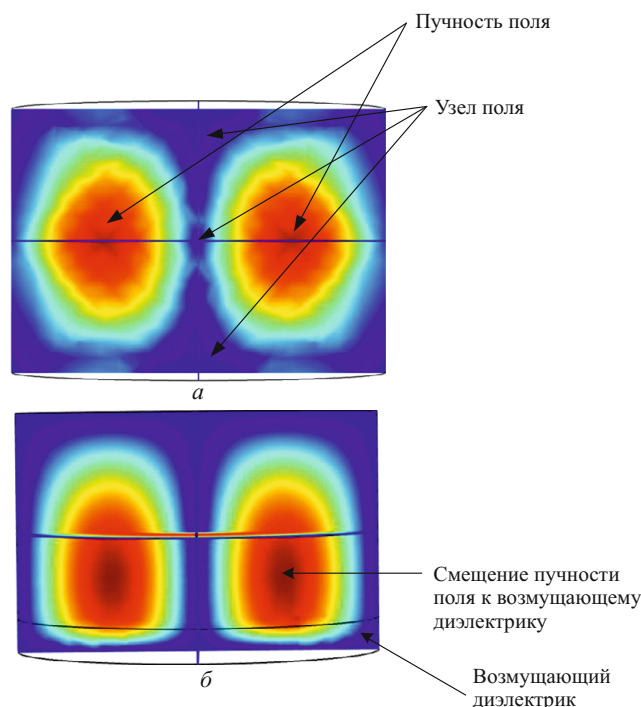
Цель работы — создание и использование микроволнового измерителя повышенной чувствительности с цилиндрическим объемным резонатором (ЦОР) асимметричного возмущения для определения толщины и диэлектрической проницаемости покрытия на металле.

Силовые линии электрического поля пространственного колебания  $H_{011}$  невозмущенного резонатора представляют собой замкнутые концентрические окружности. Напряженность поля максимальна на середине длины  $l$  и радиуса  $a$  ЦОР и равна нулю на оси и у торцевых стенок резонатора. Результат численного анализа поля методом конечных элементов с помощью программы COMSOL Multiphysics представлен на рис. 1,  $a$ .

На рис. 1,  $b$  показан результат численного моделирования электрического поля пространственного колебания  $H_{011}$  ЦОР, возмущенного диэлектриком, расположенным у одной из торцевых стенок резонатора. В этом случае силовые линии поля по-прежнему представляют собой замкнутые концентрические окружности (но смещенные от центра к возмущающему диэлектрику). Изменение распределения силовых линий позволяет определить как толщину, так и диэлектрическую проницаемость покрытия на металле.

На рис. 2 показаны схемы определения толщины покрытия на металле с использованием измерителя  $H$ -типа с пустым ЦОР. По разности резонансных час-

<sup>1</sup> Военно-учебный научный центр ВВС ВВА, г. Воронеж, Россия.

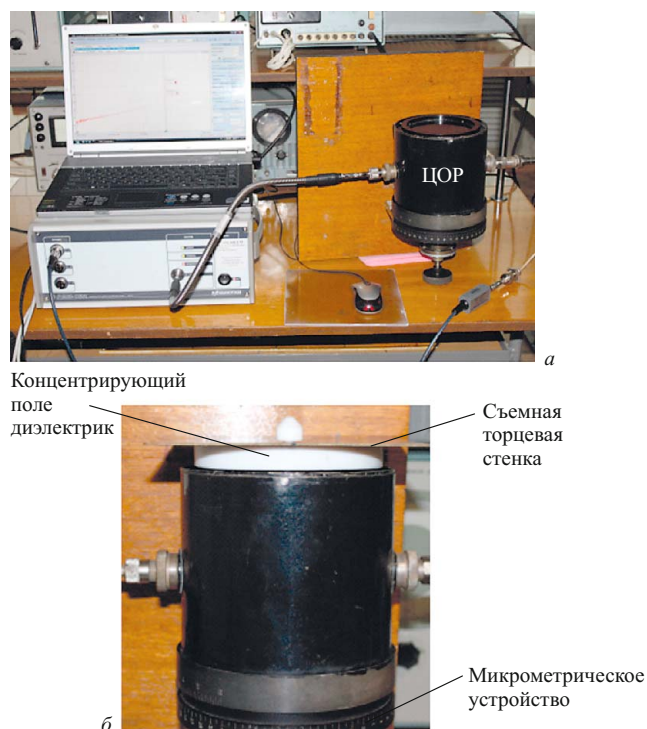


**Рис. 1.** Результат моделирования электрического поля колебания  $H_{011}$  пустого (а) и возмущенного диэлектриком (б) резонаторов

тот резонатора  $\Delta f_{21} = f_2 - f_1$  определяют толщину покрытия  $\Delta h$ .

В оригинальной экспериментальной установке (рис. 3) применяли скалярный измеритель цепей Р2М-18 (точность измерения мощности — 0,001 дБ, частоты — 0,001 МГц, шаг сканирования частоты — 1 МГц). Полученные данные сохраняли в электронном виде.

Геометрические параметры измерительного резонатора: диаметр — 152, длина — 112 мм; возбуждающая и приемная петли выступали над поверхностью стенки примерно на 1,5 – 2,0 мм. Поскольку отношение квадрата диаметра к квадрату длины ЦОР составляло 2,25, это упрощало выделение рабочего колеба-

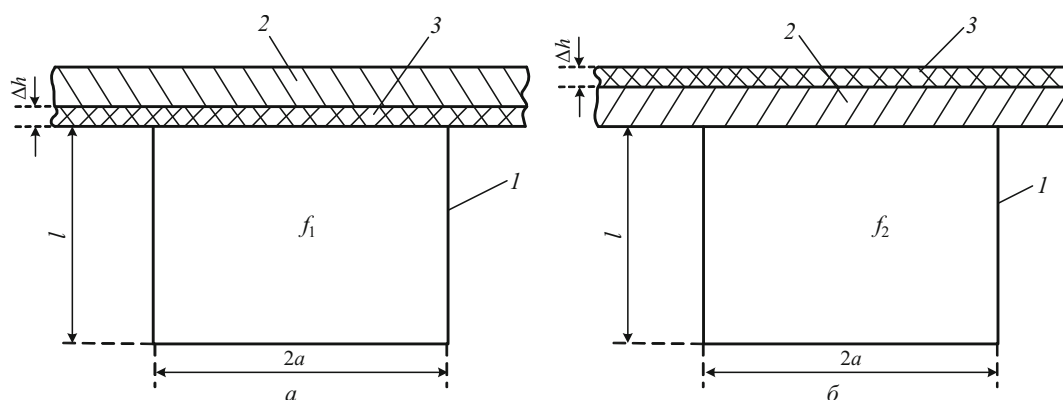


**Рис. 3.** Экспериментальная установка (а) и ЦОР с возмущающим диэлектриком (б)

ния  $H_{011}$  из других пространственных мод электромагнитной волны.

Параметры концентрирующего диэлектрика выбирали эмпирически. Его потери на СВЧ должны быть минимальными, с тем чтобы добротность резонатора оставалась высокой. В исследованиях в качестве возмущающего диэлектрика использовали ФТ-4 (высота — 15 мм).

Схемы для определения толщины покрытия с возмущенным ЦОР представлены на рис. 4. По разности резонансных частот резонатора, возмущенного диэлектриком,  $\Delta f'_{21} = f'_2 - f'_1$ , которая не зависит от диэлектрической проницаемости покрытия, определяют толщину покрытия  $\Delta h$  ( $f'_1$  — резонансная частота для измерительной схемы с возмущенным ЦОР, у которо-



**Рис. 2.** Схемы определения толщины покрытия на металле с пустым ЦОР с открытым торцом к покрытию (а) и металлу (б): 1 — ЦОР; 2 — металл; 3 — исследуемое покрытие

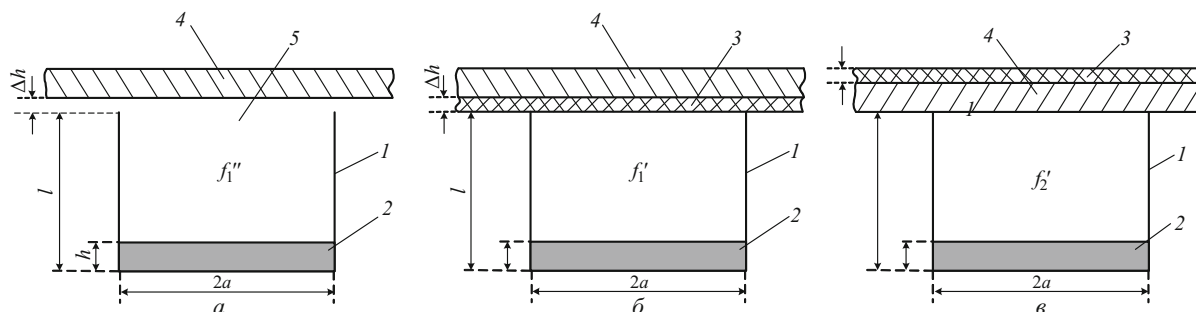


Рис. 4. Схемы определения толщины покрытия на металле с возмущенным ЦОР с открытым торцом к воздушному зазору (а), покрытию (б) и металлу (в): 1 — ЦОР; 2 — возмущающий диэлектрик; 3 — исследуемое покрытие; 4 — металл; 5 — воздушный зазор

го одна из торцевых стенок выполнена в виде металлической подложки с воздушным зазором).

Значения  $\Delta f'_{21}$  меньше  $\Delta f_{21}$  (рис. 5), что объясняется смещением максимума напряженности поля к возмущающему диэлектрику (поле ослабляется у противоположной торцевой стенки по сравнению с полем в пустом ЦОР). Тарировка зависимости  $\Delta f'_{21}$  от толщины покрытия  $\Delta h$  повышает точность измерений. Результаты представлены для покрытия (на металле) из поливинилхлорида (относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_n = 3,2 - 3,4$ , толщина —  $0,2 - 1,2$  мм).

Значения  $\Delta f_{21}$  (кривая 1) рассчитывали по формуле

$$f_{011}(l) - f_{011}(l + \Delta h) = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{3,832}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} - \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{3,832}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l + \Delta h}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $f_{011} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{x_1^{(0)}}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2}$  — резонансная частота

колебания  $H_{011}$  пустого ЦОР;  $x_1^0 = 3,832$  — характеристическое число;  $a$  и  $l$  — радиус и длина резонатора;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света в вакууме.

На рис. 6 представлены измерительные схемы ЦОР, у которого одна из торцевых стенок, где расположен возмущающий диэлектрик, заменяется покрытием в различных вариантах. Так как максимум напряженности электрического поля смещается к возмущающему диэлектрику, разность частот  $\Delta f_{43} = f_4 - f_3$  (см. рис. 6, а, б) будет зависеть от толщины  $\Delta h$  и диэлектрической проницаемости покрытия  $\epsilon_n$ . При этом совместный анализ резонансных схем позволяет исследовать влияние  $\Delta h$  и  $\epsilon_n$ .

На рис. 7 показаны экспериментальные зависимости разности резонансных частот от толщины покрытия.

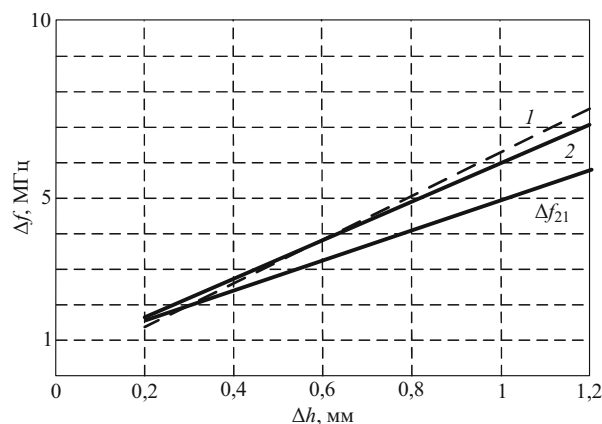


Рис. 5. Зависимость разности частот  $\Delta f_{21}$  от толщины покрытия  $\Delta h$ : 1 — расчет; 2 — эксперимент

Разность  $\Delta f_{46} = f_4 - f_6$ , зависящая только от  $\Delta h$ , больше  $\Delta f_{21}$  (см. рис. 5), т.е. чувствительность к зазору в случае возмущенного резонатора выше. Разность резонансных частот  $\Delta f_{65} = f_6 - f_5$  определяет влияние диэлектрической проницаемости  $\epsilon_n$  покрытия. При этом (см. рис. 7)

$$\Delta f_{43} \approx \Delta f_{46} + \Delta f_{65}. \quad (2)$$

Смещение максимума напряженности электрического поля увеличивается с ростом диэлектрической проницаемости  $\epsilon_d$  и высоты  $h$  возмущающего резонатор диэлектрика. Для оценки влияния  $\epsilon_d$  и  $h$  на измерение параметров покрытия определяли степень изменения электромагнитного поля при заданных толщине покрытия  $\Delta h'$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon'_n$  (см. рис. 6, в).

Степень изменения электромагнитного поля, характеризующая влияние возмущающего диэлектрика, имеет смысл постоянной  $\alpha$  измерительной ячейки:

$$E_\phi / E_{\phi 0} = \alpha, \quad (3)$$

где  $E_{\phi 0}$  и  $E_\phi$  — составляющие электрического поля пустого и возмущенного диэлектриком резонаторов соответственно.

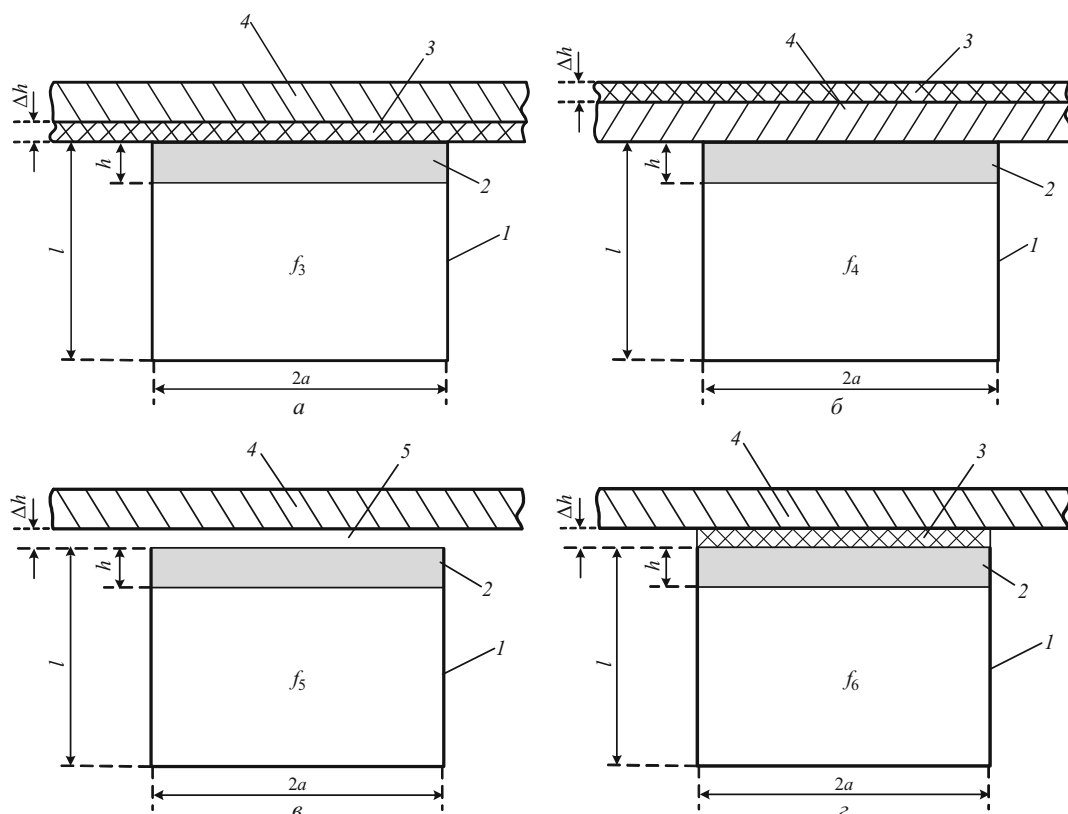


Рис. 6. Измерительные схемы с возмущенным ЦОР: 1 — ЦОР; 2 — возмущающий диэлектрик; 3 — исследуемое покрытие; 4 — металл; 5 — воздушный зазор

Приращение частоты находили методом малых возмущений резонатора с возмущающим диэлектриком. Приравняв это приращение разности частот  $\Delta f_{65}$  (абсолютный уход частоты за счет влияния  $\epsilon'_n$ ), имеем

$$\Delta f_{65}/f_2 = \Delta W/W_0, \quad (4)$$

где  $\Delta W = (\epsilon'_n - 1) \int_0^a \int_0^{l'} \int_0^{2\pi} \alpha^2 E_{\phi 0}^2 r dr dz d\phi$  — приращение энергии ЦОР за счет диэлектрика;  $W_0 = \epsilon_0 \int_0^a \int_0^{l'} \int_0^{2\pi} E_{\phi 0}^2 r dr dz d\phi$  — энергия пустого ЦОР;  $E_{\phi 0} = A J_1 \left( \frac{3,832}{a} r \right) \sin \left( \frac{\pi}{l'} z \right)$  — модуль электрической составляющей  $E_{\phi 0}$ ;  $f_2$  — резонансная частота пустого ЦОР без возмущения;  $r$  и  $z$  — радиус и направление оси резонатора;  $\phi$  — угловой параметр ЦОР;  $A$  — амплитуда возмущающего поля;  $J_1 \left( \frac{3,832}{a} r \right)$  — функция Бесселя 1-го рода первого порядка;  $l' = 1 + \Delta h'$ .

Таким образом, для постоянной измерительной ячейки можно записать:

$$\alpha = \sqrt{\frac{3l'^3 \Delta f_{65}}{(\epsilon'_n - 1) 2\pi^2 \Delta h'^3 f_2}}. \quad (5)$$

Применение возмущающего электрического поля диэлектрика в резонаторе с основным колебанием  $H_{011}$  позволяет определить толщину  $\Delta h$  и диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_n$  покрытия на металле. Так, по разности частот  $\Delta f'_{21}$  определяют  $\Delta h$ , по измеренной  $\Delta f_{43}$  и  $\Delta h$  —  $\Delta f_{65}$ , а по  $\Delta f_{65}$  на основе модели (4) и постоянной измерительной ячейки  $\alpha$  — диэлектрическую проницаемость покрытия  $\epsilon_n$ , используя зависимость

$$\epsilon_n = \frac{\Delta f_{65}}{f_2} \frac{3l'^3}{2\pi^2 \alpha^2 \Delta h^3} - 1. \quad (6)$$

В практических задачах (например, при измерении толщины и диэлектрических свойств лакокрасочных покрытий) кривизна поверхности контроля вызывает деформацию торцевой стенки резонатора, что эквивалентно появлению в ЦОР дополнительного возмущенного объема. Поправку на криволинейность можно определить из анализа третьего информативного параметра — мощности вытекающей поверхностной волны.

На рис. 8 представлена схема для определения изменения добротности за счет влияния вытекающей поверхностной волны.

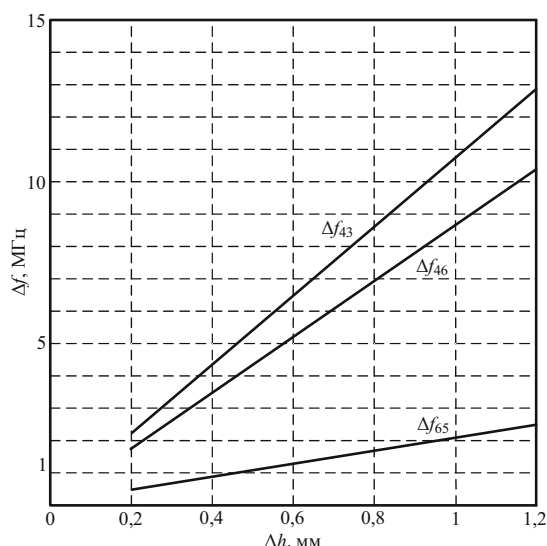


Рис. 7. Экспериментальные зависимости разности резонансных частот  $\Delta f$  от толщины диэлектрического покрытия  $\Delta h$

Пусть  $H_r$  и  $H_z$  — составляющие магнитного поля колебания  $H_{011}$ .  $H_r = 0$  при  $r = a$ , где  $a$  — радиус резонатора. Модуль  $H_z$  имеет вид:

$$H_z = AJ_0\left(\frac{3,832}{a}r\right)\sin\left(\frac{\pi}{l}z\right), \quad (7)$$

где  $J_0\left(\frac{3,832}{a}r\right)$  — функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка;  $A$  — амплитуда возмущающего поля.

Для потока мощности поверхностной волны [4] запишем

$$\Pi_n = 0,5Z_E|H_z|^2, \quad (8)$$

где  $Z_E$  — волновое сопротивление поверхностной волны,  $H_z$  — модуль магнитной составляющей при  $z = \Delta h$ .

Если толщина исследуемого слоя мала ( $\Delta h/\lambda \ll 1$ , где  $\lambda$  — длина волны), то в направляющей концентрирующей системе распространяется только волна основного типа. Тогда для волнового сопротивления поверхностной волны имеем

$$Z_E = W \operatorname{tg}(k_1 \Delta h), \quad (9)$$

$$k_1 = \omega_0 \sqrt{\epsilon_n \mu_0}, \quad (10)$$

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость покрытия;  $W = \sqrt{\mu_0/\epsilon_n}$ ;  $\omega_0$  — резонансная угловая частота.

При малой толщине слоя  $k_1 \Delta h \ll 1$ . С учетом (8) – (10) получим

$$\operatorname{tg}(k_1 \Delta h) \approx k_1 \Delta h. \quad (11)$$

Тогда мощность излучения поверхностной волны с площади  $S = 2\pi a \Delta h$

$$P_{\text{изл}}^n = \Pi_n S = \pi a \mu_0 \omega_0 \Delta h^2 H_z^2 \quad (12)$$

не зависит от  $\epsilon_n$ , а определяется толщиной  $\Delta h$ .

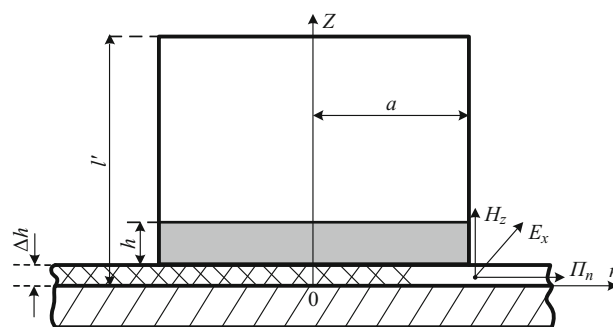


Рис. 8. Схема для анализа вытекающей поверхностной волны

Поскольку в качестве материала покрытия использовали поливинилхлорид ( $\epsilon_n = 3,2 - 3,4$ , толщина —  $0,2 - 1,2$  мм) с малыми СВЧ-потерями, для  $\Delta h = 1$  мм,  $\epsilon_n = 3,4$  и  $f_0 = 2701$  МГц  $k_1 \Delta h = 0,103 \ll 1$ , что подтверждает корректность выражения (12).

Парциальная добротность за счет влияния вытекающей поверхностной волны

$$Q_{\text{парц}}^n = \frac{\omega_0}{P_{\text{изл}}^n} \frac{\mu_0}{2} \int_V (H_z^2 + H_r^2) dV = \omega_0 \frac{\mu_0 u_1}{2P_{\text{изл}}^n}, \quad (13)$$

где  $V$  — объем резонатора;  $P_{\text{изл}}^n = \Pi_n S$ ;

$$u_1 = A^2 l^2 \pi a^2 J_0^2(3,832) \left(1 + \frac{\pi^2 a^2}{3,832^2 l^2}\right) [4].$$

В конечном виде для  $Q_{\text{парц}}^n$  имеем

$$Q_{\text{парц}}^n = \frac{1}{4\pi^2 \Delta h^4} l^3 a \left(1 + \frac{\pi^2 a^2}{3,832^2 l^2}\right). \quad (14)$$

Таким образом, в измерительной системе на основе ЦОР с асимметричным возмущением в виде диэлектрика с малыми потерями параметр  $Q_{\text{парц}}^n$  зависит только от толщины покрытия,  $\Delta f_{21}$  — от высоты диэлектрика и изменения объема резонатора, вызванного деформацией стенки за счет кривизны контролируемой поверхности, а  $\Delta f_{65}$  — от двух вышеуказанных величин и диэлектрической проницаемости исследуемого покрытия. Вариация геометрических размеров ЦОР позволяет реализовать микроволновый измеритель в заданном диапазоне толщин покрытий (уменьшение размеров ЦОР, т.е. увеличение резонансной частоты, приведет к пропорциональному смещению диапазона измерения толщин в сторону меньших значений) и осуществлять неразрушающий локальный контроль толщины и диэлектрической проницаемости покрытия с поправкой на кривизну поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. — Изд. 3-е, перераб. и доп. / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2005. — 656 с.
2. Пат. 2193184 РФ, МПК G01 N 22/00, G01R27/26. СВЧ-способ определения диэлектрической проницаемости и толщины диэлектрических покрытий на металле / Суслин М. А., Дмитриев Д. А.; заявитель и патентообладатель ТВАИИ. № 2001102116/09; заявл. 23.01.01; опубл. 20.11.02. Бюл. № 32.
3. Гордиенко Ю. Е., Гуд Ю. И., Дудкин Ю. А., Старостенко В. В. Микроволновый измеритель толщины пленок на низкоомных подложках / Приборы и техника эксперимента. 1981. № 3. С. 231 – 234.
4. Федоров Н. Н. Основы электродинамики. — М.: Высшая школа, 1980. — 399 с.

## REFERENCES

1. Klyuev V. V. (ed.). Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika. Spravochnik [Nondestructive testing and diagnostics. Reference book]. 3<sup>rd</sup> Edition. — Moscow: Mashinostroenie, 2005. — 656 p. [in Russian].
2. RF Pat. 2193184, MPK G01 N 22/00, G01R27/26. SVCh-sposob opredeleniya diélektricheskoi pronitsaemosti i tolshchiny diélektricheskikh pokrytii na metalle [Microwave detection method of dielectric permeability and dielectric coating thickness on a metal] / Suslin M. A., Dmitriev D. A.; appl. and owner TVAIL. N 2001102116/09; appl. 23.01.01; publ. 20.11.02. Byull. Otkryt. Izobret. N 32 [in Russian].
3. Gordienko Yu. E., Gud Yu. I., Dudkin Yu. A., Starostenko V. V. Mikrovolnovyi izmeritel' tolshchiny plenok na nizkoomnykh podlozhkakh [Microwave measuring instrument of films thickness on low-resistance substrates] / Pribory Tekhn. Éksper. 1981. N 3. P. 231 – 234 [in Russian].
4. Fedorov N. N. Osnovy élektroinamiki [Foundations of electrodynamics]. — Moscow: Vysshaya shkola, 1980. — 399 p. [in Russian].