

СВЧ СЕНСОР БЫСТРЫХ ТРАНСФОРМАЦИЙ СВОЙСТВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

ЛЮ ЧАН, БОНДАРЕНКО И.Н., ПАНЧЕНКО А.Ю., СЛИПЧЕНКО Н.И.

Анализируется схема СВЧ сенсора, для которой можно создать строгую аналитическую модель. Рассматривается задача описания полей в рабочей области такого сенсора. Представленная схема допускает возможность использования математической модели и для той части задачи, которая относится к трансформации свойств исследуемого объекта. Обсуждаются предварительные результаты расчетов компонент электромагнитного поля в рабочей области сенсора, дается оценка ее размерам.

Ключевые слова: коаксиальная линия; апертура; емкость; граничные условия; собственные функции; собственные числа; компоненты электромагнитного поля.

Key words: coaxial line; aperture; capacity; border conditions; eigenfunctions; eigenvalues; electromagnetic field components.

1. Введение

Методы СВЧ контроля имеют ряд преимуществ. К ним относятся неинвазивность при исследовании биологических объектов *in vivo* и скорость измерений. Первичной информацией является комплексная диэлектрическая проницаемость $\tilde{\epsilon}$, которая в значительной мере зависит от распределения свободной воды и воды, связанной с макромолекулами [1,2]. Скорость процессов создания и разрушения связей может быть высокой, что затрудняет использование биохимических и других методов, требующих подготовки образцов. СВЧ методы позволяют проследивать изменения параметров биообъектов на протяжении всего периода трансформации. Это делает задачу адаптации СВЧ сенсоров для исследования биообъектов актуальной.

Определение передаточной функции СВЧ сенсора является весьма сложной и громоздкой задачей. Наиболее простой путь ее решения – использование численных методов, которые реализуются современными программными средствами. Эти методы дают наглядное представление распределения компонент электромагнитного поля и численные значения параметров для конкретной конструкции сенсора. Однако проследить зависимости, выяснить взаимосвязи с их помощью затруднительно. Требуются многократные повторения вычислений с эвристическим определением тенденций. Поэтому аналитические методы, результатом которых являются, возможно, громоздкие, но читаемые формулы, в этом случае представляются более предпочтительными.

Целью данной работы является поиск и обоснование на качественном уровне типа сенсора, оптимального для слежения за быстрыми трансформациями биообъектов. При этом необходимо решить задачу оптимизации конструкции так, чтобы можно было составить его строгую математическую модель [3].

2. Выбор типа СВЧ сенсора

СВЧ сенсоры находят все более широкое применение в различных областях [4-6]. Как правило, с их помощью определяют значения реальной ϵ' и мнимой ϵ'' части комплексной величины диэлектрической проницаемости $\tilde{\epsilon}$ исследуемого вещества. Современный уровень развития полупроводниковой электроники СВЧ диапазона делает создание таких измерителей экономически целесообразным. Усложняются конструкции сенсоров [7-9], уточняются методы их описания [10-12].

Используются два типа СВЧ преобразователей: волноводный и резонаторный. Волноводный позволяет измерять в некотором диапазоне частот. Это является важным достоинством. Измерение параметров в диапазоне частот дает информацию, которая в данном случае определяется связью молекул воды с макромолекулами биовещества [1,2]. Но чувствительность у волноводных методов существенно ниже, чем у резонаторных.

Наиболее подходящим типом СВЧ преобразователя является четвертьволновой резонатор (ЧР) с сенсором в виде открытой коаксиальной измерительной апертуры (КИА) [13-15] (рис.1).

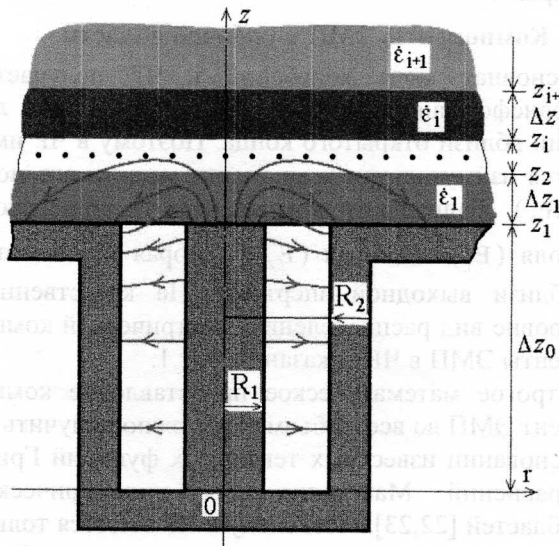


Рис. 1. Схема ЧР с сенсором в виде КИА

Он имеет ряд преимуществ. Значительная часть энергии электрического поля (показано стрелками) находится вне основного резонирующего объема. Поэтому при некоторой потере чувстви-

тельности рабочую область можно расположить вне резонатора. Связь поля резонатора с образом осуществляется через КИА, которую можно снабдить диэлектрическими вставками, кольцами, позволяющими изменять передаточную функцию. Размеры КИА могут быть существенно меньше длины волны [16-18]. Поэтому сенсор в виде КИА может работать в широком диапазоне частот и с его помощью можно исследовать объекты, вплоть до наноразмерных [7,19,20]. Еще одно достоинство ЧР состоит в том, что он допускает изменение рабочей частоты в широком диапазоне. Для этого достаточно изменять его индуктивную, закороченную часть (Δz_0 на рис.1). Это в целом способствует повышению достоверности любого вида косвенных измерений [4,5,16,21]. В данном случае это достоинство носит принципиальный характер.

Основными критериями при определении формы рабочей области сенсора можно считать возможность неинвазивной диагностики образца *in vivo* и возможность аналитического представления параметров сенсора. Они определяются через описание компонент электромагнитного поля (ЭМП) в рабочей области. Поиск аналитических представлений полей наиболее доступен в тех случаях, когда образующие рабочей области совпадают с координатными поверхностями. С учетом указанных критериев наиболее рационально выполнить сенсор в виде КИА в плоском экране.

3. Компоненты ЭМП в рабочей области

Основная мода колебаний в ЧР получается трансформацией ТЕМ волны коаксиальной линии вблизи открытого конца. Поэтому в ЧР имеется азимутальная компонента магнитного поля (H_ϕ), радиальная компонента электрического поля (E_r) и осевая (E_z), которая усиливается вблизи выходной апертуры. На качественном уровне вид распределения электрической компоненты ЭМП в ЧР показан на рис.1.

Строгое математическое представление компонент ЭМП во всем объеме ЧР можно получить на основании известных тензорных функций Грина уравнений Максвелла для цилиндрических областей [22,23]. Поскольку в ЧР имеется только одна компонента магнитного поля, то наиболее просто решение записать для неё. Общее выражение имеет вид:

$$\vec{H}(\vec{r}, z) = \int_V \Gamma^M(\vec{r}, \vec{r}') \vec{j}^M(\vec{r}') dV.$$

При одной компоненте магнитного поля H_ϕ связана только с одной составляющей источника j_ϕ^M . Поэтому из 9 компонент тензора функции Грина для $\vec{H}(\vec{r}, z)$ достаточно одной поперечной. При отсутствии вариаций по азимуту она упрощается до

$$G_{n\phi\phi}(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{1}{\lambda_n k_n^2} \frac{\partial}{\partial r} \chi_n(r) \frac{\partial}{\partial r'} \chi_n(r') g_n(z, z'),$$

где $\chi_n(r)$ – собственные функции; λ_n – нормы собственных функций; k_n – собственные числа; g_n – осевая компонента функции Грина.

Собственные функции χ представляются линейными комбинациями функций Бесселя-Неймана вида:

$$\chi_n(r, R) = [N_0(k_n r) J_0(k_n R) - J_0(k_n r) N_0(k_n R)],$$

где R – граница области.

Если область не ограничена, ряд k_n становится непрерывным: $0 \leq k < \infty$.

Поскольку ЭМП в данной конструкции проникает только через поверхности поперечного сечения, то магнитные токи j_ϕ^M выражаются через E_r на этих поверхностях:

$$j_s^M = -[\vec{n}_0 \vec{E}] = \begin{cases} -E_r(r, z = z_{i+1}) \\ E_r(r, z = z_i) \end{cases}.$$

Для осевых составляющих функций Грина g_n в общем случае представляет следующий вид:

$$g_n(z, z') = \frac{\gamma_i^{-1}}{\text{sh } \gamma_i \Delta z_i} \begin{cases} \text{ch } \gamma_i (z - z_i) \text{ch } \gamma_i (z_{i+1} - z'), & z < z' \\ \text{ch } \gamma_i (z' - z_i) \text{ch } \gamma_i (z_{i+1} - z), & z > z' \end{cases},$$

где γ_i – продольные постоянные распространения.

Для случая неограниченной области:

$\gamma_i = \sqrt{k^2 - \tilde{\epsilon}_i k_0^2}$, где k_0 – волновое число в свободном пространстве; $\tilde{\epsilon}_i$ – комплексная диэлектрическая проницаемость заполняющего материала i -й области. (Для ограниченной области используется k_n).

Выражение для H_ϕ в i -й неограниченной области имеет вид:

$$H_\phi(r, z) = -j\omega\epsilon_0 \tilde{\epsilon}_i \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\frac{\partial}{\partial r}(\chi_\infty(r)) \frac{\partial}{\partial r'}(\chi_\infty(r'))}{\lambda_\infty k_\infty^2 \gamma_i} 2\pi r' \times \\ \times \left[\frac{\text{ch}[\gamma_i(z_{i+1} - z)]}{\text{sh}(\gamma_i \Delta z_i)} E_r(r', z_i) - \frac{\text{ch}[\gamma_i(z - z_i)]}{\text{sh}(\gamma_i \Delta z_i)} E_r(r', z_{i+1}) \right] dk dr',$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума;

ω – круговая частота.

Если образец представляет собой многослойную структуру, то можно привести все источники на границах слоев к источнику на апертуре. Для этого нужно записать H_ϕ над и под каждой гра-

ницей и приравнять их на основании граничных условий $H_{1\tau} = H_{2\tau}$. На основании $E_{1\tau} = E_{2\tau}$ источники на границах равны. Пределы интегрирования и собственные функции χ также одинаковы. Поэтому одинаковыми должны быть подынтегральные выражения для $H_\phi(r, z_i + 0)$ и $H_\phi(r, z_{i+1} - 0)$. На основании этого получаем коэффициенты связи между $E_r(r', z_{i+1})$ и $E_r(r', z_i)$ в виде «лестничной» структуры:

$$K_i = \cosh(\gamma_i \Delta z_i) \left\{ \operatorname{cth}(\gamma_i \Delta z_i) + \frac{\tilde{\epsilon}_{i+1} \gamma_i}{\tilde{\epsilon}_i \gamma_{i+1}} \operatorname{cth}(\gamma_{i+1} \Delta z_{i+1}) - \frac{\cosh^3(\gamma_{i+1} \Delta z_{i+1})}{K_{i+1}} \right\}^{-1}.$$

На апертуре можно задать распределение $E_r(r', z_1)$ в виде $E_r = U_0 r'^{-1}$, где напряжение U_0 связано с напряжением между проводниками, образующими апертуру U_a как $U_0 = U_a / \ln(R_2 / R_1)$, что позволит определить величину эквивалентной емкости КИА, а значит, и передаточную характеристику сенсора [24]. Этого будет достаточно в большинстве практических приложений.

Можно использовать более строгий, но более громоздкий подход, включающий решение интегрального уравнения относительно $E_r(r', z_1)$ [25]. Но в обоих случаях поле внутри образца рассчитывается по приведенной выше процедуре.

4. Анализ распределений ЭМП КИА

Слоистый образец может быть приближенным представлением биологического объекта в период трансформации его свойств под действием физических или химических факторов, действующих со стороны, противоположной экрану. Но для создания строгой математической модели необходимо исключить влияние процессов на краях образца. Для этого радиальный размер образца должен быть существенно больше области, в которой сосредоточена основная энергия электромагнитного поля апертуры.

На качественном уровне оценить необходимые размеры вставки позволит визуализация распределения компонент ЭМП вблизи апертуры. Для этого используем наиболее простой вариант расчета с заданием источников поля в плоскости апертуры в виде $E_r(z_1) = U_0 r'^{-1}$. В этом случае выражения для распределений H_ϕ , E_r и E_z упрощаются до интегралов по волновым числам:

$$H_\phi(r, z) = -j\omega\epsilon_0 \tilde{\epsilon}_1 U_0 \int_0^\infty \frac{[J_0(\kappa R_1) - J_0(\kappa R_2)] J_1(\kappa r)}{\gamma_1 \exp[\gamma_1(z - z_1)]} d\kappa,$$

$$E_r(r, z) = -U_0 \int_0^\infty \frac{[J_0(\kappa R_1) - J_0(\kappa R_2)] J_1(\kappa r)}{\exp[\gamma_1(z - z_1)]} d\kappa,$$

$$E_z(r, z) = U_0 \int_0^\infty \frac{[J_0(\kappa R_1) - J_0(\kappa R_2)] J_0(\kappa r)}{\gamma_1 \exp[-\gamma_1(z - z_1)]} \kappa d\kappa.$$

Для расчетов выберем наиболее простые условия: размеры апертуры $R_1 = 1$ мм, $R_2 = 2$ мм, напряжение $U_0 = 1$ В, рабочая частота ЧР $\omega = 2\pi \cdot 10^{10}$ Гц, диэлектрическая проницаемость вставки $\tilde{\epsilon}_1 = 3 + i0,001$. Размеры образца существенно больше размеров апертуры.

На рис. 2,3 представлены распределения магнитной компоненты ЭМП – $H_\phi(r, z)$ [А/м] и радиальной компоненты электрического поля КИА $E_r(r, z)$ [кВ/м].

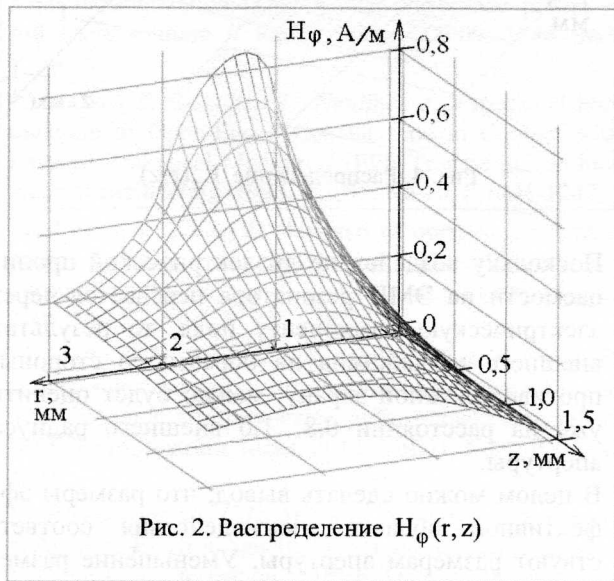


Рис. 2. Распределение $H_\phi(r, z)$

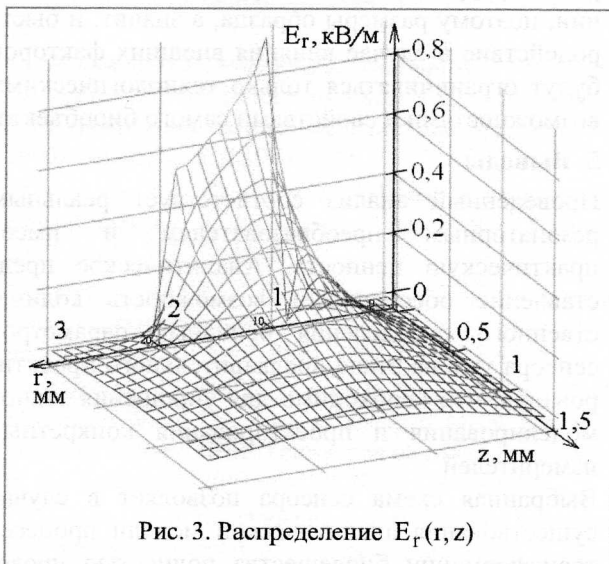


Рис. 3. Распределение $E_r(r, z)$

Основная энергия полей сосредоточена в области, прилегающей к апертуре, причем радиальная компонента электрического поля сконцентрирована в большей степени.

Осевая компонента электрического поля $E_z(r, z)$ в радиальном направлении затухает также быстро, но вдоль оси этот процесс идет медленнее (рис.4.).

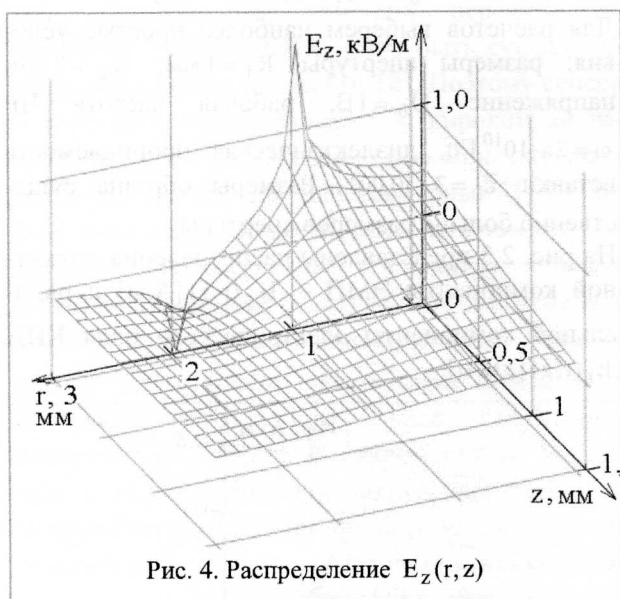


Рис. 4. Распределение $E_z(r, z)$

Поскольку воздействие диэлектрической проницаемости на ЭМП резонатора передается через электрическую компоненту поля, то результат внешнего воздействия на образец со стороны, противоположной экрану, можно будет оценить уже на расстоянии 0,8...1,0 внешнего радиуса апертуры.

В целом можно сделать вывод, что размеры эффективной области взаимодействия соответствуют размерам апертуры. Уменьшение размеров апертуры не имеет теоретических ограничений, поэтому размеры образца, а значит, и быстроедействие в случае влияния внешних факторов будут ограничиваться только технологическими возможностями и свойствами самого биообъекта.

5. Выводы

Проведенный анализ соответствует реальным резонаторным преобразователям и имеет практическую ценность. Аналитическое представление обеспечивает возможность количественного определения основных параметров сенсора уже на этапе предварительного проектирования, что необходимо для упрощения этапов моделирования и проектирования конкретных измерителей.

Выбранная схема сенсора позволяет в случае существования аналитической модели процесса трансформации биовещества полностью провести все этапы теоретической градуировки сенсора.

Модельный расчет в данной работе проводился для рабочей частоты 10 ГГц. Отметим, что уменьшение рабочей частоты не окажет принци-

пиального влияния на результаты. Поэтому полезным для практического использования является оценка рабочей области для частоты, близкой к частоте релаксации свободной воды. Связь воды с макромолекулами биовещества приведет к снижению реальной части диэлектрической проницаемости и частоты релаксации. В этом случае не менее важным информативным параметром, чем сдвиг рабочей частоты, будет изменение добротности и частотный ход этих параметров. В совокупности эти факторы обеспечат наибольшую информативность измерений.

Литература: 1. Щеголева Т.Ю. Гидратное окружение и структура макромолекул // Успехи современной биологии. 1996. Т.116, №6. С.700-714. 2. Щеголева Т.Ю. Исследование биологических объектов в миллиметровом диапазоне радиоволн. К.: Наук. думка, 1996. 182 с. 3. Panchenko A.Yu., Slipchenko N.I., Borodkina A.N. On the development of a practical technique of theoretical calibration of resonant sensors for near-field microwave diagnostics // Telecommunication and Radio Engineering. 2014. V.73, №15. P. 1397-1407. 4. Hyde M.W., Havrilla M.J. A broadband, nondestructive microwave sensor for characterizing magnetic sheet materials // IEEE Sensors J. 2016. V.16, No.12. P. 4740-4748. 5. Kempin M., Ghasr M.M., Case J., Zoughi R. Modified waveguide range for evaluation of stratified composites // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2014. V.63, No.6. P. 1524-1534. 6. Kaatz U. Techniques for measuring the microwave dielectric properties of materials // Metrologia, 2012. Vol.47, No.2. P. S91-S113. 7. Hyde M. W. IV, Havrilla M. J., Bogle A. E. Nondestructive Determination of the Permittivity Tensor of a Uniaxial Material Using a Two-Port Clamped Coaxial Probe // IEEE Trans. Microwave Theory and Technique. 2016. Vol.64, No.1. P. 239-246. 8. Cenanovic A. Schramm M., Schmidt L. Measurement setup for non-destructive complex permittivity determination of solid materials using two coupled coaxial probes // IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. 2011. P. 1-4. 9. Hyde M. W. et al. Nondestructive electromagnetic material characterization using a dual waveguide probe: A full wave solution // Radio Science. 2009. V.44, №3, P. 10-14. 10. Alanen E., Lahtinen T., Nuutinen J. Variational Formulation of Open-Ended Coaxial Line in Contact with Layered Biological Medium // IEEE Transaction on biomedical engineering. 1998. Vol.45, No.10. P.1241-1247. 11. Huang R., Zhang D. Analysis of open-ended coaxial probes by using a two-dimensional finite-difference frequency-domain method // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2008. Vol.57, No.5. P. 931-939. 12. Maftooli H., Karami H.R., Sadeghi S.H.H., Moini R. Output signal prediction of an open-ended coaxial probe when scanning arbitrary-shape surface cracks in metals // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2012. Vol.61, No.9. P. 2384-2391. 13. Poumaropoulos C.L., Misra D. A Study on the Coaxial Aperture Electromagnetic Sensor and Its Application in Material Characterization // IEEE Transaction on instrumentation and measurement. 1994. Vol.43, No.2. P.111-114. 14. Blackham D.V., Pollard R.D. An Improved Technique for Permittivity

Measurements Using a Coaxial Probe // IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. 1997. Vol.46, No.5. P.1093-1099. **15.** Gregory A.P., Clarke R.N. Dielectric metrology with coaxial sensors/ A. P.Gregory, // Meas. Sci. Technol. 2007. No.18. P.1372-1386. **16.** McLaughlin B.L., Robertson P.A. Miniature open-ended coaxial probes for dielectric spectroscopy applications // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. No.40. P.45-53. **17.** Nozokido T., Bae J., Mizuno K. Scanning Near-Field Millimeter-Wave Microscopy Using a Metal Slit as a Scanning Probe // IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique. 2001. Vol.49, No.3. P.491-499. **18.** Panchenko A.Yu. Modeling a small aperture resonator type microwave meter of substance parameters // Telecommunications and Radio Engineering. 1998. V.52 No.8. P. 118-121. **19.** Wen Mingming. Ch. Liu, Panchenko A.Yu., Slipchenko N.I. Evaluation of influence of microwave radiation sensor in the form of an open end of the coaxial line on its metrological characteristics // Telecommunications and Radio Engineering. 2015. V.74, No.15. P.1355-1366. **20.** Лю Чан, Панченко А.Ю., Слипченко Н.И., Зайченко О.Б. Ближнеполевой коаксиальный сенсор открытого типа. Оценка пространственной разрешающей способности измерительной апертуры // Вестник НТУ КПИ. Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. 2017. Вып.71. С.17-24. **21.** Hosseini M. H. Heidar H., Shams M. H. Wideband Nondestructive Measurement of Complex Permittivity and Permeability Using Coupled Coaxial Probes // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2017. V.66, №. 1. P. 148-157. **22.** Панченко Б.А. Тензорные функции Грина уравнений Максвелла для цилиндрических областей // Радиотехника. 1970. Вып. 15. С. 82-91. **23.** Tai C.T. Dyadic Green's functions for a coaxial line. IEEE Trans. of Antennas and Propagation. 1983. Vol.48, No.2, P. 355-358. **24.** Гордиенко Ю.Е., Панченко А.Ю., Фар Р.С. Приближение заданного поля в задачах определения характеристик резонаторных СВЧ – датчиков апертурного типа // Радиотехника. 1998. Вып.107. С. 93-103. **25.** Лю Чан, Панченко А. Ю., Слипченко Н. И., Зайченко О. Б. Коаксиальный сенсор открытого типа. Интегральное уравнение электрического поля в плоскости апертуры // Вестник НТУ КПИ. Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. 2017. Вып.69. С.11-16.

Transliterated bibliography:

1. Shhegoleva T.Ju. Gidratnoe okruzhenie i struktura makromolekul // Uspehi sovremennoj biologii. 1996. T.116. №6. С.700-714.
2. Shhegoleva T.Ju. Issledovanie biologicheskikh ob#ektov v millimetrovom diapazone radiovoln. K.: Naukova dumka, 1996. 182 s.
3. Panchenko A.Yu., Slipchenko N.I., Borodkina A.N. On the development of a practical technique of theoretical calibration of resonant sensors for near-field microwave diagnostics // Telecommunication and Radio Engineering. 2014. V.73, №15. P. 1397-1407.
4. Hyde M.W., Havrilla M.J. A broadband, nondestructive microwave sensor for characterizing magnetic sheet materials // IEEE Sensors J. 2016. V.16, No.12. P. 4740-4748.

5. Kempin M., Ghasr M.M., Case J., Zoughi R. Modified waveguide range for evaluation of stratified composites // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2014. V.63, No.6. P. 1524-1534.
6. Kaatz U. Techniques for measuring the microwave dielectric properties of materials // Metrologia, 2012. Vol.47, No.2. P. S91-S113.
7. Hyde M. W. IV, Havrilla M. J., Bogle A. E. Nondestructive Determination of the Permittivity Tensor of a Uniaxial Material Using a Two-Port Clamped Coaxial Probe // IEEE Trans. Microwave Theory and Technique. 2016. Vol.64, No.1. P. 239-246.
8. Cenanovic A. Schramm M., Schmidt L. Measurement setup for non-destructive complex permittivity determination of solid materials using two coupled coaxial probes // IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. 2011. P. 1-4.
9. Hyde M. W. et al. Nondestructive electromagnetic material characterization using a dual waveguide probe: A full wave solution // Radio Science. 2009. V.44. №3. P. 10-14.
10. Alanen E., Lahtinen T., Nuutinen J. Variational Formulation of Open-Ended Coaxial Line in Contact with Layered Biological Medium // IEEE Transaction on biomedical engineering. 1998. Vol.45, No.10. P.1241-1247.
11. Huang R., Zhang D. Analysis of open-ended coaxial probes by using a two-dimensional finite-difference frequency-domain method // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2008. Vol.57, No.5. P. 931-939.
12. Maftooli H., Karami H.R., Sadeghi S.H.H., Moini R. Output signal prediction of an open-ended coaxial probe when scanning arbitrary-shape surface cracks in metals // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2012. Vol.61, No.9. P. 2384-2391.
13. Poumaropoulos C.L., Misra D. A Study on the Coaxial Aperture Electromagnetic Sensor and Its Application in Material Characterization // IEEE Transaction on instrumentation and measurement. 1994. Vol.43, No.2. P.111-114.
14. Blackham D.V., Pollard R.D. An Improved Technique for Permittivity Measurements Using a Coaxial Probe // IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. 1997. Vol.46, No.5. P.1093-1099.
15. Gregory A.P., Clarke R.N. Dielectric metrology with coaxial sensors/ A. P.Gregory, // Meas. Sci. Technol. 2007. No.18. P.1372-1386.
16. McLaughlin B.L., Robertson P.A. Miniature open-ended coaxial probes for dielectric spectroscopy applications // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. No.40. P.45-53.
17. Nozokido T., Bae J., Mizuno K. Scanning Near-Field Millimeter-Wave Microscopy Using a Metal Slit as a Scanning Probe // IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique. 2001. Vol.49, No.3. P.491-499.
18. Panchenko A.Yu. Modeling a small aperture resonator type microwave meter of substance parameters // Telecommunications and Radio Engineering. 1998. V.52 No.8. P. 118-121.
19. Wen Mingming. Ch. Liu, Panchenko A.Yu., Slipchenko N.I. Evaluation of influence of microwave radiation sensor in the form of an open end of the coaxial line on its

metrological characteristics // Telecommunications and Radio Engineering. 2015. V.74, No.15. P.1355-1366.

20. Lju Chan, Panchenko A. Ju., Slipchenko N. I., Zajchenko O. B. Blizhnepolevoj koaksial'nyj sensor otkrytogo tipa. Ocenka prostranstvennoj razreshajushhej sposobnosti izmeritel'noj apertury // Vestnik NTU KPI. Serija Radiotekhnika. Radioapparatostroenie. 2017. Vyp.71. S.17-24.

21. Hosseini M. H. Heidar H., Shams M. H. Wideband Nondestructive Measurement of Complex Permittivity and Permeability Using Coupled Coaxial Probes //IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2017. V.66. №. 1. P. 148-157.

22. Panchenko B.A. Tenzornye funkicii Grina uravnenij Maksvella dlja cilindricheskikh oblastej // Radiotekhnika: Vseukrainskij mezhvedomstvennyj nauchno-tehnicheskij sbornik. 1970. Vyp. 15. S. 82-91.

23. Tai C.T. Dyadic Green's functions for a coaxial line. IEEE Trans. of Antennas and Propagation. 1983. Vol.48, No.2, P. 355-358.

24. Gordienko Ju.E., Panchenko A.Ju., Far R.S. Priblizhenie zadannogo polja v zadachah opredelenija harakteristik rezonatornyh SVCh - datchikov aperturnogo tipa // Radiotekhnika: Vseukrainskij mezhvedomstvennyj nauchno-tehnicheskij sbornik. 1998. Vyp.107. S. 93-103.

25. Lju Chan, Panchenko A. Ju., Slipchenko N. I., Zajchenko O. B. Koaksial'nyj sensor otkrytogo tipa. Integral'noe uravnenie jelektricheskogo polja v ploskosti apertury // Vestnik NTU KPI. Serija Radiotekhnika. Radioapparatostroenie. 2017. Vyp.69. S.11-16.

Поступила в редколлегию 03.04.2018

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Грицунов А.В.
Лю Чан, Ph.D, начальник отдела внешних связей, преподаватель института электротехники и информатики Хэйлунцзянского Бауи аграрного университета. Научные интересы: электродинамика, акустика. Адрес: ул. СинФон 5, г. Дачин, Хэйлунцзян, КНР 163319.
Бондаренко Игорь Николаевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектроники

электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: электродинамика, СВЧ техника. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. +38057-7021362.

Панченко Александр Юрьевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и эксплуатации электронных аппаратов ХНУРЭ. Научные интересы: электродинамика, акустика атмосферы. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. +38057-7021494.

Слипченко Николай Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор, проректор по научной работе ХНУРЭ. Научные интересы: электродинамика, техника СВЧ, нанотехнологии, солнечная энергетика. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, тел. +38057-7021013.

Liu Chang, PhD, Head of External Relations Department, Heilongjiang Bayi Agricultural University, 5, Xinfeng Str., Daqing, 163319, China.

Bondarenko Igor Nikolaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor, Head of the Department of Microelectronics, Electronic Devices and Appliances, Kharkov National University of Radio Electronics. Scientific Interests: Electrodynamics, Microwave Engineering. Address: Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave., 14, Phone/fax: +380577021362, e-mail: ihor.bondarenko@nure.ua

Alexander Panchenko, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Operation of Electronic Devices of the Kharkov National University of Radio Electronics. Scientific interests: electrodynamics, atmospheric acoustics. Address: Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave., 14, Phone/fax: +380577021494, e-mail: oleksandr.panchenko@nure.ua

Nikolai I. Slitchenko, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, pro-rector for scientific work of Kharkov National University of Radio Electronics. Scientific interests: electrodynamics, microwave technology, nanotechnology, solar energy. Address: Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave., 14, Phone/fax: +380577021013.