

**ФОРМИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
ИНФОРМАЦИИ ПРИ СВЧ ДИАГНОСТИКЕ МАТЕРИАЛОВ****Введение**

Из практики СВЧ диагностики материалов [1, 2] к настоящему времени определилось преимущество построения соответствующих методик и технических средств, ориентированных на применение резонаторных первичных измерительных преобразователей (РИП). Широкое разнообразие используемых РИП, существенно отличающихся электродинамической структурой, реально затрудняет создание их общей теории. Поэтому решение задач оптимального проектирования методов и средств в этой области находятся только в зачаточном состоянии и характеризуются скорее эвристичностью.

Вместе с тем уяснение физической природы взаимодействия отдельно нормальной и тангенциальной компонент поля СВЧ колебаний РИП с диагностируемым объектом на примере микроволновой микроскопии [3] показало реализуемость на этой основе некоторого общего подхода в теории а, следовательно, и в проектировании.

Для СВЧ макродиагностики полупроводников и диэлектриков такое раздельное исследование доступно и удобно проводить на моделях, использующих строгую теорию одноименных РИП Н- и Е-типа при диагностике плоскостойких образцов [4].

В данной работе предложены и обоснованы новые подходы формирования сигналов измерительной информации таких РИП, отличающиеся исключением или подавлением влияния традиционных в СВЧ диагностике мешающих факторов. Физические выводы из возникших возможностей допустимо впоследствии распространить на оптимизацию более сложных РИП при диагностике геометрически более сложных объектов.

Фундаментальные сигналы измерительной информации

В теории и практике РИП при СВЧ диагностике полупроводников и диэлектриков в основном исходят из оценки влияния образца на резонансную частоту и добротность РИП. Поэтому, сигналы измерительной информации, формируемые как изменение резонансной частоты $\frac{\Delta f}{f_0}$ и добротности $\frac{\Delta Q}{Q_1}$, принято называть фундаментальными (ФСИИ). Величина их и характер зависимости от параметров объекта определяются степенью его включения в электромагнитное поле РИП. Общая теория одноименных РИП Н- и Е-типа представлена в [5], исходным в ней является характеристическое уравнение вида (1). Для однослойного образца это уравнение целесообразно представлять следующим образом:

$$\chi_{21}(1 - \chi_{21} \operatorname{th} l_2 \operatorname{th} l_3) \operatorname{th} l_1 = -(\operatorname{th} l_2 + \chi_{21} \operatorname{th} l_3), \quad (1)$$

где $\chi_{21} = \left(\frac{\tilde{\epsilon}_2 - \Theta}{1 - \Theta} \right)^{1/2}$ для РИП Н-типа; $\chi_{21} = \frac{\tilde{\epsilon}_2 (1 - \Theta)^{1/2}}{(\tilde{\epsilon}_2 - \Theta)^{1/2}}$ для РИП Е-типа;

$$\tilde{\epsilon}_2 = \epsilon_2' - j\epsilon_2'' = \epsilon_2(1 - j \operatorname{tg} \delta_2); \quad \Theta = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^{1/2} (1 + \Omega' + j\Omega'')^{-2}; \quad l_{10} = 2\pi \frac{z_1}{\lambda_0} (1 - \Theta)^{1/2} (1 + \Omega' + j\Omega'');$$

$$l_{20} = 2\pi \frac{h_2}{\lambda_0} (\tilde{\epsilon}_2 - \Theta)^{1/2} (1 + \Omega' + j\Omega''); \quad l_{30} = 2\pi \frac{H}{\lambda_0} (1 - \Theta)^{1/2} (1 + \Omega' + j\Omega'');$$

h_2 – толщина образца; H, z_1 – расстояние до торцов;

$\lambda_{\text{кр}}$ – критическая длина волны для данного сечения цилиндрического резонатора и рабочего вида колебаний; λ_0 – исходная рабочая длина волны на частоте f_0 ; $\Omega' = \frac{\Delta f}{f_0}$ – изменение резонансной частоты РИП, вызванное введением в его поле исследуемого образца;

$\Omega'' = \left(\frac{f_0'}{2f''} \right)^{-1} = \frac{1}{Q_2}$; $Q_1^{-1} = Q_0^{-1} + Q_2^{-1}$; Q_2 – добротность, вносимая в РИП образцом; Q_0 – исходная добротность РИП; Q_1 – добротность РИП с образцом.

В работе проводится численное моделирование ФСИИ, базирующееся на положениях и подходах работы [5]. При плоскостойком образце степень включения определяется положением образца по оси резонатора l_{30} (врезка рис. 1, а). Например, для керамических пластин одинаковой толщины с различным значением диэлектрической проницаемости ϵ_2 зависимость $\Delta f/f_0$ от степени их включения в поле РИП Н- и Е-типа представлена на рис. 1. Как показано в [5], увеличение толщины пластин смещает эти зависимости влево. При измерении ϵ_2 изменение толщины пластины (отклонение от номинала) и степень включения ее в поле РИП являются мешающими факторами, изменяющими градуировку РИП. Следует заметить, что выбор степени включения l_{30} определяется требуемой чувствительностью. Поэтому в общем случае для определения ϵ_2 по измеренному значению $\Delta f/f_0$ необходимо предварительно с требуемой точностью измерить l_{30} и h_2 .

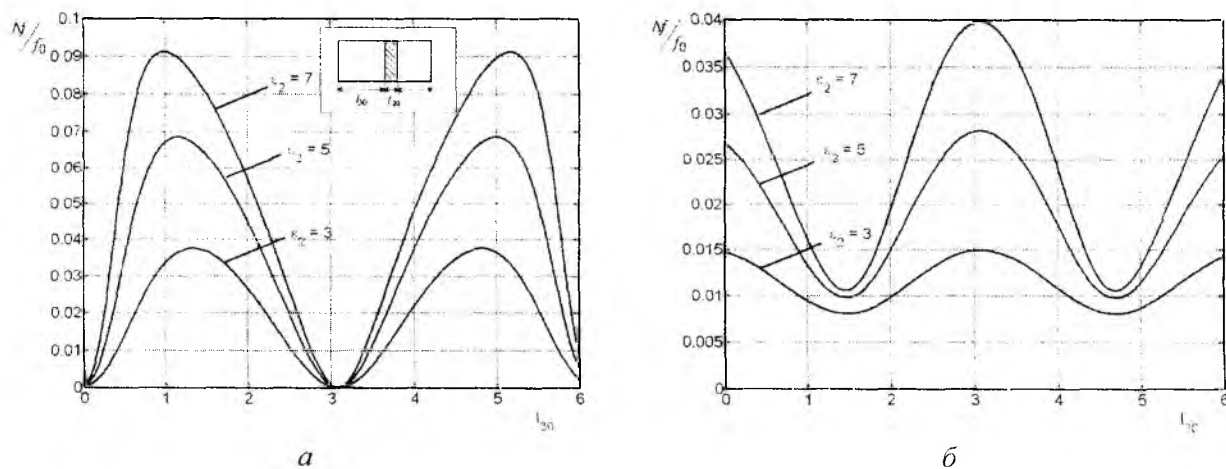


Рис. 1

Анализ данных рис. 1 и результаты работы [5] показывают, что для исключения такого мешающего фактора, как точность установки l_{30} , можно предложить использовать легко перестраиваемый по l_{30} РИП Н-типа. Изменяя степень включения образца l_{30} , устанавливают максимальное значение $\left(\frac{\Delta f}{f_0} \right)^{\max}$. На рис. 2 показана зависимость изменения максимального значения резонансной частоты от диэлектрической проницаемости образца РИП Н-типа; $\lambda_0 = 8 \text{ мм}$; $1-4 \Theta = 0,6$; $1'-4' \Theta = 0,9, 1$; $1' - l_{20} = 0,8$; $2, 2' - l_{20} = 0,64$; $3, 3' - l_{20} = 0,4$; $4, 4' - l_{20} = 0,16$. Сведения о значении l_{30} при этом не требуются. Это становится важным, например при исследовании влияния обработки образца вне РИП (отжига, механической деформации и т.д.). В то же время, при выполнении исследований кинетики изменения ϵ_2 в процессе воздействия в РИП (облучения, температурная зависимость и др.), когда l_{30} неизменно, выбор этого параметра может осуществляться с учетом его влияния на чувствительность. Напомним, что в соответствии с данными работ [5,6] влияние $\text{tg } \delta_2$ образца на $\Delta f/f_0$ несущественно, при условии $\text{tg } \delta_2 \ll 1$.

Особенностью РИП Е-типа по сигналу $\Delta f/f_0$ является то, что при $l_{30} = 0$ его чувствительность близка к максимальной (рис. 1, б). Поэтому апертурные РИП на основе объемных (не коаксиальных или полосковых резонаторов) целесообразно выполнять с Е-видом колебаний [7].

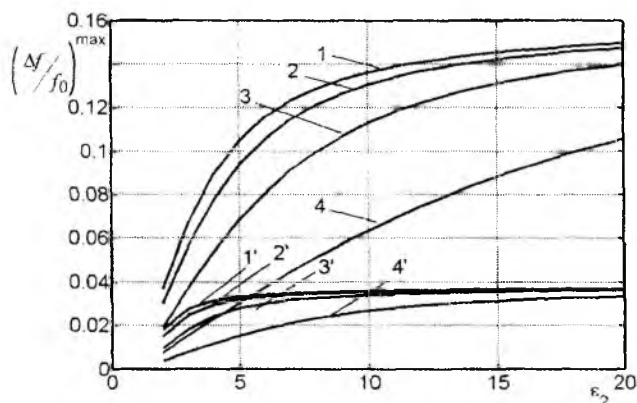
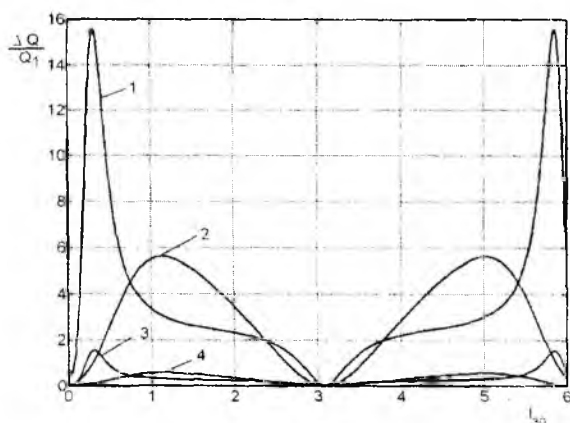


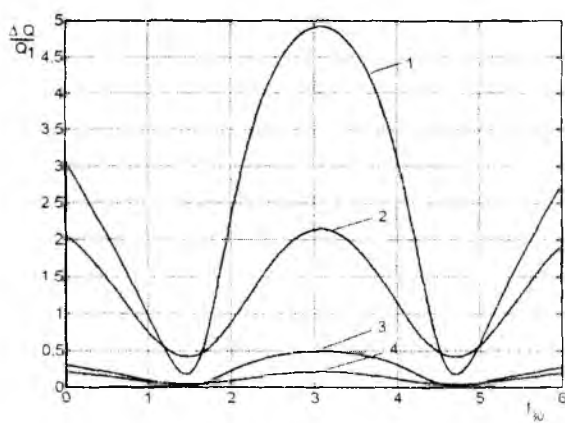
Рис. 2

Положение максимумов по l_{30} практически не зависит от $\text{tg } \delta_2$ (при $\text{tg } \delta_2 < 1$). Однако добротность РИП в максимуме сигнала $\Delta Q/Q_1$ приобретает низкое значение.

Детальный анализ показывает, что положение экстремума зависимостей $(\Delta f/f_0) = f(l_{30})$, $(\Delta Q/Q_1) = f(l_{30})$ и $Q_1 = f(l_{30})$ существенно не совпадают.



а



б

Рис. 3

Указанные особенности и различия зависимостей сигналов $\Delta f/f_0$, $\Delta Q/Q_1$ от степени включения образца l_{30} объясняется тем, что величина $\Delta f/f_0$ физически определяется изменением запасаемой в резонаторе энергии, а $\Delta Q/Q_1$ – изменением величины потерь СВЧ мощности в образце. Поэтому изменение l_{30} влияет на величину $\Delta f/f_0$ через перераспределение поля между образцом и свободной частью резонатора, а на величину $\Delta Q/Q_1$ только через степень концентрации поля в образце.

Сигнал $\frac{\Delta Q}{Q_1}$ в отличие от $\frac{\Delta f}{f_0}$ несет существенную информацию о значении $\text{tg } \delta_2$ образца. Однако чувствительность его по этому параметру зависит от ε_2 и толщины образца h_2 .

В общем случае осуществления многопараметрового контроля с помощью РИП Н- или Е-типа проблема формирования необходимого количества сигналов измерительной информации отсутствует даже при многослойном образце. При этом можно воспользоваться существенно нелинейной зависимостью ФСИИ от степени включения образца в поле РИП. Однако часто возникает потребность осуществления однопараметрового контроля. Если таким параметром является $\text{tg } \delta_2$, то ε_2 и h_2 становятся мешающими факторами при градуировке РИП, так же как и невоспроизводимость степени включения l_{30} .

Подобно однопараметровому измерению ε_2 по сигналу $\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)^{\max}$ можно предложить однопараметровое измерение $\text{tg } \delta_2$ по значению $\left(\frac{\Delta Q}{Q_1}\right)^{\max}$ при известных для градуировки величинах ε_2 и h_2 . На рис. 4 показана зависимость максимального значения изменения добротности от тангенса угла диэлектрических потерь образца для РИП Н-типа; $\lambda_0 = 8 \text{ мм}$; $\Theta = 0,6$; 1- $l_{20} = 0,16$, $\varepsilon_2 = 3$; 2- $l_{20} = 0,16$, $\varepsilon_2 = 7$; 3- $l_{20} = 0,16$, $\varepsilon_2 = 12$; 4- $l_{20} = 0,4$, $\varepsilon_2 = 3$; 5- $l_{20} = 0,4$, $\varepsilon_2 = 7$; 6- $l_{20} = 0,4$, $\varepsilon_2 = 12$; 7- $l_{20} = 0,8$, $\varepsilon_2 = 3$; 8- $l_{20} = 0,8$, $\varepsilon_2 = 7$.

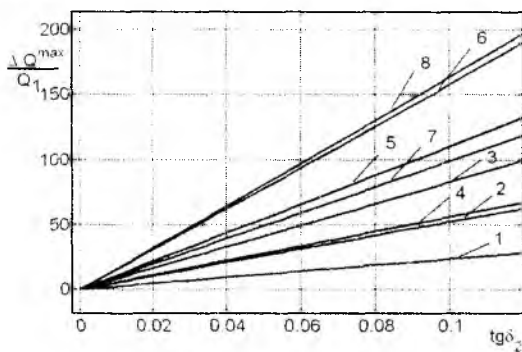


Рис. 4

Пользование этим подходом в формировании сигнала $\left(\frac{\Delta Q}{Q_1}\right)^{\max}$ возможно в пределах выполнения условия $Q_1 > Q_{\text{пред}}$, где $Q_{\text{пред}}$ определяется условиями требуемой ширины резонансной характеристики РИП. Такие условия накладываются влиянием соседних паразитных видов колебаний и метрологическими характеристиками способа измерения сигнала $\frac{\Delta Q}{Q_1}$.

Неудобство требования известности ε_2 и h_2 является несущественным при диагностике, например, полупроводниковых пластин по удельному сопротивлению и физическим свойствам с ним связанным. Обычно ε_2 для данного материала является константой, значение которой известно с высокой точностью, а толщина пластин нормируется условиями порезки кристалла.

Если ε_2 и h_2 неизвестны, то целесообразно воспользоваться градуировочными характеристиками в координатах $\left(\frac{\Delta Q}{Q_1}\right)^{\max} = \left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)^{\max}$, которые нетрудно построить по данным зависимостей, подобных рис. 1 и 3. Приведенные представления и анализ ФСИИ РИП Н- и Е-типа позволяет сделать следующие выводы. Метрологические характеристики РИП Н- и Е-типа, судя по ФСИИ, существенно отличаются по причине разного характера взаимодействия плоскостойких образцов с нормальной и тангенциальными составляющими электромагнитного поля СВЧ колебаний.

ФСИИ, формируемые РИП Н-типа, можно для заданного диапазона параметров объекта ε_2 ; $\text{tg } \delta_2$; h_2 — изменять по величине и чувствительности выбором степени его включения

в поле РИП (l_{30}) и весьма важной электродинамической характеристики, оцениваемой величиной $\Theta = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^{1/2}$.

РИП Е-типа перспективен для исследования анизотропии электрических свойств материалов, т.к. выбор l_{30} и Θ позволяет регулировать вклад нормальной и тангенциальной составляющих поля в величину ФСИИ.

Благодаря возможности подбором Θ в РИП Н-типа «обострить» экстремумы зависимости ФСИИ от l_{30} создаются подходящие условия для аппаратной организации двухпараметровых измерений, исключающих сложность решения обратных задач при обработке сигналов.

Существенная нелинейность зависимости ФСИИ РИП Н-типа при $\Theta \rightarrow 1$ обеспечивает хорошие перспективы постановки модуляционных методов измерения и диагностики [8].

Формирование комбинированных сигналов измерительной информации

В ранних разработках [1, 9, 10] для исключения или ослабления влияния указанных мешающих факторов реализовывался подход, вытекающий из представления малых возмущений поля РИП образцом. Суть его базируется на следующих соотношениях.

В приближении малых возмущений $Q_0 \gg Q_1$ можно записать: $Q_1 = \frac{Q_0}{1 + Q_0 \eta \epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2}$,

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{2} \eta (\epsilon_2 - 1), \quad (2)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_1} = \eta Q_0 \epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2, \quad (3)$$

где $\eta = \frac{\int E^2 dV}{\int E^2 dV}$ – коэффициент заполнения поля резонатора образцом; Q_0 – добротность

РИП без образца; Q_1 – добротность РИП с образцом; $\Delta Q = Q_0 - Q_1$.

Откуда следует

$$\frac{\Delta Q / Q_1}{\Delta f / f_0} = 2 \frac{\epsilon_2}{\epsilon_2 - 1} Q_0 \operatorname{tg} \delta_2. \quad (4)$$

Такой комбинированный сигнал оказывается инвариантным к коэффициенту включения образца в поле резонатора в пределах выполняемости условия малости возмущения и требования $Q_0 \gg Q_1$. В пределах выполняемости указанных требований инвариантность к η характерна и для комбинации сигнала вида

$$Q_1 \times \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\epsilon_2 - 1}{2 \epsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2}. \quad (5)$$

Коэффициент заполнения η в общем случае определяется объемом образца, положением его в поле РИП и перераспределением поля между образцом и свободным объемом резонатора. Поэтому в общем случае этот параметр имеет разное значение для сигналов $\frac{\Delta f}{f_0}$ и $\frac{\Delta Q}{Q}$. Более точно

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta W_{\text{зан}}}{W_{\text{зан}}} = \frac{1}{2} \eta (\epsilon_2 - 1) + \frac{\Delta W_{\text{зан}}^{\text{св}}}{W_{\text{зан}}}. \quad (6)$$

Поэтому соотношения (4), (5) справедливы в пределах выполнения условия

$$\frac{\Delta W_{\text{зап}}^{\text{св}}}{W_{\text{зап}}} \ll \frac{1}{2} \eta (\epsilon_2 - 1), \quad (7)$$

где $W_{\text{зап}}$ – энергия, запасаемая в РИП образцом; $W_{\text{зап}}^{\text{св}}$ – изменение запасаемой в свободной части РИП энергии при включении образца.

Детальные численные исследования показывают, что соотношения (4), (5) справедливы только для $\frac{\Delta f}{f_0} < 10^{-4}$. Однако условие $Q_0 \gg Q_1$ выполняется исключительно для $\text{tg } \delta_2 > 0,1$, что в целом ограничивает реализуемость (4), (5) по диапазону значений параметров ϵ_2 , $\text{tg } \delta_2$, и h_2 .

Конкретные количественные представления по этому поводу можно получить из численного анализа этих сигналов, который в строгом виде осуществляется с помощью решения для Q_1 , $\frac{\Delta f}{f_0}$ и $\frac{\Delta Q}{Q_1}$ уравнения (1).

В СВЧ влагометрии материалов, а также при исследовании влияния различных модифицирующих действий на диэлектрические и полупроводниковые материалы возникает необходимость количественно определять величину изменения ϵ_2 , и $\text{tg } \delta_2$ объекта или его части [11-13]. При этом сигналы измерительной информации $\frac{\Delta f}{f_0}$, и $\frac{\Delta Q}{Q_1}$ отсчитываются относительно определенных их исходных значений.

На рис. 5, а, б (где Q_{20} , ω_{20} – добротность и резонансная частота РИП при $\epsilon_2 = 2,5$, и $\text{tg } \delta_2 = 10^{-3}$, Q_{21} , ω_{21} – при $\epsilon_2 + \Delta \epsilon_2$, и $\text{tg } \delta_2 + \Delta \text{tg } \delta_2$) представлены в координатах $\Delta \epsilon_2$ и $\Delta \text{tg } \delta_2$ зависимости этих сигналов, которые позволяют судить о вкладе каждой составляющей. Пользуясь сведениями о $\Delta \epsilon_2$ и $\Delta \text{tg } \delta_2$ от влажности и плотности сыпучих сред [14] можно проверить справедливость градуировок, декларированных в [14].

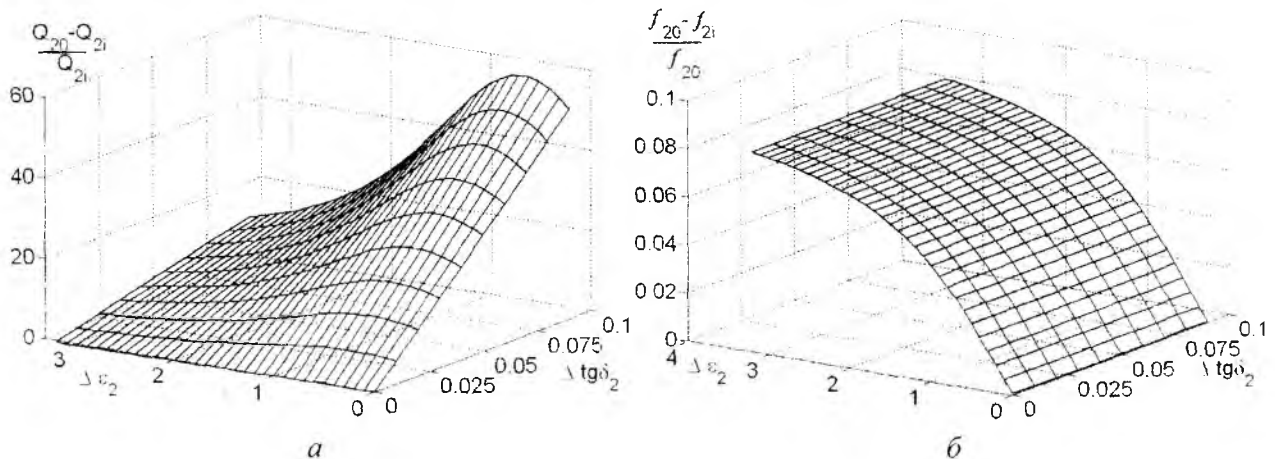


Рис. 5

Заключение

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- однопараметровый контроль диэлектрической проницаемости материалов стандартным образом целесообразно осуществлять, используя РИП Н-типа по значению информации $\frac{\Delta f}{f_0}$ в максимуме зависимости этого сигнала при изменении включения образца перестраиваемым поршнем;
- однопараметровый контроль удельной электропроводности полупроводников или $\text{tg } \delta_2$ диэлектриков целесообразно производить по значению и $\frac{\Delta Q}{Q_1}$ в максимуме аналогичной вышеприведенной зависимости;

– при нестандартной геометрии образцов целесообразно выделять комбинированные

сигналы вида $\frac{\Delta Q}{Q_1} \cdot \frac{\Delta f}{f_0}$ или $Q_1 \cdot \frac{\Delta f}{f_0}$ в области значений степени включения образца в поле

РИП, при которых эти сигналы инвариантны к величине степени включения;

– в СВЧ влагометрии сыпучих материалов при помощи рассмотренных подходов можно установить область значений степени включения пробы, для которых выполняется независимость градуировки от плотности сыпучего материала.

Список литературы: 1. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на СВЧ. М.: Физматгиз, 1963. 403 с. 2. Ахманов В.Б., Детинко М.В., Медведев Ю.В. и др. Неразрушающие бесконтактные СВЧ резонаторные методы локального контроля электрофизических параметров полупроводниковых материалов. // Дефектоскопия. 1986. № 1. С. 23-35. 3. A. Imtiaz, S. Anlage. Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microwave microscope // Journal of applied of physics. 100. 2006. 4. Гордиенко Ю.Е. Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике микрослоистых структур // Радиотехника. 1996. Вып. 100. С. 253-260. 5. Гордиенко Ю.Е., Гуд Ю.И., Корягина Е.Ю., Слипченко Н.И. Одномодовые резонаторные измерительные преобразователи в общей теории СВЧ диагностики материалов // Радиоэлектроника и информатика. 2007. № 2. С. 4-8. 6. Гордиенко Ю.Е., Фади Мохамад Хаммуд. Оценка направлений оптимизации СВЧ резонаторных датчиков контроля влагосодержания порошковых материалов электронной технологии // Радиоэлектроника и информатика. 2004. № 2. С. 34–38. 7. Гордиенко Ю.Е., Петров В.В., Фади Мохамад Хаммуд. Оценка численно-аналитических моделей СВЧ резонаторных сенсоров (датчиков) с коаксиальной измерительной апертурой // Радиотехника. № 140. С. 156-162. 8. Гордиенко Кочержин А.И., Пашков А.В., Рябухин А.А. Модуляционные варианты СВЧ диагностики материалов в сред // Радиотехника. 2003. № 134. С. 229-237. 9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 621 с. 10. Никольский В.В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. М.: Наука, 1967. 460 с. 11. Бензарь В.К. Техника СВЧ влагометрии. Минск: Высшейш. шк., 1974. 349 с. 12. Nelson O.S. Frequency and moisture dependence of the dielectric properties of high-moisture corn // J. Microwave Power, 1978. 13 (2). P. 213-218. 13. Bhar I. N. Microwave Techniques in the study of semiconductors // Proceedings of the IEEE, 1963, v. 51, № 11, p. 1623-163. 14. U.S. Pat. No. 5397993 March 3, 1995 M. Tews, J. Sikora, R. Herrmann. Method for measuring the material moisture content of a material under test using microwaves.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 25.10.2007