

Ю.Е. ГОРДИЕНКО, д-р физ.-мат. наук, Ю.И. ГУД, канд. техн. наук,
С.Ю. ЛАРКИН, канд. техн. наук, Д.А. ПОЛЕТАЕВ

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО РЕЗОНАТОРНОГО МИКРОЗОНДА ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ МИКРОСКОПИИ И МИКРОДИАГНОСТИКИ

Введение

Развитие микро-, наноэлектроники, биофизики и современных высоких технологий обуславливает постоянный рост требований к измерительной и диагностической технике в направлении осуществления многопараметрического контроля с повышенной точностью и разрешающей способностью.

Одним из современных методов микродиагностики различных объектов является метод сканирующей микроволновой микроскопии (СММ) [1]. Наиболее используемый его вариант базируется на применении резонаторных измерительных преобразователей (РИП) с коаксиальным микрозондом [2], работа которых основана на принципах ближнеполевого СВЧ контроля. Большинство разработок в области СММ проведены для исследования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [3], необходимым условием микродиагностики которых является высокая собственная добротность РИП для регистрации малых отклонений в проводимости сканируемого объекта.

Вместе с тем, важным является решение задач разработки СММ для исследования полупроводниковых материалов, что позволяет значительно повысить эффективность создания устройств микро- и наноэлектроники.

Свойства полупроводниковых материалов существенно отличаются от свойств ВТСП. Электрофизические параметры полупроводников (относительная диэлектрическая проницаемость ϵ , удельная электропроводность σ , тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$) изменяются в более широких пределах. Поэтому датчики СММ полупроводниковых структур должны обладать большей чувствительностью к изменению параметров образца, чем в случае СММ ВТСП. Зачастую требуется проводить трехмерное сканирование объекта для выявления дефектов и неоднородностей, расположенных в объеме полупроводниковой структуры.

Чувствительность СВЧ датчиков для диагностики биообъектов, которые характеризуются высоким влагосодержанием, особенностями структуры материалов и элементов, определяется выбором рабочего частотного диапазона датчика [4].

Как видно, каждый класс диагностируемых объектов имеет свою специфику. Однако можно сформулировать наиболее общие актуальные задачи дальнейшего совершенствования СММ:

- одновременное увеличение чувствительности и пространственной разрешающей способности в широком диапазоне значения параметров;
- обеспечение многопараметрической и трехмерной диагностики материалов и структур.

Решение этих задач сопряжено с преодолением противоречий, возникающих при стремлении одновременно повысить чувствительность и пространственную разрешающую способность.

Современные разработки базируются в основном на экспериментальном поиске приемлемых конструктивов микрозондов и недостаточно уделяют внимание теоретическим аспектам обеспечения решения указанных задач. В [5, 6] предложен усовершенствованный вариант резонаторного микрозонда с коаксиальной измерительной апертурой (КИА). Его разработка стимулирована интересом к расширению области применения СММ. Данный резонаторный микрозонд позволяет отдельно управлять добротностью резонатора и размером измеритель-

ной апертуры, а следовательно, чувствительностью и пространственной разрешающей способностью микроволнового микроскопа.

Цель работы – теоретические исследования электродинамических характеристик такого микрозонда в направлении оптимизации его конструктива по указанным критериям.

Общие положения и соотношения

В ранних разработках СММ [1, 7] широко использовались четвертьволновые коаксиальные резонаторы различной конструкции: чисто коаксиальные (рис.1, а); с коаксиальной измерительной апертурой (рис.1, б). Практика экспериментальных исследований таких РИП [7] свидетельствует, что для реализации метода сканирующей микроскопии необходима локализация нормальной компоненты электрической составляющей СВЧ поля в образце под острием центрального проводника. При этом очевидным является выполнение условий: $R_2 / \lambda \ll 1$ (где λ – длина волны СВЧ колебаний), $R_1 / R_2 \ll 10^{-3}$.

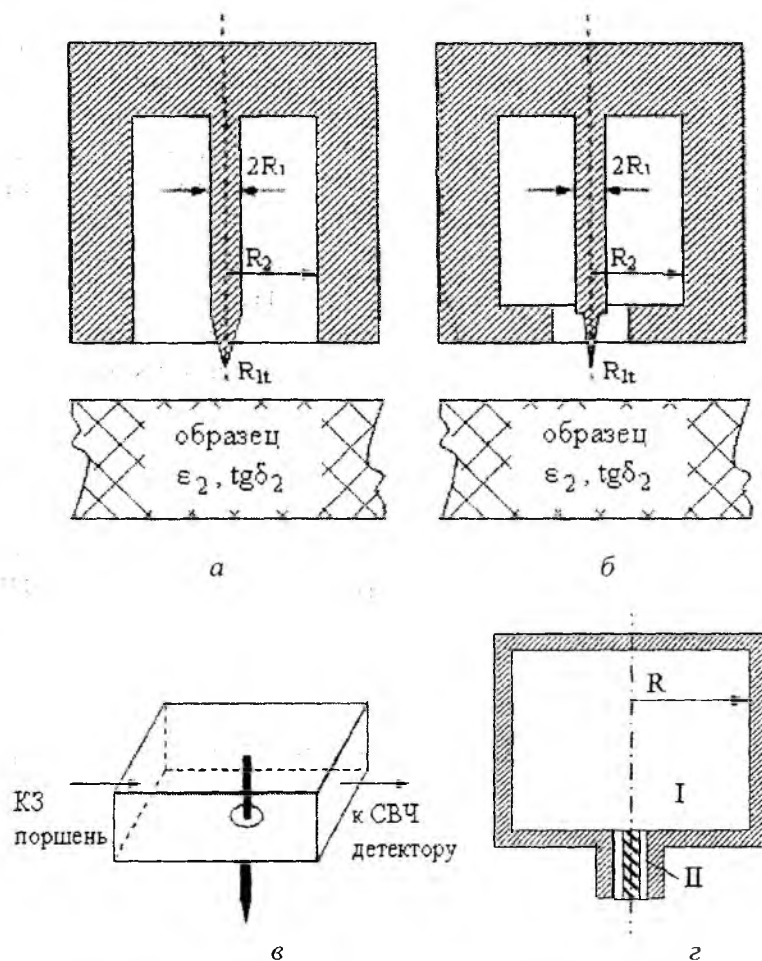


Рис.1. Схематическое изображение РИП для СММ

В современных работах по СММ отсутствует исследование режима взаимодействия РИП КИА с полупроводниковыми и диэлектрическими объектами. Эти исследования важны в связи с наличием излучающих свойств в таких РИП [2]. Обычно рассмотрение апертурного взаимодействия РИП с полупроводником или диэлектриком ограничивалось лишь колебательным режимом, и влияние объекта оценивалось из решения уравнения Гельмгольца. В случае открытого $\lambda/4$ коаксиального резонатора этот режим сохраняется только для тонкопленочных объектов на экранирующих подложках при отсутствии зазора между образцом и РИП.

Из теории и практики безэлектродного контроля параметров полупроводниковых материалов [8] известно, что для повышения чувствительности и точности измерительных средств необходимо использовать РИП с исходной добротностью, которая обеспечивает выполнение условия доминирования потерь СВЧ мощности в образце по сравнению с потерями в стенках резонатора $P_{\text{обр}} \gg P_{\text{ст}}$. Практически это условие выполняется при собственной добротности РИП $Q_0 \gg 10^3$. В случае РИП КИА для СММ необходима конкретизация выполнения этого соотношения при заданных значениях R_1/R_2 и R_2/λ .

Так, стремление повысить добротность РИП КИА привело к конструкции, изображенной на рис.1, б. Преобразователь является аналогом тороидального резонатора с укорачивающей измерительной емкостью [9].

Известна конструкция РИП КИА для СММ на основе прямоугольного резонатора [10] (рис.1, в), которая фактически представляет собой вариант комбинированного РИП с разделением на составные части – высокодобротный объемный резонатор и измерительную апертуру. Это позволяет получить требуемую высокую собственную добротность РИП, при сохранении высокой пространственной разрешающей способности. Перспективность такого подхода подтверждена более поздними конструкциями РИП (рис.1, г) на основе цилиндрического резонатора [6]. Наиболее приемлемым видом колебаний резонатора является H_{01n} , который, в отличие от E_{01n} , обеспечивает более высокую добротность накопительной части. Также возможны варианты конструкций РИП КИА, заполненных диэлектриком для максимальной концентрации поля внутри объемного резонатора и минимизации активных потерь в проводящих стенках.

Анализ результатов экспериментальных исследований большинства разновидностей РИП КИА для СММ позволяет сделать следующий вывод. Цель вариации их конструкций – обеспечение условий максимальной для данного объекта чувствительности сканирования неоднородности при заданной пространственной разрешающей способности, обусловленной радиусом конечной части центрального проводника коаксиальной апертуры R_{1t} .

При этом апертурное взаимодействие РИП с объектом содержит две компоненты. Одна из них связана с полем в области острия зонда, другая – с полем между центральным и наружным проводниками коаксиала. Назовем первую из компонент ближнеполевой, а вторую полноапертурной, соответствующей интегральному по площади апертуры взаимодействию.

Исходными выходными сигналами измерительной информации РИП, определяющими его чувствительность, являются изменение добротности $\Delta Q/Q$ и резонансной частоты $\Delta f/f$, связанные с внесением образца с комплексной диэлектрической проницаемостью $\bar{\epsilon}_2 = \epsilon'_2 + j\epsilon''_2 = \epsilon'_2(1 - j\text{tg}\delta_2)$ в область взаимодействия с полем РИП.

Основываясь на общих физических представлениях о СВЧ резонаторах, апертурно взаимодействующих с полупроводниковыми и диэлектрическими объектами, сигналы сканирования неоднородности в СММ можно представить таким способом:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_2 - f_1}{f_1} = \frac{V_{\text{обл}}}{V_{\text{обл}}} \frac{\int \delta\epsilon_2 E_z^2 dV + \int \epsilon_2 \delta(E_z^2 + E_r^2) dV}{\int (E_z^2 + E_r^2) dV}, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} = \frac{V_{\text{обл}}}{V_{\text{обл}}} \frac{\int \delta\sigma_2 E_z^2 dV + \int \sigma_2 \delta(E_z^2 + E_r^2) dV}{P_{\text{ст}} + \int (E_z^2 + E_r^2) dV}, \quad (2)$$

где Q_1, Q_2 и f_1, f_2 – добротность и резонансная частота РИП с включенным объектом в смежных точках сканирования; V – полный объем РИП с образцом; $V_{\text{обл}}$ – объем образца; $V_{\text{бп}}$ –

объем области ближнеполевого взаимодействия; $\delta(E_r^2 + E_z^2)$ – изменение распределения поля, обусловленное неоднородностью диэлектрической проницаемости $\delta\epsilon_2$ и электропроводности $\delta\sigma_2$ образца в области ближнеполевого взаимодействия.

Как отмечено выше, РИП должен обладать высокой собственной добротностью. Это практически неосуществимо при использовании чисто коаксиальных РИП. Цилиндрические объемные резонаторы обладают более высоким значением собственной добротности. В то же время последние для использования в СММ и для микродиагностики нуждаются в дополнительных конструктивных элементах апертурного взаимодействия с исследуемым образцом. Один из вариантов объемного РИП КИА для СММ – высокодобротный цилиндрический резонатор, апертурно взаимодействующий с образцом через микроразмерный коаксиальный вывод [5]. Микроразмерность этого вывода, в первую очередь, важна в области выходной апертуры коаксиала. Схематическое изображение его приведено на рис.2.

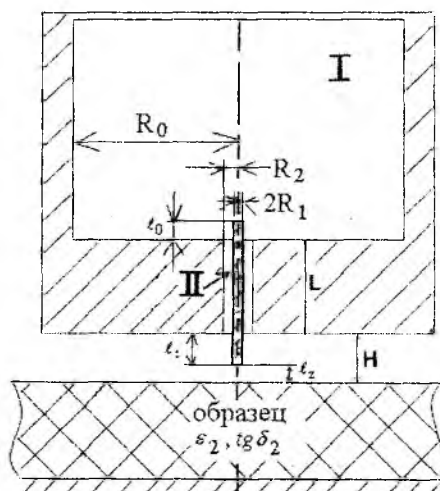


Рис.2. Схематическое изображение объемного РИП КИА

Можно предположить три физических (электродинамических) режима функционирования данного РИП:

1. Коаксиальный вывод II резонансно настроен на рабочую частоту и образует совместно с питающим объемным резонатором I систему связанных резонаторов. При сканировании образца резонатор II изменяет свою резонансную частоту и добротность, что приводит к соответствующим изменениям резонансной частоты и добротности всей системы.

2. Коаксиальный вывод II согласован с объемным резонатором I в области их соединения, но функционирует в режиме передающей линии, нагруженной образцом. При сканировании изменяется согласование такой линии с объемным резонатором I, что вызывает изменение добротности и резонансной частоты последнего.

3. Коаксиальный вывод II исходно согласован с обеих сторон (т.е. с объемным резонатором I и с образцом). Рассогласование со стороны образца изменяет добротность и резонансную частоту объемного резонатора I.

Возможность реализации режима 3 не столь очевидна, поэтому более применимыми представляются режимы 1 и 2.

Для развития этих представлений необходимы более точные количественные оценки, которые требуют детальных численных исследований моделей предложенного РИП в направлении решения задачи одновременного повышения чувствительности и пространственной разрешающей способности.

Результаты численных и экспериментальных исследований

Руководствуясь физическими соображениями, можно утверждать, что согласование коаксиального микронзда II с объемным резонатором I осуществляется путем изменения его длины L . При этом режим функционирования РИП в ближнеполевой области образца будет оказывать вторичное влияние.

На рис. 3, а, б приведены результаты вычислений зависимости добротности представленной модели РИП КИА и ее изменения при различных $\text{tg}\delta_2$ образца от величины L вывода микронзда. Остальные параметры выбраны следующими: длина волны СВЧ колебаний $\lambda = 8$ м.м.; $R_2/\lambda = 0,05$; $R_1/R_2 = 0,01$; $R_0/\lambda = 0,55$; $\varepsilon_2 = 12$; $\text{tg}\delta_2 = 0,05$; $\Delta\text{tg}\delta_2 = 0,02$; $\ell_1/\lambda = 0$; $\ell_z/\lambda = 0$.

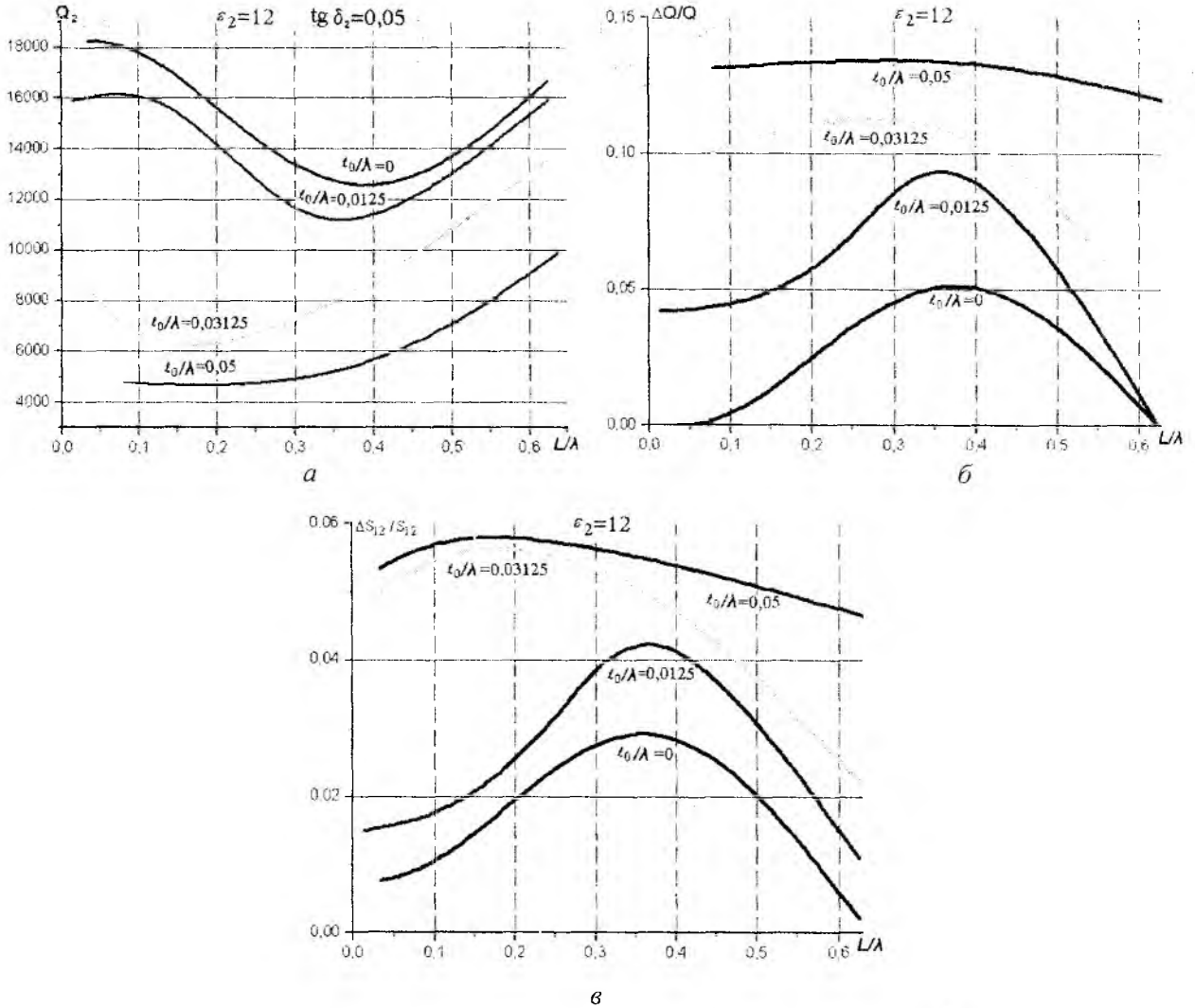


Рис.3. Зависимость добротности (а), чувствительности (б) и изменения S -параметра (в) объемного РИП КИА от длины микронзда

Зависимости Q_2 и $\Delta Q/Q$ вычислялись как из численного анализа частотной характеристики параметра $S_{12}(\omega)$ в области резонанса системы, так и путем непосредственного решения колебательных уравнений и нахождения добротности через собственные значения частоты ω' и ω'' . Параметры конструкции возбуждающей системы обеспечивали значение S_{12} в резонансе порядка 0,1. Потери в стенках не учитывались для более четкого выделения влияния образца и условий согласования. Зависимости $\Delta Q/Q$ и $\Delta S_{12}/S_{12}$ от L/λ (рис. 3, б, в соответственно) свидетельствуют о достоверности вычислений и хорошей сходимости решения.

Ввиду высокого значения волнового сопротивления коаксиального вывода микрозонда, полное согласование его с объемом I невозможно. Поэтому для улучшения возбуждения микрозонда электромагнитным полем резонатора I использован элемент, являющийся продолжением центрального проводника коаксиала длиной l_0/λ .

Из приведенных на рис. 3 зависимостей следует явно резонансный характер согласования с помощью длины коаксиала L при $l_0/\lambda = 0$ и постепенное сглаживание избирательности по L при увеличении l_0/λ . Рост чувствительности РИП КИА с повышением l_0/λ свидетельствует о предполагаемом повышении эффективности возбуждения коаксиальной части. Максимум в зависимости чувствительности от L свидетельствует о необходимости дополнительного согласования коаксиального микрозонда.

Коаксиальность микрозонда является необходимым условием формирования повышенной локализации СВЧ электрического поля в нормальной по отношению к образцу компоненте E_z (увеличение отношения E_z/E_r в подзондовой части измерительной апертуры РИП).

Ранее было показано [11], что при чисто колебательном режиме работы резонаторного микрозонда в ближнеполевой области $V_{БП}$ имеет место существенная концентрация нормальной компоненты электрической составляющей поля E_z и ее превышение над тангенциальной E_r более чем на порядок $(E_z/E_r) > 3 \cdot 10^1$. По физическим соображениям это является основой высокой пространственной разрешающей способности зондовой СММ (приблизительно равной диаметру острия зонда, а не поперечнику апертуры). Добротность системы резонаторного зонда определяется общими СВЧ потерями в апертуре. В [12] показано, что они включают колебательную и излучательную составляющие.

На рис. 4 приведены оценки зависимости добротности Q_2 и ее изменение $\Delta Q/Q$ при изменении среднего значения $\text{tg} \delta_2$, из которых следует общая тенденция повышения добротности РИП и снижения влияния среднего значения $\text{tg} \delta_2$ при увеличении локальности зонда. Подобный характер имеет и зависимость размера апертуры в области значений $R_2/\lambda < 0,05$ (рис. 5).

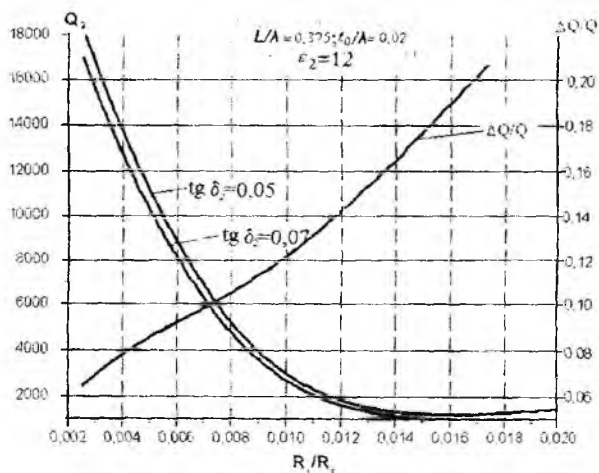


Рис. 4. Зависимость добротности и чувствительности объемного РИП КИА от величины R_1/R_2 при $R_2/\lambda = 0,05$

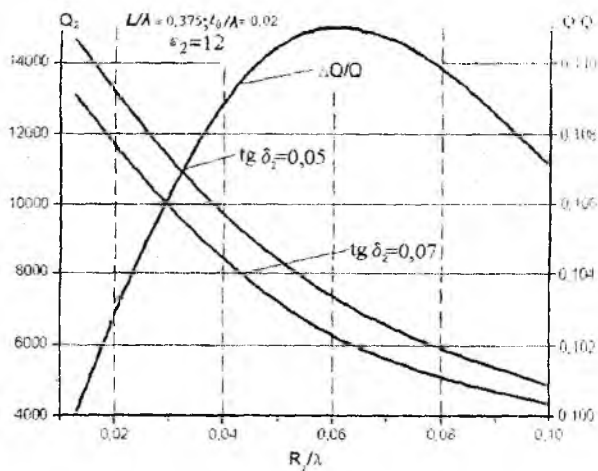


Рис. 5. Зависимость добротности и чувствительности объемного РИП КИА от величины апертуры при $R_1/R_2 = 0,01$

Отдельные исследования чувствительности такого РИП к изменению диэлектрической проницаемости ϵ_2 объекта контроля показали, что “настраиваемость” на высокую чувствительность, подобно рис. 3, практически отсутствует. Это свидетельствует о волновой, а не колебательной, природе функционирования коаксиального объема II. При этом, по-видимому, более сильно проявляется излучательный механизм ближнеполевого взаимодействия по сравнению с колебательным.

Выводы

Получены количественные соотношения, свидетельствующие о настраиваемости узла коаксиальной части резонаторного микрозонда предложенного ранее комбинированного конструктива РИП для СММ на максимум чувствительности к изменению электропроводности объекта. При этом возможно раздельное управление рабочей добротностью РИП за счет практически независимого функционирования его накопительной (I) и микрозондовой (II) части.

Установлено отсутствие избирательности указанной настройки к параметрам геометрии резонаторного микрозонда. Дальнейшему выяснению подлежит зависимость чувствительности микрозонда к неоднородности $\delta\epsilon_2$ и $\delta\sigma_2$ от параметров апертуры и возможности ее повышения путем управления длиной коаксиальной части, формой острия центрального проводника и величиной его выступа из коаксиала.

Список литературы: 1. *Vlahacjs C.P., Black R.C., Anlage S.M. et all. Near-field scanning microwave microscope with 100 μm resolution // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 69. P. 3272–3274.* 2. *Гордиенко Ю. Е. Петров В. В., Полетаев Д. А. Свойства четвертьволнового коаксиального СВЧ измерительного преобразователя для диагностики материалов // Радиотехника. 2008. № 154. С. 61–66.* 3. *Anlage S. M. Steinhauer D. E., Vlahacos C. P et all. Superconducting material diagnostics using a scanning near-field microwave microscope // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1999. Vol. 9. P. 4127–4132.* 4. *Park J., Hyun S., Kim A. et all. Observation of biological samples using a scanning microwave microscope // Ultramicroscopy 2005. № 102. P. 101–106.* 5. *Гордиенко Ю.Е. Ближнеполевая сканирующая сверхвысокочастотная микродиагностика объектов в технологии электроники // Науковий вісник ІЕНТ “Нові технології” 2002. № 1. С. 3–6.* 6. *Kim J., Lee K. Near-field scanning microwave microscope using a dielectric resonator // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 83. № 5. P. 1032–1034.* 7. *Feenstra B. J., Vlahacos C. P., Thanawalla A. S. et all. Near-field scanning microwave microscopy: Measuring local microwave properties and electric field distributions // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest. 1998. P. 965–968.* 8. *Гордиенко Ю. Е. Резонансные измерительные преобразователи в диагностике микрослоистых структур // Радиотехника. 1996 № 100. С. 253–260.* 9. *Данилов Г. Н., Лисюк Ю. В., Медведев Ю. В. Сверхвысокочастотный резонатор для бесконтактного измерения удельного сопротивления полупроводниковых пластин с высоким пространственным разрешением // Приборы и техника эксперимента. 1984. № 3. С. 206–208.* 10. *Par W., Kim J., Lee K. Millimeter-wave scanning near-field microscope using a resonant waveguide probe // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 79, No. 16. P. 2642–2644.* 11. *Гордиенко Ю.Е., Слипченко Н.И., Петров В.В. Чувствительность СВЧ резонаторных измерительных преобразователей для микроволновой микроскопии // Радиоэлектроника и информатика. 2007. №3. С. 19–23.* 12. *Гордиенко Ю.Е., Гуд Ю.И., Полетаев Д.А. Вклад колебательных и излучательных потерь в характеристики СВЧ преобразователей с коаксиальной измерительной апертурой // Радиотехника. 2009. № 157. С. 108–114.*

Харьковский национальный
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 29.10.2009