

## БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ СВЧ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ КОНУСНОГО КООКСИАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

### Введение

В технике неразрушающего контроля материалов и объектов широко используются СВЧ датчики коаксиального типа с торцевой измерительной апертурой [1]. В настоящее время особое внимание исследователей привлекают их резонаторные варианты для ближнеполевой сканирующей микроволновой микроскопии (БПСММ) [2]. Представляет интерес также применение таких датчиков для контроля содержания воды в малоразмерных биообъектах [3].

Полученные экспериментально результаты оценки метрологических свойств таких датчиков свидетельствуют о проблеме одновременного повышения их чувствительности и пространственной разрешающей способности в широком диапазоне значений СВЧ электрических параметров материалов (ВТСП, проводники, полупроводники, диэлектрики).

**Цель работы** – исследование приемов разрешения указанной проблемы путем управления структурой ближнего поля в измерительной апертуре датчика. Следует решить такие задачи:

- численно исследовать особенности зависимости структуры поля в апертуре от ее геометрии;
- теоретически и экспериментально исследовать влияние конусности четвертьволнового коаксиального датчика на его добротность.

### Основные положения

Важнейшими преимуществами апертурных коаксиальных СВЧ резонаторных датчиков по сравнению объемными [4] являются возможность достижения высокого пространственного разрешения (до 0,1 мкм) и широкий частотный диапазон практической реализации от 0,1 до 35 ГГц. При этом пространственная разрешающая способность ограничивается, в первую очередь, добротностью резонатора.

Следует отметить, что резонатор в апертурных коаксиальных датчиках является четвертьволновым, поэтому его добротность в отсутствие объекта контроля определяется СВЧ потерями в стенках и потерями на излучение в свободное пространство. В [5, 6] показано, что потери на излучение сильно зависят от геометрии апертуры и могут значительно превышать потери в стенках.

В БПСММ размеры апертуры существенно меньше (в  $10^4 \dots 10^6$  раз) рабочей длины волны, поэтому для повышения рабочей добротности поперечные размеры накопительной части резонатора превышают апертурные, а его длина выбирается в несколько полуволн. Переход к требуемой по заданному пространственному разрешению геометрии микрозонда (tip), как правило, осуществляется в конечной части резонатора.

Повышение рабочей добротности датчика за счет увеличения длины резонатора практически пропорционально снижает его чувствительность к изменению резонансной частоты воздействующим через апертуру объектом. Поэтому целесообразно использовать другие ресурсы коаксиального конструктива.

Если исходить из известного соотношения для добротности полуволнового коаксиального резонатора

$$Q_{00} = \frac{L_0}{2\delta_{cm}} \left[ 1 + \frac{L_0(R_2^{-1} + R_1^{-1})}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}} \right]^{-1}, \quad (1)$$

не трудно убедиться, что для реального соотношения  $R_2 \ll L_0$

$$Q_{00} = \frac{R_2}{\delta_{ct}} \frac{\ln \frac{R_2}{R_1}}{\left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (2)$$

где  $\delta_{ct}$  – глубина скин-слоя в материале стенок на рабочей частоте;  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы внутреннего и внешнего коаксиала;  $L_0$  – длина резонатора.

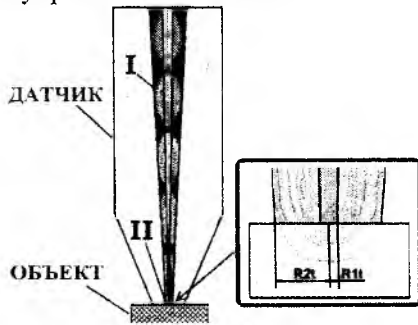


Рис. 1

Отсюда, с учетом взаимосвязи пространственной разрешающей способности с величиной  $R_1$ , возникает вывод о целесообразности конусного конструктива коаксиального резонаторного датчика апертурного типа, в том числе и для БПСММ. При таком конструктиве (рис. 1) накопительная часть I обеспечивает одновременное повышение добротности за счет выполнения условия  $R_2/R_1 \approx 3,6$  и  $R_2 \gg \delta_{ct}$  и согласование ее с малоразмерной апертурой II, обеспечивающей заданную пространственную разрешающую способность.

Выражение для добротности апертурного датчика будет отличаться от (1), (2) вкладом потерь на излучение в апертуру:

$$Q_{00} = \frac{1}{Q_{00}^{-1} + \frac{P_{изл}}{\omega \mu_0 \int_{V_p} H_\phi^2 dv}}, \quad (3)$$

где  $P_{изл}$  – мощность потерь на излучение в апертуру;  $H_\phi(r, z)$  – напряженность магнитного поля;  $\omega$  – рабочая частота;  $\mu$  – магнитная проницаемость вакуума;  $V_p$  – объем резонатора.

Из (3) видно, что реально повышать  $Q_{00}$  изложенным приемом целесообразно до выполнения условия

$$Q_{00}^{-1} \ll \frac{P_{изл}}{\omega \mu_0 \int_{V_{ppc}} H_\phi^2 dv}. \quad (4)$$

Однако здесь уместно обратить внимание на то обстоятельство, что выбор длины резонатора  $L_0$  определяется не только условием  $\frac{L_0}{2} \frac{(R_2^{-1} + R_1^{-1})}{\ln R_2/R_1} \gg 1$  и упоминавшимся выше ус-

ловиями чувствительности датчика к влиянию объекта на его резонансную частоту, но и требуемым частотным диапазоном исследования объектов. Поясним это более подробно.

Недостатком резонаторных СВЧ датчиков по сравнению с волноводными является «одночастотный» режим работы. При контроле и диагностике различных материалов важна оценка частотной зависимости их параметров. Например, при СВЧ влагометрии измерение  $\epsilon$  и  $\text{tg } \delta$  в диапазоне  $10^9 \dots 5 \cdot 10^{10}$  Гц позволяет разделить вклад свободной и связанной воды в общее влагосодержание материала либо биообъекта [3].

В БПСММ также целесообразно реализовывать исследования на нескольких разнесенных частотах для выделения неоднородности электропроводимости объекта на фоне общих СВЧ потерь в материале.

Коаксиальные резонаторные датчики в этом отношении выгодно отличаются от «одночастотных» объемных. Нетрудно оценить, что они для заданной длины  $L_0$  позволяют иметь следующий дискрет рабочих частот на низшей ТЕМ моде

$$f_i = \left( \frac{2n_i + 1}{2n_g + 1} \right) f_g, \quad (5)$$

где  $f_g = c(2n_g + 1)/4L_0$  – верхняя рабочая частота;  $c$  – скорость света;  $n_g$  – количество полуволн на верхней рабочей частоте.

В объемных такая возможность существенно ограничена соседними видами колебаний.

Конусность датчика при этом сглаживает рассогласованность накопительной части I с апертурной при переходе на другую рабочую частоту.

Работа на разных частотах позволяет отдельно, с высокой чувствительностью измерять влияние объекта на изменение резонансной частоты и добротности датчика и, соответственно, контролировать изменения свойств, связанных с  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  материала объекта.

### Результаты численных исследований структуры поля в апертуре

Выражение (3) практически сложно исследовать в аналитическом виде. Поэтому оценки метрологических параметров и свойств датчика целесообразно осуществлять путем численных исследований.

В работе все численные исследования выполнены на основе метода конечных элементов для решения уравнений Максвелла и реальных граничных условий в электродинамической системе датчик–объект (рис. 1).

На рис. 2 представлено распределение полного электрического поля  $E$  и составляющих  $E_z$  и  $E_r$  основного вида колебаний ТЕМ в объекте контроля на частоте  $f_0 = 7,89$  ГГц в зависимости от координат  $r$  и  $z$  при различных  $R_{1t}$ .

Из этих зависимостей следует, что уменьшение радиуса увеличивает концентрацию  $E_z$ -компоненты поля под микрозондом. Однако глубина «провисания» электрического поля в полупространство уменьшается с уменьшением соотношения  $R_{1t}/R_{2t}$ .

Уменьшается также общая энергия поля в апертуре. Сравнение с цилиндрическим конструктивом датчика [6] показывает, что конусность способствует лучшему согласованию резонатора с апертурой. Это проявляется в увеличении «провисания» поля в объект и, как следствие, – в повышении чувствительности датчика при заданной пространственной разрешающей способности.

На рис. 3, а, б представлены зависимости, иллюстрирующие влияние электрических параметров полубесконечного объекта на особенности распределения компонент электрического поля в апертуре. Одновременно эти зависимости дают количественное представление об отношении  $E_z/E_r$ . Из них следует, что чувствительность датчика к этим параметрам будет уменьшаться с увеличением диэлектрической проницаемости объекта  $\varepsilon_2$ , вследствие уменьшения «провисания» поля в него.

На рис. 4 приведены зависимости исходной добротности  $Q_{00}$  датчика, конструкция которого представлена на рис. 1, от рабочей частоты из указанного выше дискрета. Зависимости одновременно иллюстрируют влияние раскрытия апертуры на значение исходной добротности  $Q_{00}$ .

При расчетах оценивалась ненагруженная добротность. Электропроводность стенок выбрана для меди ( $\sigma = 5,6 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ). Здесь же представлена зависимость ненагруженной добротности полуволнового коаксиального резонатора на основе цилиндрического конструктива от рабочей частоты. Сравнение с четвертьволновым вариантом хорошо отражает вклад потерь на излучение и их зависимость от геометрии апертуры.

На рис. 5 приведены результаты численных оценок ненагруженной добротности конусного датчика от параметров полупроводникового объекта полубесконечной формы при различной геометрии измерительной апертуры.

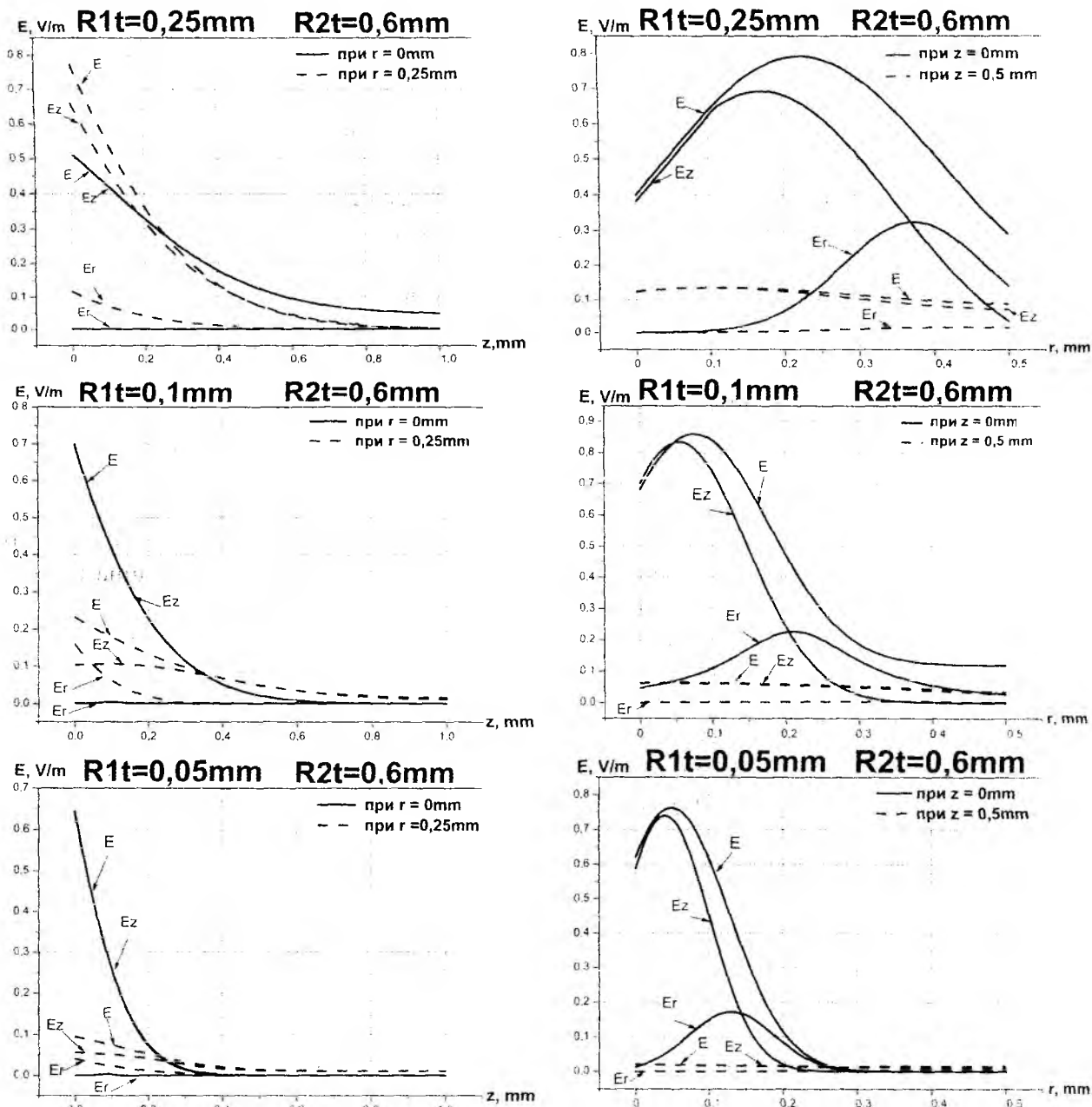


Рис. 2

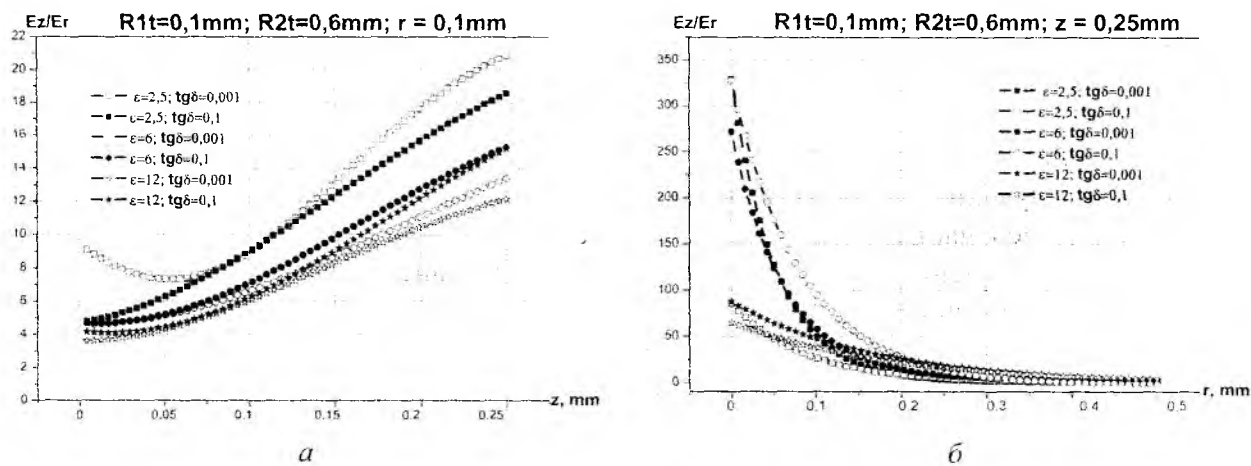


Рис. 3

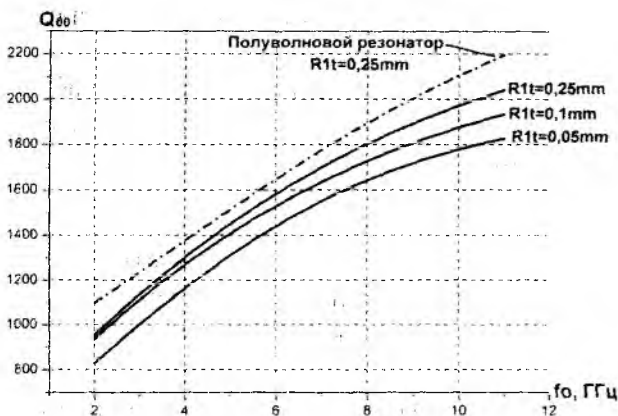


Рис. 4

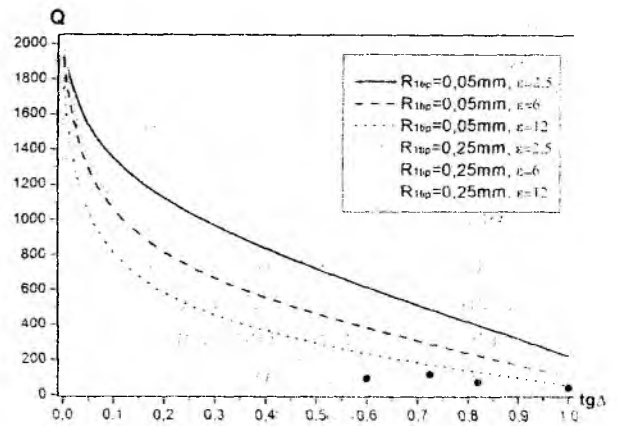


Рис. 5

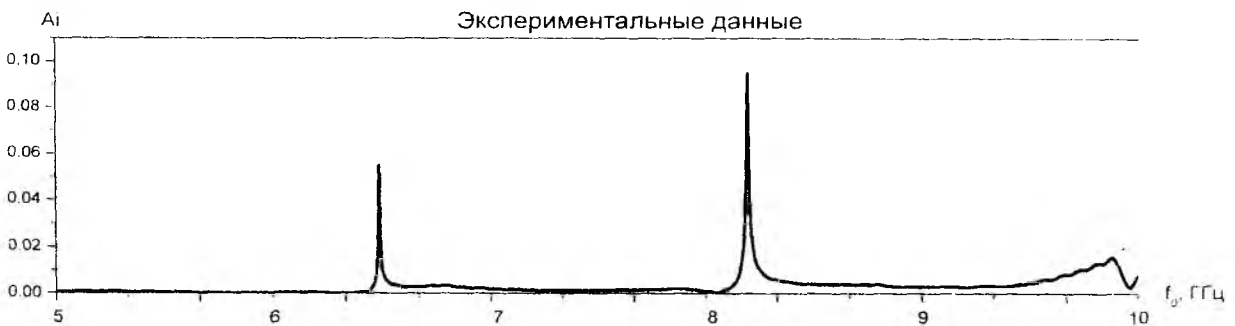
### Экспериментальные исследования

Представленные выше результаты численного исследования распределения электрических составляющих поля в измерительной апертуре качественно совпадают с имеющимися в [7] экспериментальными данными обычного цилиндрического коаксиального датчика.

Изготовленный конусный датчик экспериментально исследовался на установке, использующей векторный сетевой анализатор NA5230A. На рис. 6 приведен спектр его возбуждения в диапазоне 5...10 ГГц. Измеренные значения добротности (рис. 6, а) не соответствуют теоретическим (рис. 6, б) из-за несовершенства обработки внутренней поверхности резонатора и существенного вклада переходного сопротивления стыков разъемных частей в СВЧ потери. Качественно зависимость добротности от частоты возбуждения отражает теоретически ожидаемую. На рис. 5 точками представлены результаты экспериментального исследования ненагруженной добротности от  $\text{tg } \delta$  (электропроводности) кремния ( $\epsilon=12$ ) для конусного конструктива с геометрией ( $L = 105 \text{ мм}$ ;  $R_1 = 1,9 \text{ мм}$ ;  $R_2 = 6 \text{ мм}$ ;  $R_{1t} = 0,25 \text{ мм}$ ;  $R_{2t} = 0,6 \text{ мм}$ ) на рабочей частоте  $8 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ .



а



б

Рис. 6

Наблюдается качественное соответствие экспериментальных зависимостей и теоретических оценок.

Количественное расхождение связано с отличием реальной добротности  $Q_{00}$  рабочего образца резонатора от теоретической и погрешностью вычислений значения ненагруженной добротности из экспериментальных данных ее измерений.

### **Выводы**

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о перспективности применения конусного конструктива для разрешения проблемы отдельного управления чувствительностью и пространственной разрешающей способностью коаксиальных четвертьволновых датчиков апертурного типа.

Особое значение это имеет для продвижения сканирующей микроволновой микроскопии полупроводниковых структур в субмикронный диапазон пространственной разрешающей способности.

Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении конкретизации количественных оценок чувствительности и характеристик преобразования такого датчика, а также в направлении решения оптимизационных задач.

**Список литературы:** 1. *Chen L. F., Ong C. K., Neo C. P. and other. Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization // Southern Gate: John Wiley & Sons Ltd, 2004. 537 p.* 2. *Anlage S.M., Talanov V.V., Schwartz A.R. Principles of Near-Field Microwave Microscopy // Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale. Vol. 1. (Springer-Verlag, New York, 2007, ISBN: 978-0-387-28667-9). P. 215–253.* 3. *Tabib-Azar M., Katz J.L., LeClair S.R. Evanescent Microwaves: A Novel Super-Resolution Noncontact Nondestructive Imaging Technique for Biological Applications // IEEE transactions on instrumentation and measurement. 1999. Vol. 48. №6. P. 1111–1116.* 4. *Kim M., Kim J., Kim H. Nondestructive high spatial resolution imaging with a 60 GHz near-field scanning millimeter-wave microscope // Review of Scientific Instruments. 2004. Vol. 75. № 3. P. 1–5.* 5. *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.* 6. *Гордиенко Ю.Е., Петров В.В., Полетаев Д.А. Свойства четвертьволнового коаксиального СВЧ измерительного преобразователя для диагностики материалов // Радиотехника. 2008. №154. С. 61–66.* 7. *Imtiaz A., Anlage S. Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microwave microscope // Journal of the applied physics. 2006. Vol. 100. P. 1–8.*

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 23.11.2009*