

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗОНДОВОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Ю.Е. ГОРДИЕНКО, С.Ю. ЛАРКИН, О.П. ШИЯН

В работе приводятся результаты численного исследования зависимости распределения ближнего поля резонаторных зондов в сканирующей микроволновой микроскопии от размера острия зонда и влияния этого параметра на величину сигналов сканирования. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что пространственная разрешающая способность и контрастность микроскопии с использованием указанных зондов практически линейно зависят от радиуса острия. Это упрощает решение проблемы одновременного повышения контрастности и разрешающей способности сканирующей микроволновой микроскопии.

*Ключевые слова:* зондовая сканирующая микроволновая микроскопия (ЗСММ), резонаторный зонд (РЗ), пространственная разрешающая способность (ПРС).

### ВВЕДЕНИЕ

Ближнеполевая сканирующая микроскопия в настоящее время является наиболее развивающейся областью нового инструментария для физических исследований наноматериалов и нанотехнологий [1].

Наиболее перспективным ее направлением является зондовая сканирующая микроволновая микроскопия (ЗСММ), базирующаяся на применении резонаторных ближнеполевых зондов (РЗ) [2-4]. Характерный для микроскопии вопрос о предельной разрешающей способности в ЗСММ требует выделения аспектов, связанных с пространственной разрешающей способностью (ПРС) и контрастностью формируемых двух или трехмерных изображений распределения различных физических свойств объектов [5].

Для ранее возникших направлений зондовой сканирующей микроскопии, например, СТМ или АСМ такой вопрос не стоял в связи с тем, что повышение их ПРС теоретически и практически не сопровождается выходом сигналов на физический предел выделения. В ЗСММ такой выход может наблюдаться уже при субмикронном (а не нанометровом) значении ПРС из-за специфики формирования и выделения микроволновых сигналов сканирования.

Отметим, что в ЗСММ такими сигналами являются физические величины, связанные с изменением добротности и резонансной частоты зонда, пороги регистрации которых в относительном выражении существенно уступают порогам регистрируемых сигналов в СТМ и АСМ.

Поскольку это сложно связано как с физикой взаимодействия зонда с объектом, так и с технической обработкой сигналов, сама проблема еще весьма слабо изучена в теоретическом и практическом смыслах. В технической литературе отсутствуют прямые сведения о количественной взаимосвязи величины формируемых сигналов ЗСММ с радиусом острия зонда, который

фактически непосредственно определяет ПРС этого вида микроскопии.

Целью данной работы является установление такой взаимосвязи и попытка теоретически оценить перспективы повышения разрешающей способности ЗСММ.

Для этого предполагается решить следующие задачи:

- определить модель РЗ, исследование которой позволит обобщить подходы к количественной оценке направлений повышения разрешающей способности ЗСММ;
- численно установить зависимость сигналов сканирования от формы и сечения острия зонда;
- полномасштабно представить влияние формы и сечения острия зонда на распределение электромагнитного поля в апертуре с объектом;
- предложить физическую интерпретацию взаимосвязи ПРС и контрастности изображений, обеспечивающую возможность оценки перспектив улучшения этих параметров ЗСММ.

### 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В предыдущих работах [6-8] нами была обоснована целесообразность использования модели конусного коаксиального резонаторного зонда для построения основ теории ЗСММ. Схематичное изображение такого зонда представлено на рис. 1 с приведенными сведениями о конкретных размерах, для которых получены обсуждаемые ниже результаты.

Такой резонаторный зонд имеет резонансную частоту 7,8 ГГц на низшем ТЕМ виде колебаний при условии его четвертоволновости. Ненагруженная добротность при исполнении РЗ из меди имеет величину порядка  $2 \cdot 10^3$  и слабо уменьшается при уменьшении сечения острия  $R_{1r}$ .

Численные исследования выполняются с использованием решения уравнения Гельмгольца для электродинамической системы «РЗ –

исследуемый объект полубесконечной формы». Решение осуществляется методом конечных элементов с учетом потерь в стенках и граничных условий на бесконечности. Реальные размеры объекта для учета этих условий обоснованы в [9]. Предполагается, что воздушный зазор между острием зонда и объектом отсутствует. Ранее было показано [10], что такой подход обеспечивает хорошее совпадение с экспериментом и сходимость решений не хуже 0,01%. Время одного расчета значений добротности и резонансной частоты с промежуточным выделением распределения поля в системе не превышает 5 мин.

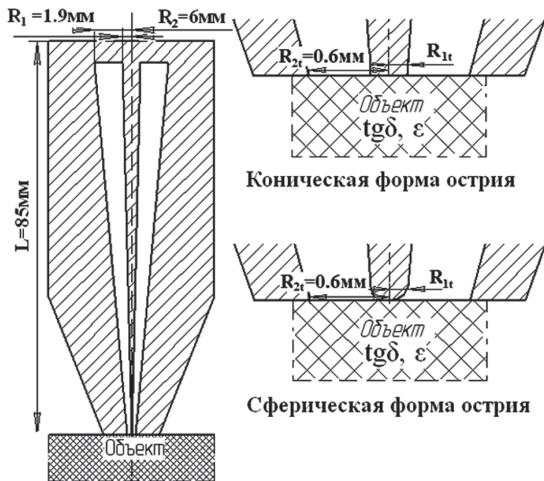


Рис. 1. Схематическое изображение конусного коаксиального резонаторного зонда

Сигналы сканирования представляются в виде значений добротности  $Q$  и резонансной частоты  $f$ , а также их изменения относительно значений для РЗ без объекта

$$\Delta\left(\frac{1}{Q}\right) = \frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0}; \quad \frac{\Delta f}{f} = \frac{f - f_0}{f}. \quad (1)$$

Одним из ключевых моментов анализа полученных результатов численного исследования является их соответствие теории малых возмущений. В соответствии с этой теорией между сигналами  $\Delta Q^{-1}$  и  $\Delta f/f$  должна существовать корреляция, выражаемая соотношением [11]:

$$\Delta\left(\frac{1}{Q}\right) = \text{tg}\delta \frac{2\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{\Delta f}{f}. \quad (2)$$

Как показано неоднократно в работах по резонаторным методам контроля параметров диэлектриков и полупроводников, это соотношение выполняется при условии существенного преобладания СВЧ потерь в объекте над потерями в стенках резонатора и на излучение, а также при условии, что объект не влияет на запасаемую энергию в остальной части электродинамической системы.

## 2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В первую очередь представим в полной мере систематизированные результаты исследования влияния формы и сечения острия зонда на распределение поля в объекте с однородным

распределением электрических свойств, характеризующимся определенным значением  $\varepsilon$  и  $\text{tg}\delta$ . Как известно [11], такое распределение для коаксиальной апертуры представляется вкладом нормальной и тангенциальной к плоскости объекта составляющих, которое зависит от формы и радиуса сечения острия. Так, для острия сферической формы вклад нормальной компоненты существенно локализуется непосредственно под острием, а для тангенциальной распределен по сечению коаксиала. Функционально важное для ЗСММ ближнее поле оказывается формируемым нормальной компонентой, а распределение его по радиусу носит квазиганссовый характер.

При форме острия в виде усеченного конуса ближнее поле локализуется по периферии острия с переходом нормальной составляющей в тангенциальную при  $r = R_{1t}$ . В итоге распределение полного ближнего поля зонда носит трубчатый характер с резким переходом от нормальной к объекту поляризации к тангенциальной на периферии острия.

Зависимость описанного распределения полного поля от радиуса  $R_{1t}$  для сферической и конической формы острия представлена на рис. 2.

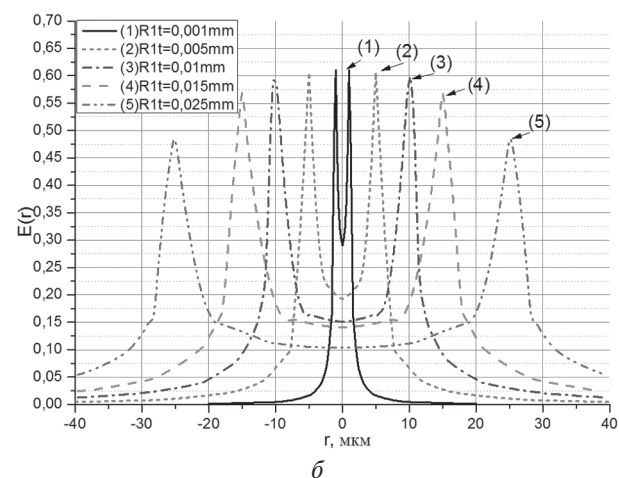
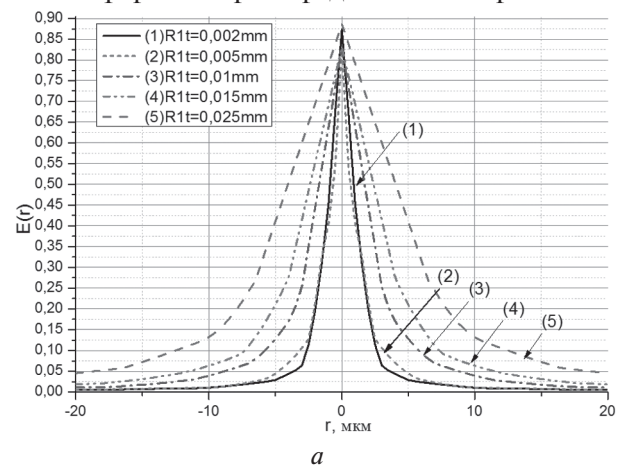


Рис. 2. Зависимость распределения поля РЗ от радиуса острия сферической (а) и конической (б) формы

Детализацию распределения поля по компонентам можно уяснить, воспользовавшись данными работы [10].

Руководствуясь формулой теории малых возмущений:

$$\frac{\Delta\pi}{\omega} = \frac{\int \Delta\varepsilon E_0 E_1^* dv}{\int \varepsilon_0 E_0 E_1^* dv}, \quad (3)$$

можно видеть, что зависимость чувствительности РЗ с конусной формой острия должна существенно отличаться от «геометрических» представлений о вносимой объектом комплексной емкости [5] и ее зависимости от  $R_{1r}$ .

Для сферической формы острия такой вывод далеко не очевиден. В целом, можно заключить, что необходимо конкретно исследовать зависимость сигналов  $Q$ ,  $\Delta Q^{-1}$ ,  $\Delta f/f$  от  $R_{1r}$ .

На рис. 3 представлены эти зависимости для различных форм острия.

Обращает на себя внимание близкая к линейной зависимость сигналов  $\Delta f/f$  и  $\Delta Q^{-1}$  от  $R_{1r}$ , что не соответствует «геометрическому» представлению о вносимой объектом в РЗ емкости. Квазилинейность зависимости сигналов как для сферической, так и для конической формы острия позволяет допускать аналогичную их экстраполяцию в область более малых значений  $R_{1r} < 10^{-3}$  мм. (Хотя вопрос поведения сигналов при сверхмалых сечениях острия требует отдельного уточнения.)

Вместе с тем, следует отдельно рассмотреть вопрос корреляции рассматриваемых зависимостей с теорией малых возмущений. С этой целью на рис. 3в представлены пунктиром графики

$\Delta\left(\frac{1}{Q}\right) = \varphi(R_{1r})$ , полученные по формуле (2), соответствующей данной теории, на основе рассчитанных значений  $\Delta f/f$ , а сплошными линиями – графики на основе прямого вычисления значения  $\Delta Q^{-1}$ .

Четко видно, что с увеличением  $R_{1r}$  и  $\text{tg}\delta$  объекта теория малых возмущений не соответствует точным вычислениям при разных формах острия. Объяснение этому факту можно искать, предполагая, что сигнал  $\Delta f/f$  кроме непосредственного накопления энергии в объекте связан еще и с перераспределением поля объектом в области апертуры. Такое предположение особо аргументируется зависимостью отклонения от  $\text{tg}\delta$  объекта.

Для полноты физической картины на рис. 4 приведены зависимости характеристик преобразования РЗ по сигналам, связанным с изменением его добротности, от радиуса сечения сферического и конусного острия. Они хорошо иллюстрируют справедливость сделанных выше выводов в широком диапазоне значений  $\text{tg}\delta$  объектов. Аналогичное заключение можно сделать и по диапазону значения диэлектрической проницаемости.

Отдельно следует отметить тот факт, что ПРС и контрастность физически скорее связаны соотношением инвариантности их произведения к радиусу острия, нежели его уменьшением с увеличением ПРС. Фактически такой вывод сделан в работе [5] по результатам экспериментальных

исследований и более приближенных физических оценок.

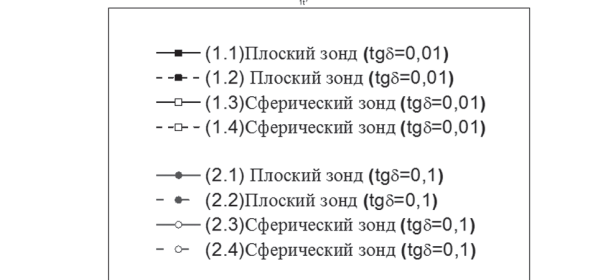
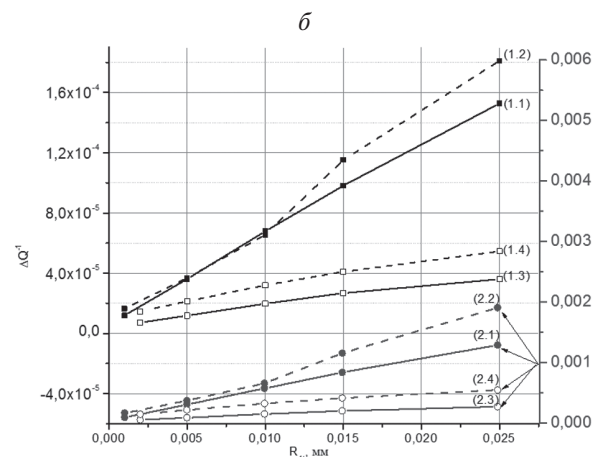
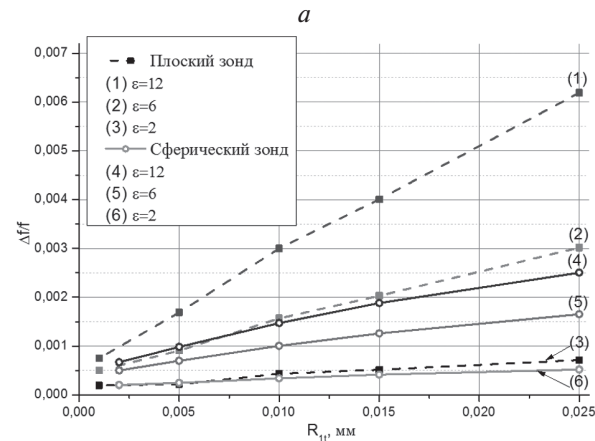
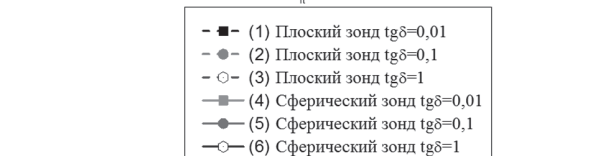
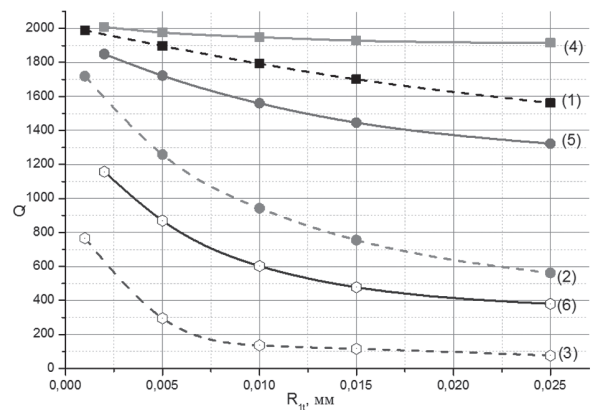


Рис. 3. Графики зависимости величин  $Q$ ,  $\Delta f/f$ ,  $\Delta Q^{-1}$  от  $R_{1r}$  для различных форм острия



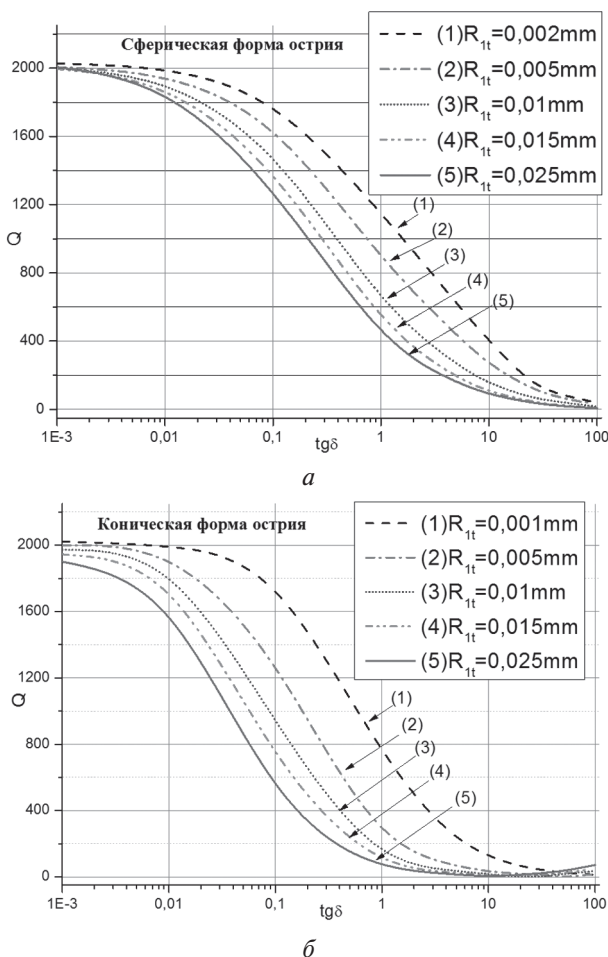


Рис. 4. Графики зависимости добротности  $Q$  для различных значений радиуса острия сферической (а) и конической (б) формы

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных системных исследований распределения поля в апертурной области резонаторных зондов для ЗСММ и зависимости формируемых с их помощью сигналов сканирования от формы и радиуса сечения острия можно сделать следующие выводы:

— для острия в форме усеченного конуса характерна «трубчатость» распределения поля в апертуре, зауживающаяся по мере уменьшения радиуса  $R_{it}$ . При сферичной форме острия «трубчатость» отсутствует, а энергия ближнего поля зонда локализуется в объекте непосредственно под острием. Сечение области локализации оказывается меньше  $R_{it}$ .

— зависимость сигналов сканирования от радиуса острия  $R_{it}$  носит квазилинейный характер, что существенно ослабляет проблему одновременного повышения ПРС и контрастности ЗСММ. Физическая интерпретация этого экспериментально подтверждаемого факта связана с концентрацией поля под острием зонда, что особенно проявляется при его сферической форме.

— количественная оценка сигналов сканирования показывает неприемлемость использования теории малых возмущений для интерпретации и реконструкции изображений в технике

ЗСММ. Для выполнения этих процедур необходимо применять прямые численные методы анализа с последующей аналитической аппроксимацией результатов при решении обратных задач.

### Литература

- [1] Scanning probe microscopy: electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale / edited by S. V. Kalinin, A. Gruverman. New York: Springer-Verlag. 2007. 980 p.
- [2] Anlage S. M., Steinhauer D. E., Feenstra B. J. at al. Near-field microwave microscopy of materials properties // Microwave Superconductivity / edited by H. Weinstock, M. Nisenoff. Netherlands: Rlumer Academic Publishers, 2001. P. 239-269.
- [3] Tabib-Azar M., Akinwande D., Ponchak G. E., LeClair S. R. Evanescent microwave probes on high-resistivity silicon and its application in characterization of semiconductors // Rev. Sci. Instrum. 1999. V. 70, №7. — P. 3083-3086.
- [4] Gao C., Wei T., Duerwer F. High spatial resolution quantitative microwave impedance microscopy by a scanning tip microwave near-field microscope // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. — P. 1872-1874.
- [5] Imtiaz A., Anlage Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microwave microscope // Journal of Applied Physics. 2006. V. 100. P. 1-8.
- [6] Гордиенко Ю.Е., Ларкин С.Ю., Яцкив А.М. Ближнеполевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора // Радиотехника, Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. X. : ХНУРЭ, 2009. — № 159. — С. 309-314.
- [7] Гордиенко Ю.Е., Камышан А.А., Ларкин С.Ю. Сравнительный анализ характеристик резонаторных зондов для СММ // Радиотехника и информатика. 2011. — № 1.
- [8] Гордиенко Ю.О., Ларкин С.Ю., Лепих Я.І. та інші. Теоретичні аспекти моделювання та проектування резонаторних зондів для скануючої мікрохвильової мікроскопії // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. 2011. Т/2, №8.
- [9] Гордиенко Ю.Е., Ларкин С.Ю., Сорока А.С. Радиационные эффекты в ближнеполевой микроволновой микроскопии // Радиотехника, Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. X.: ХНУРЭ, 2011. — № 164.
- [10] Gordienko Yu. E., Larkin S. U., and Prokaza A. M. Electromagnetic Properties of Resonator Microprobe for the Scanning Microwave Microscopy // Telecommunications and Radio Engineering, 2011, vol. 70. P. 1333-1342.
- [11] Лепих Я. І., Гордиенко Ю. О., Дзядевич С. В. та інші. Інтелектуальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління: [монографія].: Одеса, Астропринт, 2011. — С. 176-246.

Поступила в редколлегия 23.05.2012



Гордиенко Юрий Емельянович, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ.



**Ларкин Сергей Юрьевич**, канд. техн. наук, генеральный директор ПАО «НПК Наука» Киев.



**Шиян Оксана Павловна**, инженер кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ.

УДК 537.533.35

**Кількісний аналіз роздільної здатності зондової скануючої мікрохвильової мікроскопії** / Ю.О. Гордієнко, С.Ю. Ларкін, О.П. Шиян // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2012. — Том 11. № 3. — С. 426—430.

У роботі наводяться результати чисельного дослідження залежності розподілу ближнього поля резонаторних зондів у скануючій мікрохвильовій мікроскопії від розміру вістря зонда і впливу цього параметра на

величину сигналів сканування. Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що просторова роздільна здатність і контрастність мікроскопії з використанням зазначених зондів практично лінійно залежать від радіуса вістря. Це спрощує вирішення проблеми одночасного підвищення контрастності і роздільної здатності скануючої мікрохвильової мікроскопії.

*Ключові слова:* зондова скануюча мікрохвильова мікроскопія (ЗСММ), резонаторний зонд (РЗ), просторова роздільна здатність (ПРЗ).

Л. 04. Бібліогр.: 11 найм.

UDC 537.533.35

**Quantitative analysis of the resolution of scanning probe microwave microscopy** / Yu.E. Gordienko, S.Yu. Larkin, O.P. Shiyana // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2012. Vol. 11. № 3. — P. 426—430.

The paper gives results of numerical study of dependence distribution of the near field of resonator probes in scanning microwave microscopy (SMM) on the size of a probe tip and influence of this parameter on the value of scanning signals. The results obtained allow to make a conclusion that the spatial resolution and microscopy contrast with the use of the said probes are almost linearly dependent on the tip radius. This simplifies the solution of the problem of simultaneous contrast enhancement and SMM resolution.

*Keywords:* scanning probe microwave microscopy, resonator probe, spatial resolution.

Fig. 04. Ref.: 11 items.