

БЕСКОНТАКТНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ПРИ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Введение

На современном этапе сканирующая микроволновая микроскопия (СММ) в основном представлена вариантом, базирующимся на использовании сканирующих ближнеполевых зондов [1]. В этом наблюдается ее аналогия с туннельной (СТМ) и атомно-силовой (АСМ) микроскопией. Среди отличий фигурирует возможность работы в бесконтактном режиме. При этом величина зазора между острием зонда и объектом устанавливается в соответствии со спецификой формируемого изображения. Например, для разделения вклада в изображение неровности поверхности и неоднородности распределения каких-либо электрофизических свойств объекта необходимо сканирование при нескольких отличающихся значениях зазора [2]. Таким образом, в частности, реализуется прогнозируемое преимущество СММ перед СТМ и АСМ – многопараметровость диагностики и возможность томографии [3].

Как показывают экспериментальные исследования [4], зависимость фундаментальных сигналов сканирования в СММ от величины зазора имеет существенно нелинейный характер. Поэтому результаты большинства исследований объектов с помощью СММ носят иллюстративный характер, а получаемые изображения необходимо реконструировать.

Из всех вариантов ближнеполевых зондов в СММ наиболее широкое применение получили резонаторные зонды (РЗ), имеющие коаксиальную апертуру [5].

Для построения соответствующих алгоритмов реконструкции необходимо в первую очередь установить физику процессов взаимодействия ближнеполевых СВЧ резонаторных зондов с объектом при наличии зазора. Следующим после этой части шагом может быть придание аналитического вида зависимостям фундаментальных сигналов от величины зазора с целью постановки корректного решения обратной задачи.

Цель статьи – установление основных закономерностей влияния зазора между РЗ и объектом на сигналообразование в СММ.

Для ее достижения необходимо решить следующие задачи:

- количественно исследовать зависимость распределения СВЧ-поля в системе РЗ-объект от величины зазора при различной форме острия зонда;
- найти зависимость от зазора добротности РЗ и его фундаментальных сигналов при сканировании;
- дать физическую интерпретацию полученных зависимостей и оценить возможность решения обратных задач, необходимого для реконструкции изображений.

Общие положения

Экспериментальная практика и детальный теоретический анализ показывают, что все известные СВЧ-сигналы сканирования в СММ выражаются через следующий набор параметров РЗ: рабочее значение ненагруженной добротности Q ; относительное ее изменение при сканировании – $\frac{\Delta Q}{Q}$; изменение резонансной частоты при сканировании – $\frac{\Delta f}{f}$. Эти параметры и выделяемые в таком виде сигналы сканирования целесообразно называть фундаментальными. На практике выделяют значение нагруженной добротности, зависящее еще и от коэффициентов связи РЗ с волноводным трактом.

Детальное исследование различных РЗ для СММ [6] позволило установить, что в них следует выделять накопительный объем и апертурно-образующую часть. Роль накопительного объема сводится к оптимальному СВЧ-питанию сканирующей СВЧ-апертуры. Физиче-

ски это выражается в обеспечении условия преобладания СВЧ-потерь в объекте над остальными потерями в электродинамической системе РЗ – объект.

Математически это отображается соотношением $Q_0 \gg R_{об}$, в котором Q_0 – добротность РЗ в отсутствии объекта; $R_{об}$ – потери СВЧ мощности в объекте.

Использование фундаментальных сигналов сканирования Q , $\Delta Q/Q$, $\Delta f/f$ и указанного выше соотношения позволяет осуществить общие оценки при оптимизации СВЧ датчика в СММ по различным критериям с учетом свойств РЗ. Для понимания сказанного можно дополнительно воспользоваться обобщенной функциональной схемой СММ [7] с отдельно обозначенным СВЧ датчиком и конструктивом РЗ. В качестве РЗ в работе использовался конусный четвертьволновой коаксиальный резонатор, схематически изображенный на вставке рис. 1 с размерами $L_0=81\text{мм}$; $R_1=1,9\text{мм}$; $R_2=8\text{мм}$; $R_{1t}=25\text{мкм}$; $R_{2t}=600\text{мкм}$, описанный в работе [8]. Ненагруженная добротность такого РЗ без объекта составляет величину 2060 на резонансной частоте 7,9 ГГц.

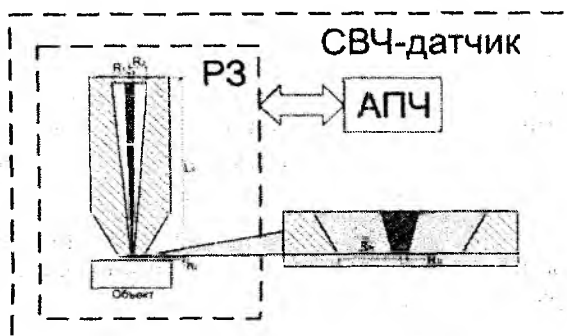


Рис. 1. Схема СВЧ датчика сканирующего микроволнового микроскопа на основе конусного резонаторного зонда

Обычно количественные оценки величины фундаментальных сигналов производятся в приближении теории малых возмущений (ТМВ) [9], из которой вытекают следующие выражения:

$$\frac{\Delta \tilde{f}}{f_0} = - \frac{\int [(\tilde{\epsilon} - \epsilon_0) \tilde{E} \tilde{E}^* + (\tilde{\mu} - \mu_0) \tilde{H} \tilde{H}^*] dV}{V_{об}} \cdot \frac{1}{\int_{V_{полн}} (\epsilon_0 \tilde{E} \tilde{E}^* + \mu_0 \tilde{H} \tilde{H}^*) dV} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = - \frac{\int (\epsilon - 1) E^2 dV}{2 \int_{V_{полн}} E^2 dV}; \quad (2a)$$

$$\Delta \left(\frac{1}{Q} \right) = \frac{\int \epsilon t g \delta E^2 dV}{2 \int_{V_{полн}} E^2 dV}; \quad (2б)$$

$$\Delta \left(\frac{1}{Q} \right) = - \frac{\Delta f}{f} \cdot \frac{\epsilon}{(\epsilon - 1)} t g \delta \quad (2в)$$

где \vec{E} , \vec{H} – напряженности электрического и магнитного СВЧ полей в рассматриваемой резонансной электродинамической системе «резонаторный зонд-объект»; ϵ_0 , μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума; $\tilde{\epsilon} = \epsilon(1 - jtg\delta)$; ϵ и $tg\delta$ – диэлектрические параметры объекта.

Интегрирование в числителях выражений (1) и (2) осуществляется по объему объекта $V_{об}$, а в знаменателях по объему всей электродинамической системы $V_{полн}$.

Выражения (2) записаны для немагнитного материала объекта (диэлектриков и полупроводников). Для добротности РЗ с объектом и ее изменения можно записать более точное общее выражение

$$Q = 2\pi f \frac{\int_V \epsilon_0 E^2 dV}{Z_{ст} \int_{S_{ст}} H^2 dS + \int_{V_{об}} 2\pi a \epsilon_0 \epsilon tg\delta E^2 dV} = \frac{1}{Q_0 + \frac{\int_{V_{об}} \epsilon tg\delta E^2 dV}{\int_{V_{полн}} E^2 dV}} + P_{изл}, \quad (3)$$

где $Z_{ст}$ – активная составляющая СВЧ импеданса металлических стенок; $P_{изл}$ – потери СВЧ мощности на излучение из РЗ.

Во всех приведенных выражениях фигурирует величина напряженности E , значение которой в общем случае зависит также и от параметров объекта (ϵ , $tg\delta$, геометрия). Поэтому основная трудность количественных оценок указанных сигналов связана с вычислением распределения напряженности СВЧ поля в различных частях системы.

Наиболее точные количественные оценки следуют из прямого численного решения колебательного уравнения системы методом конечных элементов [10]. Приведенные ниже результаты исследований получены именно таким путем. Выражения (1) – (3) будут использованы для качественного анализа, формулировки физических выводов и ориентации при получении аналитических аппроксимаций исследуемых зависимостей.

Результаты исследования и их анализ

В работе, в первую очередь, из решения волнового уравнения для электрофизической системы вида рис. 1 установлен характер и особенности распределения СВЧ поля в апертуре вдоль оси Z системы. На вставке рис.2 показано найденное исходное распределение в отсутствии объекта. Введение объекта в апертуру с различным зазором существенно усложнит характер этого распределения.

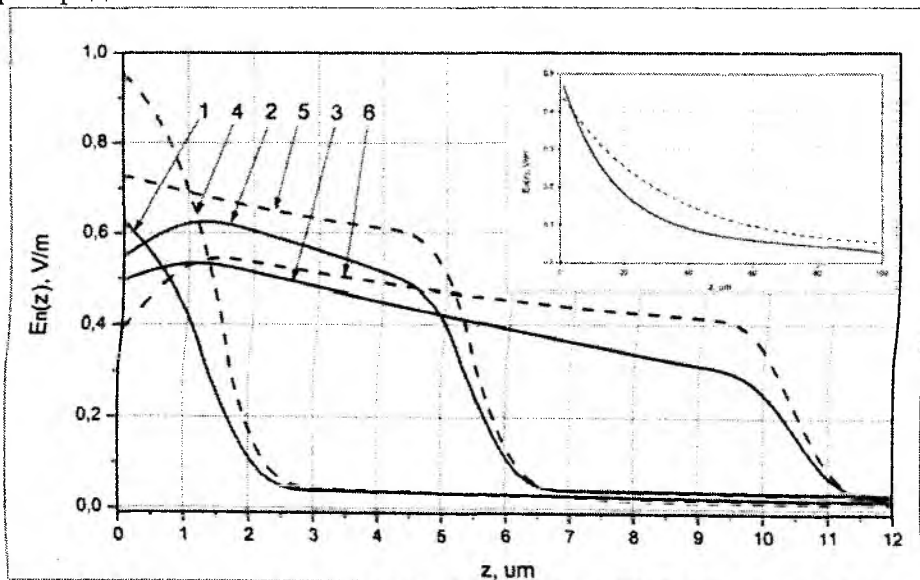


Рис. 2. Осевое распределение полей в апертуре РЗ при различной величине зазора, для сферической (1, 2, 3 – сплошная линия) и плоской (4, 5, 6 – пунктирная линия) форм острия; 1, 4 – $hz=1\text{мкм}$; 2, 5 – $hz=5\text{мкм}$; 3, 6 – $hz=10\text{мкм}$

Напомним, что, как следует из наших предыдущих работ [11] и исследования других авторов [12], полное поле локализуется в объекте под острием преимущественно в виде нормальной компоненты (E_z) при сферическом острие и перераспределяется между нормальной и тангенциальной (E_t) компонентами при плоскоконусном острие.

Причем, максимум тангенциальной компоненты смещается к периферии острия так, что распределение поля приобретает трубчатый характер. С увеличением радиуса плоской части острия провал распределения поля под зондом увеличивается.

Этот физический аспект накладывает отпечаток на зависимость распределения поля от величины зазора в виде увеличения его напряженности в зазоре при плоской форме острия. В целом следует отметить сильное ослабление поля в объекте зазором и наличие переходной области распределения на границе зазор-объект, протяженность которой зависит от диэлектрической проницаемости объекта.

Сложный характер распределения СВЧ поля в зазоре обусловлен также спецификой распределения ближнего поля в области острия зонда, и не предполагает простого прогнозирования зависимостей фундаментальных сигналов от величины зазора. Потому использование численных оценок величины поля для расчета этих сигналов по формуле (1) не является перспективным подходом. Как уже говорилось, более точные данные можно получить непосредственно из оценок собственных значений волнового числа рассматриваемой системы.

В частности, на рис. 3 приведены зависимости изменения частоты исследуемого зонда $\Delta f/f$ от зазора при различных значениях электрофизических параметров (ϵ и $\text{tg}\delta$) полубесконечного объекта. Ход их соответствует известным экспериментальным данным [5]. Хорошее соответствие с экспериментальными результатами свидетельствует об адекватности используемой модели.

Обращает на себя внимание экспериментально установленный и теоретически подтвержденный двумя приемами оценок физический факт резкого изменения фундаментального сигнала $\Delta f/f$ в области малых зазоров ($hZ \ll R1t$).

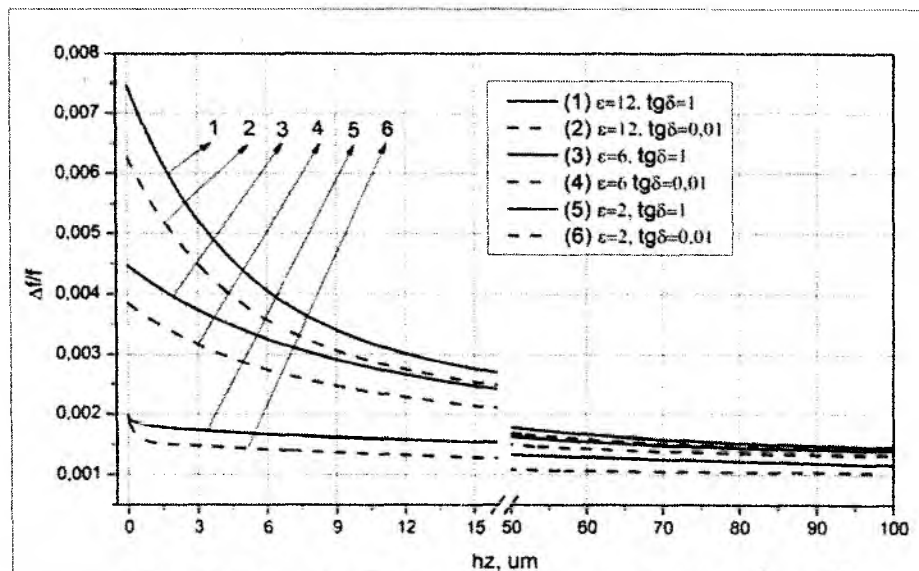


Рис. 3. Зависимость фундаментального сигнала $\Delta f/f$ от величины зазора зонд-образец

На рис. 4 представлены зависимости другого фундаментального сигнала — Q от величины зазора. Сведения о таких исследованиях в технической литературе практически отсутствуют, в частности в сравнении с зависимостями $\Delta f/f(hZ)$.

Такое сравнение весьма полезно в связи с существованием необходимости установления наличия СВЧ потерь мощности через излучение в зазор. Тот факт, что изменение обоих

сигналов с изменением зазора четко коррелированы свидетельствует об отсутствии вклада такого механизма в образовании фундаментального сигнала, связанного с добротностью зонда. Особо заметим, что при больших зазорах ($hZ \gg R1t$) наблюдаются небольшие изменения обоих сигналов. При наличии излучений в зазор сигнал Q имел бы более нелинейную зависимость по сравнению с сигналом $\Delta f/f$.

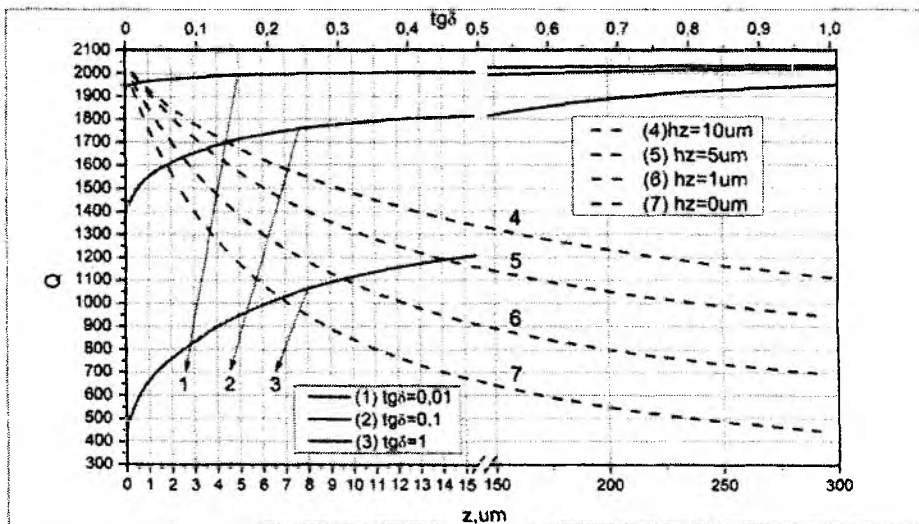


Рис. 4. Зависимость добротности от величины зазора зонд образец при различных значениях $\text{tg } \delta$ (сплошная линия) и от величины $\text{tg } \delta$ при различных значениях hz (пунктирная линия)

В совокупности представленные на рис. 3 и 4 данные несут достоверную количественную информацию о характере нелинейности фундаментальных сигналов сканирования в СММ от величины зазора в широком диапазоне его изменения, а также для практически важного интервала изменения ϵ и $\text{tg } \delta$ объектов. Плавный характер зависимостей позволяет предполагать возможность их корректной аналитической интерпретации. Это весьма важно, как для решения обратной задачи при реконструкции изображений в СММ, так и для исследования возможности постановки модуляционного (с помощью модуляции зазора) метода повышения контрастности СММ изображений.

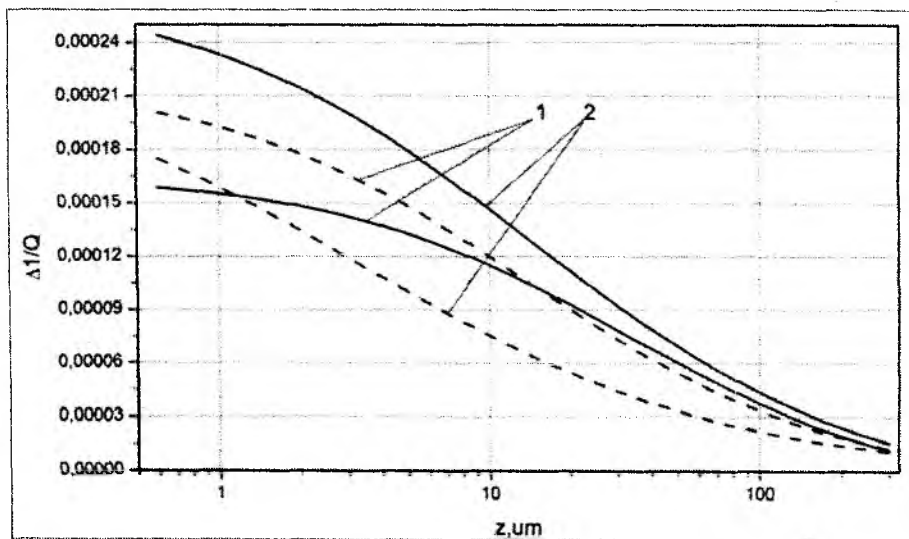


Рис. 5. Сравнение результатов прямых численных методов (пунктирная линия) и расчета с помощью ТМВ (сплошная линия): 1 – $\epsilon=4$; 2 – $\epsilon=12$

Из приведенного выше соотношения (2в) следует, что в приближении теории малых возмущений между фундаментальными сигналами $\Delta f/f$ и $\Delta(1/Q)$ существует простая взаимосвязь. Физически это объяснимо представлением о коэффициенте включения объекта в СВЧ

поле P3 [7]. Оба сигнала пропорциональны этому коэффициенту. Невыполнение упомянутого соотношения может быть вызвано потерями СВЧ мощности на излучение, а также влиянием объекта на перераспределение СВЧ поля во всей системе.

Выполнимость его позволяет упростить процедуры реконструкции СММ изображений распределения различных физических величин, характеризующих объект.

Рис. 5, на котором представлены результаты сравнения зависимостей сигнала $\Delta(1/Q)$ от зазора, полученные прямым численным методом и с помощью выражения (2в), иллюстрируют степень приближенности теории малых возмущений.

Заключение

Влияние зазора между зондом и объектом в СММ проявляется физически в резком скачке распределения осевого ближнего поля, ослабляющем его проникновение в объект.

Зависимость фундаментальных сигналов от величины зазора является существенно нелинейной. Основное убывание величины обоих сигналов происходит при малых зазорах в связи с одновременным ослаблением поля, как за счет зазора, так и в связи со спецификой его распределения по оси системы.

Количественные оценки этих факторов, выполненные для различных форм острия зонда, могут быть полезны для проектирования зондов. Сами зависимости легко аппроксимируются аналитическими соотношениями, что позволяет однозначно решать обратные задачи для реконструкции изображений.

При реконструкции целесообразно учесть существование простой (линейной) связи между сигналами $\Delta f/f$ и $\Delta(1/Q)$ в пределах выполнимости теории малых возмущений. Логично ожидать, что при очень малых зазорах ($hz \ll R1t$) такое приближение не соблюдается.

Список литературы: 1. *S. Anlage, V. Talanov, A. Schwartz: Principles of Near-Field Microwave Microscopy. Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale, Volume 1, edited by S. V. Kalinin and A. Gruverman (Springer-Verlag, New York, 2007, ISBN: 978-0-387-28667-9), p. 215-253.* 2. *Fred Duerwer, et al.: Tip-sample distance feedback control in a scanning evanescent microwave microscope. Applied physics letters Vol. 74, No. 18, 1999.* 3. *Гордиенко, Ю. Е., Мельник, С. И. Методика микроволновой сканирующей томографии электрофизических свойств полупроводников // Сб. материалов 20-й Крымской МНТК «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2010. – С.721-722.* 4. *D. Xiang, C. Gao. Quantitative complex electrical impedance microscopy by scanning evanescent microwave microscope // Materials Characterization №48, 2002, p. 117–125.* 5. *Гордиенко, Ю.Е., Петров, В.В. Полетаев, Д.А. Свойства четвертьволнового коаксиального СВЧ измерительного преобразователя для диагностики материалов // Радиотехника. – 2008. – №154. – С. 61-68.* 6. *Гордиенко, Ю.Е., Камышан А.А., Ларкин С.Ю. Сравнительный анализ характеристики резонаторных зондов для СММ // Радиоэлектроника и информатика. – 2011. – № 1. – С. 24-29.* 7. *S. V. Anlage, D.E. Steinhauer, B.J. Feenstra, et al. Near-field microwave microscopy of material properties // Department of Physics, University of Maryland, College Park, Maryland, 2000 – p. 9.* 8. *Гордиенко, Ю.Е., Ларкин, С.Ю., Яцкив, А.М. Ближнеполевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора // Радиотехника. – 2009. – Вып.159.* 9. *Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління / Я.І. Лепіх та ін. – Одеса : Астропринт, 2011. – Гл.4. Скануюча мікрохвильова мікроскопія як інтелектуальна вимірювальна система. – С. 176 – 246.* 10. *Cegerlund, J. Применение метода конечных элементов. – М. : Мир, 1979. – 392 С.* 11. *Gordienko, Y.E., Larkin, S.U., Prokaza, A.M. Electromagnetic properties of resonator microprobe for the scanning microwave microscopy // Telecommunication and Radio Engineering. – 2011. – Vol. 70, № 15. – P. 1333–1342.* 12. *Imtiaz, A., Anlage, S.M. Effect of tip-geometry on contrast and spatial-resolution on the near-field microwave microscopy // Journal of Applied Physics. – 2006. – 100 p. 0043041-0043048.*