

SIGNAL GENERATION, CONTRAST AND RESOLUTION IN NEAR-FIELD MICROWAVE MICROSCOPY

Bondarenko I.N., Gordienko Yu.Ye., Polishchuk A.V., Slipchenko N.I., Troitskiy S.I.
Kharkov National University of Radioelectronics
14, Lenin Ave., Kharkov, 61166, Ukraine
Ph.: (057) 7021362, e-mail: mepu@kture.kharkov.ua

Abstract — The analysis of scanning near-field microscope with a microwave resonator measuring probe and the recording system on the basis of the AFC system of a microwave generator with a measuring transmitter as a reference model, is carried out. It is shown that the process of signal generation and the possibility of increasing of sensitivity, contrast and resolution depend on factors that are specific to particular implementations of the microwave microscope.

СИГНАЛОБРАЗОВАНИЕ, КОНТРАСТНОСТЬ И РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ В БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ СВЧ МИКРОСКОПИИ

Бондаренко И. Н., Гордиенко Ю. Е., Полищук А. В., Слипченко Н. И., Троицкий С. И.
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
пр. Ленина, 14, Харьков, 61166, Украина
тел.: (057) 7021362, e-mail: mepu@kture.kharkov.ua

Аннотация — Проведен анализ сканирующего ближнеполевого микроволнового микроскопа с резонаторным измерительным зондом и системой регистрации на основе системы АПЧ измерительного СВЧ генератора с измерительным преобразователем в качестве эталона. Показано, что процесс сигналообразования и возможности повышения чувствительности, контрастности и разрешающей способности зависят от факторов, специфических для конкретных реализаций микроволнового микроскопа.

I. Введение

Сканирующая ближнеполевая СВЧ микроскопия, являясь одним из видов сканирующей зондовой микроскопии, позволяет производить многопараметровую диагностику различных материалов и сред, бесконтактно измерять микрорельеф поверхности, пространственное распределение удельной проводимости, диэлектрической проницаемости, строить профилограмму распределения носителей по глубине, оценивать время жизни и подвижность носителей [1].

В настоящее время активно ведутся исследования, направленные на разработку различных конструктивных решений сканирующих микроволновых микроскопов, их элементов и узлов, а также методов обработки и интерпретации получаемых с их помощью информационных сигналов.

При этом, как правило, основное внимание уделяется либо совершенствованию микроволновых измерительных преобразователей, либо систем формирования первичных информационных сигналов, либо методов обработки этих сигналов и выявления их связи с диагностируемыми параметрами.

Целью данной работы является проведение анализа комплексного влияния типа и геометрии микроволнового зонда, а также системы формирования первичных информационных сигналов на процесс сигналообразования, контрастность и разрешающую способность ближнеполевой микроволновой микроскопии.

II. Основная часть

Как и во всех видах микроволновых измерений, в сканирующей микроволновой микроскопии чувствительность измерений существенно возрастает при использовании резонаторных микрозондовых структур. СВЧ резонаторные зонды позволяют формировать два фундаментальных сигнала, связанных с изменением добротности и резонансной частоты при

сканировании объекта с неоднородным распределением свойств.

Указанные фундаментальные сигналы зависят по величине от значения собственной добротности резонатора, средней величины фундаментальных СВЧ параметров объекта (ϵ и $\text{tg}\delta$), степени взаимодействия объекта с полем в апертуре зонда, а также ряда других параметров. Поэтому при их формировании необходимо учитывать электродинамические характеристики зонда и диапазон значений ϵ и $\text{tg}\delta$ объекта.

Чувствительность зонда, которая в первую очередь определяет контрастность сканирующего микроволнового микроскопа (СММ), зависит от изменения его добротности и резонансной частоты при данной величине сканируемой неоднородности [2].

Добротность резонаторного зонда может быть определена следующим выражением:

$$Q = 2\pi f_0 \frac{W_{\text{зап}}}{P_{\text{пот}}} = 2\pi f_0 \epsilon_0 \frac{\int \epsilon E^2 dV}{P_{\text{ст}} + P_{\text{изл}} + \int \sigma_s E^2}, \quad (1)$$

где f_0 — резонансная частота зонда; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость части диагностируемого объекта, взаимодействующей с резонаторным зондом; E — амплитудное значение напряженности СВЧ поля; V_s , σ_s — включаемый в поле зонда объем диагностируемого объекта и удельная проводимость его материала; $P_{\text{ст}}$ — СВЧ потери в стенках зонда; $P_{\text{изл}}$ — СВЧ потери на излучение из зонда.

Напряженность СВЧ поля E , значения ϵ_s и σ_s являются функциями координат. Связанные с добротностью зонда сигналы изображения в СММ формируются как ее изменения ($\delta Q/Q$), вызванные главным образом изменением удельной проводимости объекта $\delta\sigma_s/\sigma_s$, так и других параметров (например, $\delta\epsilon_s/\epsilon_s$ или неровность поверхности $\delta h_z/h_z$). При этом ука-

занные изменения параметров объекта влияют на величину $\delta Q/Q$ не только прямо (1), но и косвенно через их воздействие на распределение поля E и значения $P_{ст}$ и $P_{изл}$.

Чувствительность зонда по добротности $\delta Q/Q$ можно получить из (1), дифференцируя его по контролируемому параметру с учетом зависимости всех входящих в выражение (1) величин этого параметра.

Чувствительность по резонансной частоте $\delta f/f$ получают аналогично из соотношения:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta W_{зап}}{W_{зап}} = \frac{V_s \int (\epsilon_s - 1) E^2 dV}{4 \int_V \epsilon E^2 dV}, \quad (2)$$

где $\Delta f/f$ — изменение резонансной частоты зонда, вызванное включением в его апертуру объекта объемом V_s ; $\Delta W_{зап}$ — изменение запасаемой СВЧ энергии в полной электродинамической системе зонда, связанное с включением объекта.

Из выражения (2) видно, что наиболее существенно величина $\Delta f/f$ зависит от ϵ_s объекта.

Для повышения чувствительности резонаторного зонда ко всем параметрам исследуемого образца необходимо максимально повышать его собственную добротность.

В тоже время рабочая добротность зонда, зависящая от степени включения объекта в его СВЧ поле, не должна быть ниже величины, которая ограничивает инструментальную точность выделения сигналов датчика.

Выделение и обработка фундаментальных сигналов $\delta Q/Q$ и $\Delta f/f$ имеет также большое значение для повышения чувствительности датчика и контрастности изображения СММ. Фактически при этом физические сигналы преобразуются в электрические и усиливаются до уровня, который обеспечивает их последующее использование и обработку современными информационными технологиями. Указанное преобразование базируется на использовании методов измерения добротности и резонансной частоты, обеспечивающих высокую чувствительность и точность.

Особенностью этих методов применительно к СММ является то, что необходимо производить одновременное измерение добротности (или ее изменений) и резонансной частоты (или ее сдвигов).

Наиболее простым решением представляется применение программируемого высокостабильного синтезатора частот СВЧ диапазона, синхронизируемого с системой позиционирования, позволяющего по точкам измерять резонансную кривую датчика и представлять данные измерений в цифровом виде.

Однако использование такого инструментария удорожает стоимость СММ в несколько раз, что неизбежно ведет к ограничениям в его широком распространении.

В тоже время поставленная задача может быть решена с помощью системы АПЧ измерительного СВЧ генератора с частотной модуляцией, в которой в качестве эталона служит резонаторный измерительный преобразователь СММ [1, 3].

При этом сигнал сканирования, связанный с $\delta f/f_0$, выделяется в виде сигнала ошибки после фазового детектора 7.

Величина его в общем случае определяется выражением

$$\frac{\delta f}{f_0} \approx \frac{\delta U(\delta f_0) \cdot S}{f_0}, \quad (3)$$

где $\delta U(\delta f_0)$ — напряжение сигнала ошибки, используемое для подстройки частоты измерительного генератора; S — крутизна перестройки частоты измерительного генератора.

Сигнал сканирования, связанный с $\Delta Q/Q$, выделяется в виде напряжения на СВЧ детекторе на частоте 2Ω , усиливается узкополосным усилителем и дальше поступает на систему обработки.

$$U^{2\Omega} \approx A_0 \cdot \frac{Q^2 (\Delta f_d)^2}{f_0^2}, \quad (4)$$

где A_0 — коэффициент, зависящий от мощности измерительного СВЧ генератора, схемы включения резонаторного измерительного датчика и характеристик СВЧ детектора; Δf_d — девиация частоты генератора.

Особенностью рассмотренной схемы формирования сигналов есть то, что автоподстройка частоты измерительного СВЧ генератора и работа в режиме совмещения его частоты с резонансной частотой РИП дают возможность снизить влияние на информационный сигнал шумов, обусловленных частотными флуктуациями генератора, использование информационного сигнала на частоте 2Ω позволяет уменьшить составляющую шума детектора, пропорциональную $1/f$, а селективное усиление — полосу усиливаемых шумов.

III. Заключение

Анализ, проведенный для СММ с резонаторным измерительным зондом и системой регистрации на основе системы АПЧ, показывает, что для получения базовых информационных сигналов, характеризующих основные параметры диагностируемых с помощью СММ объектов, необходим учет большого числа факторов, связанных как измерительным преобразователем, так и с системой измерения.

Процесс сигналообразования, повышение чувствительности и улучшение контрастности зависят и определяются особенностями конкретной реализации зондовых измерительных преобразователей и систем формирования базовых информационных сигналов.

IV. References

- [1] 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 / edited by S. V. Kalinin, A. Gruverman*, 2007. vol. 1, pp. 215-253.
- [2] Gordienko Yu.Ye., Larkin S.Yu., Prokaza A.M. Analytical simulation of instrumentation performance of resonance probes in scanning microwave microscopy. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2012, vol. 71, No 12, p. 1115-1123.
- [3] Bondarenko I.N., Gordienko Yu.Ye., Larkin S.Yu. Primenenie sistemy APCh izmeritel'nogo generatora v mikrovolnovo skaniryushei mikroskopii [Application of AFC system of the measuring generator in microwave scanning microscopy]. *Radioelektronika i informatika*, 2009, No 3, pp. 3-6.