

ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА ЗОНД — ОБРАЗЕЦ В СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Гордиенко Ю. Е., Ларкин С. Ю., Чхотуа М. С. Е.
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
г. Харьков, пр. Ленина, 14, 61166, Украина
тел.: (057) 702-13-62, e-mail: meru@kture.kharkov.ua

Аннотация — в докладе приводятся полученные путем численных исследований зависимости распределения СВЧ поля вдоль оси системы зонд-зазор-объект для конусного коаксиального резонаторного зонда от величины зазора. А также даны зависимости от зазора фундаментальных сигналов сканирования. В совокупности эти результаты представляют основу для комплексных оценок влияния зазора на функционирование СММ и проектирования алгоритмов реконструкции изображений в широком диапазоне значений электрофизических параметров объектов.

I. Введение

При сканирующей микроволновой микроскопии (СММ) между зондом и образцом, в отличие от сканирующей туннельной микроскопии, возможен, а чаще и необходим зазор, величина которого устанавливается в зависимости от специфики формируемого изображения. Например, для разделения вклада в изображение неровности поверхности и неоднородности распределения электрофизических свойств необходимо сканирование при нескольких отличающихся значениях зазора [1].

Влияние зазора на величину фундаментальных сигналов в СММ, как показывают экспериментальные исследования [2], имеет преимущественно непропорциональный характер и зависит от электрофизических параметров объектов и геометрии апертурно-образующей части зонда. Поэтому результаты большинства исследований по СММ различных объектов носят иллюстративный характер и требуют дополнительной реконструкции изображений. Для построения соответствующих алгоритмов реконструкции необходимо в первую очередь установить физику процессов взаимодействий 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.

II. Результаты исследований

Численные исследования выполнялись путем решения волновых уравнений для электродинамической системы, схематично изображенной на вставке к рис. 1. Конусный коаксиальный резонаторный зонд (ККРЗ) указанной на вставке геометрии [3] имеет резонансную частоту 7.9ГГц и ненагруженную добротность без объекта 2060. Полученное из решения волнового уравнения методом конечных элементов [4] распределение полного СВЧ-поля в системе представлено на рис. 1 для нескольких значений зазора. Физически, из представленных данных следует, что поле в объекте ослабляется при увеличении зазора, а эффективная глубина его проникновения в объект остается практически неизменной. Отдельный интерес представляет сам характер распределения в зазоре и объекте, отличающийся от квазистатического.

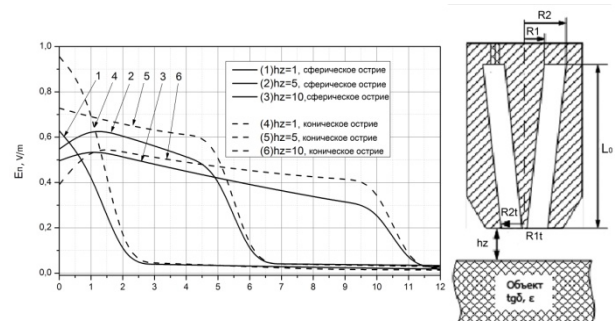


Рис. 1. Распределение поля и схема ККРЗ: $R_1=1.9\text{мм}$, $R_2=8\text{мм}$, $R_{1t}=25\text{мкм}$, $R_{2t}=600\text{мкм}$, $L_0=81\text{мм}$.

Fig. 1. Chart of $E_n(h_z)$ characteristics and CCRP scheme: $R_1=1.9\text{mm}$, $R_2=8\text{mm}$, $R_{1t}=25\mu\text{m}$, $R_{2t}=600\mu\text{m}$, $L_0=81\text{mm}$

Отчетливо проявляется влияние формы острия (конус или полусфера) на характер распределения, что объясняется увеличением роли нормальной компоненты поля при полусферическом острии [5].

Рис. 2 иллюстрирует зависимость величины добротности ККРЗ от зазора (кривые 1, 2, 3) и значения $\text{tg}\delta$ объекта (кривые 4, 5, 6, 7). Эти зависимости укладываются в рамки физического представления и полезны своим количественным характером.

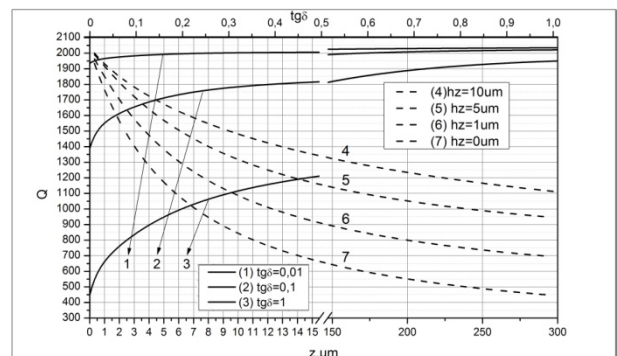


Рис. 2. Характеристики преобразования ККРЗ, $\epsilon=12$.

Fig. 2. CCRP conversion characteristics, $\epsilon=12$

Из них видно, что наиболее резкое изменение добротности с увеличением зазора имеет место при малых значениях зазора (при $\frac{h_z}{R_{1t}} \approx 0.2$). Столь же очевидным является усиление влияния зазора при $\text{tg}\delta > 0.1$. Зависимость сигнала $\frac{\Delta f}{f}$ от величины зазора, как вытекает из рис. 3, имеет существенно нелинейный характер при различных ϵ и $\text{tg}\delta$ объекта. Особенно резкое изменение этого фундаментального сигнала также наблюдается в области малых зазоров (при $\frac{h_z}{R_{1t}} < 0.2$).

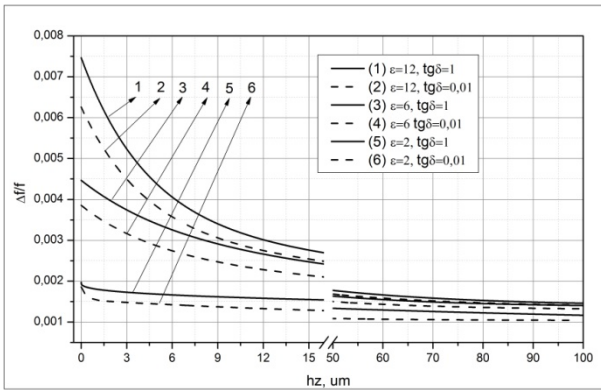


Рис. 3. Частотные характеристики ККРЗ.
Fig. 3. CCRP frequency characteristics

Качественно этот характер рассматриваемых зависимостей совпадает с известными экспериментальными данными [6].

Фундаментальный сигнал, связанный с изменением добротности резонаторного зонда, часто представляют в виде $\Delta\left(\frac{1}{Q}\right)$. На рис.4 даны результаты исследований влияния зазора на этот сигнал.

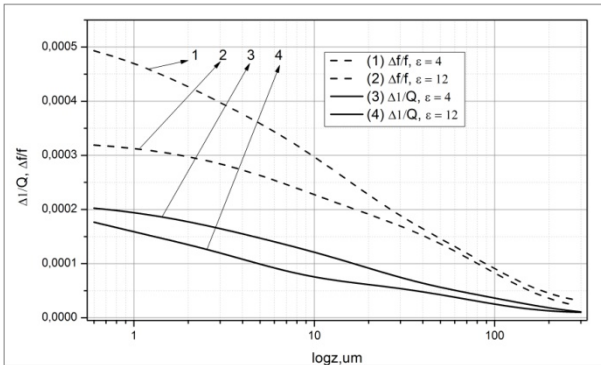


Рис. 4. Изменение добротности ККРЗ.
Fig. 4. CCRP Q-factor variation

Эти данные вычислены непосредственно (кривые 3, 4), и измерены в приближении теории малых возмущений (ТМВ) [7] из сигнала $\frac{\Delta f}{f}$ (кривые 1, 2).

III. Заключение

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

Зависимость фундаментальных сигналов от величины зазора является существенно нелинейной. При малых зазорах происходит основное убывание величины обоих сигналов в связи с одновременным ослаблением поля, как за счет зазора, так и в связи со спецификой 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.

IV. Список литературы

[1] Fred Duerwer, et al.: Tip-sample distance feedback control in a scanning evanescent microwave microscope // Applied physics letters Vol. 74, No. 18, 1999.

[2] Michael Golosovsky, et al.: Near-Field of a Scanning Aperture Microwave Probe: A 3-D Finite Element Analysis // IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 51, NO. 5, 2002
[3] Гордиенко Ю. Е. и др.: Ближнеполевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора // Радиотехника : науч.-техн. сб. – X. : ХНУРЭ, 2009. – Вып. 159. – С. 309–314.
[4] Сегерлинд Л.: Применение метода конечных элементов — М.: Мир, 1979. — 392 С..
[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.
[6] Kiejn Lee et al.: Near-Field Scanning Microscopy Using a Resonant Waveguide Probe at Millimeter Wavelengths // Journal of the Korean Physical Society, Vol. 39, No. 6, 2001, P. 1003–1005
[7] Гордиенко Ю. О., Лепих Я. І. та ін.: Інтелектуальні вимірвальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління. – Одеса: Астропринт, 2011. С. 186-190.

SAMPLE — TIP DISTANCE INFLUENCE IN SCANNING MICROWAVE MICROSCOPY

Gordienko Y. E., Larkin C. Y., Chkhotua M. S. E.
Kharkiv National University of Radioelectronics
14, Lenina avenue, Kharkiv, Ukraine, 61166
ph.: (057) 702-13-62, e-mail: mepu@kture.kharkov.ua

Abstract — This paper contains a microwave-field distribution dependence of sample-tip distance (STD) along the system probe-distance-sample axis for a finite coaxial resonator probe (CCRP). In addition, the STD dependence of fundamental signals is presented.

I. Introduction

Influence of STD on the fundamental signals in Scanning Microwave Microscopy (SMM) is mainly disproportional; it is proved in experimental studies. It also depends on sample electro-physical parameters, and aperture geometry. Therefore most of the SMM analysis of different objects is mainly illustrative and requires additional image reconstruction.

For the reconstruction algorithm formation it is necessary to bring out the physics of near-field interactions with STD.

II. Main Part

The numerical investigation was performed by solving wave equations for the electrodynamic system, displayed in the frame in fig.1. Resonance frequency of this CCRP is 7.9GHz and unloaded Q-factor is 2061.

We have the field distribution for several values of STD, shown in Fig.2. Physically, it means that field in the sample gets weaker with increasing STD, but the effective field penetration depth remains practically unchanged.

Fig. 2 illustrates the Q-factor dependence of STD and $tg\delta$. One can see that most dramatic changes take place at low STD values ($\frac{h_z}{R_{st}} \approx 0.2$).

Obviously, STD influence increases at $tg\delta > 0.1$. Also, the $\frac{\Delta f}{f}$ dependence of STD is given in Fig. 3, it has a nonlinear nature.

Fig. 4 showed the fundamental signal $\Delta\left(\frac{1}{Q}\right)$ dependence of STD. The black traces are for direct calculations, the dotted lines were calculated using the small perturbation theory (SPT).

III. Conclusion

It is shown that SPT calculations give an overrated result, which can be caused with stem from the field redistribution influence at a value of $\Delta f/f$ in aperture. Differences between the probe shapes do not affect field penetration in a sample, but using a cone probe can lead to an increment of its value.