

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Гордиенко Ю. Е.¹, Ларкин С. Ю.²

¹Харьковский национальный университет радиозлектроники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166, Украина

тел.: (057) 702-13-62, e-mail: teru@kture.kharkov.ua

²Научно-производственный концерн НАУКА

пр. 50-летия Октября, 26, г. Киев, 03148, Украина

тел.: +38-044-4820511

Аннотация — Приведены результаты численного, численно-аналитического и экспериментального исследования сигнала образования в сканирующей микроволновой микроскопии (СММ). Численное моделирование электродинамических характеристик взаимодействия коаксиального резонаторного зонда с диэлектрическими и полупроводниковыми объектами позволило установить зависимость сигналов первичного преобразования информации от геометрии апертуры зонда и электрофизических параметров объекта. Численно-аналитические и экспериментальные исследования последетекторного преобразования сигналов определили общие теоретические аспекты различных способов этой части сигналаобразования. В целом созданы предпосылки формирования общей теории СММ.

I. Введение

Сканирующая микроволновая микроскопия (СММ) по физическому принципу образования сигнала от элемента сканирования объекта относится, также как и АСМ, СТМ, ЕСМ, к ближнеполевой [1] микроскопии.

Важными отличительными особенностями микроскопии СММ, определяющими перспективы ее развития, являются: применимость для широкого класса объектов (диэлектрики, полупроводники, ВТСП, биосреды и пр.), возможность получать изображение картины пространственного распределения различных физических свойств объектов в отдельности; технико-аппаратное базирование на современных стандартных узлах и системах. Однако, реализация этих перспектив сдерживается отсутствием общей теории СММ.

В докладе обсуждаются следующие основные аспекты такой теории: теория формирования первичной измерительной информации; теория оптимального выделения СВЧ сигналов измерительной информации; теория последетекторного преобразования и обработки сигналов; теория многопараметровой микродиагностики объектов и подавления мешающих факторов.

II. Основная часть

Исходя из приоритетности использования в качестве первичного преобразователя информации резонаторных зондов с коаксиальной измерительной апертурой [2], путем численных исследований (метод конечных элементов при решении уравнений Максвелла) соответствующих электродинамических систем установлены физические взаимосвязи чувствительности и пространственной разрешающей способности СММ с геометрией апертуры указанных зондов. Приводятся также количественные соотношения, отражающие эти взаимосвязи и характеризующие диапазоные особенности СММ для различных объектов.

В частности, представленные на рис. 1 и 2 графики распределения электрического поля СВЧ колебаний конусного зонда [3] в измерительной апертуре свидетельствуют о таких особенностях:

– при соотношении внутреннего и внешнего радиусов коаксиального зонда $(R_{1t}/R_{2t}) < 10$ и $(R_{2t}/\lambda) < 10^{-2}$ подавляющая часть энергии СВЧ электрического поля в апертуре сосредоточена в нормальной к объекту компоненте;

– придание концу зонда сферической или эллипсоидальной формы «заостряет» по сравнению с плоской формой диаграмму направленности апертуры и способствует увеличению пространственной разрешающей способности СММ с меньшими потерями чувствительности;

– глубина «провисания» поля в объект также увеличивается с переходом от плоской формы к сферической или эллипсоидальной.

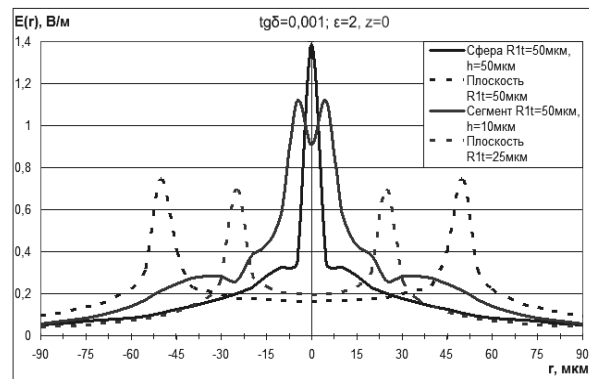


Рис. 1. Зависимость $E(r)$ от геометрии микрозонда.

Fig. 1. $E(r)$ dependence vs. different probe shapes

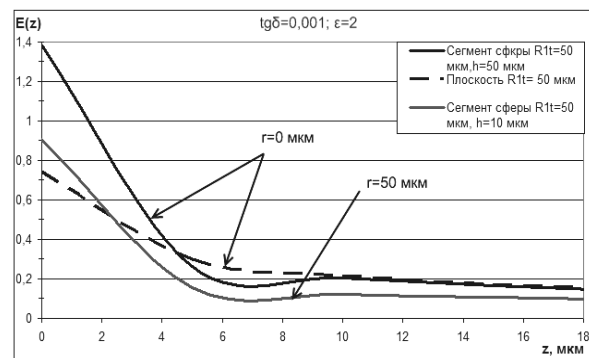


Рис. 1. Зависимость $E(z)$ от геометрии микрозонда.

Fig. 1. $E(z)$ dependence vs. different probe shapes

Результаты количественных исследований соотношения чувствительности и пространственной разрешающей способности показали их практически линейную зависимость от параметра R_{1t}/R_{2t} .

Отдельными исследованиями установлены вклад СВЧ потерь на излучение в первичные сигналы измерительной информации и его зависимость от зазора между зондом и объектом. Также изучены соотношения, характеризующие влияние электрических параметров объекта на распределение поля в апертуре зонда.

Показано, что теория выделения сигналов измерительной информации от элемента сканирования и их последующего преобразования к стандартному для компьютерной обработки виде может базироваться на реализации различных вариантов следящего алгоритма:

$$\left. \begin{matrix} \Delta s(x, y, z) \\ \Delta \sigma(x, y, z) \\ \dots \\ \Delta \tau(x, y, z) \\ \Delta \mu(x, y, z) \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} \frac{\Delta_t Q_i(x, y, z)}{Q_i} \\ \frac{\Delta_t f_i(x, y, z)}{f_i} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} \Delta U_{t_1}^Q \rightarrow \Delta U_1^Q \\ \Delta U_{t_1}^f \rightarrow \Delta U_1^f \\ \Delta U_{t_2}^Q \rightarrow \Delta U_2^Q \\ \Delta U_{t_1}^f \rightarrow \Delta U_2^f \\ \dots \end{matrix} \right\}$$

1 2 3 4 5

где 1 – набор контролируемых по неоднородности параметров; 2 – временная последовательность воздействия на объект; 3 – первичная измерительная информация с элемента сканирования; 4 – последовательное преобразование сигнала; 5 – выходные парциальные нормированные сигналы измерительной информации.

Приводятся примеры парциального воздействия и теории формирования первичной информации $\Delta_t Q_i / Q_i$ и $\Delta_t f_i / f_i$, ее оптимального преобразования в сигналы ΔU_i^Q и U_i^f , и аппаратное или математическое исключения влияния мешающих факторов.

III. Заключение

В результате выполненных исследований созданы предпосылки формирования общей теории СММ, базирующейся на использовании в качестве микроволнового зонда объемных резонаторов с коаксиальной измерительной апертурой. При этом показано, что для последетекторного преобразования перспективными являются модуляционный и прямоотсчетный способы выделения и обработки сигналов, связанных с модуляцией добротности и резонансной частоты зонда в СВЧ системе с АПЧ питающего генератора по зонду.

Многопрофильность СММ по изображению неоднородности распределения различных физических параметров объекта может реализовываться подбором специфичных воздействий на объект и вариацией степени включения его в поле зазора.

IV. Список литературы

- [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. – New York: Springer-Verlag, 2007. Vol. 1. p. 215-253.
- [2] *Gordienko Yu. E., Petrov V. V., Khamud F. M.* Estimation of Numerical-Analytical Models of Microwave Cavity Detectors with a Coaxial Measuring Aperture // Telecommunications and Radio Engineering. 2006. Vol. 65, № 9-10. p. 789–798.
- [3] *Гордиенко Ю. Е., Ларкин С. Ю., Яцкив А. М.* Ближнеполевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора // Радиотехника. – 2009. № 159. С. 309–314.

THE BASIC ASPECTS OF THE GENERAL THEORY OF SCANNING MICROWAVE MICROSCOPY

Gordienko Yu. Ye.¹, Larkin S. Yu.²

¹Kharkov National University of Radioelectronics
14, Lenin Ave., Kharkov, 61166, Ukraine
Ph.: (057) 702-13-62, e-mail: mepu@kture.kharkov.ua

²Scientific and industrial concern NAUKA
2-B, 50-richya Zhovtnya Ave., Kyiv, 03148, Ukraine
Ph.: +380-044-236-10-85

Abstract — The numerical modeling of electrodynamics of interaction of the coaxial resonator microprobe with dielectric and semiconductor objects allowed ascertaining some dependence of signal parameters of primary transformation of the information on the geometry of probe aperture and electrophysical parameters of an object. Numerical-analytical and experimental research after detector transformation of signals have determined a general theoretical aspects of various ways of this stage of signal forming. The preconditions of forming of the general theory of SMM are created.

I. Introduction

The important distinctive features of SMM, which determine future trends of its development, are the following: applicability for a wide class of objects, availability of the image of spatial distribution of various physical properties of objects separately; hardware engineering based on modern standard units and systems. However realization of these future trends is restrained by the absence of the general SMM theory.

II. Main Part

Taking into account the priority of using the resonator probes with the measuring coaxial aperture as a primary converter of information [2] by numerical research of appropriate electrodynamic systems, the physical interrelations of sensitivity and spatial resolving capacity of SMM with the aperture geometry of the specified probes (fig. 1, 2) are established. The quantitative relations reflecting these interrelations and describing the frequency range features of SMM for various objects are also presented.

Individual investigations have allowed ascertaining the role of microwave radiation losses in forming primary signals of the measuring information and the dependence vs. a gap between the probe and an object. Also some relations describing the influence of electrical parameters of an object on field distribution in the aperture of a probe are investigated.

The examples of partial influence and theory of forming the primary information $\Delta_t Q_i / Q_i$ and $\Delta_t f_i / f_i$, its optimal transformation to signals ΔU_i^Q and U_i^f , and hardware or mathematical exceptions of influence of the interfering factors are presented.

III. Conclusion

As a result of the investigations the preconditions of forming the general theory of SMM based on using the volume resonator with the coaxial measuring aperture as a microwave probe are created. Thus it is shown that for the after-detector transformation the perspective ways are modulating and directly reading ways of recovery and processing of signals connected with modulation of quality and resonant frequency of a probe in a microwave system with AFC of the generator supplying a probe.

The versatility of SMM on imaging the heterogeneity of distribution of various physical parameters of an object can be realized by selection of specific influences on an object and by variation of a degree of its inclusion in a field of a gap.