

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ РЕЗОНАТОРНЫХ ЗОНДОВ ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МИКРОСКОПИИ

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

Аннотация — Исследованы характеристики преобразования резонаторных зондов с коаксиальной измерительной апертурой. Вычислительная практика показывает, что процедура их численных оценок требует особого внимания, что порождает особые требования по обеспечению адекватности моделирования. Таким образом, в работе рассмотрены возможности придания аналитических аппроксимаций данным метрологических зависимостей в теории СММ, полученным прямыми численными методами решения электродинамических задач в строгой постановке.

I. Введение

В сканирующей микроволновой микроскопии (СММ), несмотря на более широкие функциональные возможности по сравнению с АСМ и СТМ [1], существует ряд проблем, ограничивающих ее широкое применение. В первую очередь к ним следует отнести необходимость и сложность процедуры реконструкции первичных изображений [2]. Эти проблемы связаны со сложной зависимостью сигналов сканирования от исходных параметров объекта и конструктива сканирующего зонда [3-4]. Практически все известные попытки установления этих зависимостей базируются на исследовании прямыми численными методами решения возникающих электродинамических задач. Такой подход исключает, необходимое при реконструкции, решение обратной задачи через исследования решений прямой задачи.

В докладе обсуждается возможность формирования аналитических соотношений для измерительных зависимостей в СММ, в первую очередь для их использования в решении обратных задач реконструкции изображений. Такие соотношения могут вытекать из аппроксимации графиков указанных зависимостей, полученных прямыми численными методами.

II. Основная часть

Конечная цель обработки измерительной информации в СММ - это не только получение радиоизображений образца (высотный профиль поверхности, пространственная картина распределения электрофизических характеристик на поверхности образца и т.д.), но и получения количественной информации об этих свойствах. Сканирование поверхности образца может выполняться в режиме мягкого контакта (случай нулевого зазора) и режима зазора между острием микронзонда и поверхностью образца.

В результате проведенных исследований были получены характеристики преобразования (рис. 1 – 2) РИП от величины воздушного зазора, а также в его отсутствии (рис. 3), для полупроводниковых структур, которые имеют значения диэлектрической проницаемости в диапазоне 2 – 12 и тангенсом угла диэлектрических потерь равным $10^{-3} - 1$.

В связи со слабым влиянием на изменение частоты $\text{tg}\delta$ материала объекта в зависимостях, изображенных на рис. 1 использовался $\text{tg}\delta=0,1$.

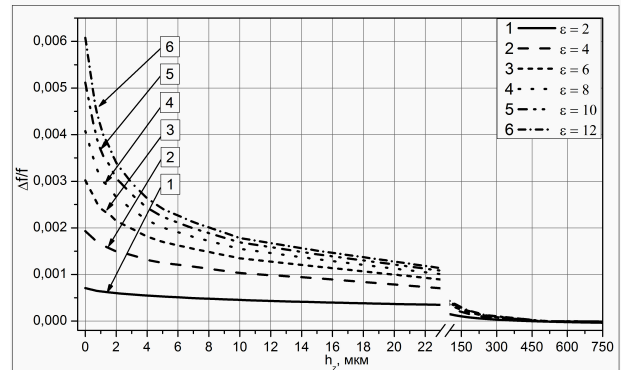


Рис. 1. Зависимость сдвига частоты РИП от величины зазора.

Fig. 1. The dependence of the frequency shift of RMC on the gap

В результате аппроксимации полученных зависимостей было найдено следующее выражение:

$$\Delta f / f(\varepsilon, h_z) = \frac{A(\varepsilon) - B(\varepsilon)}{1 + \left(\frac{h_z}{C(\varepsilon)} \right)^{D(\varepsilon)}} + B(\varepsilon) \quad (1)$$

где коэффициенты зависят от ε и имеют следующий вид:

$$A(\varepsilon) = a - b \cdot \varepsilon^c; \quad D(\varepsilon) = a_0 + a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2 + a_3\varepsilon^3 + a_4\varepsilon^4 + a_5\varepsilon^5;$$

$$C(\varepsilon) = a \cdot e^{b/(\varepsilon+c)}; \quad B(\varepsilon) = a_0 + a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2 + a_3\varepsilon^3 + a_4\varepsilon^4.$$

Для коэффициентов в зависимостях $A(\varepsilon)$, $B(\varepsilon)$, $C(\varepsilon)$, $D(\varepsilon)$ найдены численные значения.

Зависимости добротности РИП от воздушного зазора для Si в качестве материала исследования изображены на рис. 2.

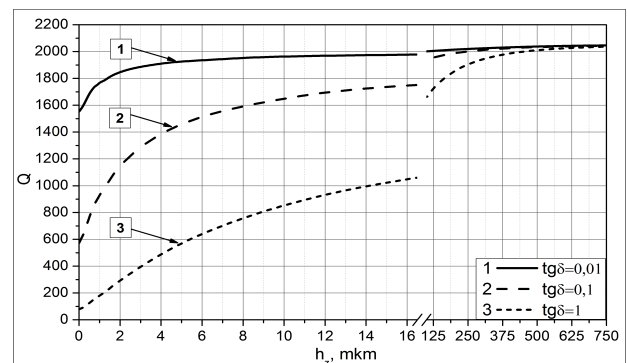


Рис. 2. Зависимость добротности РИП от величины зазора.

Fig. 2. The dependence of Q-factor of RMC on the gap

Функция аппроксимации данного семейства кривых имеет вид:

$$Q(h_z, \text{tg} \delta) = \left(A(h_z) + B(h_z) \cdot \text{tg} \delta + C(h_z) \cdot \text{tg} \delta^2 \right)^{-1} \quad (2)$$

где коэффициенты зависят от $\text{tg} \delta$ и имеют следующий вид:

$$A(h_z) = a + (b-a) \frac{h_z^c}{d^c + h_z^c}; \quad B(h_z) = \left(a + b \cdot h_z + c \cdot h_z^2 \right)^{-1};$$

при h_z от 0 до 2 мкм

при h_z от 2 мкм.

$$C(h_z) = a + b \cdot e^{-0.5 \left(\frac{h_z - c}{d} \right)^2}; \quad C(h_z) = b + \frac{a - b}{1 + e^{\frac{h_z - c}{d}}}.$$

Для коэффициентов в зависимостях $A(h_z)$, $B(h_z)$, $C(h_z)$ также найдены численные значения.

На рис. 3 показана зависимость добротности РИП от электрофизических параметров объекта в отсутствии воздушного зазора в системе зонд-объект.

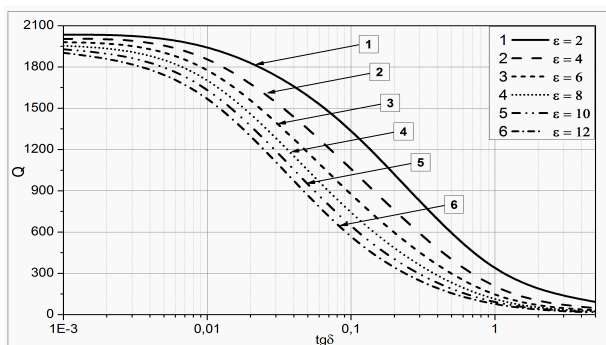


Рис. 3. Зависимость добротности РИП от электрофизических параметров объекта.

Fig. 3. The dependence of Q-factor RMC on the electrical parameters of the object

Проведя анализ полученных результатов было получено аппроксимирующее выражение для данной зависимости:

$$Q(\epsilon, \text{tg} \delta) = \frac{A\epsilon^B (C + D\epsilon + I\epsilon^2)}{A\epsilon^B + \text{tg} \delta} \quad (3)$$

где: $A=0.36157$, $B=-0.84458$, $C=2021.26$, $D=-7.9836$, $I=-0.05078$.

Погрешность рассчитанных значений по всем выражениям, приведенных в работе, в сравнении с теоретическими не превышает 3-5%.

III. Заключение

Таким образом, сформулированы общие требования к решению задачи аппроксимации экспериментальных данных при микроволновой микроскопии полупроводниковых материалов. Полученные в результате моделирования аппроксимационные выражения, позволят оперативно в ходе эксперимента строить радио изображения образцов и получать количественную информацию о неровности поверхности и электрических параметрах полупроводниковых материалов.

IV. Список литературы

- [1] *Near-field microwave microscopy of materials properties* / Anlage S. M., Steinhauer D. E., Feenstra B. J., Vlahosand C. P., Wellstood F. C. // Center for Superconductivity Research, and Materials Research Science and Engineering Center, Department of Physics, University of Maryland, College Park, Maryland 20742-4111 USA. 2000. P.1–31.
- [2] Гордиенко Ю. Е. Алгоритм реконструкции изображений в ближнеполевой сканирующей микроскопии // Радиотехника, 2003 с. 135.
- [3] Исследование электродинамических свойств микрозонда на основе конусного коаксиального резонатора в сканирующей микроволновой микроскопии // Гордиенко Ю. Э., Ларкин С. Ю., Гуд Ю. И., Проказа А. М. // Сб. материалов 21-й Крымской МНТК «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2011. с.663-664.
- [4] Гордиенко Ю. Е., Ларкин С. Ю., Яцкив А. М. Ближнеполевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора // Радиотехника, Всеукр. межвед. научн.– техн. сб.–Х.: ХНУРЭ, 2009.–Вып.159.–С.309-314.

THE ANALYTICAL APPROXIMATION OF MEASURING DEPENDENCES OF RESONATOR PROBES FOR SCANNING MICROWAVE MICROSCOPY

Gordienko Y. E., Larkin S. Y., Prokaza A. M.
Kharkov National University of Radioelektroniks
Kharkov, Lenin av., 14, 61166, Ukraine
Ph.: (057) 702-13-62, e-mail: mepu@kture.kharkov.ua

Abstract — The characteristics of conversion of coaxial resonator probes with a measuring aperture were investigated. Approximate expressions were obtained.

I. Introduction

In this paper the possibility of forming analytical relations for measuring relationships in the SMM, primarily for use in solving inverse problems in image reconstruction is discussed. Such relationships may result from the approximation of the dependence graphs, which obtained by direct numerical methods.

II. Main Part

The ultimate goal of processing the measurement information in the SMM – is not only to obtain radio images of the sample (high-altitude surface profile, the spatial pattern of distribution of electrical characteristics on the sample surface, etc.), but also to obtain quantitative information on these properties. Scanning the sample surface can be done in a mode of soft contact (in the case of a zero gap) and the regime of the gap between the edge of the microprobe and the sample surface is considered.

A the result of our study were obtained the RMC conversion characteristic (Fig. 1 – 2) from the air gap, and also in case of its absence (Fig. 3), for semiconductor structures, which are the values of the dielectric constant in the range 2 – 12 and the tangent of the dielectric losses equal to $10^{-3} - 1$.

III. Conclusion

Thus, the general requirements for the solution of the problem of approximating the experimental data for microwave microscopy of semiconducting materials are formulated. Approximate expressions obtained in simulation make it possible to efficiently build (during experiment) the radio image of the samples and to obtain quantitative information on surface roughness and electrical parameters of semiconductor materials.