

МЕТОДИКА МИКРОВОЛНОВОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ ТОМОГРАФИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Мельник С. И., Гордиенко Ю. Е.

Харьковский национальный университет радиозлектроники МОНУ
г. Харьков, просп. Ленина 14, 61166, Украина
тел.: +38-057-740-10-10 e-mail: smelnyk@yandex.ru

Аннотация — Разработана методика микроволновой диагностики полупроводников с произвольным распределением электрофизических свойств по глубине. Предложено проводить сканирование по величине воздушного зазора между объемным резонаторным датчиком и поверхностью полупроводника. Разработан одномерный алгоритм реконструкции распределения электрофизических свойств полупроводника. Он сводится к решению интегрального уравнения для получения промежуточной функции, полностью характеризующей свойства объекта, и пошаговому алгоритму решения некорректной обратной задачи для нее.

I. Введение

Сканирующая зондовая микроволновая микроскопия (СЗММ) применяется для исследования электрофизических свойств (ЭФС) и геометрической структуры объектов в микро и нанозлектронике. В последнее время удалось достичь разрешающей способности метода в десятки нанометров за счет применения нанометрового острого зонда, расположенного на кантилере сканирующей системы АСМ [1]. Однако это преимущество ограничивает возможность исследования электрофизических свойств на больших (микрометровых) глубинах. Кроме того, структура поля, формируемого острием зонда, делает пренебрежимо малым влияние подповерхностных слоев на уровень полезного сигнала.

Свободными от этих недостатков являются методики, в которых размер открытой апертуры датчика сопоставим с требуемой глубиной диагностики [2]. В этом случае остро стоит задача реконструкции распределения электрофизических параметров по глубине исследуемого образца. Для варьирования глубины проникновения поля предлагается изменять характерный размер апертуры. Однако эта процедура технически трудоемка и позволяет получить лишь дискретный набор значений. Кроме того, используемые алгоритмы реконструкции основаны на первом приближении теории возмущений [3] или приближении слоистой среды. В случае значительных (в 2 и более раз) вариаций электрофизических параметров объекта это приводит к большим погрешностям, как при моделировании поля, так и при последующей реконструкции его ЭФС.

В связи с этим актуальной является задача построения аналитической теории распространения микроволнового поля в исследуемый неоднородный образец при больших вариациях ЭФС. Кроме того, желательно получить непрерывное (а не послойное, как в существующих аналогах) описание свойств объекта. Это позволит в дальнейшем перейти к решению более общей задачи микроволновой сканирующей томографии (МСТ) - реконструкции трехмерного распределения ЭФС в контролируемом объекте.

II. Алгоритм решения прямой задачи МСТ на основе объемного коаксиального резонатора

На рисунке 1 показана модель микроволнового датчика на основе объемного резонатора и объекта

контроля с неоднородным распределением ЭФС по его глубине. Распределение диэлектрической проницаемости и проводимости задаем функцией комплексного переменного $\varepsilon(z)$. Противоположную датчику поверхность объекта считаем экранированной проводником. Варьируем толщину зазора Δz_1 .

Для решения прямой задачи используем метод заданного в апертуре поля. В силу осевой симметрии системы после преобразования Ханкеля первого порядка получим для радиальной составляющей электрического поля $\vec{E}_{r(1)}$ уравнение:

$$-k(z)^2 \vec{E}_{r(1)}(z, \zeta) = -\zeta^2 \vec{E}_{r(1)}(z, \zeta) + \frac{\partial^2 \vec{E}_{r(1)}(z, \zeta)}{\partial z^2}, \text{ где} \quad k(z)^2 = \mu\mu_0 \varepsilon(z) w^2 \quad (1)$$

Подстановкой $U(z, \zeta) = \frac{\vec{E}_{r(1)}(z, \zeta)}{d\vec{E}_{r(1)}(z, \zeta)/dz}$ приводим его

$$\text{к виду: } \frac{d}{dz} U(z, \zeta) = 1 - U^2(z, \zeta) \cdot (\zeta^2 - k^2(z)) \quad (2)$$

Решаем его (численно) для граничного условия $U(d, \zeta) = 0$ и находим функцию $U(0, \zeta)$. Отметим, что эта функция полностью определяет ЭФС объекта $\varepsilon(z)$ и является граничным условием для решения задачи в воздушном слое.

Ранее [4] была получена формула для дополнительной емкости, связанной с объектом контроля в эквивалентной схеме резонатора

$$\tilde{C}_n = -\frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln^2(b/a)} \iint_{0a}^{\infty b} \left\{ \frac{[J_0(ka) - J_0(kb)] J_1(kr')}{\gamma_1} \right. \\ \left. \left[\text{ctgh} \gamma_1 \Delta z_1 - R_1^{M, \infty} \text{csech} \gamma_1 \Delta z_1 \right] \right\} dr' dk \quad (3)$$

В ней $R_1^{M, \infty}(\zeta) = \frac{\vec{E}_{r(1)}(0, \zeta)}{\vec{E}_{r(1)}(-\Delta z_1, \zeta)}$. Эта функция может

быть получена из функции $U(z, \zeta)$ и решения уравнения (1) для воздушной прослойки

$$R_1^{M, \infty}(\zeta) = (\text{ch} \gamma_1 \Delta z_1 + \text{sh} \gamma_1 \Delta z_1 / (\gamma_1 U(0, \zeta))) \quad (4)$$

Откуда:

$$\tilde{C}_n(\Delta z_1) = -\frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln^2(b/a)} \iint_{0a}^{\infty b} \left\{ \frac{[J_0(\zeta a) - J_0(\zeta b)] J_1(\zeta r')}{\gamma_1} \right. \\ \left. \frac{\gamma_1 U(0, \zeta) \text{th} \gamma_1 \Delta z_1 + 1}{\gamma_1 U(0, \zeta) + \text{th} \gamma_1 \Delta z_1} \right\} dr' d\zeta \quad (5)$$

С учетом параметров эквивалентной схемы датчика и комплексной функции $\tilde{C}_n(\Delta z_1)$, рассчитываем относительный сдвиг частоты и добротности, измеряемый в эксперименте - комплексную функцию $\delta\tilde{f} / \tilde{f}_0(\Delta z_1)$.

III. Алгоритм решения обратной задачи

Для решения обратной задачи сначала на основании измеренной при изменяющейся величине воздушного зазора функции $\delta\tilde{f} / \tilde{f}_0(\Delta z_1)$ восстанавлива-

ем функцию вносимой объектом комплексной емкости $C_n(\Delta z_1)$. Затем решаем численно интегральное уравнение (5) относительно $U(0, \zeta)$.

Таким образом, решение обратной задачи сводится к нахождению $k^2(z)$ из уравнения (2) при заданных граничных условиях $U(0, \zeta)$ и $U(h, \zeta) = 0$.

Можно показать, что эта обратная задача некорректна, так как допускает множество решений. Поэтому ее нужно решать как задачу оптимизации по заданному критерию правдоподобия. Мы используем для этого алгоритм пошаговой минимизации сложности описания решения, описанный ранее [5]. Для оценки чувствительности к локальным неоднородностям нами разработан алгоритм, использующий методику сканирования с двумя различными значениями воздушного зазора [6].

IV. Заключение

Получено обобщение модели поля в задаче микроволновой сканирующей томографии полупроводников на случай произвольного непрерывного распределения ЭФС по глубине. Предложен метод томографии, основанный на измерении зависимости относительного сдвига резонансной частоты и добротности датчика от величины воздушного зазора между ним и поверхностью объекта. Сформулированы алгоритмы решения прямой и обратной задач микроволновой томографии полупроводников для случая неоднородности, непрерывно распределенной по глубине. Показано, что решение обратной задачи может быть разбито на два независимых этапа.

V. Список литературы

- [1] *Michael Serry*, Agilent Application Note 5989-8181EN, <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8181EN.pdf>, 2008.
- [2] *Резник А. Н., Юрасова Н. В.* Ближнепольная СВЧ томография биологических сред. ЖТФ. 2004. Том 74. Вып. 4. с. 108-116.
- [3] *K. P. Gaikovich*. Near-field microwave tomography. in Crimean Conference "Microwave Telecommunication Technology. (CriMiCo'2005). 12-16 September, 2005: CriMiCo'2005 Organizing Committee; Weber Co. IEEE Catalog Number: 05EX1089
- [4] *А. Ю. Панченко, Ю. Е. Гордиенко, Р. С. Фар.* Приближение заданного поля в задачах определения характеристик резонаторных СВЧ-датчиков апертурного типа. Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 1998. – Вып. 107. – с. 93–103.
- [5] *Гордиенко Ю. Е., Слипченко Н. И., Мельник С. И., Ищенко А. Л.* Повышение пространственной разрешающей способности микроволновой микроскопии полупроводников. Сб. материалов 18-й Крымской МНТК «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2008. с.546-547
- [6] *S. I. Melnyk, M. I. Slipchenko*. Microwave Scanning Tomography Local unit Defects. Proceedings of the International Conference TCSET'2010. Lviv-Slavsko, Ukraine February 23-27, 2010

METHOD OF MICROWAVE SCANNING TOMOGRAPHY OF ELECTRICAL PROPERTIES OF SEMICONDUCTORS

Melnik S. I., Gordienko J. O.
*Kharkov National University of Radioelectronics,
MES Ukraine
14 Lenina ave., Kharkov, 61166, Ukraine
Ph.: +38-057-7401010, e-mail: smelnyk@yandex.ru*

Abstract — The technique of microwave diagnostics of semiconductors with arbitrary distribution of electrical properties in depth has been developed. It has been proposed to conduct the scanning of the value of the air gap between the resonator sensor and the surface of the semiconductor. The one-dimensional reconstruction algorithm of distribution of electrical properties of the semi-conductor has been generated. It consists of solution of the integral equation for the intermediate function, which completely characterizes the properties of the object, and step-by-step algorithm for solution of the ill-posed inverse problem.

I. Introduction

Microwave Scanning Probe Microscopy (MSPM) is used to study electro-physical properties (EPP) and the geometric structure of objects in the micro- and nanoelectronics. The task of construction of analytical theory of distribution of microwave field into the inhomogeneous model with large variations of EPP is of current concern.

II. Algorithm of Solution of Direct Problem of Microwave Scanning Tomography (MCT) Based on Coaxial Resonator

In order to solve the direct problem the method of the field specified in the aperture is used. With Hankel transform of the first order the one-dimensional equation of the second-order for the image of the radial component of the electric field is obtained. By means of substitution it is reduced to Riccati equation and solved numerically. The resultant function completely determines EPP of the test piece and is the boundary condition for solution of the problem in the air layer. We expect additional capacity associated with the investigated object in the equivalent circuit of the resonator. Given parameters of the equivalent circuit sensor account the relative frequency shift and Q, measured in the experiment

III. An Algorithm for Solving the Inverse

In order to solve the inverse problem on the basis of measured function at varying value of the air gap the function of integrated capacity introduced by the object is restored. Then the integral equation is solved. It might be shown that this inverse problem is incorrect, since admits multiple solutions. We use the step-by-step algorithm of minimization of complexity of description of the solution.

III. Conclusion

The generalization of the model of the field in the task of MST of semiconductors for the arbitrary continuous distribution of EPP in depth has been obtained. The method of tomography based on the measurement of dependence of relative shift of resonance frequency and Q factor of the sensor on the size of the air gap between it and the surface of the object has been proposed. The algorithm of solution of direct and inverse problems of microwave imaging of semiconductors for the case of one-dimensional inhomogeneity has been formulated. It has been shown that the inverse problem might be divided into two independent stages.