

УДК 621.385.6

ПРИНЦИПЫ ФИЗИЧЕСКОЙ РАСШИФРОВКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Ю. Е. Гордиенко, А. В. Левченко, И. Н. Щербань

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

Надійшла до редакції 27.03.2018

В работе численно исследуются приёмы построения изображений в СММ, обеспечивающие визуализацию профилей распределения физических параметров объекта в приповерхностной области. Показано, что изображение фундаментальных сигналов изменения резонансной частоты и добротности резонаторного сканирующего зонда далеко не всегда соответствует профилю указанных параметров. Для обеспечения такого соответствия предлагается реконструировать изображение этих сигналов на основе аналитической аппроксимации соответствующих характеристик преобразования зонда и формирования оптимального пакета сигналов. В частности, для построения изображений профиля электропроводности $\sigma(x, y)$ следует использовать комбинированный сигнал вида $\Delta Q^{-1}/\Delta f(x, y)$. Для двухпараметровой диагностики профиля $\varepsilon(x, y)$ и профиля поверхности $\Delta h_z(x, y)$ целесообразно использовать два сигнала $\Delta f_1(x, y)$ и $\Delta f_2(x, y)$ при различных фиксированных значениях зазора h_{z1} и h_{z2} и аналитические аппроксимации соответствующих характеристик преобразования. Результаты исследования иллюстрируют демонстрацией профиля общего сигнала и восстановленным профилем физических величин. **Ключевые слова:** сканирующая микроволновая микроскопия, характеристики преобразования, реконструкция изображений, многопараметровость диагностики, аналитическая аппроксимация.

ПРИНЦИПИ ФІЗИЧНОЇ РОЗШИФРОВКИ ЗОБРАЖЕНЬ В СКАНУЮЧІЙ МІКРОХВИЛЬОВІЙ МІКРОСКОПІЇ

Ю. Є. Гордієнко, А. В. Левченко, І. М. Щербань

В роботі чисельно досліджуються прийоми побудови зображень в СММ, що забезпечують візуалізацію профілів розподілу фізичних параметрів об'єкта в приповерхневій області. Показано, що зображення фундаментальних сигналів зміни резонансної частоти і добротності резонатора скануючого зонда далеко не завжди відповідають профілю зазначених параметрів. Для забезпечення такої відповідності пропонується реконструювати зображення цих сигналів на основі аналітичної апроксимації відповідних характеристик перетворення зонда і формування оптимального пакету сигналів. Зокрема, для побудови зображень профілю електропроводності $\sigma(x, y)$ слід використовувати комбінований сигнал виду $\Delta Q^{-1}/\Delta f(x, y)$. Для двопараметрової діагностики профілю $\varepsilon(x, y)$ і профілю поверхні $\Delta h_z(x, y)$ доцільно використовувати два сигнали $\Delta f_1(x, y)$ і $\Delta f_2(x, y)$ при різних фіксованих значеннях зазору h_{z1} і h_{z2} і аналітичні апроксимації відповідних характеристик перетворення. Результати дослідження ілюструють демонстрацією профілю загального сигналу і відновленням профілем фізичних величин.

Ключові слова: скануюча мікрохвильова микроскопія, характеристики перетворювання, реконструкція зображень, багатопараметровість діагностики, аналітична апроксимація

PRINCIPLES OF PHYSICAL IMAGE DECODING IN SCANNING MICROWAVE MICROSCOPY

Yu. Ye. Gordienko, A. V. Levchenko, I. N. Shcherban

In the paper, the methods of constructing images in SMM are numerically studied, providing visualization of profiles of the distribution of physical parameters of an object in the near-surface region. It is shown that the image of the fundamental signals of the change in the resonant frequency and Q of the resonator scanning probe does not always correspond to the profile of the indicated parameters. To ensure such correspondence, it is proposed to reconstruct the image of these signals on the basis of an analytical approximation of the corresponding conversion characteristics of the probe and formation of the optimal signal packet. In particular, to ensure an imaging of the electrical conductivity profile $\sigma(x, y)$, a combined signal of the form $\Delta Q^{-1}/\Delta f(x, y)$ should be used. For two-parameter diagnostics of the profile $\varepsilon(x, y)$ and the surface profile $\Delta h_z(x, y)$, it is advisable to use two signals $\Delta f_1(x, y)$ and $\Delta f_2(x, y)$ for various fixed values of the gap h_{z1} and h_{z2} and analytical approximations of the corresponding conversion characteristics. The results of the study are illustrated by demonstrating the profile of the common signal and the reconstructed profile of physical quantities.

Keywords: scanning microwave microscopy, conversion characteristics, reconstruction of images, multiparameter diagnostics, analytical approximation

ВВЕДЕНИЕ

Сканирующая микроволновая микроскопия (СММ) относится к разделу так называемых сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ), для которых характерно использование одиночного зонда со сверхвысоким пространственным разрешением (нанозонда) и системы пошагового его смещения относительно исследуемого объекта [1].

СММ в отличие от широко зарекомендовавших себя сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), атомносиловой микроскопии (АСМ), сканирующей емкостной микроскопии (СЕМ) и их модификаций характеризуется перспективностью 3D диагностики объектов [2, 3] и, что, особенно важно, многопараметровостью информативных измерительных сигналов [4, 5]. Однако, эта особенность накладывает отдельные требования на анализ получаемых при СММ изображений.

Для аргументации сказанного достаточно указать, что в отличие от АСМ, показывающей в основном нанопрофиль поверхности объекта, изображение СММ содержит информацию не только о профиле поверхности, а ещё и, наноразмерную информацию о профиле распределения диэлектрической проницаемости и электропроводности (или $\operatorname{tg}\delta$ на СВЧ) [4, 5]; фоточувствительности [6], влагосодержания [7]; магнитных свойствах [8] и др. Естественно, что необходимая многопараметровость диагностики реализуется путем организации соответствующего количества выделяемых сигналов измерительной информации и выделением вклада каждого из них в процессе обработки изображений. Практика компьютерных томографий показательна в этом отношении, однако прямая аналогия, как правило, неприменима. В целом, проработка вопросов СММ томографии находится только в начальной стадии, хотя и является весьма актуальной [2, 3].

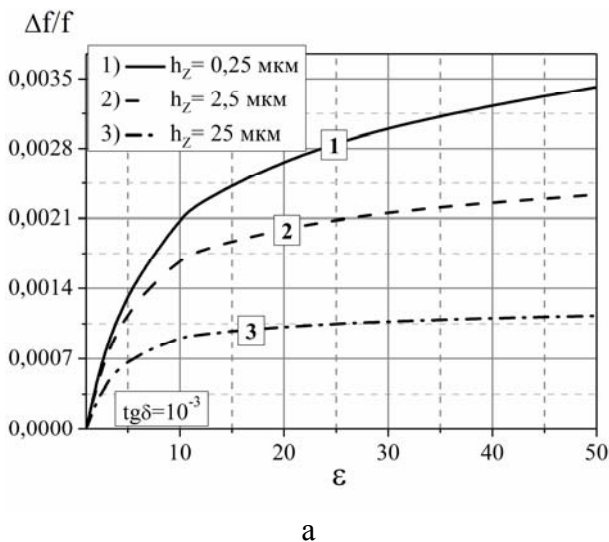
В работах [4, 5] осуществлены первые попытки постановки двухпараметровой диагностики при СММ и создания начал необходимой теории. Попутно следует заметить, что даже на этом начальном этапе в полный

рост стала проблема решения так называемых обратных задач измерения [9]. Теоретически эта проблема существует только в ситуации, когда прямая задача решается строго приближенными численными методами [10]. Для СММ это как раз и является характерным. Целью данной работы является обоснование последовательности подходов к решению обратных задач реконструкции СММ изображений путем использования аналитических приближений результатов решения прямых электродинамических задач взаимодействия резонаторных СВЧ зондов с различными диагностируемыми объектами.

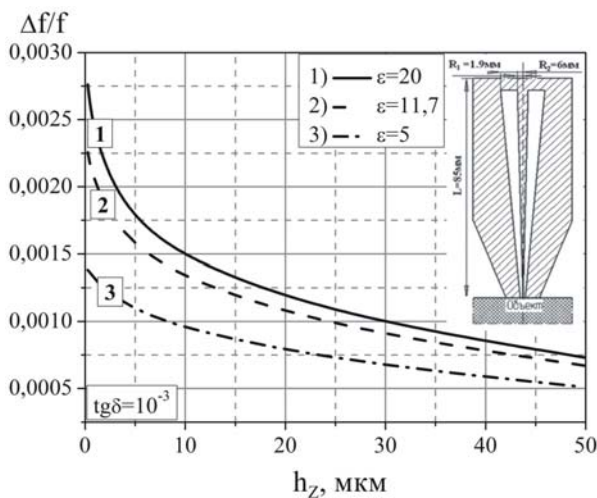
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В [11] уже была предпринята попытка обработки одного такого подхода к реконструкции изображения профиля поверхности, получаемого в СММ с помощью коаксиального резонаторного зонда. Была показана необходимость такой реконструкции в связи с существенной нелинейностью зависимостей сигналов измерительной информации в такой системе от величины зазора между острием зонда и поверхностью объекта исследования [12]. Предложено аналитическое приближение для сигнала сдвига резонансной частоты обеспечивающее простое решение обратной задачи измерения и соответствующей реконструкции СММ изображений профиля поверхности.

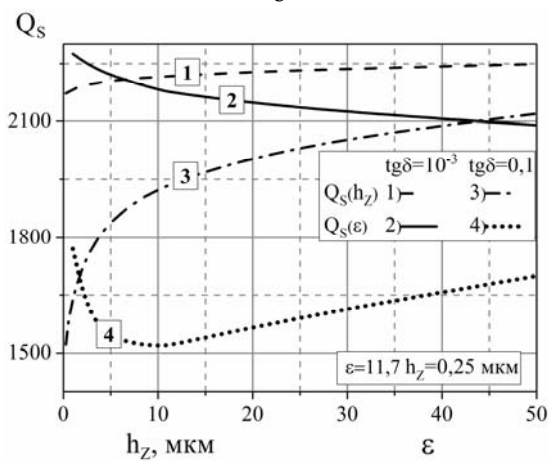
Следующим этапом решения указанных проблем является организация расшифровки СММ изображений при двух и трехпараметровой СММ диагностике различных объектов. В частности, при диагностике влагосодержащих структур [7] или биообъектов возникают проблемы одновременного наблюдения профиля поверхности и распределения по ней значений диэлектрической проницаемости. Если последнее имеет комплексный характер, то диагностика становится уже трехпараметровой, т. к. необходимо общий сигнал реконструировать по трём параметрам: неровность поверхности, неоднородность диэлектрической проницаемости $\varepsilon(x, y)$ и $\sigma(x, y)$.



а



б



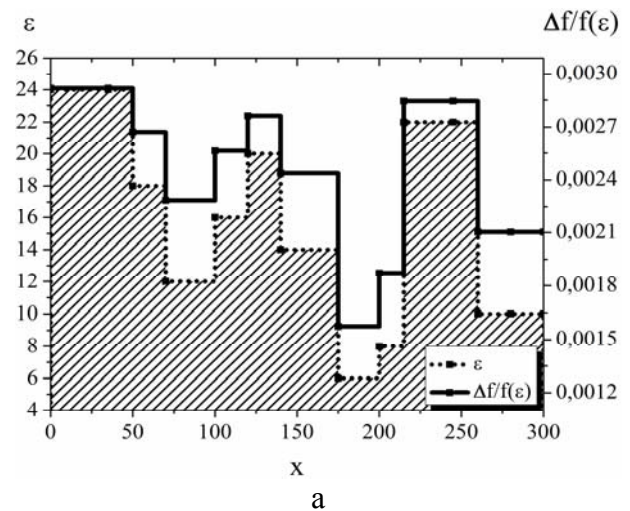
в

Рис. 1. Характеристики преобразования фундаментальных сигналов $\Delta f/f$ в зависимости от диэлектрической проницаемости объекта (а) и зазора между острием и образцом (б), и Q_s при различных значениях $\text{tg}\delta$ (в).

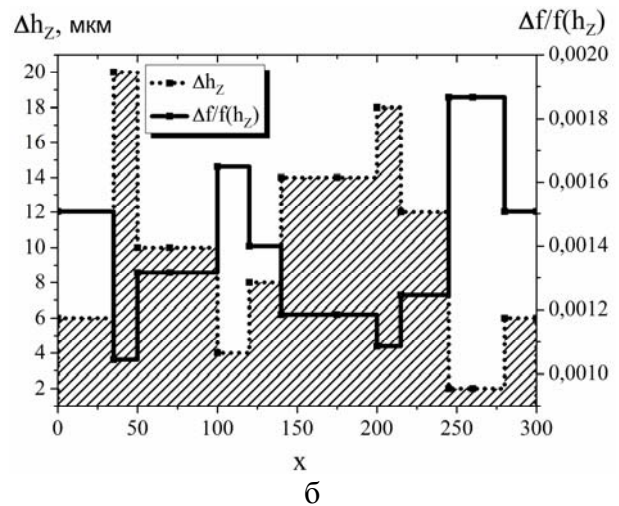
Численные решения прямых задач по этим параметрам уже обсуждалось нами в

[12]. Приведём их в некотором общем виде (рис.1) для схематического конструктива, изображенного на вставке (рабочая частота 10 ГГц).

Очевидна существенная нелинейность характеристик преобразования, обуславливающая сложность (или, скорее, невозможность) физической трактовки соответствующих СММ изображений самих сигналов. Чтобы нагляднее это продемонстрировать, на рис. 2 приведены в одномерном варианте виртуальные профили параметров и ожидаемые по ним профили сигналов.



а



б

Рис. 2. Пробные виртуальные профили и соответствующие им профили сигналов $\varepsilon(x)$ (а) и $\Delta h_z(x)$ (б).

В первую очередь эти данные отчетливо убеждают в наличии серьезной проблемы реконструкции изображений по конкретным параметрам. В предыдущих работах [11, 12, 13] нами уже обсуждался вопрос аналити-

ческой аппроксимации характеристик преобразования для фундаментальных сигналов и возможность её использования при решении обратной задачи измерения. Была показана эффективность такого подхода при однопараметровой реконструкции изображения в СММ. Однако, совершенно очевидно, что СММ изображения, например, сигнала сдвига резонансной частоты одновременно в общем случае содержат информацию о влиянии зазора между зондом и объектом, и диэлектрической проницаемости объекта. Это неоднократно подтверждено экспериментально в многочисленных работах [4, 14]. Как правило, такие СММ изображения требуется расшифровывать по двум параметрам. Если объект имеет значение $\text{tg}\delta > 0,1$, то указанный сигнал оказывается зависящим от трёх параметров и потребуются соответствующее расшифровывание, или реконструкция его СММ изображений.

Для начала предположим, что зависимостью $\Delta f/f(x, y)$ от $\text{tg}\delta$ можно пренебречь, и

$$\frac{\Delta f}{f}(h_z, \varepsilon) = y_0(h_z) + \sum_{i=1}^3 ((A_i(h_z) \cdot \exp(\frac{-\varepsilon}{t_i(h_z)}))) \quad (1)$$

$$\frac{\Delta f}{f}(h_z + \Delta h_z, \varepsilon) = y_0(h_z + \Delta h_z) + \sum_{i=1}^3 ((A_i(h_z + \Delta h_z) \cdot \exp(\frac{-\varepsilon}{t_i(h_z + \Delta h_z)}))) \quad (2)$$

где: $y_0, t_1, A_1, t_2, A_2, t_3, A_3$ – коэффициенты, зависящие, в общем случае, от зазора h_z , зависимость которых имеет общий вид сигмоиды вида:

$$f(x) = \frac{L}{1 + e^{-k(x-x_0)}}$$

где: L – отвечает за диапазон, в котором функция претерпевает изменения; x_0 – значение по оси x , отвечающее за местоположение центра сигмоиды; k – значение, отвечающее за крутизну кривой; x – в данном случае является значением зазора h_z .

Таким образом, получается система, состоящая из двух уравнений (1) и (2) и имеющая 2 неизвестных ε и h_z . Решая эту систему для каждой точки сканирования получаем значения этих параметров в этих точках.

достаточно ограничится двухпараметровой расшифровкой и реконструкцией СММ изображений, получая изображение о пространственном распределении $\text{tg}\delta(x, y)$ через комбинированный сигнал [15]. В таком случае следует искать подход формируя аналитическое представление сигнала $\Delta f/f(x, y)$ для двух линейно не связанных изображений $\Delta f/f_1(x, y)$ и $\Delta f/f_2(x, y)$. Они могут быть получены, путем сканирования при двух положениях зонда по вертикали. Следует только позаботиться об оптимальном выборе этих положений.

Детальное исследование аналитического представления $\Delta f/f(x, y)$, аналогичного используемому нами в [13] показало, что по критериям слабой зависимости коэффициентов от $\varepsilon(x, y)$ и допустимой точности воспроизводимости зависимости сигнала от профиля поверхности $\Delta h_z(x, y)$ более подходящими оказываются ниже приведенные соотношения аппроксимации.

Исследуем область применимости этого подхода на виртуальных моделях профилей $\varepsilon(x, y)$ и $\Delta h_z(x, y)$ представленных на рис.2. На рис. 3 для удобного сравнения приведено вид измеряемого одномерного профиля сигналов $\Delta f/f(h_z, \varepsilon)$ и результаты восстановления заданных виртуальных профилей $\varepsilon(x)$ и $\Delta h_z(x)$ в виде их процентного отклонения $\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon(x)}$ и $\frac{\Delta(\Delta h_z)}{\Delta h_z(x)}$.

Из них видно, что погрешность по всей длине сканирования кроме одного участка не превышает 3%, что является весьма приемлемым результатом. Наличие заметных отклонений объясняется тем, что погрешность аппроксимации сигнала по одному параметру и последующих аппроксимаций коэффициентов главной аппроксимацион-

ной функции по второму параметру складывается.

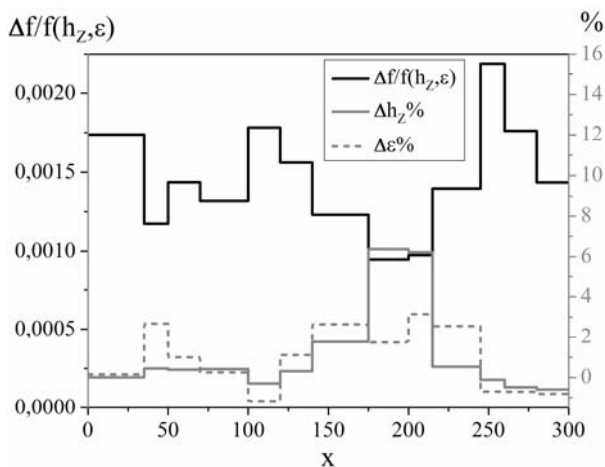


Рис. 3. Измеряемый общий профиль сигналов $\Delta f/f(h_z, \epsilon)$ и восстановленные заданные виртуальные профили $\epsilon(x)$ и $\Delta h_z(x)$ в виде их процентного отклонения.

Идеальным является случай, когда эти погрешности друг друга ликвидируют, худшим – когда все эти погрешности имеют один и тот же знак. На участке $175 < x < 215$ погрешность восстановления профиля зазора находится в районе 6%. Очевидно, что резкое увеличение погрешности вызвано тем, что результирующий сигнал на этом участке принял наименьшее значение. Можно сделать вывод, что когда сигнал принимает значения менее чем 10^{-3} , что соответствует малому значению диэлектрической проницаемости и наибольшему значению зазора, из-за явления насыщения сигнала при большем зазоре его вклад в общий сигнал выделяется с меньшей точностью. Поэтому проведение измерений при зазорах более 20 мкм является нецелесообразным по причине высоких погрешностей, возникающих в результате восстановления слишком низкого результирующего сигнала.

ВЫВОДЫ

Проведенные численные исследования наглядно убеждают в том, что СММ изображения имеют сложный комплексный характер, зависящий как от типа выделяемого при сканировании сигнала измерительной информации, так и от влияния на его величину физических параметров приповерхност-

ной области объекта. Поэтому расшифровка этих изображений носит сложный характер.

Апробирован один из возможных подходов расшифровки, базирующийся на формировании комплекта измерительных сигналов, путём создания изображений при двух и более значениях величин зазора между острием зонда и объектом. Выполнена апробация подхода на примере двухпараметрового разделения изображения на изображение профиля поверхности $\Delta h_z(x, y)$ и распределение диэлектрической проницаемости $\epsilon(x, y)$.

Если дополнить такой комплект изображением комбинированного сигнала вида $\Delta Q_s^{-1}(x, y)$, то будет осуществлено разделение комплексного СММ изображения на три физических составляющие $\epsilon(x, y)$, $\sigma(x, y)$ и $\Delta h_z(x, y)$. Результат представлен в одномерном варианте зависимости профилей от координаты x .

При стабилизации зазора с помощью СТМ можно ограничиться выделением сигналов изображения $\Delta f/f(x, y)$ и $\Delta Q^{-1}(x, y)$. Во всех случаях для получения профилей истинных значений ϵ , $tg\delta$ и Δh_z необходимо пользоваться аналитически аппроксимированными характеристиками преобразования, вид которых описан нами в предыдущей работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bhushan B. Scanning Probe Microscopy - Principle of Operation, Instrumentation, and Probes Springer Handbook of Nanotechnology / B. Bhushan, M. Othmar // ISBN 978-3-540-29855-7. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 591 p.
2. Вдовичева Н. К. Глубинная профилометрия свободных носителей в полупроводниках при помощи ближнеполевой микроволновой томографии / Н. К. Вдовичева, М. А. Галин, А. Н. Резник, И. А. Шерешевский // Известия РАН. Серия физическая. – 2012. – Т. 76. – № 2. – С. 172-175.
3. Гайдай Ю. А. Ближнеполевая СВЧ томография приповерхностного слоя диэлектриков / Ю. А. Гайдай, В. С. Сидоренко, О. В. Синькевич // Радиоэлектроника. – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 37-42.

4. Gao C. Quantitative scanning evanescent microwave microscopy and its applications in characterization of functional materials libraries / C. Gao, B. Hu, I. Takeuchi, K.-S. Chang, X.-D. Xiang and G. Wang // *Meas. Sci. Technol.* – 2005. – Vol. 16, No. 1. – P. 248-260.
5. Tselev A. Broadband dielectric microwave microscopy on micron length scales / A. Tselev, S. M. Anlage, Z. Ma, and J. Melngailis // *Review of Scientific Instruments.* – 2007. – Vol. 78. – P. 044701-044701-7.
6. Weber J. C. A near-field scanning microwave microscope for characterization of inhomogeneous photovoltaics / J. C. Weber, J. B. Schager, N. A. Sanford, A. Imtiaz, T. M. Wallis, L. M. Mansfield, K. J. Coakley, K. A. Bertness, P. Kabos, V. M. Bright // *Review of Scientific Instruments.* – 2012. – Vol. 83, No. 8. – P. 083702.
7. Tselev A. Seeing through Walls at the Nanoscale: Microwave Microscopy of Enclosed Objects and Processes in Liquids / A. Tselev, J. Velmurugan, A. V. Ievlev, S. V. Kalinin, and A. Kolmakov // *ACS Nano.* – 2016. – Vol. 10, No. 3. – P. 3562-3570.
8. Joseph C. H. Scanning microwave microscopy technique for nanoscale characterization of magnetic materials / C. H. Joseph, G. M. Sardi, S. S. Tuca, G. Gramse, A. Lucibello, E. Proietti, F. Kienberger, R. Marcelli // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2016. – Vol. 420. – P. 62-69.
9. Gaikovich K. P. Inverse problem of near-field scattering in multilayer media / K. P. Gaikovich, P. K. Gaikovich // *Inverse Problems.* – 2010. – Vol. 26, No. 12. – P. 125013.
10. T. Monti Multiphysics simulation of a scanning microwave microscope: a joint electromagnetic and thermal analysis / T. Monti, S. W. Kingman // *ARMMS.* – 2015.
11. Гордиенко Ю. Е. Алгоритм реконструкции изображений в ближнеполевой сканирующей микроскопии / Ю. Е. Гордиенко, С. И. Мельник, Н. И. Слипченко, В. В. Петров, А. Л. Ищенко // *Радиотехника.* – 2003. – С. 135.
12. Gordienko Yu. Ye. Analytical simulation of instrumentation performance of resonance probes in scanning microwave microscopy / Yu. E. Gordienko, S. U. Larkin, A. M. Prokaza // *Telecommunications and Radio Engineering.* – 2012. – Vol. 71, No. 12. – P. 1115-1123.
13. Gordienko Yu. Ye. Naturalization of the image in scanning microwave microscopy / Yu. Ye. Gordienko, I. M. Shcherban, A. V. Levchenko // *Telecommunications and Radio Engineering.* – 2017. – Vol. 76, No. 19. – P. 1769-1775.
14. Korolyov S. A. Quantitative characterization of semiconductor structures with a scanning microwave microscope / S.A.Korolyov, A.N.Reznik // *Review of Scientific Instruments.* – 2018. – Vol. 89, No. 2. – P. 023706.
15. Gordienko Yu. Ye. Naturalization of the image in scanning microwave microscopy / Yu. Ye. Gordienko, I. M. Shcherban, A. V. Levchenko // *Telecommunications and Radio Engineering.* – 2017. – Vol. 76, No. 19. – P. 1769-1775.

REFERENCES

1. Bhushan B. Scanning Probe Microscopy - Principle of Operation, Instrumentation, and Probes Springer Handbook of Nanotechnology / B. Bhushan, M. Othmar // ISBN 978-3-540-29855-7. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 591 p.
2. Vdovicheva N.K. Glubinnaya profilometriya svobodnyih nositeley v poluprovodnikah pri pomoschi blizhnepolnoy mikrovolnovoy tomografii / N. K. Vdovicheva, M. A. Galin, A. N. Reznik, I. A. Shereshevskiy // *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya.* – 2012. – T. 76. – No. 2. – S. 172-175.
3. Gayday Yu.A. Blizhnepolevaya SVCh tomografiya pripoverhnostnogo sloya dielektrikov / Yu.A. Gayday, V.S. Sidorenko, O.V. Sinkevich // *Radioelektronika.* – 2012. – T. 55, No. 3. – S. 37-42.
4. Gao C. Quantitative scanning evanescent microwave microscopy and its applications in characterization of functional materials libraries / C. Gao, B. Hu, I. Takeuchi, K.-S. Chang, X.-D. Xiang and G. Wang // *Meas. Sci. Technol.* – 2005. – Vol. 16, No. 1. – P. 248-260.
5. Tselev A. Broadband dielectric microwave microscopy on micron length scales / A. Tselev, S. M. Anlage, Z. Ma, and J. Melngailis // *Review of Scientific Instruments.* – 2007. – Vol. 78. – P. 044701-044701-7.
6. Weber J. C. A near-field scanning microwave microscope for characterization of inhomogeneous photovoltaics / J. C. Weber, J. B. Schager, N. A. Sanford, A. Imtiaz, T. M. Wallis, L. M. Mansfield, K. J. Coakley, K. A. Bertness, P. Kabos, V. M. Bright // *Review of Scientific Instruments.* – 2012. – Vol. 83, No. 8. – P. 083702.
7. Tselev A. Seeing through Walls at the Nanoscale: Microwave Microscopy of Enclosed Ob-

- jects and Processes in Liquids / A. Tselev, J. Velmurugan, A. V. Ievlev, S. V. Kalinin, and A. Kolmakov // *ACS Nano*. – 2016. – Vol. 10, No. 3. – P. 3562-3570.
8. Joseph C. H. Scanning microwave microscopy technique for nanoscale characterization of magnetic materials / C. H. Joseph, G. M. Sardi, S. S. Tuca, G. Gramse, A. Lucibello, E. Proietti, F. Kienberger, R. Marcelli // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2016. – Vol. 420. – P. 62-69.
 9. Gaikovich K. P. Inverse problem of near-field scattering in multilayer media / K. P. Gaikovich, P. K. Gaikovich // *Inverse Problems*. – 2010. – Vol. 26, No. 12. – P. 125013.
 10. T. Monti Multiphysics simulation of a scanning microwave microscope: a joint electromagnetic and thermal analysis / T. Monti, S. W. Kingman // *ARMMS*. – 2015.
 11. Gordienko Yu. E. Algoritm rekonstruktsii izobrazheniy v blizhnepolevoy skaniruyushey mikroskopii / Yu. E. Gordienko, S. I. Melnik, N. I. Slipchenko, V. V. Petrov, A. L. Ischenko // *Radiotekhnika*. – 2003. – С. 135.
 12. Gordienko Yu. Ye. Analytical simulation of instrumentation performance of resonance probes in scanning microwave microscopy / Yu. E. Gordienko, S. U. Larkin, A. M. Prokaza // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2012. – Vol. 71, No. 12. – P. 1115-1123.
 13. Gordienko Yu. Ye. Naturalization of the image in scanning microwave microscopy / Yu. Ye. Gordienko, I. M. Shcherban, A. V. Levchenko // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2017. – Vol. 76, No. 19. – P. 1769-1775.
 14. Korolyov S. A. Quantitative characterization of semiconductor structures with a scanning microwave microscope / S.A.Korolyov, A.N.Reznik // *Review of Scientific Instruments*. – 2018. – Vol. 89, No. 2. – P. 023706.
 15. Gordienko Yu. Ye. Naturalization of the image in scanning microwave microscopy / Yu. Ye. Gordienko, I. M. Shcherban, A. V. Levchenko // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2017. – Vol. 76, No. 19. – P. 1769-1775.