

УДК 537.533.35

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ РЕЗОНАТОРНИХ ЗОНДІВ ДЛЯ СКАНУЮЧОЇ МІКРОХВИЛЬОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

*Ю. О. Гордієнко<sup>1</sup>, С. Ю. Ларкін<sup>2</sup>, Я. І. Лепіх<sup>3</sup>,  
С. В. Ленков<sup>4</sup>, В. О. Проценко<sup>5</sup>, М. М. Ваків<sup>6</sup>*

<sup>1</sup>Харківський національний університет радіоелектроніки,  
каф. Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв,  
61166, Україна, м. Харків, пр. Леніна, 14  
E-mail: meru@kture.kharkov.ua

<sup>2</sup> Концерн «Наука»

<sup>3</sup>Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр при ОНУ імені І. І. Мечникова

<sup>4</sup>Київський національний університет ім. Т. Шевченка.

<sup>5</sup>ВАТ «Мерідіан» ім. С. П. Корольова

<sup>6</sup>ВАТ «Концерн-Електрон»

### ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ РЕЗОНАТОРНИХ ЗОНДІВ ДЛЯ СКАНУЮЧОЇ МІКРОХВИЛЬОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

*Ю. О. Гордієнко, С. Ю. Ларкін, Я. І. Лепіх, С. В. Ленков, В. О. Проценко, М. М. Ваків*

**Анотація.** У роботі обґрунтовано загальні підходи до оцінки впливу характеристик резонаторних зондів на просторову роздільну здатність та контрастність зображень в скануючій мікрохвильовій мікроскопії. Зокрема, якісно і кількісно установлені залежності сигналів сканування, що пов'язані зі зміною об'єктом добротності та резонансної частоти зондів, від геометрії коаксіальної апертури, форми вістря та величини зазору між зондом і об'єктом. Для фізичного обґрунтування цих залежностей чисельно досліджено розподіл ближнього поля при різних характеристиках. Особливо відзначено перехід від «трубчатого» характеру розподілу поля при сплющеному вістрі до квазігаусового при наданні йому сферичної форми.

Встановлені аспекти можна використовувати при оптимальному проектуванні резонаторних зондів для мікрохвильових мікроскопів різного призначення.

**Ключові слова:** скануюча мікрохвильова мікроскопія (СММ), резонаторний зонд, добротність, резонансна частота, просторова роздільна здатність (ПРЗ), напівпровідник, діелектрична проникність

### THE THEORETICAL ASPECTS OF MODELLING AND DESIGNING OF RESONATOR PROBES FOR SCANNING MICROWAVE MICROSCOPY

*Yu. E. Gordienko, S. Yu. Larkin, Ya. I. Lepikh, S. V. Lenkov, V. O. Prochenko, M. M. Vakiv*

**Abstract.** In the work the general approaches to an estimation of influence of characteristics resonator probes on spatial resolution and contrast of images in scanning microwave microscopy are proved. In particular, the dependences of scanning signals which are caused by influence of object of research on a value of quality factor and resonance frequency of probes from geometry of the coaxial aperture, the form of an edge and gap size between a probe and object are qualitatively and quantitatively established. For a physical substantiation of these dependences on the specified characteristics there were three dimensional distributions of a near field numerically investigated. Transition from «tubular» character of distribution of a field, which is characteristic for the flat form of an edge, to quasigaussian distribution of a field for the spherical form of an edge is especially pointed.

The established dependences can be used for optimum designing of resonator probes of microwave microscopes for different function.

**Keywords:** scanning microwave microscopy (SMM), resonator probe, quality factor, resonance frequency, spacial resolving capacity (SRC), semiconductor, dielectric permittivity

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЗОНАТОРНЫХ ЗОНДОВ ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МИКРОСКОПИИ

*Ю. Е. Гордиенко, С. Ю. Ларкин, Я. И. Лепух, С. В. Ленков, В. О. Проценко, М. М. Вакив*

**Аннотация.** В работе обоснованы общие подходы к оценке влияния характеристик резонаторных зондов на пространственную разрешающую способность и контрастность изображений в сканирующей микроволновой микроскопии. В частности, качественно и количественно установлены зависимости сигналов сканирования, которые связаны с изменением объектом добротности и резонансной частоты зондов, от геометрии коаксиальной апертуры, формы острия и величины зазора между зондом и объектом. Для физического обоснования этих зависимостей численно исследовано распределение ближнего поля при различных характеристиках. Особенно отмечен переход от «трубчатого» характера распределения поля при уплощенном острии к квазигауссовому с приданием ему сферической формы.

Установленные аспекты можно использовать при оптимальном проектировании резонаторных зондов для микроволновых микроскопов разного назначения.

**Ключевые слова:** сканирующая микроволновая микроскопия (СММ), резонаторный зонд, добротность, резонансная частота, пространственная разрешающая способность (ПРС), полупроводник, диэлектрическая проницаемость

### Вступ

Скануюча мікрохвильова мікроскопія (СММ) відноситься до сучасного напрямку експериментальних досліджень матеріалів, і об'єктів з нанорозмірною просторовою роздільною здатністю (ПРЗ), що яскраво представлені тунельною та атомно-силовою мікроскопією (СТМ, АСМ). Взагалі, цей напрямок створює нову область — скануюча зондова мікроскопія [1], яка швидко поповнюється новими різновидами. Виникнення СММ можна пов'язувати з реалізацією ближньопольової оптичної мікроскопії, що пододала межу Аббе [2], і успішністю використання безелектродних НВЧ методів контролю параметрів матеріалів [3,4]. Найбільший розвиток СММ досягла в області діагностики ВТНП матеріалів та структур. Виконано також ряд робіт по застосуванню СММ в напівпровідниковому матеріалознавстві і біофізиці.

Перспективність застосування СММ в розробках наноматеріалів та нанотехнологій в першу чергу пов'язана з більш широкими порівняно з СТМ чи АСМ функціональними

можливостями та більш глибоким зондуванням приповерхневої області об'єктів дослідження. Особливо широкі функціональні можливості СММ добре ілюструються її застосуванням в діагностиці напівпровідникових матеріалів.

При НВЧ зондуванні сигнал від елемента сканування визначається не тільки нерівністю поверхні, а ще також значенням питомої електропровідності матеріалу (або  $\text{tg}\delta$ ) та його діелектричною проникністю. З цими фізичними величинами пов'язані можливості якісно оцінювати ряд важливих електрофізичних властивостей напівпровідників. Таким чином створюються передумови багатопараметрової діагностики напівпровідникових матеріалів та структур на їх основі. При досягненні субмікронної та нанорозмірної ПРЗ цей вид зондової мікроскопії стає універсальним засобом контролю в технології субмікронної та наноелектроніки.

Однак, на відміну від СТМ та АСМ, для СММ існує проблема одночасного підвищення ПРЗ та контрастності зображення. Це пов'язано з тим, що при підвищенні ПРЗ за рахунок змен-

шення перерізу вістря зонда чутливість його до зміни всіх параметрів об'єкта зменшується. По мірі зняття цієї проблеми застосування СММ в технології мікроелектроніки буде розширюватися від технології субмікронних інтегральних схем до технології наноелектроніки.

Метою даної роботи є обґрунтування основних теоретичних положень моделювання найбільш відповідального сенсорного елемента СММ — резонаторних зондів (РЗ) та їх оптимального проектування для СММ різного призначення. При цьому необхідно вирішити задачі кількісного дослідження впливу геометрії апертурної частини зонда, конструкції його накопичувальної частини та робочого виду НВЧ коливання в ній на сигналоутворюючі параметри, до яких відноситься добротність РЗ та його резонансна частота.

### 1. Принципи та основні положення СММ

У традиційній мікроскопії для одержання інформації про досліджуваний об'єкт використовуються електромагнітні хвилі видимого діапазону в далекому полі випромінювання. Просторова роздільна здатність при цьому обмежується дифракційною межею, що в ідеальній оптичній системі відповідно до критерію Аббе—Релея не може бути краще половини довжини хвилі випромінювання. Подібна ситуація має місце й при одержанні зображень об'єктів в інших діапазонах довжин хвиль. При використанні НВЧ випромінювання для дослідження різноманітних матеріалів часто вдається одержати більший об'єм інформації, чим в оптичному діапазоні. Однак ПРЗ при використанні далекої зони випромінювання виявляється набагато гіршою, чим в оптичному діапазоні. Наприклад, при гігагерцових частотах у найкращому разі вона обчислюється міліметрами.

Для підвищення ПРЗ плідною виявилася ідея використання ближньопольового сканування через отвір субхвильового розміру, вперше висловлена ще в 20-х роках минулого століття. Необхідною умовою ближньопольового сканування є створення локальної області взаємодії електромагнітного випромінювання зі зразком. Із загальних фізичних міркувань, які підкріплюються багатьма експериментами та чисельними розрахунками, впливає, що для одержання високої ПРЗ доцільно використо-

вувати випромінюючий коаксіальний мікрозонд, який повинен закінчуватися вістря [1,5,6]. При цьому вдається забезпечити більш високу амплітуду інформативного НВЧ сигналу, відбитого від зразка, чим при використанні апертури у вигляді отвору. Коаксіальні резонаторні мікрозонди знайшли застосування при дослідженні різних матеріалів з ПРЗ близько  $10^{-6} \lambda$ .

Високої просторової здатності вдається досягти при об'єднанні методів НВЧ діагностики з технікою скануючої тунельної або атомно-силової мікроскопії [7,8]. Типова схема такого СММ передбачає використання вузлів скануючих зондових мікроскопів з модифікованими кантилеверами, що проводять електричний струм, або спеціального мікрозонда, виготовленого, наприклад, у вигляді відрізка коаксіального кабелю з вістря кантилевера на кінці. По кабелю від генератора поширюється НВЧ випромінювання. Довжина відрізка кабелю звичайно вибирається такою, щоб виконувалися умови резонансу для НВЧ коливань. Діаметр вістря мікрозонда, що може мати величину близько 10 нм, набагато менше довжини хвилі зондувального випромінювання. Вістря мікрозонда може бути наближене до поверхні досліджуваного зразка на відстань кілька нанометрів. НВЧ випромінювання від вістря кантилевера попадає на досліджувану поверхню, частково відбивається від зразка й уловлюється за допомогою того ж самого мікрозонда, котрий у цьому випадку виконує також роль прийомної антени. При цьому величина сигналу сканування формується через електромагнітну взаємодію ближнього поля мікрозонда з об'єктом, що проявляється в його ослабленні через поглинання та розсіювання.

Практика показала, що базова схема найбільш широко функціональних мікрохвильових мікроскопів має вигляд, представлений на рис. 1 [4].

Склад такої схеми містить три основні блоки: блок датчика на основі ближньопольового мікрохвильового первинного перетворювача; блок керування координатним столом та блок обробки і візуалізації даних.

Датчик включає крім первинного перетворювача систему формування вимірювального НВЧ сигналу та електронні пристрої після детекторного виділення і обробки інформативних сигналів.

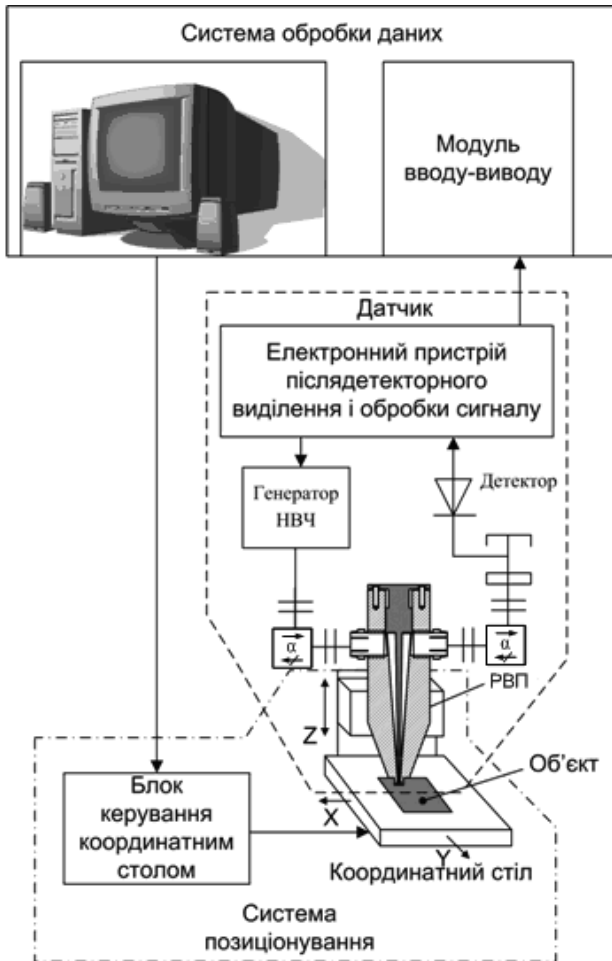


Рис. 1. Базова функціональна схема СММ

Первинний вимірювальний перетворювач включає безпосередньо мікрохвильовий зонд та пристрій його збудження і виводу НВЧ енергії. Надалі, якщо первинний перетворювач базується на резонаторному зонді (РЗ) будемо його іменувати резонаторним вимірювальним перетворювачем (РВП). (Поняття РЗ не враховує конструктив і параметри пристроїв вводу-виводу НВЧ енергії.)

Система позиціонування, що забезпечує керування координатним столом, будується по аналогії з відповідними системами СТМ і АСМ, але може мати додаткові можливості збільшення площі сканування зі зменшеною ПРЗ.

Система керування та обробки даних забезпечує синхронізацію роботи всього мікроскопа та необхідний формат їх представлення.

Розробка та застосування СММ для різних призначень в першу чергу пов'язана з ефективним вирішенням проблеми одночасного підвищення ПРЗ та контрастності зображень. Якщо ПРЗ цілком і однозначно залежить від

геометрії та форми вістря в коаксіальній апертурі резонаторного зонда, то контрастність визначається величиною електричних сигналів, що формуються на виході датчика при скануванні об'єкта. В цілому, ця характеристика обмежується співвідношенням сигналу з шумом. Величина сигналів практично безумовно зменшується при зменшенні ефективного перерізу вістря для підвищення ПРЗ. Однак, в СММ є ряд способів підвищення сигналів сканування, незалежних від перерізу вістря.

Взагалі, НВЧ резонаторні зонди дозволяють формувати два фундаментальні сигнали, що пов'язані зі зміною його добротності та резонансної частоти при скануванні об'єкта з неоднорідним розподілом властивостей. Багатопараметровість діагностики (мікроскопія неоднорідності різних фізичних величин та пов'язаних з ними властивостей) досягається додатковим впливом на об'єкт [9–12], або взаємодією зонда з об'єктом [12, 13].

Вказані фундаментальні сигнали залежать по величині від значення власної добротності резонатора; середньої величини фундаментальних НВЧ параметрів об'єкта ( $\epsilon_s$  і  $tg\delta$ ); ступеню взаємодії об'єкта з полем в апертурі зонда та інш. [14–17]. Тому при їх формуванні необхідно враховувати електродинамічні характеристики зонда та діапазон значень  $\epsilon$  і  $tg\delta$  об'єкта.

Для попереднього наближеного аналізу взаємозв'язку чутливості з означеними вище факторами процесу СММ можна скористатися наступними відомими співвідношеннями для добротності та зміни резонансної частоти зонда

$$Q = 2\pi f_0 \epsilon_0 \frac{W_{зан}}{P_{ном}} = 2\pi f_0 \epsilon_0 \frac{\int_V \epsilon E^2 dV}{P_{cm} + P_{випр} + \int_{V_s} \sigma_s E^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta W_{зан}}{W_{зан}} = \frac{\int_{V_s} (\epsilon_s - 1) E^2 dV}{4 \int_V \epsilon E^2 dV}, \quad (2)$$

де  $f_0$  — резонансна частота зонда;  $\epsilon_0$  — абсолютна діелектрична проникність вакууму;  $\epsilon$  — відносна діелектрична проникність середовища, що входить в різні частини об'єму  $V$  електродинамічної системи резонатор-зразок;  $E$  — амплітудне значення напруженості НВЧ поля в різних частинах електродинамічної системи

резонатор-зразок;  $V_s, \sigma_s$  — вмикуваний в поле об'єм об'єкту та питома електропровідність його матеріалу;  $P_{ст}$  — НВЧ втрати в стінках зонда;  $P_{випр}$  — НВЧ втрати на стороннє випромінювання із зонда;  $\Delta f/f$  — зміна резонансної частоти зонда, що викликана включенням в його апертуру об'єкта об'ємом  $V_s$ ;  $\Delta W_{зап}$  — зміна запасаної НВЧ енергії в повній електродинамічній системі зонда, що пов'язана з включенням об'єкта.

Напруженість НВЧ поля  $E$ , значення  $\epsilon_s$  та  $\sigma_s$  є функціями координат. Пов'язані з добротністю зонда сигнали зображення в СММ формуються як її зміни ( $\delta Q/Q$ ), визвані, в першу чергу, зміною питомої електропровідності об'єкта  $\delta\sigma_s/\sigma_s$ , так і інших його параметрів (наприклад  $\delta\epsilon_s/\epsilon_s$ ; нерівності поверхні  $\delta h_z/h_z$ ). При цьому вказані зміни параметрів об'єкта впливають на величину  $\delta Q/Q$  не тільки через прямо вхідні в (1) їх величини, але й опосередковано через їх вплив на розподіл поля  $E$  та значення  $P_{ст}$  та  $P_{випр}$ .

Чутливість зонда по добротності та зміні резонансної частоти можна отримати із (1) та (2), диференціюючи їх по контролюємому параметру з урахуванням залежності всіх вхідних величин від цього параметра.

Сигнал, який формується через зміну добротності РЗ, можна представити у вигляді

$$\frac{\delta Q(x,y)}{Q} = Q \left[ \frac{\partial Q^{-1}}{\partial \text{tg}\delta} \delta \text{tg}\delta + \frac{\partial Q^{-1}}{\partial \epsilon_s} \delta \epsilon_s + \frac{\partial Q^{-1}}{\partial h_z} \delta h_z \right]. \quad (3)$$

Для сигналу, що формується через зміну резонансної частоти, можливо використання співвідношення

$$\begin{aligned} \frac{\delta f_s}{f} = & \frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \left( \frac{\Delta f}{f} \right) \delta \epsilon_s + \frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \left[ \frac{\partial}{\partial h_z} \left( \frac{\Delta f}{f} \right) \right] \delta \epsilon_s + \\ & + \frac{\partial}{\partial h_z} \left( \frac{\Delta f}{f} \right) \delta h_z + \frac{\partial}{\partial h_z} \left[ \frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \left( \frac{\Delta f}{f} \right) \right] \delta h_z. \end{aligned} \quad (4)$$

Представлений розгляд сигналів  $\delta Q/Q$  та  $\delta f/f$  є зручним для демонстрації та дослідження різних способів підвищення багатопараметровості СММ діагностики напівпровідників та діелектриків. Прикладом може служити розвинутий фотомодуляційний варіант утворення сигналів в техніці НВЧ контролю параметрів напівпровідників [9].

Співвідношення (1–4) неможливо розвернути аналітично для розглянутих резонаторних

зондів, що широко використовуються. Однак, в деяких випадках можна скористатись наступним варіантом наближеного аналізу для оцінки властивостей сигналів.

Наприклад, при СММ кремнію в процесах різної його обробки можна виходити із незмінності та відомої величини його діелектричної проникності на НВЧ ( $\epsilon_s=12$ ). Тоді вираз (2) може представляти результат експериментально вимірюваної величини, що характеризує ступінь включення об'єкта в НВЧ поле зонда. Значення цього параметра може бути корисним для аналізу різних сигналів  $\delta Q/Q$ . Зокрема. Сигнал профілю добротності в зображенні СММ виражається відразу через профіль розподілу  $\delta \text{tg}\delta(x,y)$  та профіль нерівності поверхні  $\delta h_z(z)$ . Останній у данному випадку пропорційний профілю  $\delta h_z(x,y)$ :

$$\frac{\delta Q(x,y)}{Q} = 2 \frac{\epsilon_s}{\epsilon_s - 1} Q \left[ \frac{\Delta f}{f} \delta \text{tg}\delta(x,y) + \text{tg}\delta \frac{\delta f(x,y)}{f} \right]. \quad (5)$$

У всіх цих співвідношеннях  $Q$  — експериментально вимірювана власна добротність резонаторного зонда при включенні об'єкта;  $\Delta f/f$  — експериментально вимірюване середнє значення зміни резонансної частоти зонда при взаємодії з об'єктом;  $\epsilon_s$  — відома відносна діелектрична проникність об'єкта.

Для підвищення чутливості резонаторного зонда до всіх параметрів досліджуваного зразка доцільно максимально підвищувати його власну добротність  $Q_0$ . Це ствердження впливає із співвідношень (1), (5) та кількісно описується умовою:

$$\int_{V_s} 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_s E^2 dV \gg (P_{ст} + P_{випр}). \quad (6)$$

Наведені вирази дозволяють аналізувати фізично напрямки підвищення чутливості резонаторних зондів для СММ. З метою більш детальної кількісної оцінки потрібно виконувати чисельне моделювання їх електродинамічних характеристик.

Уявлення про залежність робочої добротності різних РЗ від  $\text{tg}\delta$  об'єкта дає рис. 2. Одночасно із представлених на ньому даних можна порівняти їх чутливість.

Усі наведені залежності отримано чисельним шляхом з використанням методу кінцевих елементів. При цьому апертурна область мала однакові розміри перетину коаксіалу ( $R_{2t} = 0,6$  мм;  $R_{1t} = 0,025$  мм).

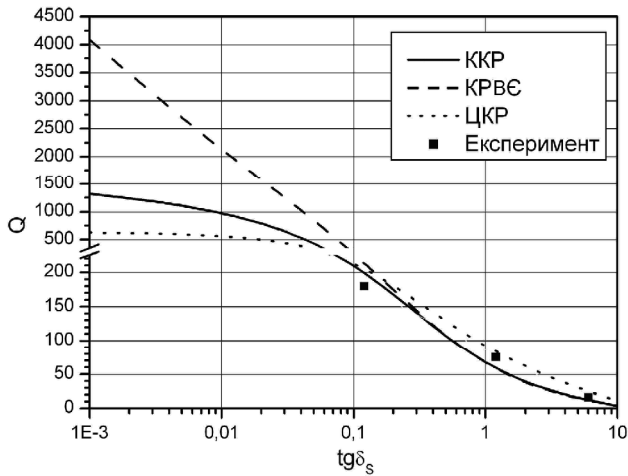


Рис. 2. Залежність добротності трьох видів коаксіальних РЗ від тангенсу кута діелектричних втрат об'єкта

Аналіз їх свідчить, що найбільш високі значення власної добротності  $Q_0$ , робочої добротності  $Q$  в широкому діапазоні  $\text{tg}\delta$  об'єкта та чутливості по сигналу  $\delta Q/Q$  мають РЗ на основі коаксіального резонатора з вкорочуючою ємністю (КРВС). РЗ на основі конусного коаксіального резонатора (ККР) має найбільше значення чутливості по сигналу  $\delta f/f$  і зрівняну чутливість по сигналу  $\delta Q/Q$  тільки при  $\text{tg}\delta > 10^{-1}$ . РЗ на основі циліндричних коаксіальних резонаторів (ЦКР) суттєво поступаються КРВС та ККР. Порівняння виконувалось за умови однакової ПРЗ за рахунок ідентичності апертурного вузла.

Чисельні оцінки показують, що короткохвильові РЗ на основі об'ємних резонаторів [4] мають більш високі значення  $Q_0$ ;  $Q$ ;  $\delta Q/Q$ ;  $\delta f/f$  на частотах  $10^{10} \dots 4 \cdot 10^{10}$  Гц порівняно з КРВС на частоті  $10^{10}$  Гц.

Виділення та обробка фундаментальних сигналів РЗ  $\delta Q/Q$  і  $\delta f/f$  має також важливе значення для підвищення чутливості датчика та контрастності зображень СММ. Фактично при цьому фізичні сигнали перетворюються в електричні і підсилюються до рівня, що забезпечує використання їх в сучасних інформаційних технологіях. Таке перетворення базується на використанні методів вимірювання добротності та резонансної частоти, які забезпечують високу чутливість і точність. Ці методи можна умовно розділити на дві групи: прямі та модуляційні.

Відповідні сигнали відтворюються співвідношенням [18]

$$\frac{\delta U}{U_d} = \frac{\delta Q}{Q}, \quad (7); \quad \frac{\delta U_M}{U_M} = \frac{2\delta Q}{Q}. \quad (8)$$

В обох випадках на детекторі буде з'являтися зміна напруги сигналу, пропорційна зміні значення добротності. У випадку прямого детектування це буде сигнал постійного струму, а при модуляційному методі — напруга сигналу подвоєної частоти модуляції. Враховуючи, що  $U_M \ll U_d$ , амплітуда сигналу на постійному струмі буде значно більше, ніж на змінному, але сигнал змінного струму може бути виділений за допомогою синхронного детектування та посилений вузькосмуговим підсилювачем.

## 2. Фізико-теоретичні моделі резонаторних зондів

Для детального аналізу зондових РЗ і їхнього оптимального проектування за критеріями СММ, у першу чергу, необхідне встановлення особливостей розподілу електромагнітного поля в об'ємі всієї електродинамічної системи, що включає й об'єкт дослідження. Однак, найбільшу увагу доцільно звернути на область апертурної взаємодії зонда з об'єктом. Як обґрунтовано в [15,19,20], такі дослідження доцільно виконувати на основі рішення електродинамічних задач методом кінцевих елементів з урахуванням усіх граничних умов.

Поле за межами накопичувальної області є вузько локалізованим у приапертурній області об'єкта або вільного простору. Тому РЗ з такими розмірами апертури називаються ближньопольовими. Якісний характер розподілу поля в об'єкті практично не відрізняється для різних РЗ.

Наведемо найбільш важливі результати досліджень, що виконані для конусного коаксіального РЗ [21,22] зі слудуючою геометрією  $R_1 = 1,9$  мм;  $R_2 = 8$  мм;  $L_0 = 81$  мм. Вид геометрії і форми вістря в дослідженнях представлені окремо на рис. 3.

Ці результати дозволяють робити загальні судження, тому що характер розподілу поля в апертурі не залежить від типу коливань у накопичуючому об'ємі РЗ. У першу чергу розглянемо залежність розподілу повного електричного поля і його компонент від геометрії вістря, до якої відноситься величина перетину вістря, що представлена радіусом  $R_{11}$ , і його форма. Реально форма може бути різною. Умовно розділимо передбачувані різновиди на плоску (рис.3,а) у вигляді усіченого конуса; сферичну (рис.3,б); еліпсоїдальну (рис.3,в), представлену спочатку сегментом.

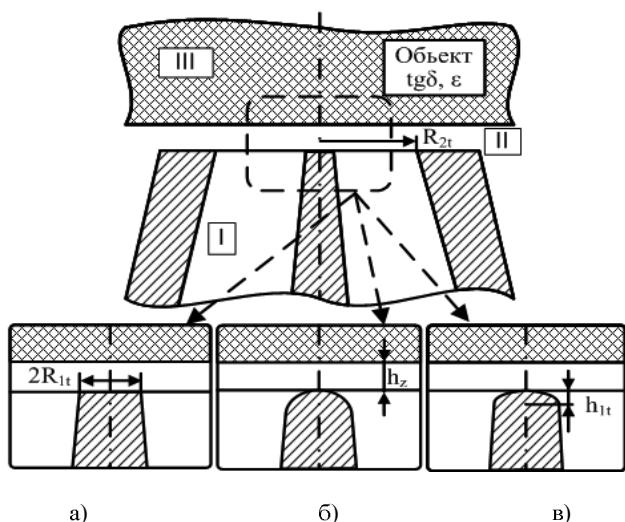


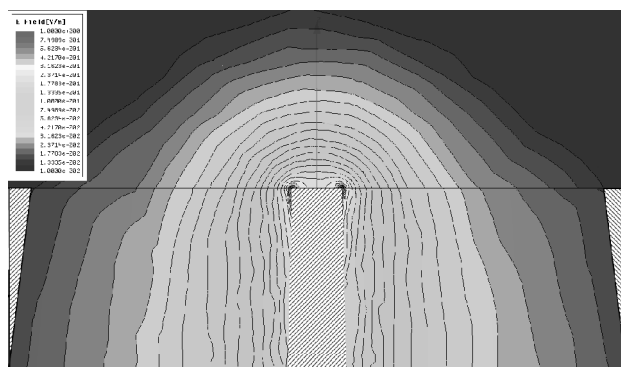
Рис. 3. Геометрія та варіанти форми вістря в апертурному вузлі: у вигляді усіченого конуса (а); сферична форма вістря (б); у вигляді сегмента сфери (в)

На рис. 4 представлені для ілюстрації результати порівняння епюр поля в апертурі РВП з  $R_{2t} = 0,6$  мм при різному радіусі вістря у формі усіченого конуса: а) і б) без об'єкта; в) і г) з об'єктом;  $\epsilon_s = 12$ ,  $\text{tg}\delta_s = 10^{-2}$ .

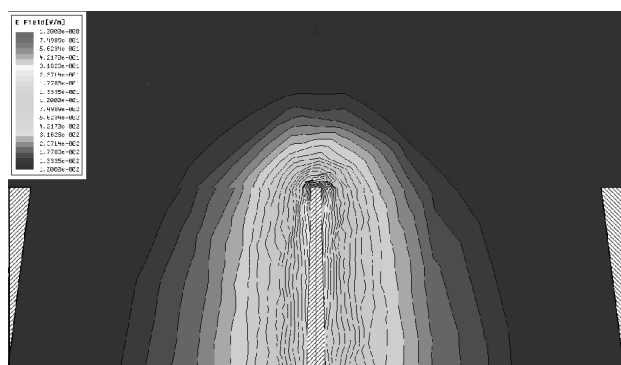
Видно, що поле локалізується в просторі розмірами суттєво менше  $R_{2t} = 0,6$  мм. Скоріше можна стверджувати, що область його локалізації в об'єкті небагато перевищує перетин вістря.

Більш детально кількісні особливості розподілу повного поля в об'єкті під апертурою представлені на рис. 5 та рис.6. Зокрема, на рис. 5 зображено розподіл повного поля по радіусу на поверхні об'єкта у відсутності зазору між ним і зондом. Графіки (1), (5) відповідають різній формі вістря при однаковому перетині центрального провідника  $R_{1t} = 0,025$  мм в апертурі. Залежність (1) характеризує розподіл при формі вістря у вигляді півсфери радіусом  $R_{1t} = 0,025$  мм; (5) — при формі усіченого конуса  $R_{1t} = 0,025$  мм. Графіки (3), (4) показують розподіл поля для вістря у формі усіченого конуса при  $R_{1t} = 0,005$  мм і  $R_{1t} = 0,01$  мм. Графік (2) відображає розподіл поля для вістря у формі півсфери при  $R_{1t} = 0,05$  мм.

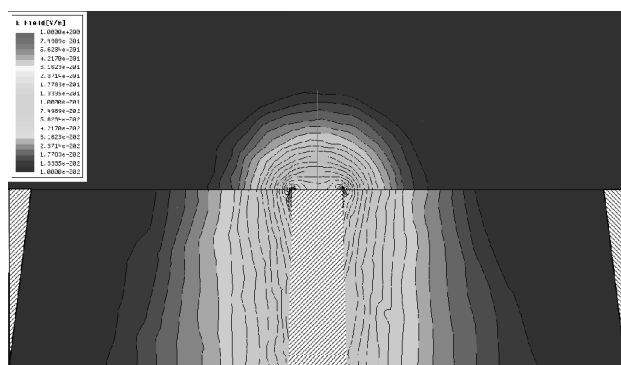
Із цих залежностей впливає, що розподіл поля по радіусу при плоскому вістрі (усічений конус) має «трубчастий» характер. При сферичній формі вістря трубчатість зникає, або звужується залежно від повноти сферичності, й поле локалізується під центром вістря. При плоскому перетині вістря поле локалізується під його периферією, що впливає із залежності положення максимумів його розподілу від значення  $R_{1t}$ .



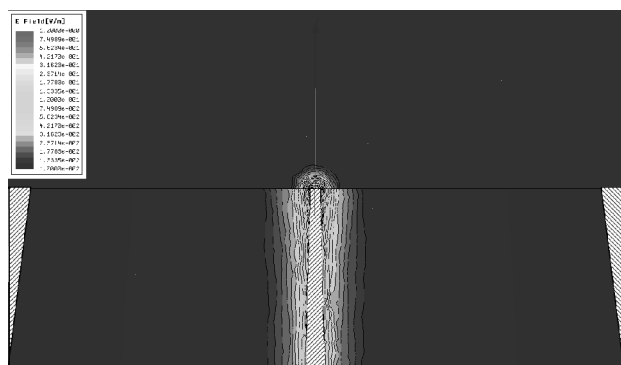
а



б



в



г

Рис. 4. Епюри поля в апертурі резонаторного зонда:  $R_{1t} = 50$  мкм (а) і (в);  $R_{1t} = 10$  мкм (б) і (г)

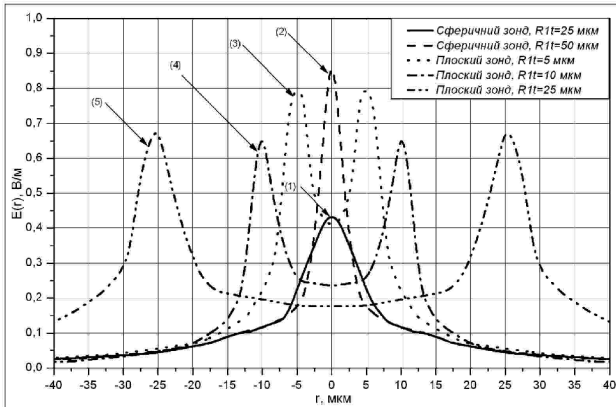


Рис. 5. Розподіл повного поля уздовж радіуса вістря на поверхні об'єкта

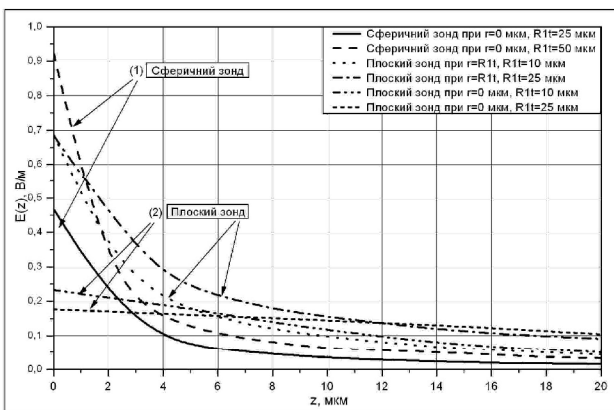


Рис. 6. Розподіл поля по глибині об'єкта уздовж осі зонда (1 і 2) і під його периферією (3) для різних типів вістря

Більш детально дослідження розподілу окремо  $E_r$  і  $E_z$  компонент поля показує, що при сферичній формі вістря основна енергія ближнього поля в апертурі з об'єктом і без нього зосереджена в  $E_z$  компоненті. При формі вістря у вигляді усіченого конуса має місце перерозподіл поля від  $E_r$  компоненти до  $E_z$  компоненти зі зменшенням  $R_{11}$ . При  $R_{11} \ll 10$  мкм основна енергія поля стає також зосереджена в  $E_z$  компоненті подібно вістря зі сферичною формою.

При цьому, надання вістря зонда напівсферичної (або еліптичної) форми підсилює просторову локалізацію поля в області  $r \ll R_{11}$ , сприяючи тим самим поліпшенню ПРЗ мікрохвильової мікроскопії.

Ці результати фактично підтверджують і кількісно ілюструють деякі дані експериментальних досліджень у роботі [6] про поліпшення ПРЗ резонаторних мікрозондів з коаксіальною апертурою при переході до сферичної форми вістря. Крім того, з них переконливо випливає

така важлива обставина, як «квазігауссовість» розподілу поля в апертурі зонда при сферичній або еліптичній формі вістря зонда, на відміну від його «трубчатості» при конусній формі. Це виявляється досить важливим для спрощення рішення зворотних задач при реконструкції зображень у СММ [23].

На сучасному етапі в СММ також стає актуальним рішення задач формування тривимірних зображень мікр властивостей напівпровідникових структур [24], біооб'єктів [25] і т.п. У зв'язку із цим важливого значення набуває оцінка розподілу поля резонаторного зонда по глибині досліджуваного об'єкта. На рис. 6 представлені деякі результати таких оцінок залежно від геометрії й форми вістря для напівнескінченного зразка з  $\epsilon=12$  і  $\text{tg}\delta=10^{-2}$ . З них і інших досліджень випливають такі важливі особливості:

- для вістря зонда у формі усіченого конуса глибина проникнення поля в об'єкт суттєво збільшується зі збільшенням  $R_{11}$ ; для сферичної форми ця залежність виражена менш сильно;
- розподіл поля по радіусу в глибині об'єкта повторює розподіл на поверхні;
- ослаблення поля в об'єкті в напрямку осі зонда при сферичній формі вістря відбувається за законом  $a/(b+cz)$  з локалізацією його під центром вістря;
- при формі вістря у вигляді усіченого конуса поле проникає в глибину трохи більше з локалізацією під периферією вістря;
- у цілому, ефективна глибина проникнення поля в об'єкт не перевищує  $R_{11}$ ;
- зі зменшенням  $\epsilon$  об'єкта глибина проникнення поля в нього зростає; залежність від  $\text{tg}\delta$  практично відсутня при  $\text{tg}\delta < 1$ .

Вплив геометрії апертурного вузла на контрастність зображень у СММ можна кількісно оцінювати із залежності добротності й резонансної частоти від параметрів об'єкта.

На рис. 7 і 8 представлені деякі кількісні результати відповідних оцінок. З них, зокрема, випливає, що чутливість сигналу, пов'язаного з добротністю РВП, (нахил залежності  $Q$  від  $\text{tg}\delta$ ) слабко зменшується при зменшенні перетину вістря й надання йому сферичної форми. Абсолютні значення добротності при цьому міняються більш суттєво. Це дозволяє стверджувати, що надання вістря сферичної форми для підвищення ПРЗ позначається на контрастності зображень розподілу значення  $\text{tg}\delta$  по пло-



щі об'єкта в діапазоні його величини від  $10^{-2}$  до 1 не так сильно, як можна було б припускати із квазістатичних уявлень.

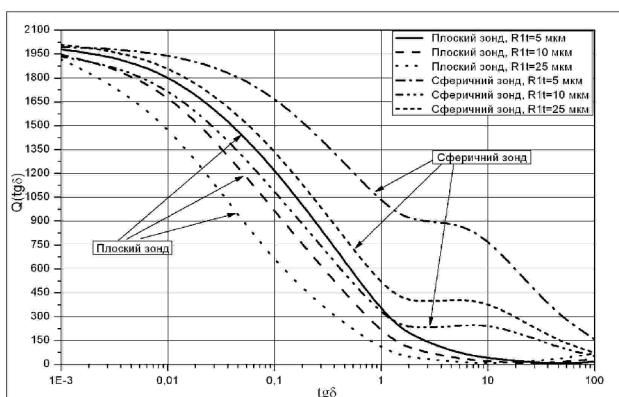


Рис. 7. Залежність добротності резонаторного зонда від тангенса кута діелектричних втрат для різних форм вістря

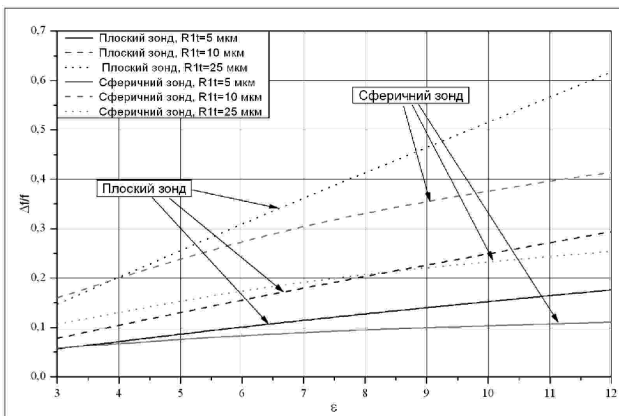


Рис. 8. Залежність зміни резонансної частоти РВП від  $\epsilon$  матеріалу для різних форм вістря

Сигнал, пов'язаний зі зміною резонансної частоти (рис. 7), зазнає більш сильного ослаблення при зменшенні перетину вістря й надання йому сферичної форми. Фізично це пов'язано з більш сильним впливом значення  $\epsilon$  об'єкта на розподіл ближнього поля в апертурі РВП.

В скануючій зондовій мікрохвильовій мікроскопії особливе значення має, як показала практика, вплив зазору між вістрям зонда і об'єктом [1]. Величина вказаного зазору суттєво змінює величину сигналів сканування і в меншій мірі ПРЗ. Особливо шкідливим таке явище стає при нерівній поверхні об'єктів, тому що модуляцію сигналів цією нерівністю не легко видалити від корисної. Тому для знешкодження цього впли-

ву використовують окремі, досить складні пристрої стабілізації зазору.

Взагалі, якщо діелектрична проникність матеріалу об'єкта дослідження незмінна, а  $\text{tg}\delta < 1$ , то сигнал  $\Delta f/f$  повністю і однозначно відтворює нерівність поверхні і, відповідно, зазору. Вплив модуляції зазору на сигнал  $\delta Q/Q$  можна врахувати окремо, при наявності відповідної теорії сигналів. В зв'язку зі сказаним, в моделюванні властивостей РЗ дуже важливим є відтворення моделі впливу зазору на функціонування РЗ та його характеристики.

Зокрема, на рис. 9 показана теоретично встановлена вказаним раніше числовим методом моделювання залежність розподілу поля в апертурі з об'єктом від величини зазору. Із представлених даних слідує, що вплив зазору зростає при збільшенні діелектричної проникності об'єкта. Особливо суттєво діє величина зазору на  $E_z$  компоненту ближнього поля РЗ, що витікає із більш суттєвого ослаблення поля при сферичній формі вістря зонда. Вплив значення  $\text{tg}\delta$  об'єкта починається тільки при  $\text{tg}\delta > 1$ .

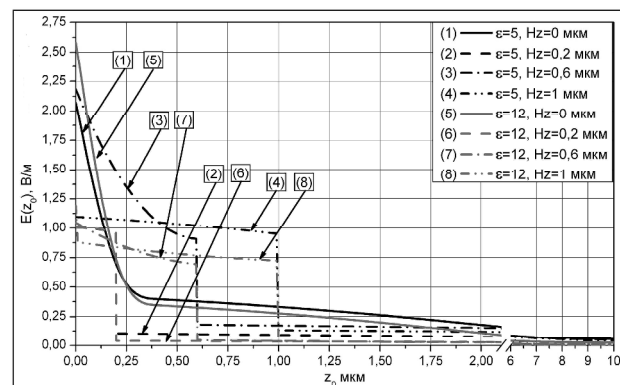


Рис. 9. Розподіл поля в апертурі РЗ по глибині в залежності від величини зазору та діелектричної проникності об'єкта при  $\text{tg}\delta=0,01$  для сферичного вістря

Ослаблення електричного поля зазором відбивається на величині обох сигналів та значенні робочої добротності РЗ (рис. 10).

Наведені дані дають досить повну уяву про фізичну модель впливу зазору на функціонування РЗ. Крім того, із них випливає висновок про те, що кількісні залежності робочих характеристик зонда і СММ доцільно отримувати тільки користуючись повнохвильовими чисельними моделями.

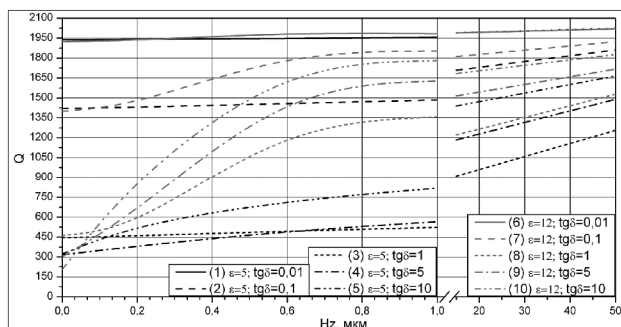


Рис. 10. Залежність робочої добротності РЗ від величини зазору при сферичній формі вістря

### Висновки

У результаті проведеного аналізу можна констатувати наступні важливі електродинамічні особливості резонаторних зондів з коаксимальною вимірювальною апертурою, які широко використовуються в СММ:

1. Просторова локалізація ближнього поля зондів припадає на область торця центрального провідника й порівнянна за розмірами з його перетином.

2. Розподіл НВЧ електричного поля в апертурі по радіусу при формі вістря у вигляді усіченого конуса має трубчастий характер з енергетичною локалізацією по периферії вістря.

3. Надання вістря сферичної форми знімає трубчатість у зазначеному розподілі й сприяє локалізації поля під центром вістря.

4. При сферичній формі вістря поле енергетично локалізується в нормальній до площини апертури електричній компоненті.

5. Провисання поля вглиб об'єкта приблизно дорівнює перетину вістря і зменшується зі зменшенням радіуса вістря, збільшенням зазору й діелектричної проникності об'єкта.

6. Добротність зонда і його чутливість змінюються при зменшенні перетину вістря та збільшенні зазору якісно відповідно з уявленням про ємність, що вноситься у резонатор через апертуру, і НВЧ втрати в ній. Однак кількісні співвідношення суттєво відрізняються від тих, що впливають із квазістатичного наближення.

У підсумку можна зробити висновок, що надання вістря сферичної форми поліпшує ПРЗ СММ, а суттєвого зниження його чутливості при цьому не відбувається. Установлені аспекти доцільно використовувати при оптимальному проектуванні РЗ для мікрохвильової мікроскопії.

### Література

1. Scanning Probe Microscopy: Electronic and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale / Edited by S. Kalinin, A. Gruverman. — Springer Science Business Media, LLC, 2007. — 980 p.
2. Durig U., Pohl D. W., Rohrer F. Near-field optical scanning microscopy // *Journal of Applied Physics*, 1986. — Vol. 59. — P. 3318–3327.
3. Chen L. F., Ong C. K., Neo C. P., Varadan V. V., Varadan V. K. *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*. — John Wiley & Sons, Ltd, 2004. — 537 p.
4. Лепіх Я. І., Гордієнко Ю. О., Дзядевич С. В. та ін. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем. — Одеса: Астропринт, 2010. — 296 с.
5. Imtiaz A., Anlage S. M., Barry J. D., Melugailis J. Nanometer-scale materials contrast imaging with a near-field microwave microscope // *Appl. Phys., Lett.*, 2007. — Vol. 90.
6. Imtiaz A., Anlage S. M. Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microwave microscope // *Journal of Applied Physics*. — 2006. — Vol. 100. — P. 1–8.
7. Ju Y., Hamada M., Kobayash T., Soyama H. A microwave probe nanostructure for atomic force microscopy // *Microsystem Technologies*. — 2009. — Vol. 15, № 8. — P.1195–1199.
8. Tabib-Azar M., Wang Y. Design and fabrication of scanning near-field microwave probes compatible with atomic force microscopy to image embedded nanostructures // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. — 2004. — Vol. 52, № 3. — P. 971–979.
9. Gordienko Yu. E., Borodin B. G., Smuglii V. I. Microwave Photomodulation Method for the Study of Recombination Processes in Semiconductors // *Telecommunication and Radio Engineering*. — 1998. — Vol. 52, N 2. — P. 47–52.
10. Гордієнко Ю. Е., Рябухин А. А., Фар Р. С. Фотомодуляционная СВЧ-диагностика структурно упорядоченных областей в аморфных полупроводниках // *Радиоэлектроника и информатика*. — 1998. — № 2. — С. 28–32.
11. Гордієнко Ю. Е., Бородин Б. Г., Ващерук А. В., Сидоренко С. Д. СВЧ фотомодуляционный метод измерения параметров полупроводниковых пластин и эпитаксиальных структур // *Складні системи і процеси*. — 2006. — № 2. — С. 35–39.
12. Гордієнко Ю. Е., Кочержин А. И., Пашков А. В., Рябухин А. А. Модуляционные варианты СВЧ диагностики материалов и сред // *Радиотехника : Всеукр. межвед. науч. — техн. сб.* — X. : ХНУРЭ. — 2003. — Вып. 134. — С. 229–236.
13. Tselev A., Anlage S. M., Christen H., Moreland R. L., Talanov V. V., Schwartz A. R. Near-field microwave microscope with improved sensitivity

- and spatial resolution // *Rev. Sci. Inst.* — 2003. — V. 74. — P.3167–3170.
14. Гордієнко Ю. Е., Петров В. В., Полетаев Д. А. Свойства четвертьволнового коаксиального СВЧ измерительного преобразователя для диагностики материалов // *Радиотехника : Всеукр. межвед. науч. — техн. сб. — Х. : ХНУРЭ. — 2008. — Вып. 154. — С. 61–66.*
  15. Гордієнко Ю. Е., Гуд Ю. И., Полетаев Д. А. Вклад колебательных и излучательных потерь в характеристики СВЧ преобразователей с коаксиальной измерительной апертурой // *Радиотехника : Всеукр. межвед. науч. — техн. сб. — Х. : ХНУРЭ. — 2009. — Вып. 157. — С. 108–114.*
  16. Гордієнко Ю. Е. Ближнеполевая сканирующая сверхвысокочастотная микродиагностика объектов в технологии электроники // *Нові технології : наук. вісник ІЕНТ. — 2002. — № 1. — С. 3–6.*
  17. Гордієнко Ю. Е., Гуд Ю. И., Ларкин С. Ю., Полетаев Д. А. Электродинамические характеристики усовершенствованного резонаторного микронзонда для микроволновой микроскопии и микродиагностики // *Радиотехника : Всеукр. межвед. науч. — техн. сб. — Х. : ХНУРЭ. — 2009. — Вып. 159. — С. 302–308.*
  18. Бондаренко И. Н., Гордієнко Ю. Е., Ларкин С. Ю. Формирование сигналов сканирования в микроволновой микроскопии с резонаторным микронзондом // *Радиотехника : Всеукр. межвед. науч. — техн. сб. — Х. : ХНУРЭ. — 2009. — Вып. 158. — С. 59–67.*
  19. Jin J. M., Volakis J. L. A finite element-boundary integral formulation for scattering by three dimensional cavity backed apertures // *IEEE Trans. Antennas and Propagation.* — Jan. 1991. — Vol. AP-39. — P. 97–104.
  20. Lee J.H, Hyun S., Char K. Quantitative analysis of scanning microwave microscopy on dielectric thin film by finite element calculation // *Rev. Sci. Inst.* — 2001. — V. 72. — P. 1425–1434.
  21. Гордієнко Ю. Е., Ларкин С. Ю., Яцків А. М. Ближнеполевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора // *Радиотехника : Всеукр. межвед. науч. — техн. сб. — Х. : ХНУРЭ. — 2009. — Вып. 159. — С. 309–314.*
  22. Гордієнко Ю. Е., Ларкин С. Ю., Ищенко А. Л. Характеристики коаксиального конусного СВЧ датчика для микродиагностики объектов // *Радиотехника : Всеукр. межвед. науч. — техн. сб. — Х. : ХНУРЭ. — 2010. — № 162. — С. 35–40.*
  23. Гордієнко Ю. Е., Мельник С. И., Слипченко Н. И., Петров В. В., Ищенко А. Л. Алгоритм реконструкции изображений в ближнеполевой сканирующей микроволновой микроскопии // *Радиотехника : Всеукр. межвед. науч. — техн. сб. — Х. : ХНУРЭ. — 2007. — Вып. 151. — С. 259–265.*
  24. Гордієнко Ю. Е., Мельник С. И. Методика микроволновой сканирующей томографии электрофизических свойств полупроводников // *Сб. материалов 20-й Крымской МНТК «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2010. — С. 721–722.*
  25. Резник А. Н., Юрасова Н. В. Обнаружение контрастных образований внутри биологических сред при помощи ближнеполевой СВЧ диагностики // *Журнал технической физики.* — 2006. — Т. 76, вып. 1. — С. 90–104.