

# ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

---

## PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

---

---

УДК 621.385.6

### ОСНОВЫ ВЫСОКОЛОКАЛЬНОЙ СВЧ СЕНСОРИКИ

*Ю. Е. Гордиенко<sup>1</sup>, И. Н. Бондаренко<sup>1</sup>, Я. И. Лепих<sup>2</sup>, А.М. Проказа<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники,  
e-mail: [mequ@kture.kharkov.ua](mailto:mequ@kture.kharkov.ua) <sup>2</sup>

Межведомственный научно-учебный физико-технический центр МОН и НАН Украины,  
ОНУ имени И.И.Мечникова, e-mail: [ndl\\_lepikh@onu.edu.ua](mailto:ndl_lepikh@onu.edu.ua)

### ОСНОВЫ ВЫСОКОЛОКАЛЬНОЙ СВЧ СЕНСОРИКИ

*Ю. Е. Гордиенко, И. Н. Бондаренко, Я. И. Лепих, А.М. Проказа*

**Аннотация.** Созданы теоретические основы разработки нового поколения ближнеполевых микроволновых датчиков для контроля сред и функциональных материалов с широким спектром локальности, которые являются базой высоколокальной СВЧ сенсорики. Системно исследованы характеристики преобразования таких датчиков, показана связь потерь на излучение с размерами апертуры зонда и электрофизическими параметрами объекта исследования. Предложен способ решения задачи одновременного повышения локальности и чувствительности датчиков. Разработана схема выделения и обработки сигналов измерительной информации с использованием современных достижений аналого-цифрового преобразования и микропроцессорной техники.

**Ключевые слова:** сенсорики, ближнеполевая микроскопия, апертура, накопительная область, характеристики преобразования

## ОСНОВИ ВИСОКОЛОКАЛЬНОЇ НВЧ СЕНСОРИКИ

*Ю. О. Гордієнко, І.М. Бондаренко, Я. І. Лепіх, О.М.Проказа*

**Анотація.** Створено теоретичні передумови розробки нового покоління ближньопольових мікрохвильових датчиків для контролю середовищ і функціональних матеріалів з широким спектром локальності, які є базою високолокальної НВЧ сенсорики. Системно досліджено характеристики перетворення таких датчиків, показано зв'язок втрат на випромінювання з розмірами апертури зонда і електрофізичними параметрами об'єкта дослідження. Запропоновано спосіб вирішення задачі одночасного підвищення локальності і чутливості датчиків. Розроблено схему виділення та обробки сигналів виміральної інформації з використанням сучасних досягнень аналого-цифрового перетворення і мікропроцесорної техніки.

**Ключові слова:** сенсорика, ближньопольова мікроскопія, апертура, область накопичення, характеристики перетворення

## FOUNDATIONS of HIGHLOCAL MICROWAVE SENSORICS

*Yu. E. Gordienko, I. N. Bondarenko, Ya. I. Lepikh, A. M. Prokaza*

**Abstract.** Theoretical foundations of development of short-distance field microscopy microwave gauges of new generation for the control of medium and functional materials with a wide spectrum of localness that are the base of highlocal microwave sensorics are created. Such gauges transformation characteristics are systemically investigated, connection of losses on radiation with the probe aperture sizes and the investigated object electrophysical parameters is shown. The way of the solving of a problem of simultaneous gauges localness and sensitivity increase is offered. The pattern of measuring information signals displaying and processing with the use of modern achievements of analog-digital transformation and microprocessor engineering is developed.

**Keywords:** sensorics, short-distance field microscopy, the aperture, storage area, transformation characteristics

### Введение

Функционирование СВЧ сенсоров базируется на радиоволновом методе контроля материалов, сред и структур. Этот метод реализуется посредством зондирования объектов электромагнитным СВЧ излучением. Размеры объектов должны быть сравнимы или превышать длину волны излучения.

Существующие разновидности СВЧ сенсоров, отличаются электродинамической структурой первичного измерительного преобразователя и способом формирования сигналов измерительной информации. Однако, для большинства разработанных СВЧ сенсоров и систем характерны специфические требования к геометрии и размерам образца. Кроме того, воспроизводимость результатов измерений

у них невысокая из-за невоспроизводимости распределения поля в системе излучатель- объект- детектор.

С разработкой и развитием сканирующей микроволновой микроскопии (СММ) [1-3] возникло представление о возможности создания источников СВЧ поля со значительной концентрации его энергии в локальной области трехмерного пространства [4]. Для них характерно практическое отсутствие излучения в дальней зоне, в связи с чем такие источники получили название ближнеполевых, эванесцентных. Последнее означает быстрое уменьшение энергии поля с координатой. Его следует отличать от стоячей и затухающей бегущей волн. Эванесцентность определяет высокую степень достижимой локальности.

Указанные особенности ближнеполевых источников СВЧ поля обеспечивают широкие возможности безэлектродного, неразрушающего локального контроля поверхности и подповерхностных областей объектов произвольной формы. Кроме того, благодаря высокой локализации взаимодействия с объектом существенно улучшается воспроизводимость результатов измерений. На основе таких источников СВЧ зондирующего поля может быть построен широкий спектр первичных измерительных преобразователей, являющихся основой СВЧ сенсоров.

Таким образом, целью данной работы является обоснование возможности создания высоколокальной СВЧ сенсорики на основе ближнеполевых микроволновых резонаторных датчиков для контроля сред и функциональных материалов с широким спектром локальности.

#### Основная часть

Наибольшее распространение по опыту развития СММ могут получить измерительные преобразователи резонаторного типа РИП [5, 6]. Сразу отметим, что в отличие от СММ их локальность можно варьировать (выбирать) в диапазоне от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Представленные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что в общем виде РИП характеризуются фундаментальными сигналами изменения резонансной частоты ( $\Delta f/f$ ) и добротности ( $\Delta Q/Q$ ) под влиянием исследуемого объекта. Из этих сигналов, путем вторичного преобразования, образуются специализированные по выделению и использованию рабочие сигналы измерительной информации СВЧ сенсоров.

В общем виде высоколокальные РИП содержат так называемую апертурнообразующую область I (рис. 1) и область накопления энергии поля II. Их влияние на сигналы  $\Delta f/f$  и  $\Delta Q/Q$  различно. Апертурнообразующая область формирует локальный источник ближнего СВЧ поля. Поэтому ее характеристики единообразно в качественном отношении определяют указанные сигналы.

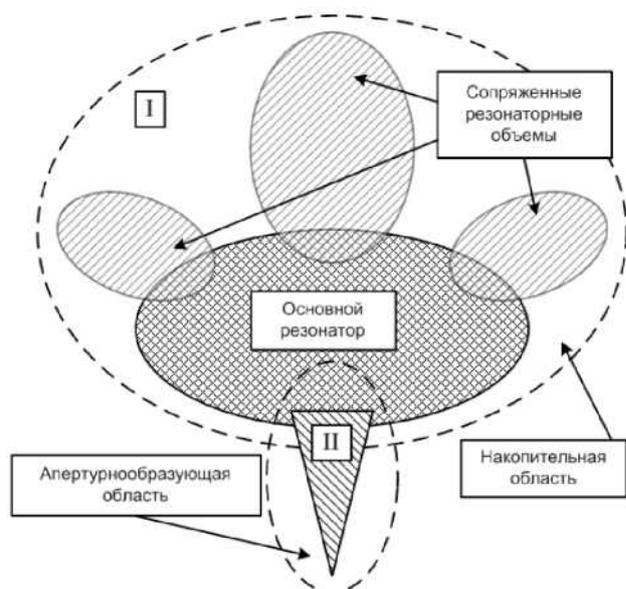


Рисунок 1 – Обобщенное схематическое изображение РИП.

Накопительная область II определяет исходную добротность РИП. Поэтому ее влияние преимущественно сказывается на величине сигналов  $\Delta Q/Q$ . В отличие от этих сигналов увеличение накопленной энергии в РИП уменьшает сигнал  $\Delta f/f$ . Это следует из приведенных ниже общих выражений для этих сигналов.

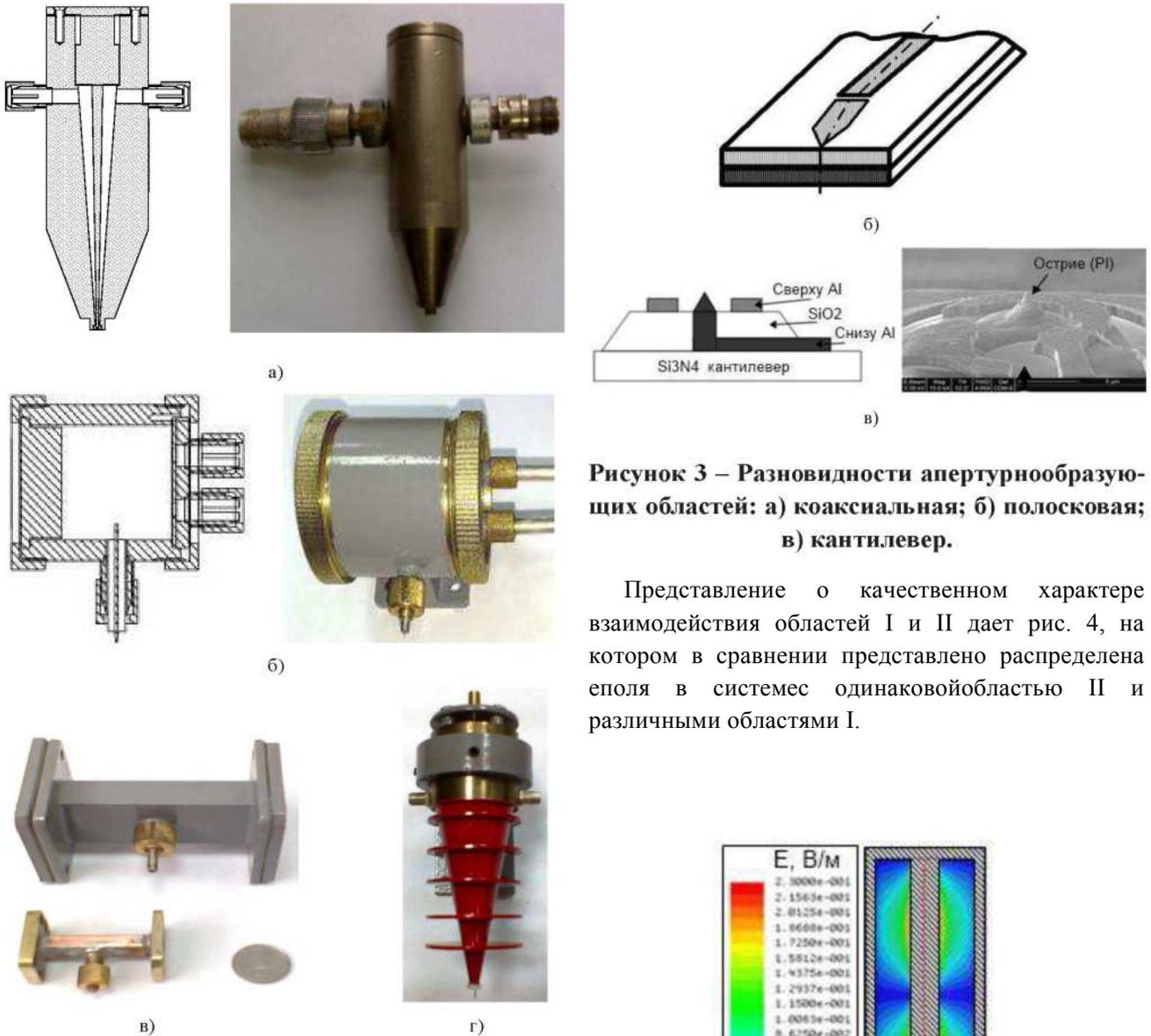
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta W}{W_3}; \quad (1)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = Q_0 \frac{\Delta P_s}{(P_0 + P_{s0} + \Delta P_s)} = \frac{W_3}{P_0 + P_s} \cdot \frac{\Delta P_s}{(P_0 + P_{s0} + \Delta P_s)},$$

где  $Q_0$  - ненагруженная добротность РИП;  $P_0$  - потери в стенках РИП;  $P_{s0}$  - потери на излучение;  $\Delta P_s$  - потери, вносимые объектом сканирования.

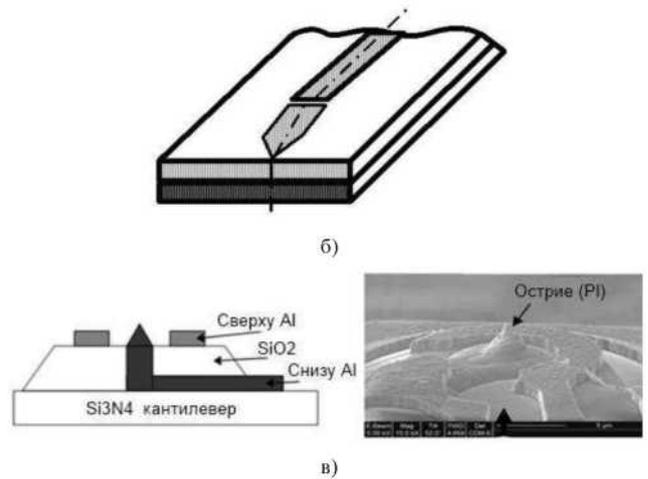
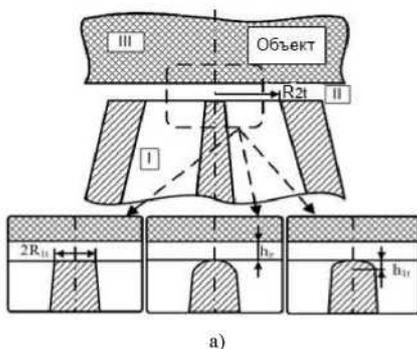
Увеличение запасаемой за период в накопительной области II энергии СВЧ поля  $W$  способствует увеличению сигнала  $\Delta Q/Q$ , однако уменьшает сигнал  $\Delta f/f$ .

Конструкции некоторых РИП представлено на рис. 2.



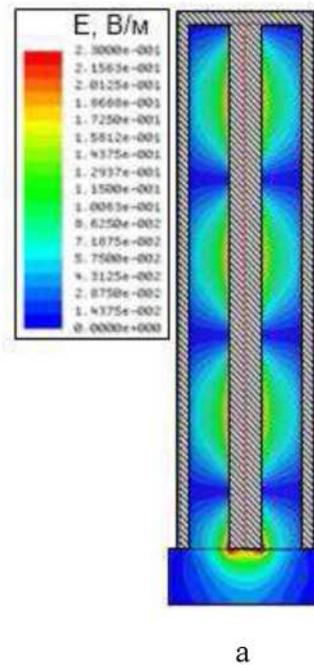
**Рисунок 2 – Конструкции РИП: а) конусный коаксиальный; б) цилиндрический; в) на основе волновода; г) конусный коаксиальный с гибридной структурой поля.**

На рис. 3 приведено несколько разновидностей апертурнообразующих областей II.



**Рисунок 3 – Разновидности апертурнообразующих областей: а) коаксиальная; б) полосковая; в) кантилевер.**

Представление о качественном характере взаимодействия областей I и II дает рис. 4, на котором в сравнении представлено распределена еполя в системес одинаковойобластью II и различными областями I.



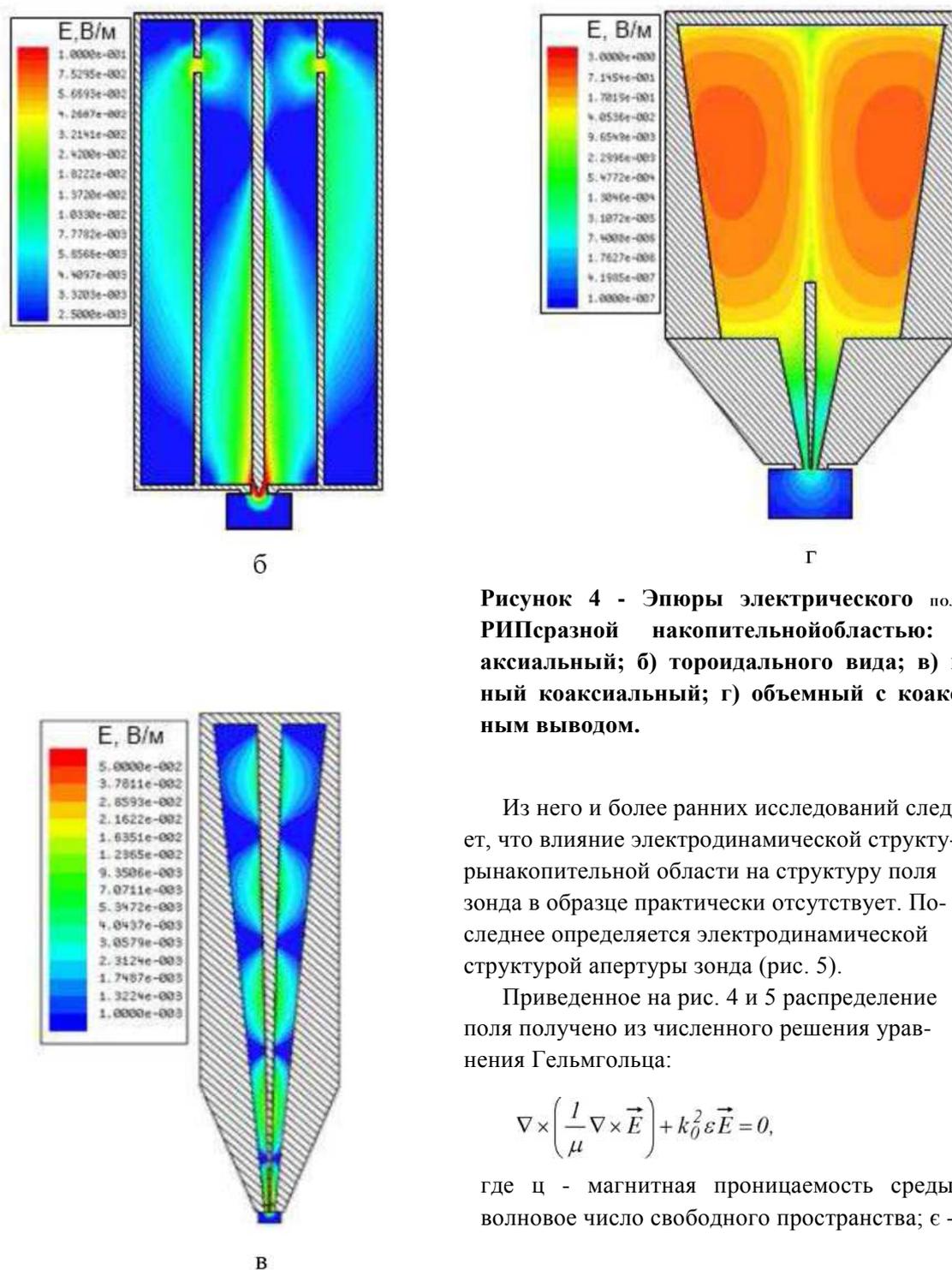


Рисунок 4 - Эпюры электрического поля для РИПразной накопительнойобластью: а)коаксиальный; б) тороидального вида; в) конусный коаксиальный; г) объемный с коаксиальным выводом.

Из него и более ранних исследований следует, что влияние электродинамической структуры накопительной области на структуру поля зонда в образце практически отсутствует. Последнее определяется электродинамической структурой апертуры зонда (рис. 5).

Приведенное на рис. 4 и 5 распределение поля получено из численного решения уравнения Гельмгольца:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} \right) + k_0^2 \epsilon \vec{E} = 0, \quad (2)$$

где  $\mu$  - магнитная проницаемость среды;  $k_0$  - волновое число свободного пространства;  $\epsilon$  -

диэлектрическая проницаемость среды;  $\vec{E}$  - вектор напряженности электрического поля.

Уравнение (2) решается методом конечных элементов. В отличии от СММ для анализа СВЧ сенсоров решение этого уравнения должно осуществляться с учетом возможного появления поля в дальней зоне. Как показано в [7] учет этого излучения предполагает выполнение в объекте следующего соотношения:

$$(\nabla \times \vec{E})_{\tau} = jk_0 \vec{E} - \frac{j}{k_0} \nabla \times \vec{n} (\nabla \times \vec{E})_n + \frac{j}{k_0} \nabla_{\tau} (\nabla_{\tau} \times \vec{E}_{\tau}) \quad (3)$$

где  $\vec{E}_{\tau}^{-1}$  - вектор напряженности электрического поля, тангенциальный к поверхности;  $\vec{n}$  - единичный вектор, нормальный к поверхности;  $\nabla$  – оператор Гамильтона.

Необходимая граница образа не должна порождать отраженных волн (обладать свойством прозрачности). Выполнение соотношения (3) позволяет заменять при численном решении полубесконечный образец конечным с условием (3) на противоположной границе. (3) применением этого подхода в работе [7] показана с учетом необходимости учета потерь на излучение с размерами структуры РИП и электрическими параметрами бразца.

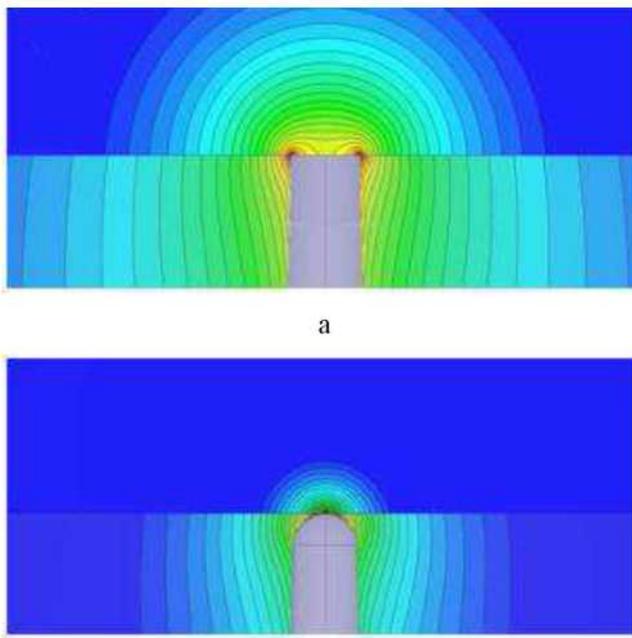


Рисунок 5. Эпюры электрического поля в апертуре конусного коаксиального РИП сраз-ной формой острия: а) плоская; б) сферическая.

Из зависимости радиационной добротности РИП на основе конусного коаксиального резонатора с геометрией  $L=81$  мм;  $R_2 = 8$  мм;  $R_1 = 1,9$  мм  $R_{1T} = 50$ мкм от диаметра апертуры

$\frac{2R_{2T}}{\lambda}$  при  $\lambda = 3$ см, представленной на рис.6, видно, что учет потерь на излучение СВЧ сенсоров на основатакихРИП необходим при  $\frac{2R_{2T}}{\lambda} > 0.1$

Наиболее общим образом рассматриваемые СВЧ сенсоры описываются характеристиками

преобразования РИП. На рис.7 представлены полученные из численного анализа зависимости фундаментальных сигналов  $\Delta Q/Q$  и  $\Delta f/f$  от электрических параметров ( $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$ ) полупроводниковых и диэлектрических объектов. Для получения представлений о взаимосвязи чувствительности и локальности РИП они приведены при различных значениях  $R$  фактически определяющих эти характеристики сенсоров в целом. Эти зависимости отражают специфику локальных СВЧ сенсоров на основе ближнеполевых резонаторных зондов (РИП). Суть ее сводится к тому, что сигнал  $\Delta f/f$  практически пропорционален значению действительной части диэлектрической проницаемости материала объекта и в области значений  $\text{tg}\delta < 1$  не зависит от этого параметра. Сигнал  $\Delta Q/Q$  в широком диапазоне значения  $\epsilon$  плавно возрастает с уменьшением  $\epsilon$  материала объекта и сложным образом изменяется в широком диапазоне значений  $\text{tg}\delta$ .

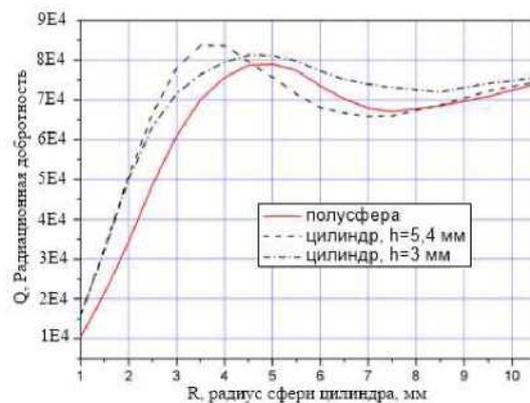
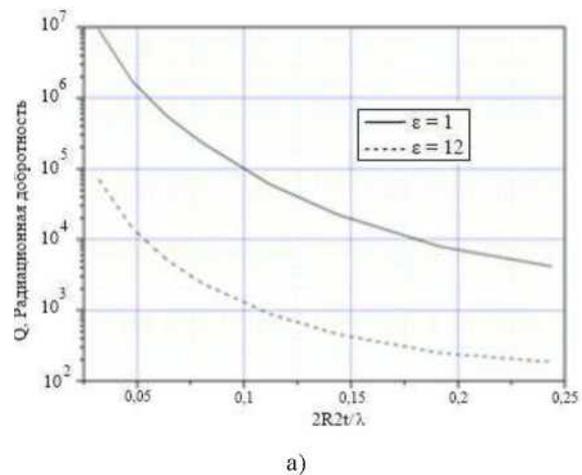
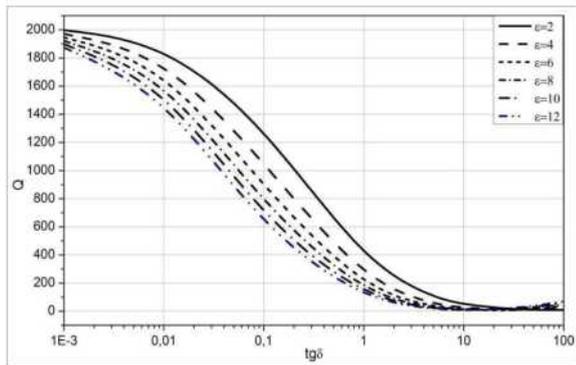
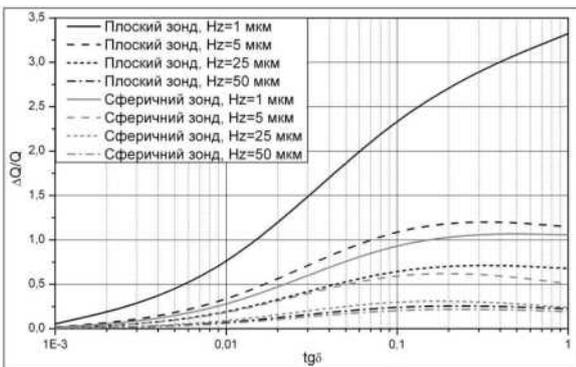


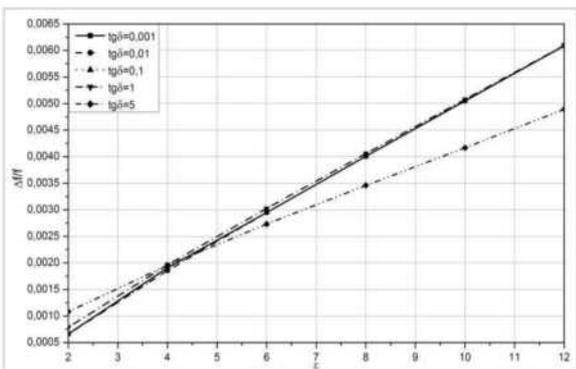
Рисунок 6. Зависимость радиационной добротности от диаметра апертуры (а) и радиуса объекта исследования (б).



а)



б)



в)

**Рисунок 7- Зависимость характеристики преобразования РИП от электрофизических параметров материала: а) добротность; б)  $\Delta Q/Q$ ; в)  $\Delta f/f$**

Оба сигнала уменьшаются с уменьшением радиуса центральной части коаксиальной апертуры зонда  $R_{1c}$ , т.е. с увеличением локальности сенсора. Как отмечалось выше и в работах по СММ [8], падение чувствительности при повышении локальности можно скомпенсировать дополнительными приемами увеличения исходной добротности  $Q_0$ , или степени включения образца в поле РИП.

Отдельной проблемой проектирования СВЧ сенсоров для контроля и диагностики объектов с высоким значением  $tg\delta$  (больше

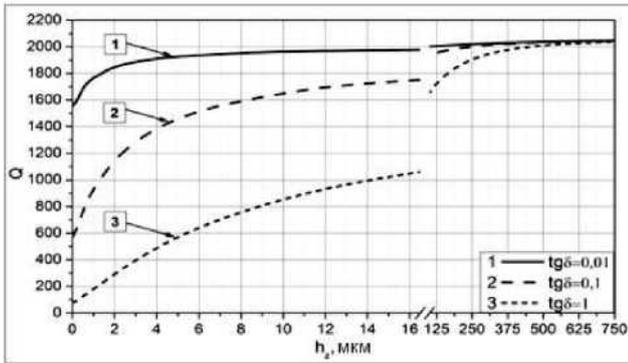
0.1) становится значительное снижение добротности РИП. Это особенно проявляется при исследовании низкоомных полупроводников и объектов со значительным влагосодержанием [9]. Рассматриваемые ближнеполевые РИП и СВЧ сенсоры на их основе позволяют принципиально и технически несложно снимать указанную проблему путем уменьшения степени связи апертурнообразующей области с накопительной частью резонатора. Это не затрагивает возможности реализовывать заданную локальность выбором раскрыва апертуры ( $R_{1c}$ ,  $R_{2c}$ )

Как уже упоминалось, для СВЧ сенсоров характерна проблема воспроизводимости измерений (отсчетов). В случае рассматриваемых ближнеполевых сенсоров она чаще всего определяется только лишь влиянием зазора между зондом и объектом. Количественно это влияние демонстрирует зависимость характеристик преобразования по сигналам  $\Delta f/f$  и  $\Delta Q/Q$  от величины указанного зазора (рис.8). Особо следует выделить сильное проявление влияния зазора в области его значений, существенно меньших раскрыва апертуры зонда.

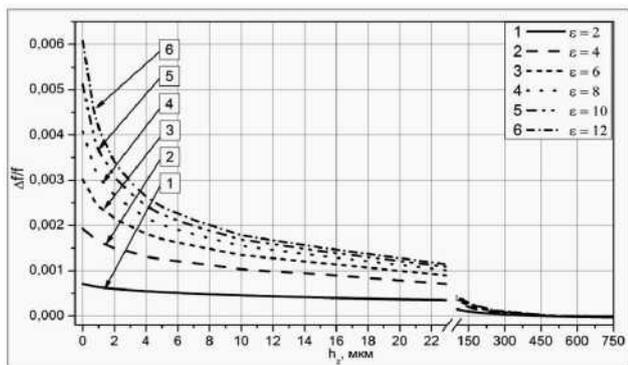
Указанный факт вполне физически объясним и не может быть снят принципиальным образом. В работах по СММ он снимается технически путем установки дополнительного сенсора зазора на основе туннельного, атомно-силового или емкостного зондов [10]. В наших работах используется более простой прием, базирующийся на сильной зависимости сигнала  $\Delta f/f$  от величины зазора. Правда, такой прием может использоваться только для снятия влияния зазора на величину сигнала  $\Delta Q/Q$ . Суть этого приема изложена ниже.

До сих пор рассмотрение основ локальной СВЧ сенсорике касалось только РИП. В целом сенсоры включают и устройства вторичной обработки измерительной информации. Первичные сигналы, как уже указывалось, базируются на фундаментальных сигналах  $\Delta f/f$  и  $\Delta Q/Q$ , однако, могут различаться, образуя производные от них пары первичных сигналов. Обычно сигнал  $\Delta f/f$  СВЧ формируется простой регистрацией резонанса  $\Delta f/f$  СВЧ частотомером при перестройке задающего СВЧ генератора. Сигнал  $\Delta Q/Q$  формировать технически более сложно. Точное измерение до

бротности при зондировании объекта метрологически более затруднено. Поэтому, часто избегают путем использования, например, зависимости коэффициента усиления передачи или отражения РИП от его добротности [11]. Однако, при этом проявляется влияние ряда мешающих факторов.



а)

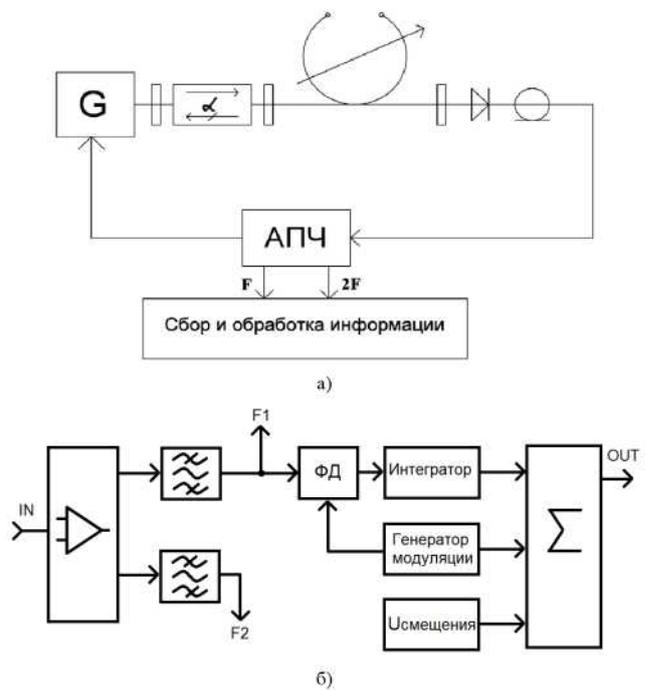


б)

**Рисунок 8 — Влияние зазора на характеристики преобразования РИП: а) на добротность; б) на сдвиг частоты.**

На рис.9, а представлена функциональная схемалокального СВЧ сенсора, которая разработана с учетом специфики сигналообразования рассмотренных РИП. Такой сенсор базируется на твердотельном задающем СВЧ генераторе (G), рабочая частота которого поддерживается равной текущей резонансной частоте РИП с помощью системы автоматической подстройки частоты (АПЧ) модуляционного типа (рис. 9,б) [12]. В нее встраиваются дополнительные два канала образования аналоговых сигналов первичной измерительной информации, пропорциональных  $\Delta f/f$  и  $\Delta Q/Q$ . Это каналы, отмеченные в схеме как F и 2F.

Канал (F) выделяет сигнал обработки АПЧ, а канал (2F) формирует сигнал по величине  $\Delta Q/Q$  на удвоенной частоте модуляции, применяемой в АПЧ. Далее эти сигналы преобразуются к цифровому виду и обрабатываются либо компьютером, либо контроллером. Непосредственная перестройка частоты СВЧ генератора по сигналу с выхода АПЧ осуществляется с помощью варикапа, встроенного в генератор G.



**Рисунок 9 — Функциональная (схема локального СВЧ сенсора (а) и блок-схема АПЧ (б)).**

Такая схема сенсора позволяет выполнить его компактным и имеющим хорошие метрологические характеристики. Если необходимо компенсировать влияние зазора, как упоминалось выше, подстройка равенства частоты СВЧ генератора с резонансной частотой РИП осуществляется путем изменения зазора с помощью того же электронного узла АПЧ с модифицированным оконечным усилителем под другой обрабатывающий элемент.

## Выводы

В процессе научной деятельности в области сканирующей микроволновой микроскопии были созданы теоретические предпосылки разработки нового поколения ближнеполевых

микроволновых датчиков для контроля сред и функциональных материалов с широким спектром локальности, которые являются основой высоколокальной СВЧ сенсорики. При этом одновременно могут решаться вопросы реализации заданной чувствительности, багатопараметровости и ширины диапазона значений электрофизических параметров, которые контролируются. Соответствующие теоретические положения и выводы подтверждены экспериментально и снабжены разработанным рядом датчиков.

### Список использованной литературы

- [1] Anlage S.M. Principles of near-field microwave microscopy / Anlage S.M., Talanov V.V., Schwartz A.R. // Scanning Probe Microscopy: electrical and electromechanical phenomena at nanoscale – New York: Springer-Verlag, 2007. – vol.1. – p. 215–253.
- [2] Gordiyenko Yu.O. Skanuyucha mikrokhvylyova mikroskopiya yak intelektual'na vymiryuval'na systema / Intelektual'ni vymiryuval'ni systemy na osnovi mikroelektronnykh datchyiv novoho pokolinnya: monohrafiya // za red. Lepikha Ya.I., Romanova V.O. – Odesa : Astroprint, 2011. – S. 176–246.
- [3] Anlage S.M. Near-field microwave microscopy of materials properties / Anlage S.M., Steinhauer D.E., Feenstra B.J., Vlahacosand 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.
- [4] Gao, C. High spatial resolution quantitative microwave impedance microscopy by a scanning tip microwave near-field microscope / C. Gao, T. Wei, F. Duetter, Y. Lu, X.-D. Xiang // Appl. Phys. Lett. – 1997. – V. 71, No 13. – P. 1872–1874.
- [5] Gordiyenko YU.Ye. Sravnitel'nyy analiz kharakteristik rezonatornykh zondov dlya SMM / Gordiyenko YU.Ye., Kamyshan A.A., Larkin S.YU. //Radioelektronikai informatika. – 2011. - №1. – S. 24-29.
- [6] Imtiaz, A. Near-field microwave microscopy on nanometer length scales / A. Imtiaz, M. Pollak, S. M. Anlage, J. D. Barry, J. Melngailis // Journal of applied physics. – 2005. – V. 97, N.4. – P. 044302-1–044302-6.
- [7] Gordiyenko Yu.E. Radiatsionnyye efekty v blizhnepolevoy mikrovolnovoy mikroskopii poluprovodnikov / Gordiyenko Yu.E., Larkin S.Yu., Soroka A.S. // Radiotekhnika. – Khar'kov, 2011. – Vyp. 164. – S. 180-189
- [8] Gordiyenko Yu.E. Blizhnepolevoy SVCH datchik na osnove konusnogo koaksial'nogo rezonatora / Gordiyenko Yu.E., Larkin S.Yu., Yatskiv A.M. // Vishcha shkola: Radiotekhnika: Vseukr. mezhdved. nauchn.-tekhn. sb. – 2009. – №159.S.309-314.
- [9] Gordienko Yu.E. Quantitative estimation of physical processes at a contactless scanning microwave microscopy / Gordienko Yu.E., Larkin S.Yu., Prokaza A.M. // Telecommunications and Radio Engineering, 2012, vol. 71, № 3, p. 265 – 276.
- [10] Duetter F. Tip-sample distance feedback control in a scanning evanescent microwave microscope / Duetter F., Gao C., Takeuchi I., Xiang X.-D // Applied physics letters Vol. 74, No. 18, 1999.
- [11] Bondarenko I.N. Application of the AFC system measuring generator in microwave scanning microscopy / Bondarenko I.N., Gordienko Yu.E., Larkin S.Yu // Radioelectronics and Informatics 2009. No 3, pp. 3-6.
- [12] Gordiyenko Yu.E. APCH zadayushchego generatora v SVCH diagnostike poluprovodnikov i metamaterialov / Gordiyenko Yu.E., Polishchuk A.V., Slipchenko N.I. // SVCH-tehnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii: materialy 24-y Mezhdunar. Krymskoy konf. (KryMiKo'2014), Sevastopol': Veber, 2014. C. 994–995.

Стаття надійшла до редакції 10.11.2014 р.