

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

«Исследование амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода»

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 411 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Хлопкова Алексея Васильевича

Научные руководители

профессор, д.ф.-.м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

А.В. Скрипаль

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-.м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

А.П. Фролов

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Д.А. Усанов

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов, 2016

## **Введение**

Ближнеполевая СВЧ-микроскопия – это неразрушающий метод исследования, позволяющий исследовать малоразмерные объекты с высокой степенью локальности, базируется на регистрации СВЧ-воздействия, локализованного в ближнем поле зонда.

СВЧ-микроскопия обладает рядом преимуществ: электромагнитная волна не имеет массы и электрического заряда, свободно распространяется в воздухе и многих диэлектрических материалах, легко изменяет поляризацию, может иметь сравнительно большую длину волны и т.д.

Таким образом, с помощью СВЧ-микроскопа можно определять не только геометрию поверхности объектов, но и параметры материалов под поверхностью, за счет проникновения СВЧ-излучения в объем структуры. Это является основным достоинством СВЧ-микроскопа по сравнению с туннельным и атомно-силовым микроскопами.

Ближнеполевые СВЧ-микроскопы, в отличие от оптических, не ограничены дифракционным пределом, разрешающая способность превосходит длину волны используемого излучения на несколько порядков. В таких микроскопах используется эффект «ближнего поля» – образование квазистационарных полей, быстро затухающих с расстоянием и локализуемых в малой окрестности излучающей системы. Располагая исследуемый объект в области существования этого поля, можно исследовать распределение его электрофизических свойств с разрешением, намного меньшим, чем длина волны используемого излучения.

Для того чтобы достичь высокого быстродействия современная электроника работает на больших частотах. СВЧ-микроскоп позволяет исследовать параметры электронных структур на тех частотах, на которых и планируется их использование.

**Целью бакалаврской работы** являлось разработка микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода со штыревой металлической структурой и исследование его амплитудно-частотных характеристик.

Для достижения этой цели было выполнено:

- при помощи системы автоматизированного проектирования *High Frequency Structural Simulator v13* смоделирован микрокоаксиальный зонд ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода,
- проведен расчет амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа при расположении в волноводе структуры, состоящей из металлических штырей, и при её отсутствии.

Для определения наилучшей резонансной особенности была проведена параметризация:

- положения штырей вдоль волновода,
- угла поворота металлических штырей,
- расстояния между золотой пленкой и зондом.

Проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода с помещенной в него штыревой структурой.

## Расчет амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода

На основе численного моделирования с использованием метода конечных элементов в САПР HFSS Ansoft исследовалось взаимодействие электромагнитного поля с системой на основе модели микрокоаксиального зонда СВЧ-микроскопа, созданной по параметрам уже существующего микрокоаксиально-волноводного перехода с отрезком микрокоаксиала, центральный проводник которого выступает за пределы внешнего проводника микрокоаксиала на величину 1 мм. Конец центрального проводника микрокоаксиального зонда выполнялся заостренным с постепенно уменьшающимся диаметром до величины 2,5 мкм. Внутренняя (невыступающая) часть центрального проводника помещалась в диэлектрический конус.

В качестве волноведущей части использовался прямоугольный волновод сечением 23x10 мм.

Рассматривалась ситуация, при которой у острия зонда была расположена золотая пленка толщиной 10 мкм, величина зазора  $h$  варьировалась от 50 нм до 150 нм (см. рисунок 1).

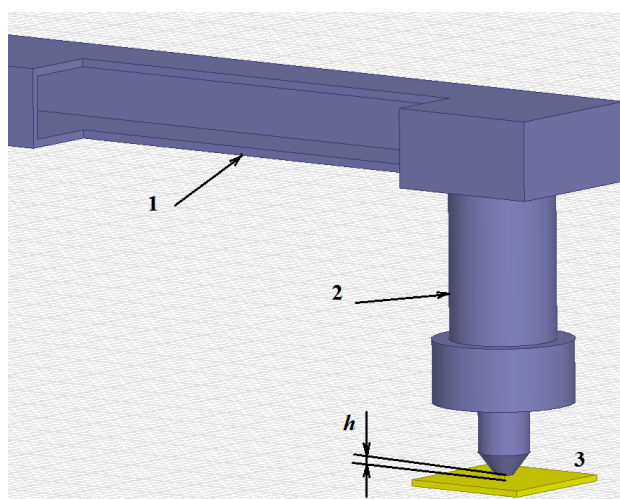


Рисунок 1 Конструкция зонда на основе микрокоаксиально-волноводного перехода, содержащего: 1- прямоугольная волноведущая часть, 2- микрокоаксиально-волноводный переход, 3- золотая пленка,  $h$ - расстояние между золотой пленкой и концом центрального проводника микрокоаксиального зонда

Однако по результатам компьютерного моделирования в спектральных характеристиках ближнеполевого зонда представленной конструкции не выявлено ярко выраженных резонансных особенностей.

#### **Описание, структуры состоящей из металлических штырей помещенной в волновод**

С целью создания резонансной моды колебаний в спектральной характеристике коэффициента отражения в волноведущую часть данной конструкции, помещалась структура, состоящая из медных штырей диаметром 1 мм, и находящихся друг от друга на расстоянии 2 мм. Данная конструкция была, закреплена на блоке из материала с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 1,05$  перпендикулярно направлению распространения электромагнитного излучения и полностью заполняя волновод по поперечному сечению. В дальнейшем металлические штыри поворачивались на угол  $\alpha$  относительно вертикальной оси.

#### **Результаты расчета амплитудно-частотных характеристик компьютерной модели микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода**

С целью определения угла  $\alpha$ , при котором в спектре коэффициента отражения исследуемой модели возникает наиболее выраженная резонансная мода колебаний, был проведен параметрический анализ зависимости частотного положения резонансной особенности в спектре коэффициента отражения. В качестве задаваемого параметра выступал угол  $\alpha$  между штырем и вертикальной осью  $Y$ . Данный угол варьировался в диапазоне от  $10^\circ$  до  $80^\circ$  с шагом  $10^\circ$  (см. рисунок 2).

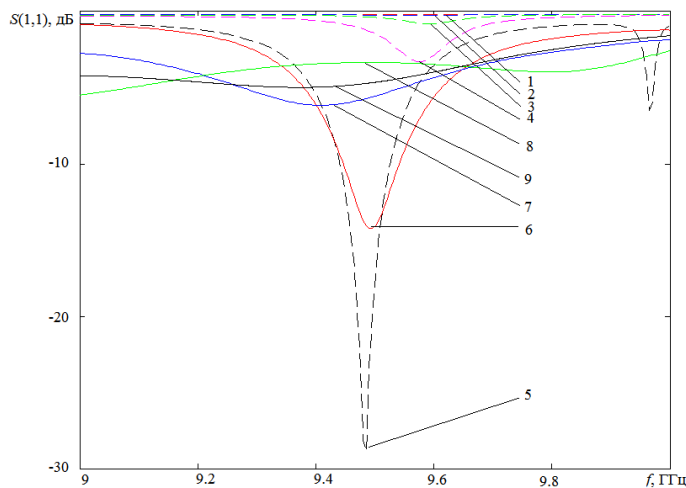


Рисунок 2 Амплитудно-частотные зависимости коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда, центральный проводник которого выступает за пределы внешнего проводника микрокоаксиала, при помещенной внутрь волновода структуре и при различном угле поворота стержней этой структуры. Положение зонда над поверхностью золотой пластины 100 нм  $1-\alpha=10^\circ$ ,  $2-\alpha=20^\circ$ ,  $3-\alpha=30^\circ$ ,  $4-\alpha=40^\circ$ ,  $5-\alpha=50^\circ$ ,  $6-\alpha=60^\circ$ ,  $7-\alpha=70^\circ$ ,  $8-\alpha=80^\circ$ , 9- пустой волновод

С целью определения расстояния  $l$ , при котором в спектре коэффициента отражения исследуемой модели возникает наиболее выраженная резонансная мода колебаний, был проведен параметрический анализ зависимости частотного положения резонансной особенности в спектре коэффициента отражения. В качестве задаваемого параметра выступало расстояние  $l$  между диэлектрической пластиной и плоскостью, содержащей ось симметрии коаксиальной части зонда (положение штыревой структуры в волноводе зонда на основе микрокоаксиального перехода). Данное расстояние варьировалось в диапазоне от 28 мм до 32 мм с шагом 1 мм (см. рисунок 3).

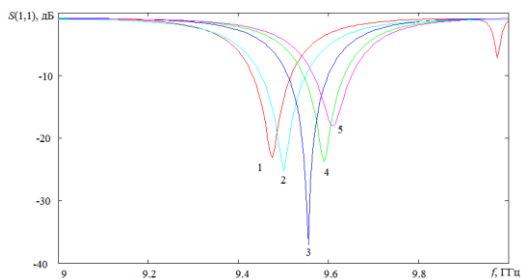


Рисунок 3 амплитудно-частотные зависимости коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда, при помещенной внутрь волновода структуре. Угол поворота стержней этой структуры  $\alpha=50^\circ$ . Положение зонда над поверхностью золотой пластины 100 нм. 1-  $l=32$  мм, 2-  $l=31$  мм., 3-  $l=30$  мм, 4-  $l=29$  мм, 5-  $l=28$  мм

В ходе расчетов структуры было выявлено, что наилучшая резонансная особенность проявляется при положении  $l=30$  мм, угле наклона медных стержней  $\alpha=50^\circ$ . Для определения разрешающей способности был проведен расчет структуры с такими параметрами. Параметр  $h$  (зазор зонд – поверхность золотой пленки) варьировался от 50 нм до 150 нм. На рисунке 12 представлены амплитудно-частотные зависимости коэффициента отражения  $S_{11}$  для такой структуры (см. рисунок 4).

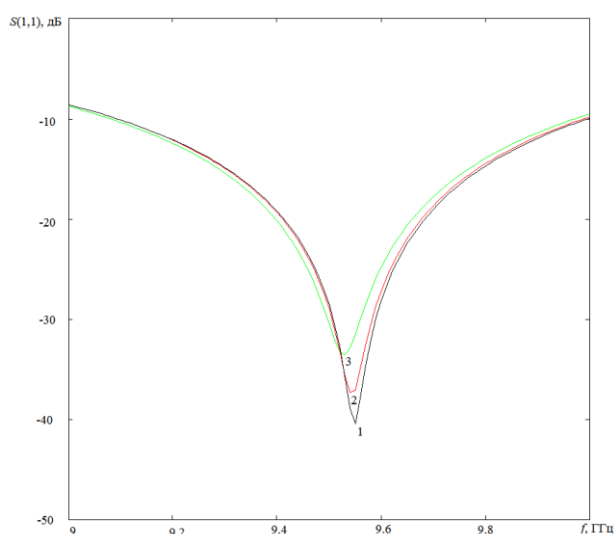


Рисунок 4 амплитудно-частотные зависимости коэффициента отражения  $S_{11}$  микроаксиального зонда, центральный проводник которого выступает за пределы внешнего проводника микроаксиала, при помещенной внутрь волновода структуре. Изменялся параметр  $h$ , от 50 нм до 150 нм, 1-  $h=50$  нм, 2-  $h=100$  нм, 3-  $h=150$  нм

Как следует из результатов, представленных на рисунке 12, на частоте  $f \sim 9.55$  ГГц при изменении величины  $h$  от 50 нм до 150 нм наблюдается наибольшая чувствительность  $\partial S_{11} / \partial h$ , величина которой составляет 0.06 дБ/нм.

## **Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода с помещенной внутрь структурой, состоящей из металлических штырей**

Высокочастотные характеристики исследуемого СВЧ-устройства на основе резонатора в виде отрезка волновода с помещенной внутрь штыревой структурой, соединенного с микрокоаксиальным переходом, центральный проводник которого выступает за пределы внешнего проводника на величину порядка 1 мм, нагруженным на металлодиэлектрическую структуру, исследовались с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5230A.

Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода было проведено с использованием трех образцов штыревой структуры. Каждый образец помещался в волновод на заданное расстояние  $l$  между плоскостью в которой лежат медные штыри и плоскостью, содержащей ось симметрии коаксиальной части зонда. Параметр  $l$  брался равным 2 см, 3 см, 5 см, 7 см и 9 см.

На рисунке 5 представлено семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда, для различных значений параметра  $l$ . Использовался образец с углом  $\alpha = 45^\circ$ .



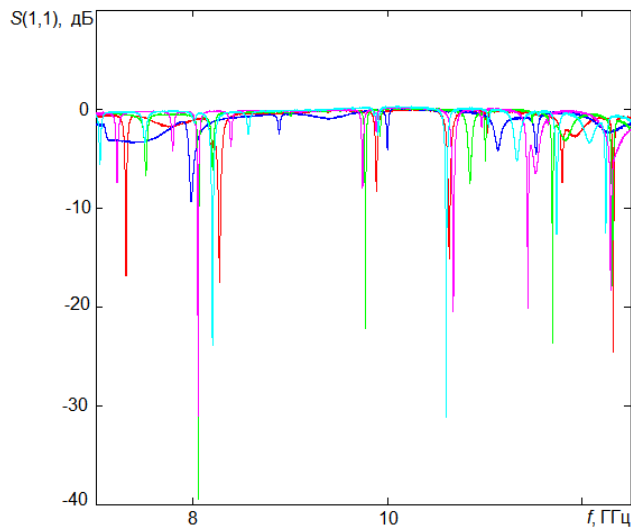


Рисунок 5 Семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда, для различных значений параметра  $l$ . Использовался образец с углом  $\alpha = 45^\circ$

На рисунке 6 представлено семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда, для различных значений параметра  $l$ . Использовался образец с углом  $\alpha = 50^\circ$ .

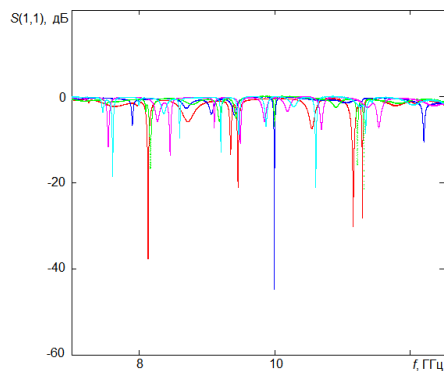


Рисунок 6 Семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда, для различных значений параметра  $l$ . Использовался образец с углом  $\alpha = 50^\circ$

На рисунке 7 представлено семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда, для различных значений параметра  $l$ . Использовался образец с углом  $\alpha = 55^\circ$ .

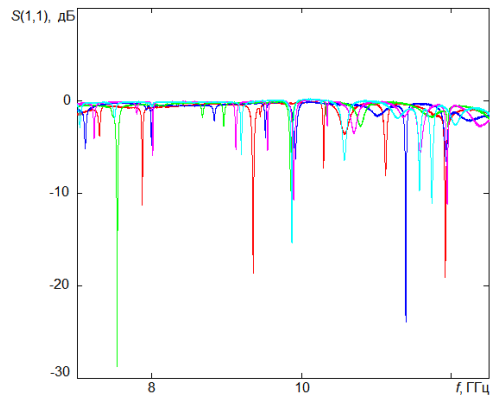


Рисунок 7 Семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда, для различных значений параметра  $l$ . Использовался образец с углом  $\alpha = 55^\circ$

Рассматривалась ситуация, при которой у острия зонда была расположена золотая пленка, величина зазора  $h \sim 20\text{мкм}$ .

На рисунке 8 представлено семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда «нагруженного» на золотую пленку, для различных значений параметра  $l$ . Использовался образец с углом  $\alpha = 45^\circ$ .

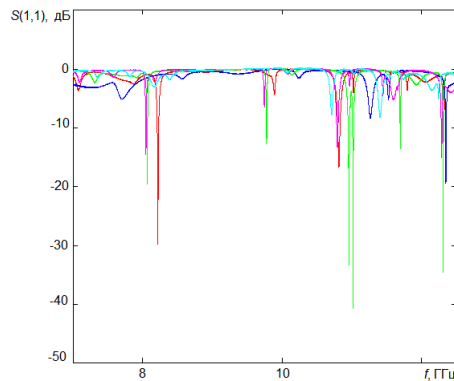


Рисунок 8 Семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда «нагруженного» на золотую пленку, для различных значений параметра  $l$ . Использовался образец с углом  $\alpha = 45^\circ$

На рисунке 9 представлено семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда «нагруженного» на золотую пленку, для различных значений параметра  $l$ . Использовался образец с углом  $\alpha = 50^\circ$ .

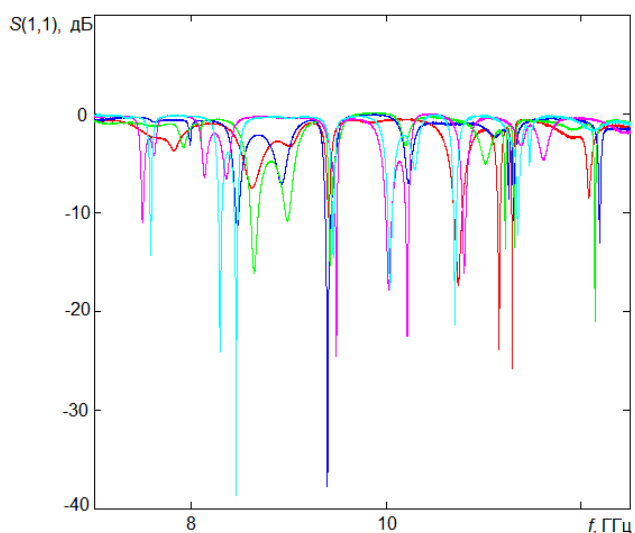


Рисунок 9 Семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда «нагруженного» на золотую пленку, для различных значений параметра  $l$ . Использовался образец с углом  $\alpha = 50^\circ$

На рисунке 10 представлено семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда «нагруженного» на золотую пленку, для различных значений параметра  $l$ . Использовался образец с углом  $\alpha = 55^\circ$ .

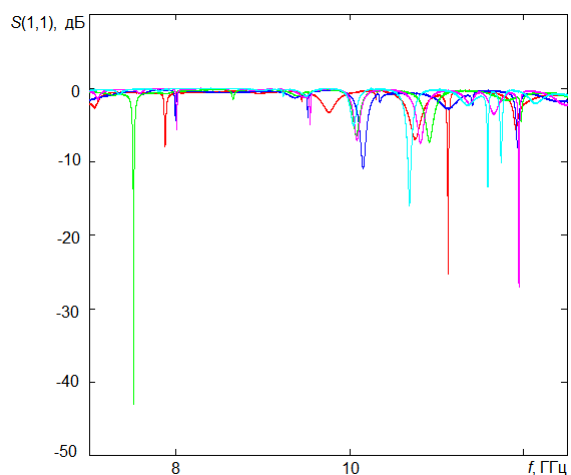


Рисунок 10 Семейство амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения  $S_{11}$  микрокоаксиального зонда «нагруженного» на золотую пленку, для различных значений параметра  $l$ . Использовался образец с углом  $\alpha = 50^\circ$

## Заключение

В ходе выполнения бакалаврской работы получены следующие результаты:

Проведено компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов в САПР HFSS Ansoft микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода.

Проведен расчет амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода, содержащего металлическую штыревую структуру и при её отсутствии.

С целью получения наилучшей резонансной особенности на АЧХ микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода были оптимизированы параметры штыревой структуры с помощью:

- изменения положения штыревой структуры относительно плоскости симметрии микрокоаксиала;
- изменения угла поворота элементов штыревой структуры;
- изменения расстояние между золотой пластиной и зондом.

Проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка волновода с помещенной в него штыревой структурой, состоящей из медных штырей.

Показана возможность создания перестраиваемого (управляемого) резонатора микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе волноведущей секции, содержащей металлическую штыревую структуру.

## Список используемых источников

1. Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области ее применения / Д.А. Усанов. — Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2010. — 100 с.
2. Near-field microwave microscopy of materials properties” in Microwave Superconductivity / S.M.Anlage, D.E.Steinbauer, B.J.Feenstra et al. / Eds. H. Weinstock and M. Nisenoff. — Amsterdam. The Netherlands: Kluwer, 2001. — P. 239–269.
3. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Резонансы в системе диафрагма–короткозамыкающий поршень // Изв. вузов. Радиопизика. — 2001. — Т.44, № 12. — С. 1046–1049.
4. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Волноводный измерительный резонатор // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 2002. — Т.45. — № 9. — С. 26–28.
5. Kleismit R. A., Kazimierczuk M. K. and Kozlowski G. Sensitivity and Resolution of Evanescent Microwave Microscope // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2006. — Vol. 54. — N 2. — P. 639–647.
6. S.M. Anlage, D.E. Steinbauer, B.J. Feenstra, C.P. Vlahacos, F.C. Wellstood. Near-Field Microwave Microscopy of Materials Properties // Microwave Superconductivity. — Amsterdam. — 2001. — P. 239-269.
7. T. Norokido, I. Вас, K. Mirumo. scanning Near-Field Millimeter-Wave Microscopy Using a Metal Hit as a Scanning Probe // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2001. — V.49. — № 3. — P. 491-499.
8. M. Gobovsky, A. Galkin, D. Davidov. High-spatial resolution resistivity mapping of large-area YBCO films by a near- field millimeter-wave microscope // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, 1996. — V. 44. — № 7. — P. 1390-1392.