

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

Кафедра физики твёрдого тела

**Исследование характеристик ближнеполевого СВЧ-микроскопа с  
резонатором на основе частично отражающей поверхности**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента   2   курса   201   группы  
направления (специальности) \_\_\_\_\_  
код и наименование направления (специальности)  
факультета нано- и биомедицинских технологий

**Рузанова Олега Михайловича**

Научные руководители  
профессор, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

должность, уч. степень, уч. звание

А.В. Скрипаль

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

должность, уч. степень, уч. звание

А.П. Фролов

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

Заслуженный деятель науки РФ,  
профессор, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

должность, уч. степень, уч. звание

Д.А. Усанов

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

Саратов 2016

## Введение

При конструировании устройств твердотельной микро-и нано электроники важно контролировать наличие дефектов и их локализацию в используемых при создании устройств материалов с возможно более высокой точностью и в короткое время. Такие перспективы открываются при использовании, в частности, ближнеполевой сканирующей СВЧ-микроскопии. Многие традиционные СВЧ-методы измерения параметров материалов и структур позволяют получить результат измерений, усреднённый по размеру, сравнимому с длиной волны. Следствием такого усреднения было то, что на результат измерения могла влиять флуктуация параметров в сравнительно малой части исследуемого объекта, а при измерении параметров одного из слоёв сложных структур могли влиять параметры других слоёв. От подобного рода ограничений свободны микроскопы, основанные на использовании эффекта ближнего поля.

Такие микроскопы позволяют проводить количественные измерения с высоким разрешением. Масштаб измеряемых размеров при их использовании не имеет жёстких ограничений, связанных с частотой зондирующего поля. Результаты измерений с помощью ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа могут быть успешно использованы при изучении сверхпроводимости, эффектов, связанных с распространением спиновых волн, плазмонов и т.д. Высокое разрешение ближнеполевых сканирующих СВЧ-микроскопов позволяет локализовать области дефектов в интегральной схеме [1]. Существует несколько видов классификаций ближнеполевых СВЧ микроскопов [2]:

- 1) СВЧ резонатор с отверстием в одной из стенок; сдвиг частоты  $\Delta f$  и добротность фиксируются на мониторе.
- 2) Метод измерения по коэффициенту отражения  $R$  и прохождения  $T$  на конце или в линии передачи.
- 3) Метод измерения с использованием сканирующего резонатора.

- 4) Метод, основанный на использовании зонда с заостренным концом.
- 5) SQUID-метод (сканирующий сверхпроводящий квантовый интерферометр)

Общим моментом для всех типов ближнеполевых микроскопов с использованием резонатора является стремление связать резонатор с локальным участком исследуемого образца [1].

**Актуальность:** В данной работе рассматривается метод, основанный на использовании микрокоаксиального зонда с резонатором на основе частично отражающей поверхности. В ходе выполнения работы решаются две задачи:

- повышение локальности измерений с использованием ближнеполевого СВЧ-зонда;
- создание резонатора на основе частично отражающей поверхности для повышения чувствительности измерений.

**Цель магистерской работы:** Разработка, создание и исследование микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе частично отражающей поверхности.

## **2 Компьютерное моделирование характеристик зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе частично отражающей поверхности**

С использованием программы трехмерного электродинамического моделирования ANSYS HFSS было проведено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе частично отражающей поверхности. Использование коаксиального зонда, включенного в цепь СВЧ-генератора с центральным проводником, выступающим за пределы внешнего проводника на расстояние не более  $0,3$  длины волны  $\lambda$ , для измерения диэлектрической проницаемости материалов в 1982 г. описано в [3].

В качестве частично отражающей поверхности использовалась металлическая решетка, нанесенная на диэлектрическую подложку.

В качестве подложек использовались пластина фторопласта толщиной 10 мм и поликоровая пластина (керамика  $Al_2O_3$ ) толщиной 1 мм.

Диэлектрические пластины с нанесенной металлической решеткой полностью заполняли поперечное сечение волновода канала 23x10 мм.

В ходе компьютерного моделирования проводились исследования влияния угла поворота металлической решетки на АЧХ частично отражающей поверхности, созданной на её основе.

Были выполнены расчеты АЧХ ближнеполевого зонда с резонатором на основе диэлектрической пластины, полностью заполняющей поперечное сечение волновода, и частично отражающей поверхности на основе металлической решетки.

Как следует из результатов расчета на частотной зависимости коэффициента отражения ближнеполевого зонда с резонатором на основе диэлектрической пластины из поликора наблюдается ряд резонансных пиков отражения. Величина, одного из которых достигает значения  $-9.8$  дБ.

АЧХ ближнеполевого зонда с резонатором на основе частично отражающей поверхности в виде металлической решетки  $\alpha=10^\circ$  характеризуется высокими значениями коэффициента отражения, слабо зависящими от частоты.

В ходе компьютерного моделирования были рассчитаны АЧХ ближнеполевого зонда с резонатором на основе частично отражающей поверхности, выполненной в виде металлической решетки, нанесенной на диэлектрическую подложку. При расчетах варьировался угол поворота металлической решетки в диапазоне от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом  $10^\circ$ .

Как следует из результатов расчета на частотной зависимости коэффициента отражения ближнеполевого зонда с резонатором на основе металлической решетки на поликоровой ( $Al_2O_3$ ) подложке наблюдается ряд резонансных пиков отражения, величины которых зависят от угла поворота металлической решетки.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует, что при угле поворота равном  $60^\circ$  величина резонанса на частоте 11.0 ГГц достигает значения  $-24$  дБ.

Для исследования влияния параметров подложки на АЧХ ближнеполевого зонда с резонатором на основе частично отражающей поверхности на основе металлической решетки были проведены расчеты характеристик при размещении металлической решетки на фторопластовой подложке. При расчетах угол поворота металлической решетки варьировался в диапазоне от  $0^\circ$  до  $60^\circ$  с шагом  $10^\circ$ .

### **3 Экспериментальные исследования характеристик зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе частично отражающей поверхности**

На основе результатов компьютерного моделирования были изготовлены образцы частично отражающей поверхности на основе металлической решетки на диэлектрической подложке. В качестве подложки использовались фторопластовые пластины. Металлическая решетка изготавливалась из меди и никрома.

Эскиз фторопластовой подложки с пазами для металлической решетки представлен на рис. 1.

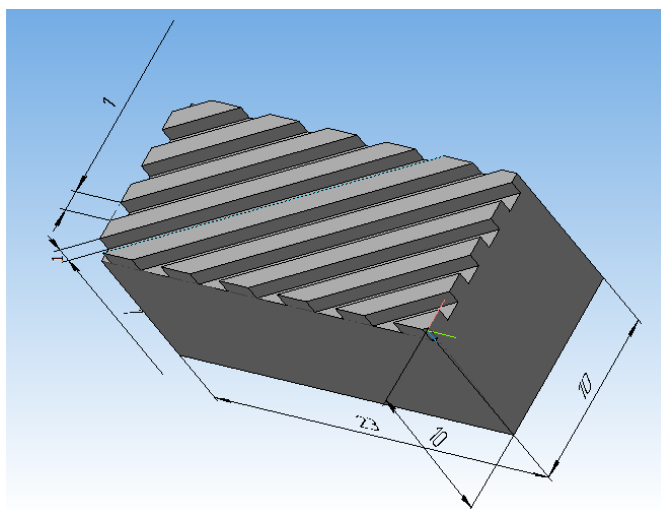


Рис. 1 Эскиз фторопластовой подложки с пазами для металлической решетки

Фотографии изготовленных структур выполняющих роль частично отражающей поверхности представлены на рис. 2.



Рис. 2 Фотографии изготовленных структур выполняющих роль частично отражающей поверхности. Металлическая решетка из меди (справа) и никрома (слева)

С использованием векторного анализатора цепей Agilent N5230A были измерены АЧХ ближнеполевого зонда с резонатором на основе частично отражающей поверхности на основе металлической решетки при угле поворота  $60^\circ$ .

Были рассмотрены случаи, когда нагрузкой для ближнеполевого зонда выступали поликоровая пластина с нанесенным резистивным покрытием различной толщины и поликоровая пластина без резистивного покрытия.

Измерения АЧХ проводились в бесконтактном режиме, зазор между ближнеполевым зондом и поликоровой пластиной был фиксированным и составлял 13 мкм.

Выполнены измерения АЧХ ближнеполевого зонда, нагруженного на поликоровую пластину без резистивного покрытия (см. рис. 3), с резистивным покрытием  $198 \text{ Ом}/\square$  (см. рис. 4) и с резистивным покрытием  $4 \text{ Ом}/\square$ , с резонатором на основе частично отражающей поверхности на основе металлической решетки, выполненной из никрома и меди.

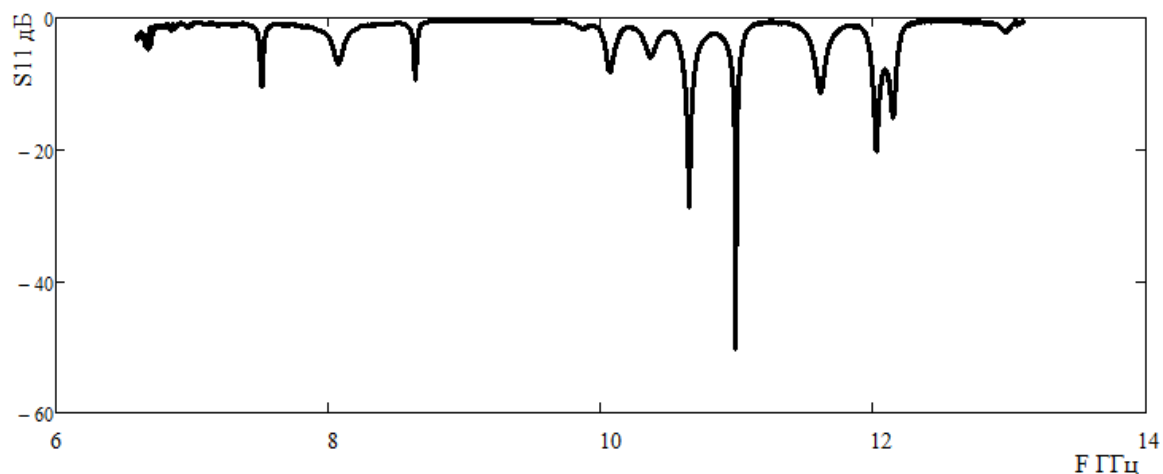


Рис. 3. АЧХ ближнеполевого зонда, нагруженного на поликоровую пластину без резистивного покрытия, с резонатором на основе частично отражающей поверхности на основе металлической решетки, выполненной из меди

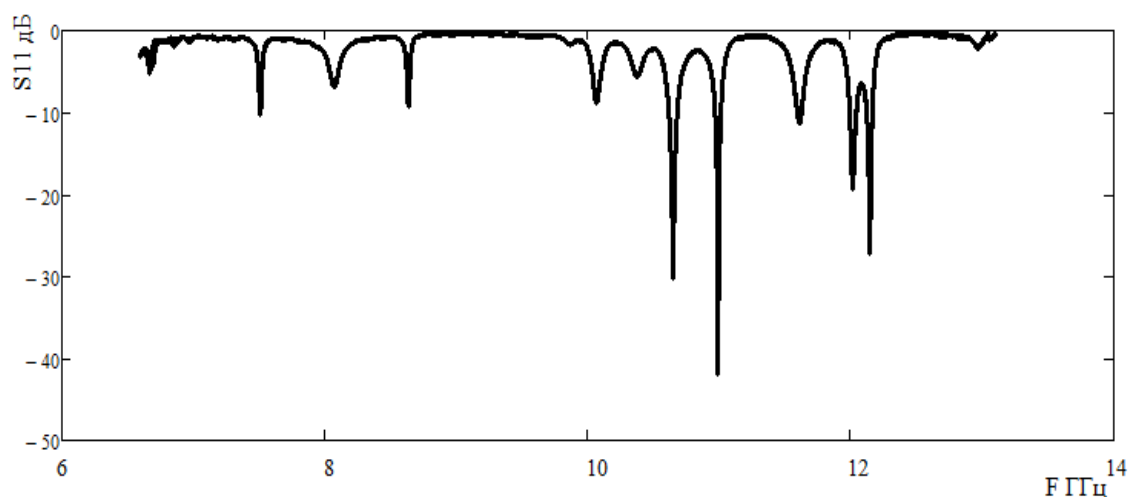


Рис. 4. АЧХ ближнеполевого зонда, нагруженного на поликоровую пластину с резистивным покрытием 198 Ом/□, с резонатором на основе частично отражающей поверхности на основе металлической решетки, выполненной из меди

Как следует из результатов измерений, нанесение на поликоровую пластину резистивного слоя изменяет величину коэффициента отражения на резонансных частотах.

При использовании металлической решетки, выполненной из меди, нанесение резистивного слоя сопротивлением 198 Ом/□ приводит к изменению коэффициента отражения в диапазоне от -52 дБ до -42 дБ. Уменьшение сопротивления резистивного слоя до 4 Ом/□ приводит к изменению коэффициента отражения в диапазоне от -42 дБ до -36 дБ.

При использовании металлической решетки, выполненной из никрома, нанесение резистивного слоя сопротивлением 198 Ом/□ приводит к изменению коэффициента отражения в диапазоне от -32 дБ до -19 дБ. Уменьшение сопротивления резистивного слоя до 4 Ом/□ приводит к изменению коэффициента отражения в диапазоне от -19 дБ до -12 дБ.

Анализ полученных данных показывает, что при создании частично отражающей поверхности на основе металлической решетки, выполненной из меди достигается более высокая чувствительность зонда ближнеполевого микроскопа с резонатором на основе частично отражающей поверхности к изменению сопротивления нанометровых резистивных слоев.

Таким образом, показана возможность создания зонда ближнеполевого микроскопа, чувствительного к изменению сопротивления нанометровых резистивных слоев, с резонатором на основе частично отражающей поверхности.

### **Заключение**

В ходе выполнения магистерской диссертации были получены следующие результаты:

1. Проведен анализ современного состояния исследований в области ближнеполевой СВЧ-микроскопии.
2. С использованием программы трехмерного электродинамического моделирования ANSYS HFSS создана модель зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе частично отражающей поверхности
3. С использованием программы трехмерного электродинамического моделирования ANSYS HFSS было проведено компьютерное моделирование



амплитудно-частотных характеристик микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе частично отражающей поверхности.

4. Проведен анализ АЧХ микрокоаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе частично отражающей поверхности при различных углах поворота металлической решетки и значениях диэлектрической подложки структуры. Определен оптимальный угол поворота, обеспечивающий максимальное значение коэффициента отражения по абсолютной величине.

5. На основе результатов компьютерного моделирования были изготовлены образцы частично отражающей поверхности на основе металлической решетки на диэлектрической подложке.

6. С использованием векторного анализатора цепей Agilent N5230A были измерены АЧХ ближнеполевого зонда с резонатором на основе частично отражающей поверхности на основе металлической решетки при угле поворота  $60^\circ$ .

7. С использованием ближнеполевого зонда с резонатором на основе частично отражающей поверхности в виде металлической решетки были измерены в бесконтактном режиме нанометровые резистивные слои, нанесенные на поликоровые подложки.

#### **Список использованных источников**

1. Усанов Д.А. Ближнеполевая сканирующая свч-микроскопия и области ее применения. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та. 2010. 100 с.
2. Anlage S.M. Steinhawer D.E., Feenstra B.J., Vlahacos C.P., Wellstood F.C. Near-Field Microwave Microscopy of Materials Properties// Microwave Superconductivity. Amsterdam: Kluver, 2001. P.239-269.
3. А.с. № 1450602 СССР. Устройство для измерения толщин / Усанов Д.А., Коротин Б.Н., Орлов В.Е. – Оpubл.07.08.88. – Бюл. №29.