

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

**ЗОНД ДЛЯ БЛИЖНЕПОЛЕВОГО СВЧ-МИКРОСКОПА НА ОСНОВЕ  
СТРУКТУР С ЗАПРЕЩЕННЫМИ ЗОНАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса

по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Алехина Владимира Сергеевича

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 2017

## **Введение**

СВЧ-методы измерения параметров полупроводниковых, диэлектрических и металлических нанослоев относятся к неразрушающим методам контроля. Однако главным недостатком СВЧ-методов является отсутствием локализованного поля. Так как длины волн в этих методах достигают миллиметры и даже сантиметры. Этот недостаток может быть решён с использованием эффектов ближнего поля.

Ближнеполевая СВЧ-микроскопия – это неразрушающий метод исследования. С использованием ближнего поля можно локализовать сканирующую область. Обычно ближнее поле достигается за счёт очень маленького диаметра зонда.

СВЧ-микроскопия обладает рядом преимуществ:

Актуальность работы заключается в том, что с помощью СВЧ-микроскопа можно определять не только геометрию поверхности объектов, но и параметры материалов под поверхностью, за счёт проникновения СВЧ-излучения в объём структуры. Это является основным достоинством СВЧ-микроскопа по сравнению с туннельным и атомно-силовым микроскопами.

В СВЧ-электронике для усиления отклика сигнала при измерениях с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа используются резонаторы, характеризующиеся высокой степенью добротности. Периодические структуры с запрещёнными зонами, на основе фотонных кристаллов связанных с зондом ближнеполевого микроскопа, могут использоваться как раз в качестве таких резонаторов. Можно сказать, что фотонный кристалл может использоваться как резонатор для микроскопа. Так же стоит отметить, что частотными характеристиками резонатора на основе фотонного кристалла можно управлять, изменяя структуру фотонного кристалла. Резонатор на основе фотонного кристалла обладает высокой селективностью, что делает его использование очень удобным для создания различных

электронных устройств. Ближнее поле обладает физическими свойствами сравнимыми с каплей жидкости, то есть, поле может проникать через непроводящий материал и сканировать поверхность под ним, что является очень полезным свойством для микроскопии.

Целью данной работы является исследование амплитудно-частотных характеристик коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонаторами в виде отрезка коаксиальной линии передачи и на основе структур с запрещенными зонами.

Для достижения этой цели:

- при помощи системы автоматизированного проектирования High Frequency Structural Simulator выполнено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа
- проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа

Выпускная квалификационная работа содержит 3 главы:

- 1) Анализ современного состояния исследований материалов в СВЧ-диапазоне с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа
- 2) Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа
- 3) Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа

## Амплитудно-частотные характеристики резонатора в виде отрезка коаксиальной линии передачи

В ходе компьютерного моделирования был построен зонд с резонатором в виде отрезка коаксиальной линии. В качестве диэлектрика для коаксиальной линии был выбран фторопласт с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1=2,1$ , толщиной 24 мм., с закруглением на конце. Из закругленного участка слоя выступает стальная игла, диаметров  $d=1$ мм. и длиной 9мм., которая является зондом для данной структуры. Однако при измерении резонансных свойств данная структура не обладает достаточно хорошей чувствительностью. Поэтому конструкция резонатора была изменена на трёхслойную структуру. Между двух слоёв фторопласта был помещён слой поликора, для увеличения резонансных свойств.

С помощью компьютерного моделирования было рассчитано АЧХ данной структуры. В область зонда помещались образцы с различной диэлектрической проницаемостью. Диэлектрическая проницаемость образца выбиралась из экспериментальных данных и высчитывалась при помощи формулы Бруггемана. С помощью компьютерного моделирования были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики резонатора в виде отрезка коаксиальной линии передачи, они представлены на рисунке 1.

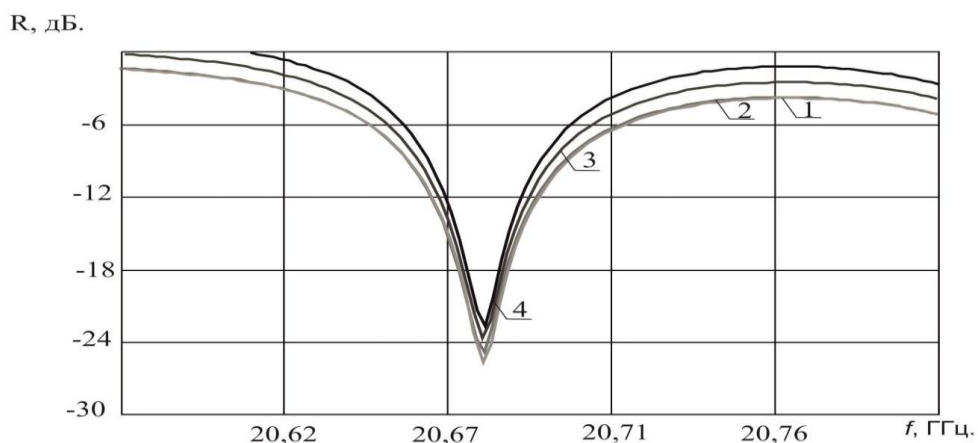


Рисунок 1. АЧХ резонатора в виде отрезка коаксиальной линии для различных образцов: 1-  $\epsilon=1,811$ , 2 –  $\epsilon=1,471$ , 3 –  $\epsilon=1,203$  , 4 –  $\epsilon=1,175$

При анализе графика, можно сказать, что отрезок коаксиальной линии обладает своими резонансными свойствами.

### **Амплитудно-частотные характеристики резонатора на основе структур с запрещенными зонами**

В ходе работы было построено несколько типов резонаторов для микроскопа. С использованием компьютерного моделирования при помощи программы Ansoft HFSS был предварительно проанализирован оптимальный вариант коаксиальной линии, в которой, вместо привычного диэлектрика выступал фотонный кристалл. Чётные слои данной периодической системы были выполнены из фторопласта ( $\epsilon=2,1$ ) толщина слоя 10 мм, а нечётные из поликора ( $\epsilon=9,7$ ) толщина слоя 2 мм. Материал внешнего металлического слоя был сделан из стали, из этого же материала была изготовлена внутренняя жила коаксиальной линии. Была рассчитана АЧХ зонда связанного с резонатором на основе периодической структуры с запрещенными зонами. На зонд помещался образец с различной диэлектрической проницаемостью, данная структура изображена на рисунке 2.

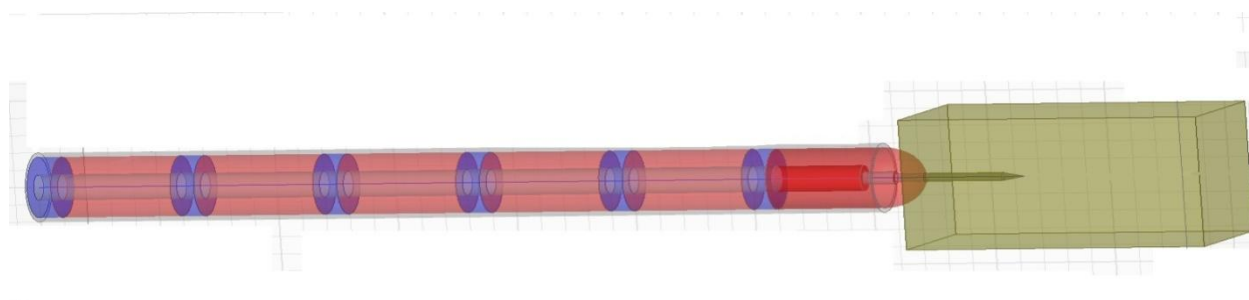


Рисунок 2. Модель зонда с резонатором на основе структуры периодической структуры с запрещёнными зонами.

Далее при помощи компьютерного моделирования было рассчитано АЧХ такой структуры, рисунок 3.

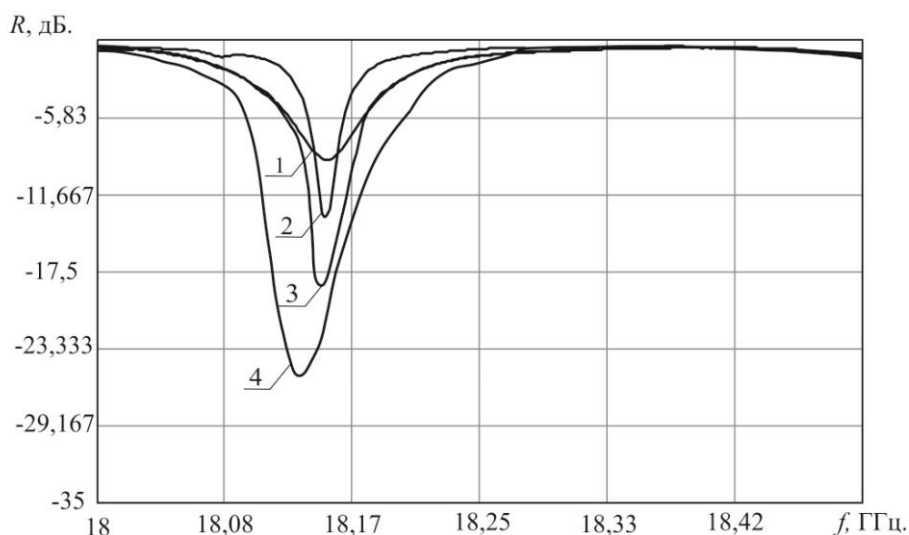


Рисунок 3 Амплитудно-частотные характеристики резонатора на основе структур с запрещенными зонами, при различных образцах: 1-  $\epsilon=1,175$ , 2 –  $\epsilon=1,203$ , 3 –  $\epsilon=1,47$ , 4 –  $\epsilon=1,81$

Если сравнить результаты компьютерного моделирования, то можно заметить, что изменение резонанса более заметное, чем в случае с резонатором в виде отрезка коаксиальной линии.

### **Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка коаксиальной линии передачи**

В ходе эксперимента был собран резонатор. Он представлял отрезок коаксиальной линии, в котором вместо диэлектрического слоя, был помещён лишь один слой фторопласта, толщиной 10 мм. Слой фторопласта был плотно прижат к фторопластовой втулке, в которой закреплён зонд, в виде стальной иглы. При измерении собственных резонансных свойств (без образца), он не обладал достаточно высокими резонансными свойствами, поэтому было принято решения поместить в область между фторопластовым слоем и фторопластовой втулкой слой поликора, толщиной 1 мм, тем самым

усилив его резонансные способности. Остальная же область коаксиала оставалась пустой, то есть заполненная воздушным слоем, длиной 222,5 мм.

С использованием данной структуры мы исследовали образец, который представляет из себя пористый материал, различного уровня влажности. Изначально образец подвергся сушке в специальном сушильном шкафу, после этого мы считаем его сухим, то есть можно, что поры композита заполнены только воздухом. Таким способом мы измеряли положение и амплитуду резонанса. В полученных данных замеряли изменение глубины резонанса, варьируя влажность образца. Полученный результат показан на рисунке 4.

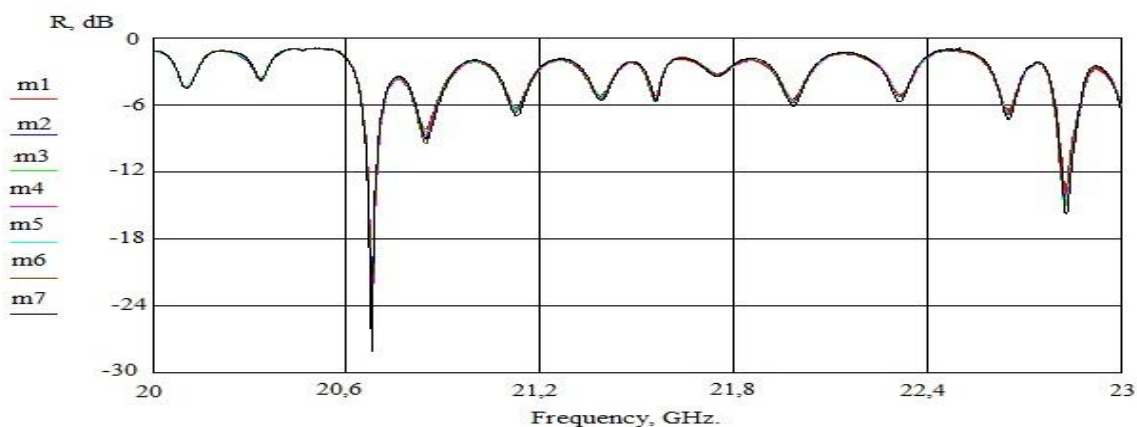


Рисунок 4. Спектральная характеристика образца в широком диапазоне частот, полученная зондом с длиной иглы 9мм., без использования фотонного кристалла, при различной влажности:  $m_1=0,1664$ ;  $m_2=0,1938$ ;  $m_3=0,2244$ ;  $m_4=0,2343$ ,  $m_5=0,2456$ ;  $m_6=0,2873$ ;  $m_7=0,3588$ .

### **Использование коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка коаксиальной линии передачи для измерения параметров материалов**

Изучение диэлектрических свойств гетерогенных систем является актуальной задачей для физики диэлектриков, геофизики, коллоидной физики, биофизики, технологии композитных материалов, гранулометрии и других областей науки и техники. Одной из основных задач этих

исследований является восстановление функциональной зависимости эффективной диэлектрической проницаемости системы  $\epsilon$  от диэлектрических параметров, геометрических размеров и концентрации отдельных компонентов. С использованием данной структуры можно провести такие исследования. Так же в современности стоит вопрос о измерении параметров материала с высокой точностью. Данная структура способна детектировать изменение диэлектрической проницаемости. Однако резонирующие способности отрезка коаксиальной линии во многих случаях являются недостаточными. При помещении образца в область ближнего поля, сосредоточенного около зонда, наблюдаются смещение резонанса, которое даёт возможность зафиксировать изменение влажности образца.

При анализе данного графика были выбраны наиболее чувствительные резонансные частоты. Для сравнения характеристик мы возьмём две частоты  $f_1=20,67$  ГГц, а вторая  $f_2=22,8$  ГГц.

На основе данной структуры было получена зависимость спектра отражения от объёмной доли, см. рисунок 5.

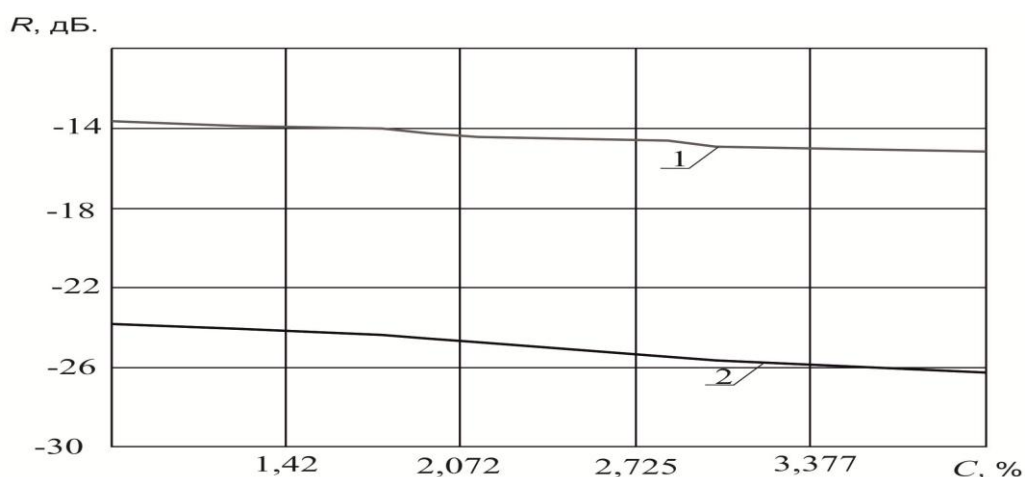


Рисунок 5 Зависимость спектра отражения от объёмной доли жидкости в образце при длине иглы 9 мм, без использования фотонного кристалла на разных резонансных частотах: 1 -  $f=20,67$  ГГц, 2 -  $f=22,8$  ГГц.



## **Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе структур с запрещенными зонами**

Сначала были замерены резонирующие свойства самого фотонного кристалла. Затем мы исследовали композитный материал. Изменяя влажность образца, можно было установить зависимость спектра отражения от объёмной доли жидкости в образце. Измерение объёмной доли проводилось косвенным методом, через замеры массы образца.

В эксперименте в качестве жидкости выступала не дистиллированная вода. Усредненная плотность которой равна  $\rho = 0,9982 \text{ гр/см}^3$ . За массу образца берём массу высушенного композитного материала,  $m_0 = 0,123$ . Объём сухого образца так же известен, образец представляет собой параллелепипед со сторонами  $2,5 \times 1,5 \times 1,5 \text{ см}$ , следовательно, объём равен

$$V_0 = 5,625 \text{ см}^3$$

С помощью компьютерного моделирования был построен коаксиальный зонд

Путём измерения был получен спектр отражения для различных объёмных долей, см. рисунок 13. На данном рисунке показан общий характер спектра, в широкой полосе частот, при изменении в нём влажности, длина зонда для этого случая будет равна 6 мм.

При длине иглы  $D = 9 \text{ мм}$  была получена спектральная характеристика отражения при различном уровне влажности образца.

Проанализировав АЧХ в широком диапазоне частот, можно выделить наиболее чувствительные участки спектра. Рассмотрим их в более узком частотном диапазоне, рисунок 6.

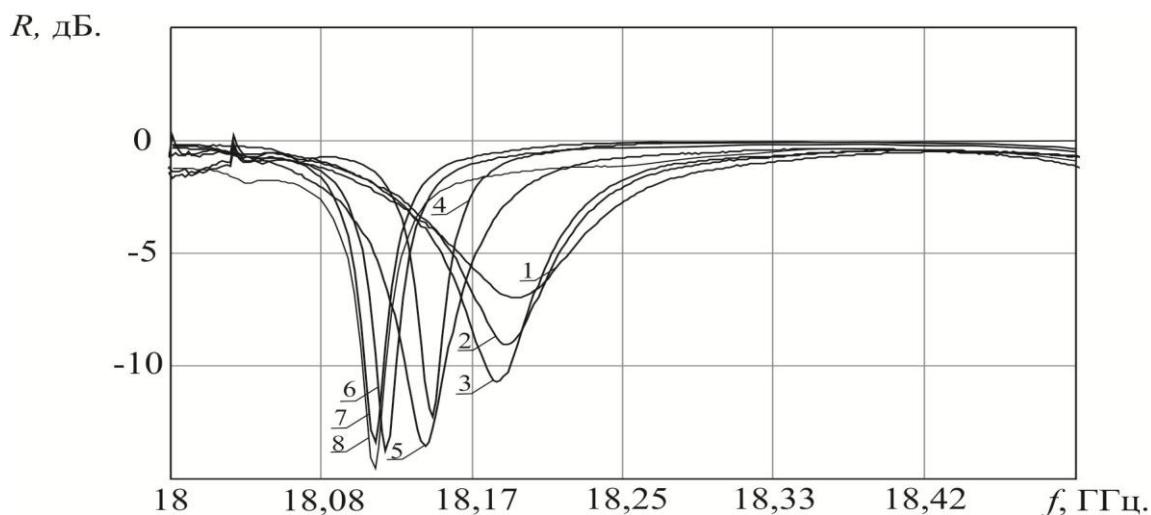


Рисунок 6. Спектральная характеристика образца с длиной иглы 9мм. в узком диапазоне частот, при различной влажности: 8 –  $m=0,3735$  гр.; 7 –  $m= 0,3733$  гр.; 6 –  $m=0,3636$  гр.; 5 –  $m= 0,3144$  гр.; 4 –  $m=0,274$ ; 3 –  $m= 0,2419$ ; 2 -  $m=0,2239$ ; 1 -  $m=0,1929$  гр.

В резонаторе с использованием периодической структуры наблюдается более сильное изменение амплитуда частотной характеристики (АЧХ) в отличии от резонатора в виде отрезка коаксиальной линии.

### **Использование коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе структур с запрещенными зонами для измерения параметров материалов**

Проанализировав полученную АЧХ, можно использовать данный зонд для измерения влажности композитного материала. Выбрав определённую резонансную частоту, можно зафиксировать изменение амплитуды, которое связано с изменением диэлектрической проницаемости образца. Изменяя влажность образца, мы можем получить зависимость спектра отражения от объёмной доли. Рисунок 7.

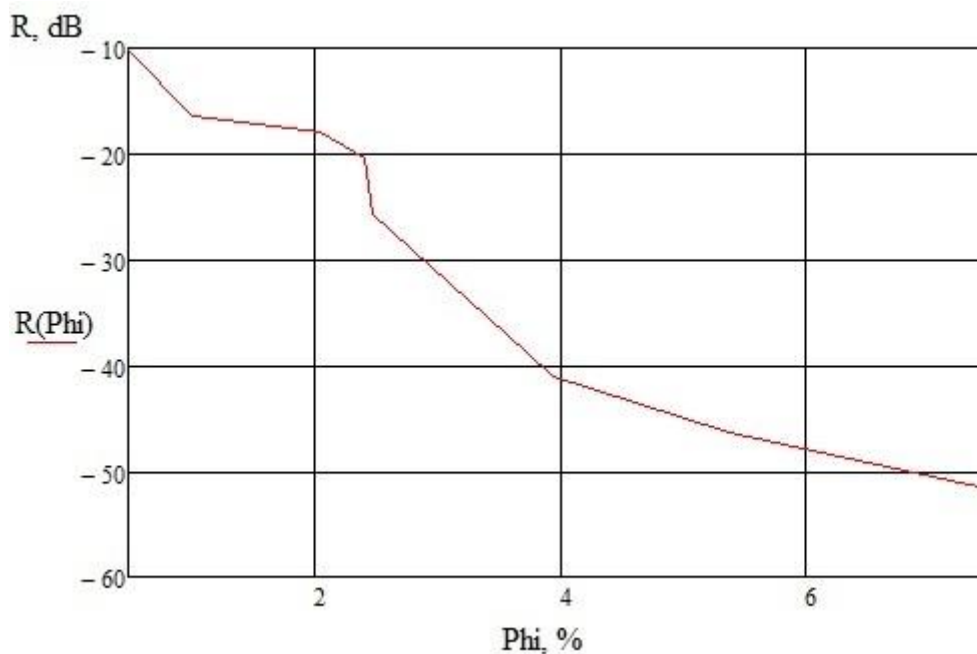


Рисунок 7 Зависимость спектра отражения от объёмной доли жидкости в образце при длине иглы 6 мм. Резонансный пик выбирался на частоте 15,6 ГГц.

Так же был проведён расчёт для более длинного зонда

Проанализировав каждый резонансный участок, наиболее чувствительными к изменению влажности оказались участки на 15,14 ГГц и на 18,56 ГГц.

Полученная зависимость представлена на рисунке 8.

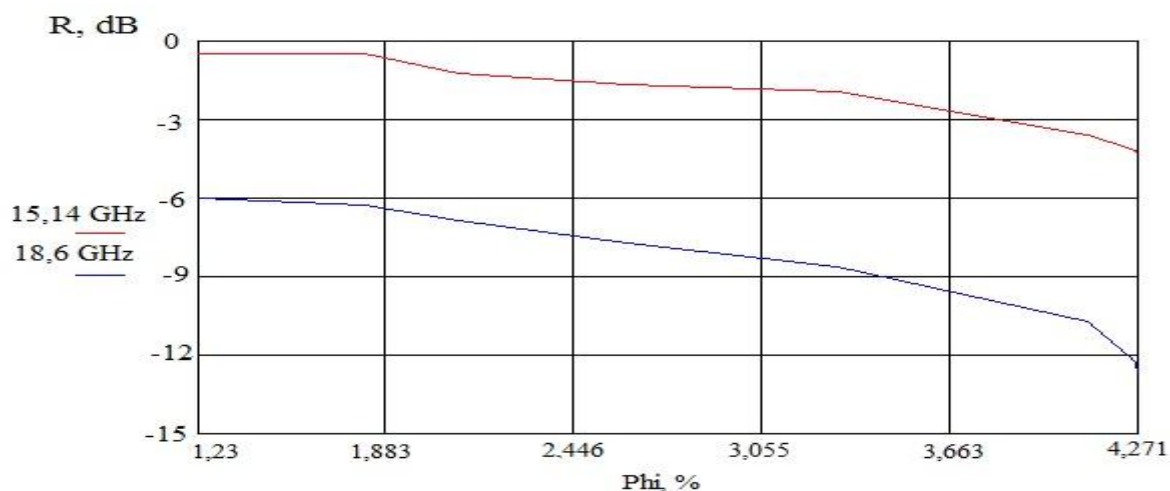


Рисунок 8. Зависимость спектра отражения от объёмной доли жидкости в образце при длине иглы 9 мм.

При сравнении рисунка 8 и рисунка 9, можно заметить, что изменение АЧХ, при длине зонда в 6 мм, намного больше, чем при длине 9 мм.

С помощью данной структуры можно также измерить объёмную долю растворов. В ходе работы была исследован раствор спирта 97% с дистиллированной водой. Были выбраны две наиболее чувствительные частоты, на этих частотах наблюдалось наиболее заметное изменение АЧХ. Полученная зависимость представлена на рисунке 9.

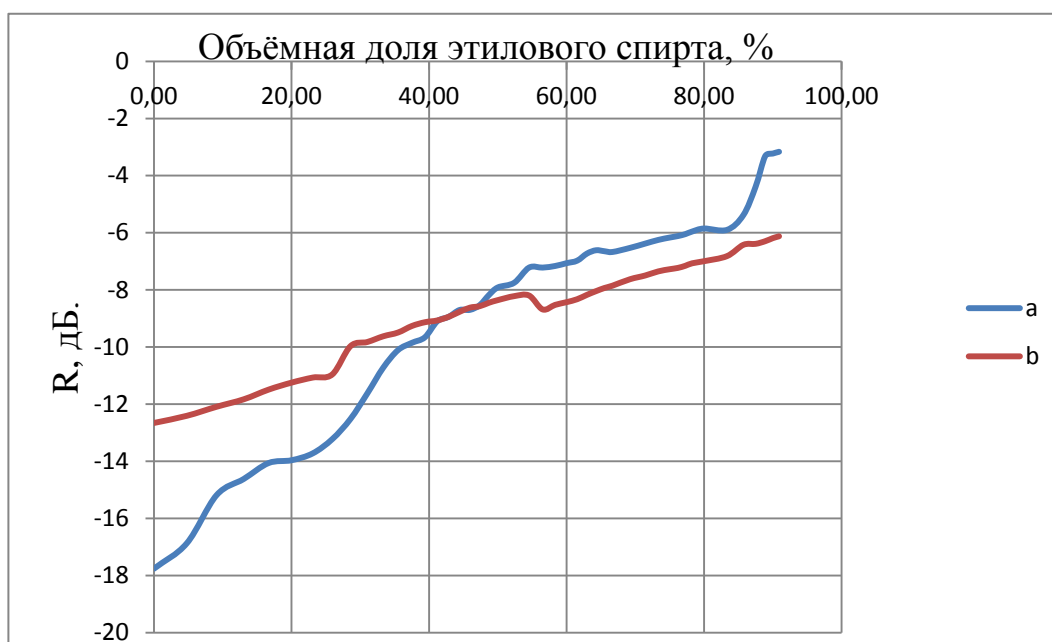


Рисунок 9 Зависимость глубины резонанса от объёмной доли этилового спирта на частотах: a –  $f = 9,57$  ГГц, b –  $f = 10,5$  ГГц.

На этих частотах можно увидеть характер зависимости, близкий к линейной зависимости. Однако отклонения от линейного характера обусловлены погрешностью эксперимента. Таких как испарения спирта при добавлении его в раствор, не равные шаги измерения концентрации и смещение положения зонда, относительно центра ёмкости с исследуемым раствором. Линейный характер зависимости позволяет создать прибор который мог бы детектировать содержание вещества в растворе.

В ходе эксперимента так же было проведено исследование различных жидкостей. Исследовалось три жидкости: вакуумное масло – 6, 97% - раствор

этилового спирта, дистиллированная вода. Объем жидкости в сосуде был приблизительно равен и составлял 40 мл. Полученные АЧХ представлены на рисунке 10.

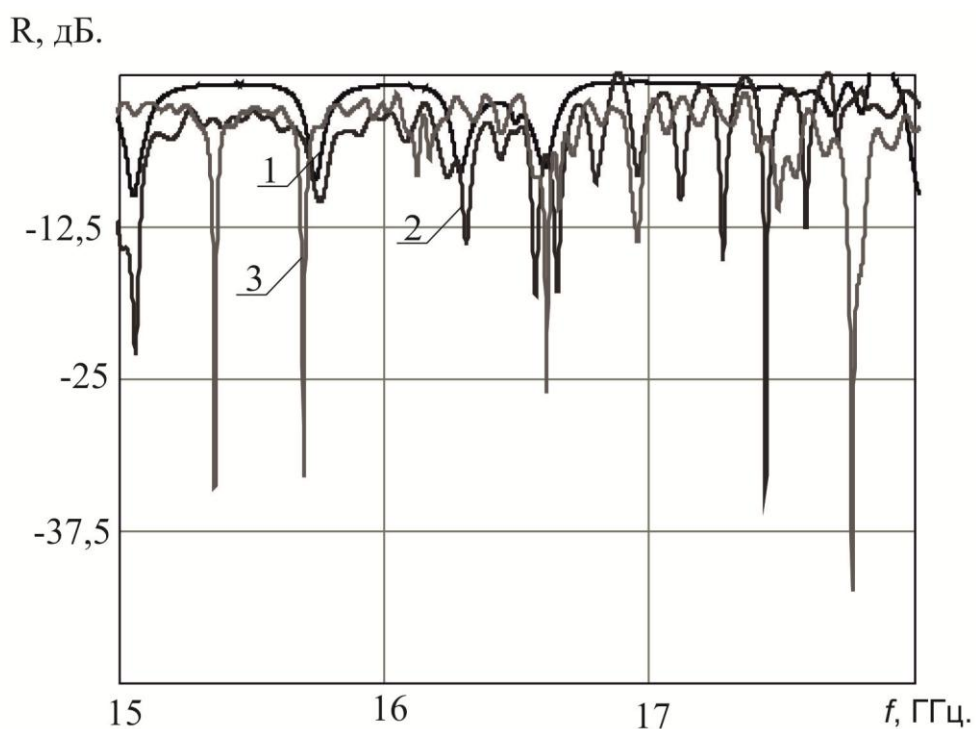


Рисунок 10 Результат измерения АЧХ сред, с использованием коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе структур с запрещенными зонами. 1- вакуумное масло, 2 – этиловый спирт, 3 – вода.

При анализе результатов, можно отметить хорошее совпадение теоретических данных с данными полученными в ходе эксперимента. Это доказывает актуальность и работоспособность таких структур в качестве резонаторов для ближнеполевых СВЧ-микроскопов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе выполнения бакалаврской работы были получены следующие результаты:

Проведен анализ современного состояния исследований материалов в СВЧ-диапазоне с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа.

Проведено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа резонатора в виде отрезка коаксиальной линии передачи.

Проведено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа резонатора в виде коаксиального фотонного кристалла.

Проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка коаксиальной линии передачи и в виде фотонного кристалла.

Предложена методика измерения влажности пористых материалов с использованием коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде отрезка коаксиальной линии передачи и в виде фотонного кристалла.

Показана возможность измерения с помощью коаксиального зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде коаксиального фотонного кристалла объёмных долей отдельных компонент растворов.

## Список использованных источников

- 1) А.Н.Резник, И.А.Шерешевский, Н.К.Вдовичева. Радиационные эффекты в ближнеполевой сверхвысокочастотной диагностике // РЭ. 2008. Т. 53, №6. С. 656-664.
- 2) В.Слюсар. Метаматериалы в антенной технике - Первая миля. Выпуск #3-4/2010 С. 55-57.
- 3) А. Ярив, П. Юх. Оптические волны в кристаллах. – Москва: Мир, 1987. – 616с.
- 4) В. Фуско. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1990. - 288 с.
- 5) Усанов Д. А., Горбатов С. С. Эффекты ближнего поля в электродинамических системах с неоднородностями и их использование в технике СВЧ. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2011. 392с.
- 6) Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К. Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках// Известия вузов. Электроника. 2007. №6. С. 25–32.
- 7) А.Н.Резник, И.А.Шерешевский, Н.К.Вдовичева. Радиационные эффекты в ближнеполевой сверхвысокочастотной диагностике // РЭ. 2008. Т. 53, №6. С. 656-664.
- 8) Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. 2004. Мир.
- 9) Anlage S. M., Steinhauer D. E., Feenstra B. J., Vlahacos C. P. and Wellstood F. C. “Near-field microwave microscopy of materials properties” in Microwave Superconductivity. Eds. H. Weinstock and M. Nisenoff. Amsterdam. The Netherlands: Kluwer, 2001. P. 239–269

- 10) Усанов Д. А., Горбатов С. С., Кваско В. Ю., А.В. Фадеев А.В., Калямин А.А. Пространственные осцилляции электрического поля и плотности заряда в кремниевом  $p-i-n$ -диоде. Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 21. С 104.
- 11) Усанов Д.А., Горбатов С.С., Кваско В.Ю // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2013. Т 21. № 5. С. 51–59
- 12) Д. А. Усанов, С. А. Никитов, А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев. Резонансные особенности в разрешённых и запрещённых зонах сверхвысокочастотного фотонного кристалла с нарушением периодичности. Радиотехника и электроника , 2013, том 58, № 11, с. 1071–1076
- 13) Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф. // Докл. АН. 2005. Т. 400. № 2. С. 181.
- 14) Гуняков В.А., Герасимов В.П., Мысливец С.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. № 21. С. 76.
- 15) Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В. и др. // Изв. вузов. Электроника. 2010. № 1. С. 24.
- 16) Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В. и др. // Изв. вузов. Электроника. 2006. № 6. С. 27.
- 17) Пахомов В. В., Усанов Д. А., Морозов В. А. и др. Расчет полупроводниковых преобразователей СВЧ-мощности проходного типа. - Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ, 1976, № 5, с. 83 – 89
- 18) Валитов Р. А., Сретенский В. Н. Радиоизмерения на сверхвысоких частотах. М., 1958.
- 19) Гуняков В.А., Мысливец С.А., Паршин А.М. и др. // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 10. С. 95.
- 20) Усанов Д.А. Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области ее применения. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2010.