

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФГБОУ ВО «САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

**ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЗОНДА БЛИЖНЕПОЛЕВОГО СВЧ-МИКРОСКОПА НА ОСНОВЕ
КОАКСИАЛЬНЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 201 группы

направление 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» факультета нано- и
биомедицинских технологий

Алехин Владимир Сергеевич

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

И. о. зав. кафедрой
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2019

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:

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.

В ходе работы сначала были исследованы частотные свойства коаксиальных фотонных кристаллов, а именно влияние различных дефектов на резонансную частоту. Это было необходимо для выбора подходящей конфигурации системы зонда и дальнейших экспериментальных исследований.

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 зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором в виде коаксиальной брэгговской структуры.

Компьютерное моделирование

Большинство СВЧ методов измерения параметров материалов и структур дают возможность получить результат измерений, усредненный по размеру, сравнимому с длиной волны излучения. При использовании таких методов пространственное разрешение изменения характеристик материалов ограничивается несколькими миллиметрами. Следствием такого усреднения является то, что на результат измерения существенно влияет изменение параметров в сравнительно малой части исследуемого объекта, а при измерении параметров одного из слоев сложных структур могут влиять параметры прилегающих слоев.

В ходе компьютерного моделирования был проведён расчёт модели коаксиального брэгговской структуры. Данный расчёт и моделирование были выполнены в программе Ansoft HFSS, которая позволяет получить спектр S-параметра.

В данной работе было построено несколько типов резонаторов для СВЧ-микроскопа. С использованием компьютерного моделирования при помощи программы Ansoft HFSS был предварительно проанализирован оптимальный вариант коаксиальной линии, в которой, вместо привычного диэлектрика использовалась брэгговская структура представляющая собой 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. 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 1.

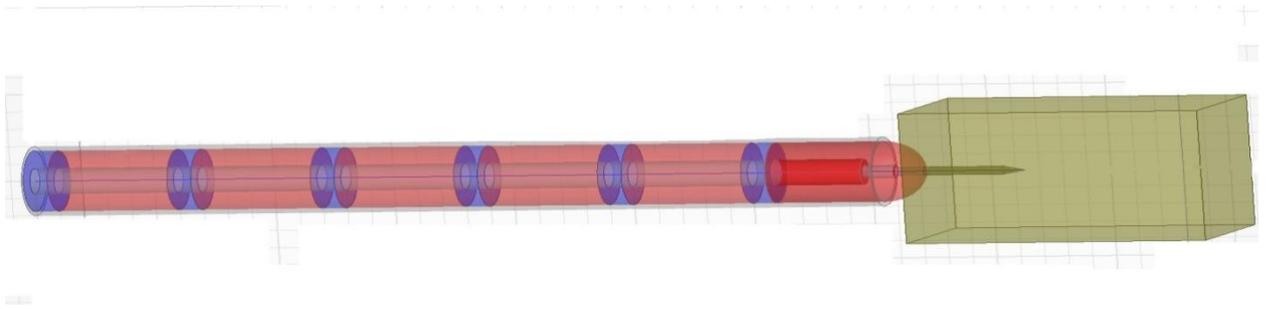


Рисунок 1 Модель зонда с резонатором на основе коаксиальной брэгговской структуры

Было проведено сравнение зонда с резонатором на основе брэгговской структуры и резонатора на основе отрезка коаксиальной линии.

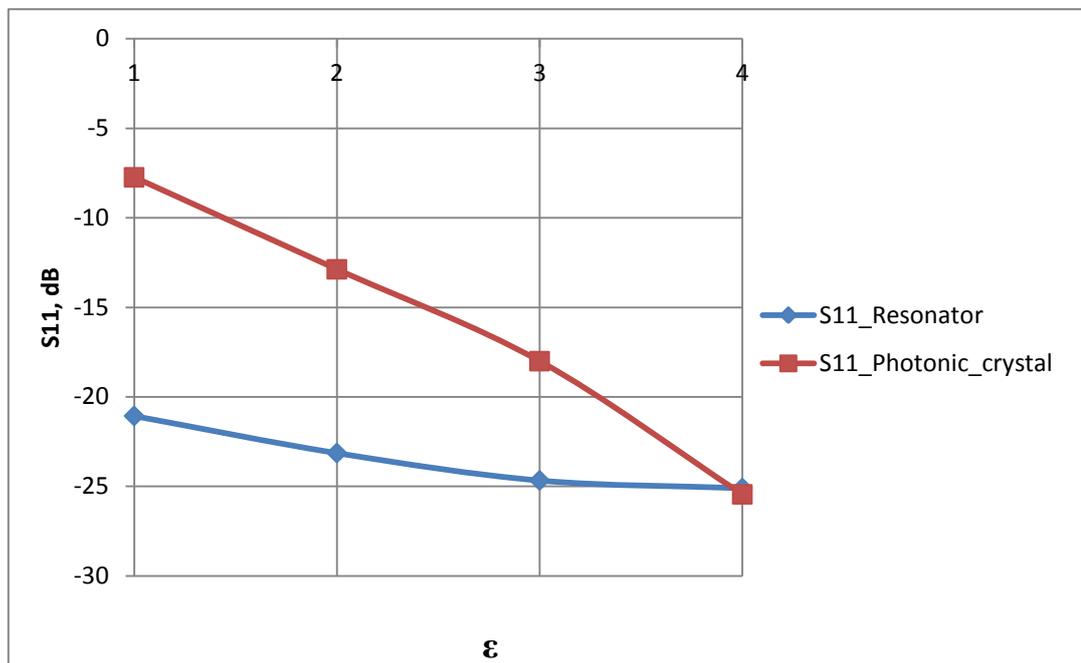


Рисунок 2 Зависимость глубины резонанса от величины диэлектрической проницаемости, в структуре отрезка коаксиальной линии и структуре и использование брэгговской структуры.

Если сравнить результаты компьютерного моделирования, то можно заметить, что изменение резонанса с использованием резонатора на основе ФК ($\Delta=17,7$ дБ), более заметное, чем в случае с резонатором в виде отрезка коаксиальной линии ($\Delta.=4$ дБ).

Так же с помощью компьютерного моделирования был построен ФК с одним, двумя и без нарушения периодичности и представлена их амплитудно-частотная характеристика (Рисунок 3).

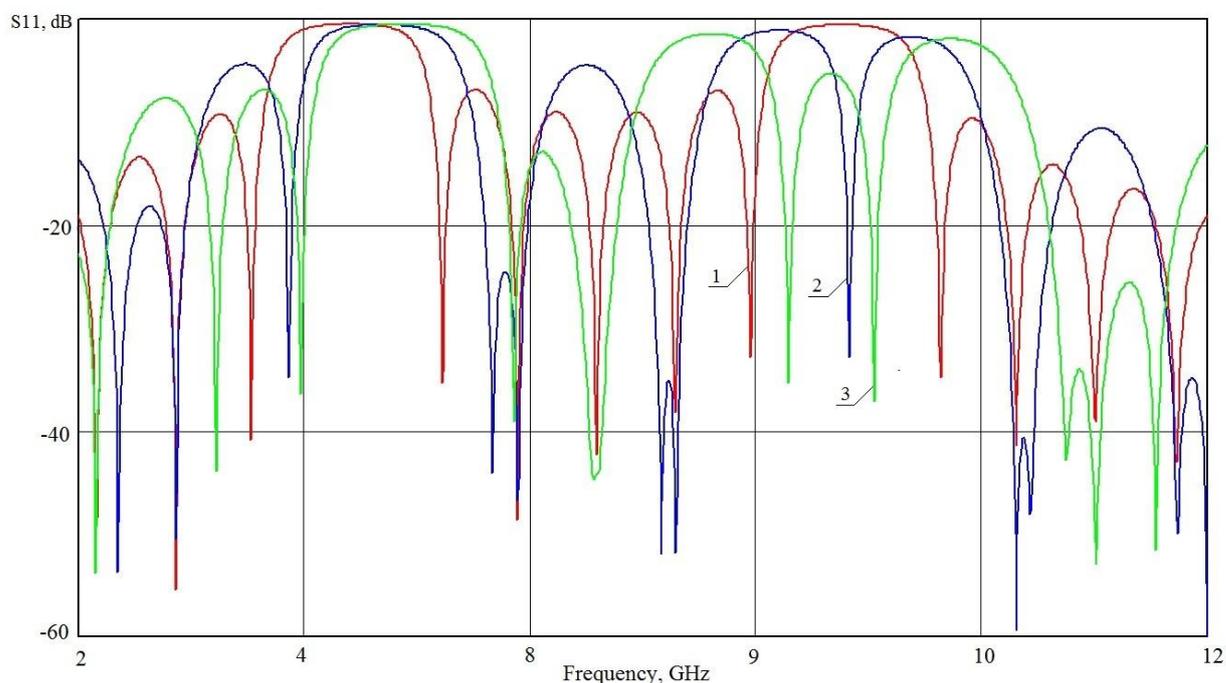


Рисунок 3 АЧХ коаксиальной брэгговской структуры (Фотонного кристалла): 1 – без нарушения; 2 – с одним нарушением; 3 - с двумя нарушением периодичности.

Из графика видно, структура зон ФК и при внесении в ФК нарушения в запрещенной зоне появляются разрешенные частоты (Для случая с одним дефектом - 8.83 ГГц; для двух дефектов - 8.29 ГГц и 9.05 ГГц). Так же можно сказать, что количество таких разрешённых частот соответствует количеству дефектов в ФК, такие частотные участки очень высокодобротные и могут обладать резонансными свойствами, в частотах соответствующих дефектам наблюдается резкое падения до 38 дБ, это демонстрирует возможную чувствительность такой резонансной системы.

Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик

В ходе эксперимента так же был исследован ФК состоящий из слоёв фторопласта и материала FLAN ($\epsilon = 8,8$), толщина фторопласта 8 мм и

толщина FLAN2 мм. В этой части эксперимента так же использовалась разборная коаксиальная линия. В данном случае один из концов коаксиальной линии открытый. Открытый конец коаксиальной линии может быть использован в качестве зонда, так как он обладает достаточной чувствительностью. ФК представляющий собой брэгговскую структуру собран таким образом, чтобы нечётный слой (закрывающий) состоял из фторопласта, так как один конец линии открытый, то при использовании слоя с маленькой толщиной (FLAN - 2мм) ФК недостаточно зафиксирован, что может привести к нарушению целостности ФК, поэтому последний слой состоит из слоя фторопласта толщиной 8мм. Этот слой будет удерживать структуру за счёт силы трения.

При помощи такого зонда с резонатором на основе ФК можно измерить толщины тонких металлических пленок. В ходе опыта были взяты 6 образцов, с различными толщинами и следовательно различным поверхностным сопротивлением. Так же как и в случае с резонатором фторопласт-воздух-фторопласт центральный проводник коаксиальной линии плотно прижимался к поверхности образца. Полученные результаты представлены на рисунке 4.

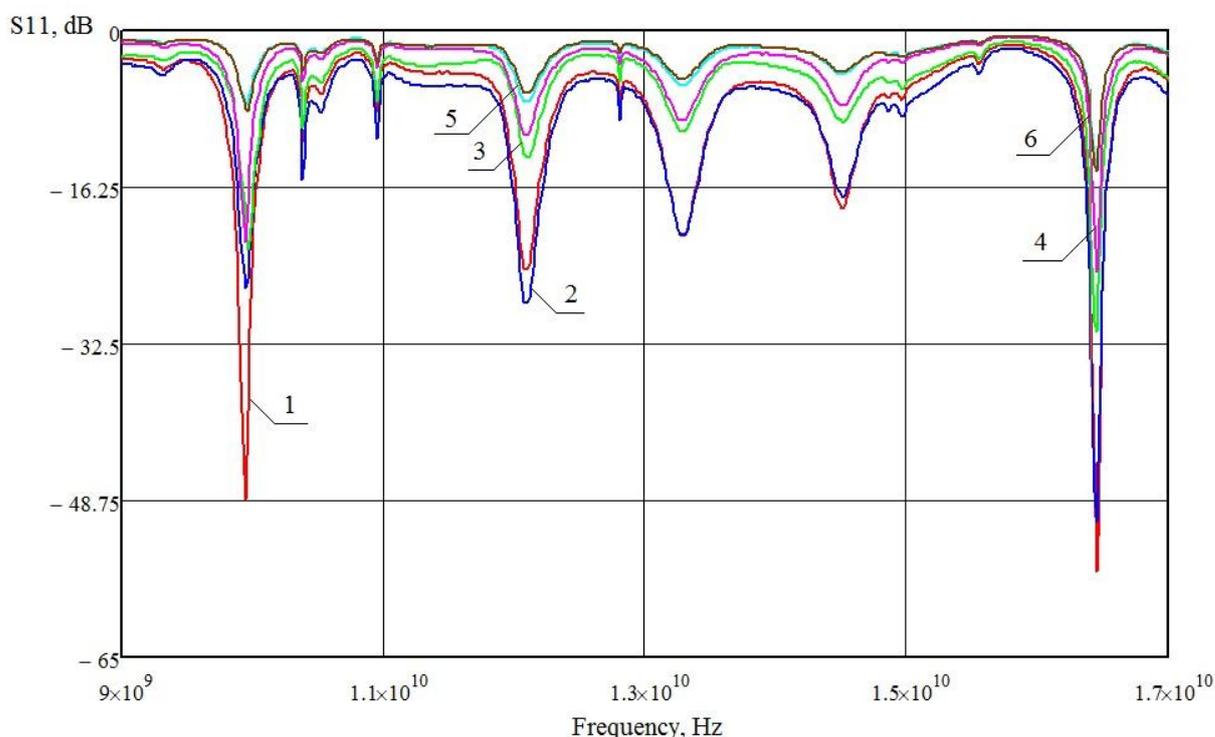


Рисунок 4 Изменение АЧХ резонатора с использованием ФК при различных толщинах металлических пленок с различными поверхностными сопротивлениями (1 – $\rho = 1,1 \text{ Ом/}\square$; 2 – $\rho = 1,2 \text{ Ом/}\square$; 3 – $\rho = 2,1 \text{ Ом/}\square$; 4 – $\rho = 2,2 \text{ Ом/}\square$; 5 – $\rho = 3,1 \text{ Ом/}\square$; 6 – $\rho = 3,2 \text{ Ом/}\square$)

Проанализировав АЧХ можно выбрать наиболее чувствительный резонанс, в данном случае будем рассматривать резонанс на частоте 16,45 GHz, и можно построить зависимость:

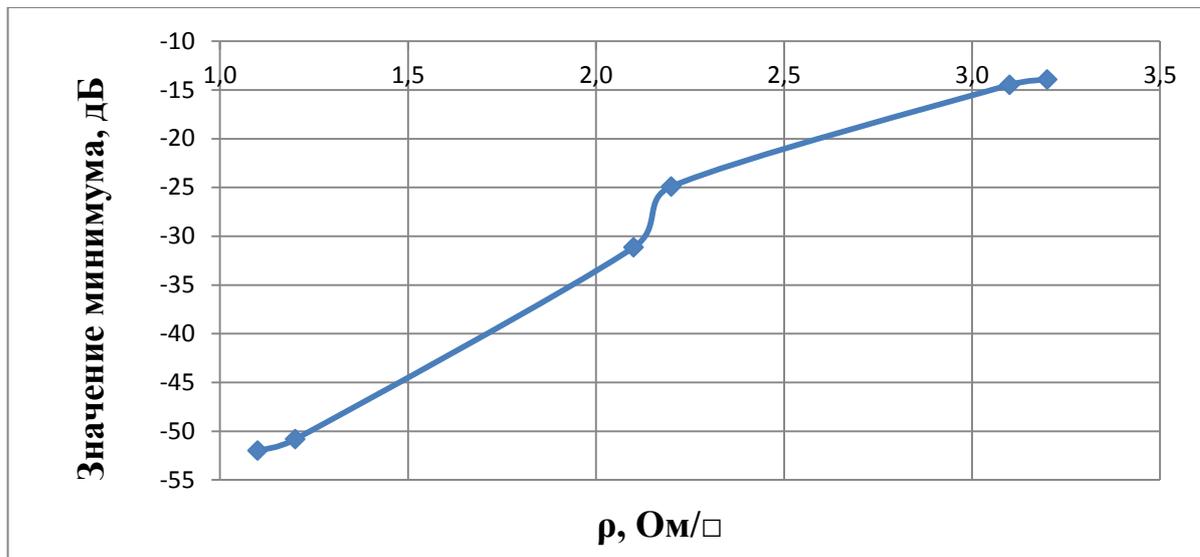


Рисунок 5 Зависимость глубины резонанса от толщины металлической плёнки на частоте 16,45 ГГц.

С использованием резонатора на основе периодической структуры был достигнут существенный перепад ($\Delta=39,06$ дБ), так же стоит отметить, что резонанс более стабильный по частоте, все резонансы лежат на одной частоте.

Аналогичным образом можно измерить материалы с различной ϵ . Были взяты прямоугольные пластины толщиной 2 мм, с различными значениями диэлектрической проницаемости. И была исследована спектральная характеристика резонатора на основе периодической структуры. (Рисунок 6)

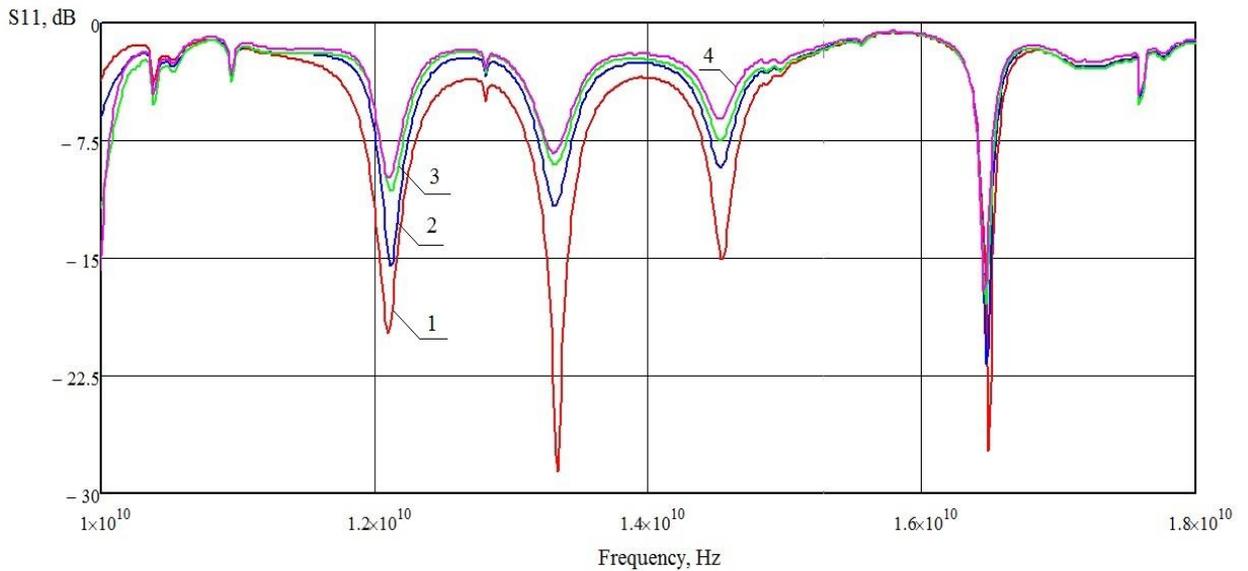


Рисунок 6 Изменение АЧХ резонатора на основе периодической структуры в зависимости от диэлектрической проницаемости (1 – $\epsilon=2,1$; 2 – $\epsilon=5$; 3 – $\epsilon=8,8$; 4 – $\epsilon=9,8$.)

С помощью полученных данных можно построить зависимость глубины резонанса от величины диэлектрической проницаемости на частоте 16,45 ГГц.

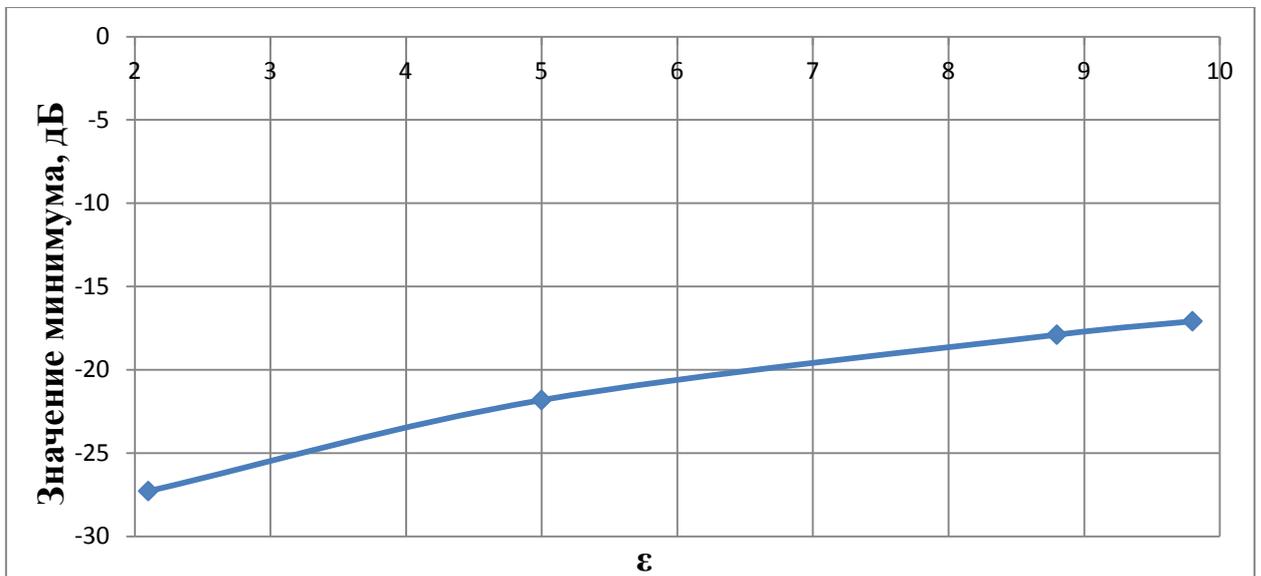


Рисунок 7 Зависимость значения минимума от диэлектрической проницаемости с использованием резонатора на основе коаксиальной брэгговской структуры

При сравнении полученных результатов без использования периодической структуры и с использованием ФК, можно сказать, что при использовании ФК сдвиг резонанса по частотам менее заметен, что может дать возможность для работы на фиксированной частоте. Отличие по перепадам глубин резонансов практически не отличаются в случаи с использованием ФК и без

его использования. Можно сказать, что данная структура может детектировать отличие диэлектрической проницаемости.

Так же с помощью данной структуры была исследована зависимость глубины резонанса от концентрации спирта в дистиллированной воде.

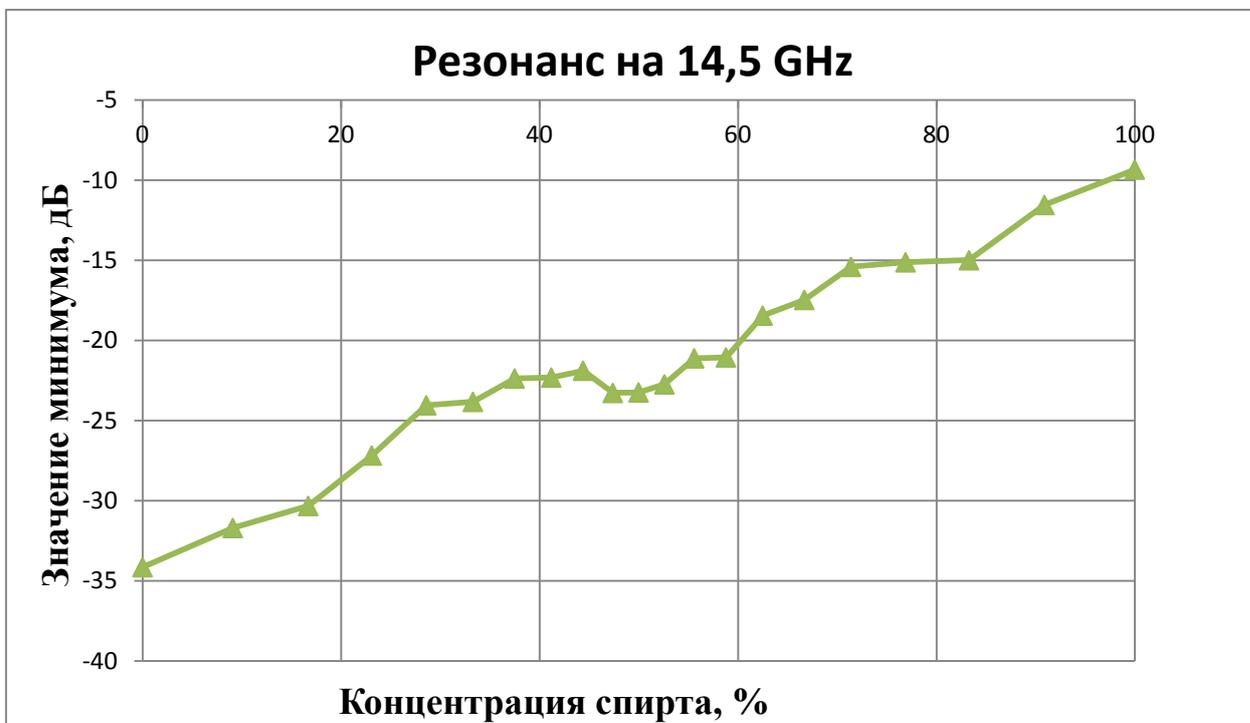


Рисунок 8 Зависимость глубины резонанса от концентрации спирта

Можно заметить хорошую линейную зависимость глубины резонанса от концентрации спирта (изменение диэлектрической проницаемости). В сравнение с аналогичным измерением без использования ФК перепад при использовании периодической структуры меньше, но всё равно достаточно существенный ($\Delta=25$ дБ), что позволяет использовать данную структуру для измерения концентрации растворов.

Заключение

- 1) В ходе магистерской работы был использован новый метод исследования характеристик материала с помощью зонда с резонатором на основе коаксиальной брэгговской структуры. Были показаны способы использования зондов с резонатором на основе периодической структуры.
- 2) Исследована зависимость амплитудно-частотных характеристик от изменения диэлектрической проницаемости образца и показана возможность измерения влажности материалов СВЧ методом.
- 3) Была исследована зависимость амплитудно-частотной характеристики от толщины плёнок на подложке, в ходе работы была установлено, что с ростом толщины плёнки величина резонанса на частоте 16,45 ГГц монотонно убывает.
- 4) Было проведено сравнение характеристик зондов с различными резонаторами, резонаторы на основе коаксиальных брэгговских структур, являются более стабильными по частоте и дают возможность работать на одной частоте резонанса.
- 5) Установлена монотонность зависимости значения S_{11} в резонансе от значения диэлектрической проницаемости, при этом характер этой зависимости близок к линейной зависимости. Получен перепад в 11 дБ. между материалами с диэлектрической проницаемостью 2,1 и 9,8.