

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.  
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»  
(СГУ)

Кафедра физики твердого тела

**РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОДНЫХ БРЭГГОВСКИХ  
СТРУКТУР В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ С ИЗМЕНЯЕМОЙ СТРУКТУРОЙ  
ОБЪЕМНОГО НАРУШЕНИЯ  
АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студентки 2 курса 2252 группы  
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»  
института физики

Селивановой Ангелины Денисовны



Научный руководитель:

профессор, д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

Зав. кафедрой физики твердого  
тела:

профессор, д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

  
подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

  
подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2025

## ВВЕДЕНИЕ

Фотонные кристаллы (ФК) представляют собой периодические структуры, обладающие способностью управлять распространением электромагнитных волн за счет формирования фотонных запрещенных зон (ФЗЗ). Особое внимание в последние годы уделяется СВЧ-фотонным кристаллам, реализуемым в волноводах, благодаря их высокой технологической доступности и перспективности для использования в телекоммуникационных, радиолокационных и сенсорных системах [1].

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания адаптивных фильтров и резонаторов, чьи характеристики можно настраивать без физической замены элементов. Особый интерес вызывает изучение влияния нарушений периодичности, в том числе подвижных объемных дефектов, на резонансные характеристики СВЧ ФК. Исследование таких структур дает возможность проектировать перестраиваемые СВЧ-фильтры нового типа с регулируемыми спектральными свойствами [2].

**Целью** работы является исследование влияния структуры объемного дефекта на резонансные характеристики волноводного фотонного кристалла в СВЧ-диапазоне. Для достижения данной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести анализ современного состояния исследований в области фотонных кристаллов и методов их численного моделирования;
2. Разработать математическую модель фотонной структуры с перемещаемым объемным дефектом, реализовать ее в Mathcad и выполнить численное моделирование;
3. Провести экспериментальные измерения коэффициентов отражения и передачи в диапазоне 7-13 ГГц при различных положениях дефекта;
4. Сопоставить результаты моделирования с экспериментальными данными и проанализировать влияние положения дефекта на резонансные характеристики структуры.

В качестве объекта исследования рассматривается волноводный фотонный кристалл, собранный из чередующихся слоев поликора ( $\epsilon = 9.6$ ,  $d = 1$  мм) и фторопласта ( $\epsilon = 2.1$ ,  $d = 9$  мм), размещенный внутри прямоугольного волновода. В центральный воздушный слой вводится локальное нарушение — радиопоглощающее эластомерное нарушение с комплексной диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon = 13.12 - 0.65i$ ,  $d = 1.17$  мм). Его перемещение вдоль оси структуры позволяет отслеживать изменение положения резонансной моды.

Работа состоит из четырех глав. В первой главе выполнен обзор фотонных кристаллов: представлены их физические свойства, классификация, принципы формирования запрещенных зон и применение дефектов. Во второй главе изложена теоретическая модель на основе метода матрицы передачи, приведены формулы и расчеты. Третья глава посвящена экспериментальному исследованию, в четвертой главе проводится сравнение теоретических и практических данных.

Научная новизна работы заключается в экспериментальном и теоретическом исследовании структуры с двойным нарушением периодичности — сочетанием воздушного зазора и перемещаемого эластомера, — ранее не описанной в опубликованной научной литературе. Впервые рассмотрена возможность спектральной перестройки резонансной моды за счет перемещения объемного дефекта по воздушному промежутку в ФК без изменения общей геометрии структуры.

Научная значимость работы связана с возможностью практического применения полученных результатов при проектировании перестраиваемых СВЧ-фильтров и сенсорных элементов, чувствительных к положению дефекта. Показана применимость метода матрицы передачи для моделирования сложных многослойных структур с перемещаемыми включениями.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** представлен обзор физической природы фотонных кристаллов и их применения в СВЧ-диапазоне. Рассмотрено понятие фотонной запрещенной зоны, возникающей в результате периодического чередования слоев с различной диэлектрической проницаемостью [3]. Описаны принципы формирования отражательных и передающих зон на основе брэгговского отражения, а также аналогии с зонной теорией в твердом теле [4].

Приведена классификация фотонных кристаллов по размерности (1D, 2D, 3D) и рассмотрены особенности одномерных структур, реализуемых в волноводах [5]. Одномерные ФК обладают высокой отражающей способностью при относительно простой конструкции, что делает их удобными для использования в качестве фильтров, резонаторов и сенсорных элементов в СВЧ-технике [6].

Рассмотрены основные свойства одномерных ФК, в том числе зависимость ширины запрещенной зоны от диэлектрического контраста и количества слоев [7]. Особое внимание уделено эффекту введения локального нарушения периодичности, которое вызывает появление узкой резонансной моды в пределах фотонной запрещенной зоны [8].

В завершение главы приведен обзор материалов, применяемых при построении фотонных кристаллов [9]. Обоснован выбор поликоралли фторопласта на основе их электрофизических свойств.

Во **второй главе** для теоретического исследования резонансных характеристик одномерного фотонного кристалла с объемным дефектом в СВЧ-диапазоне был использован метод матрицы передачи. В качестве среды моделирования была выбрана программа Mathcad 15. Дополнительно для анализа и представления результатов использовался язык программирования Python.

Матрица передачи для  $j$ -го слоя с толщиной  $d_j$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_j$  задается в виде [10]:

$$T(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp((\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}) & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp((\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}) \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp(-(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}) & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} \exp(-(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Для всей структуры, состоящей из  $N$  слоев, общая матрица передачи  $T_N$  формируется как произведение матриц отдельных слоев. Учитывая последовательное расположение слоев от  $j = 0$  до  $j = N$ , общая матрица выражается как:

$$T_N = \prod_{j=N}^0 T_{j,j+1} = T(z_{N-1,N}) \cdot T(z_{N-2,N-1}) \cdot \dots \cdot T(z_{1,2}) \cdot T(z_{0,1}). \quad (2)$$

Для расчета коэффициентов отражения и пропускания используются элементы общей матрицы  $T_N$  с учетом граничных условий на входе и выходе. Коэффициенты отражения  $S_{11}$  и пропускания  $S_{21}$  определяются как:

$$S_{11} = -\frac{T_N[2,1]}{T_N[2,2]},$$

$$S_{21} = \frac{T_N[1,1]T_N[2,2] - T_N[1,2]T_N[2,1]}{T_N[2,2]}, \quad (3)$$

Для точного расчета коэффициентов учитываются граничные условия, зависящие от волнового сопротивления среды и поперечных волновых чисел. В случае волноводно-неоднородной структуры поперечные волновые числа определяют поведение поля в разных областях структуры, включая области с дефектами и для каждого слоя определяются с учетом геометрии волновода и электродинамических свойств материала следующим образом:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0}, \quad (3)$$

$$\gamma_d = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_d \epsilon_0 \mu_0}, \quad (4)$$

$$\gamma_m = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_m \epsilon_0 \mu_0},$$

Для обеспечения эффективного формирования резонансной моды при симметричном расположении дефекта, ширина центрального зазора подбиралась так, чтобы в его пределах укладывались две полуволны распределения поля. В результате оптимальная ширина промежутка между 5-м и 9-м слоями поликора была выбрана равной  $L = 42$  мм.

Исходная структура состояла из 11 слоев, чередующихся по толщине и материалу: нечетные слои толщиной 1 мм выполнены из поликора ( $\epsilon = 9.6$ ), четные – из фторопласта толщиной 9 мм ( $\epsilon = 2.1$ ). Центральный (6-й) слой фторопласта был заменен на воздушный зазор, в который помещался поглощающий эластомер с размерами  $23 \times 10 \times 1.17$  мм и комплексной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 13.12 - 0.65i$ . В результате структура трансформировалась в 13-слойную: 6-й и 8-й слои соответствовали воздуху, а центральный 7-й слой – эластомеру.

В результате выполнения компьютерного моделирования сформированы зависимости частоты и амплитуды основного резонанса от положения эластомерного дефекта, представленные на рисунках 1 и 2. Из графиков видно, что частота резонансной моды изменяется плавно и симметрично относительно центра структуры ( $L = 20.5$  мм), что подтверждает наличие зеркальной симметрии распределения поля. Минимальная частота достигается при симметричных относительно центра положениях 8 мм и 33 мм, а максимальная – при центральном расположении и положениях эластомера у краев зазора.

В отличие от частоты, зависимость амплитуды резонансного пика имеет сложный, нерегулярный характер. В некоторых положениях (например,  $L = 6$  мм и  $L = 20.5$  мм) наблюдается значительное увеличение амплитуды (до -38 дБ и -30 дБ соответственно), тогда как в других – ее падение вплоть до -0.8 дБ. Такая флуктуация может быть связана с распределением поля внутри зазора: в ряде положений эластомер оказывается в области максимума поля, усиливая поглощение, в других – вблизи узла, слабо влияя на АЧХ.

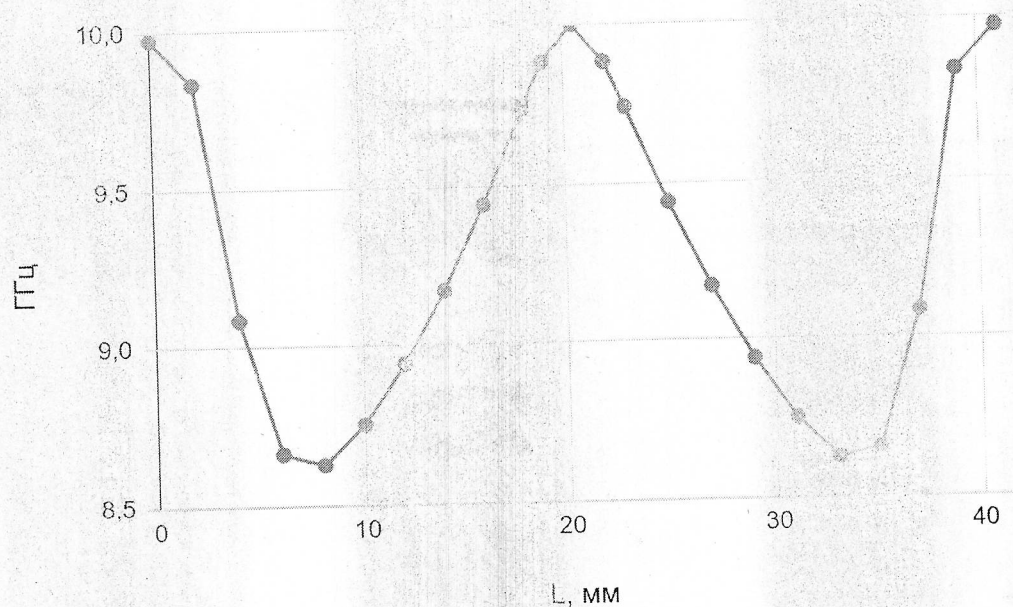


Рисунок 1 – Зависимость резонансной частоты от положения дефекта

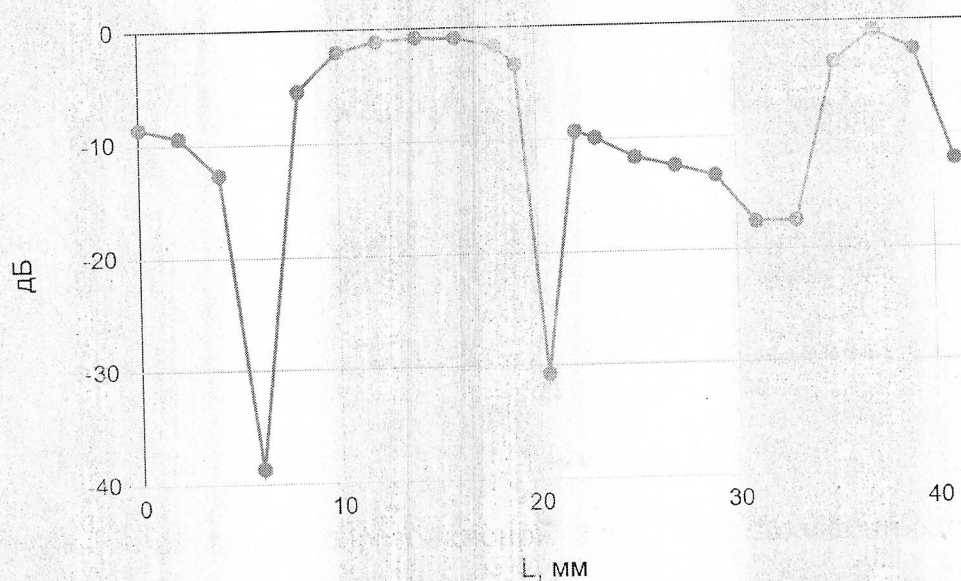


Рисунок 2 – Зависимость амплитуды резонанса от положения дефекта

В третьей главе описано экспериментальное исследование, проведенное с целью подтверждения результатов численного моделирования и анализа резонансных характеристик волноводного фотонного кристалла с объемным дефектом. Испытания выполнялись в диапазоне частот от 7 до 13 ГГц с использованием прямоугольного волновода и векторного анализатора цепей. Полученные данные позволили оценить влияние положения объемного дефекта на амплитудно-частотные характеристики структуры на практике.

Измерения коэффициентов отражения ( $S_{11}$ ) и пропускания ( $S_{21}$ ) выполнялись отдельно для каждого положения эластомера. Структура собиралась внутри латунного волновода, а положение эластомера изменялось вручную с помощью микрометра. Полученные данные сохранялись в формате и визуализировались в среде Python для построения АЧХ.

Для обобщения полученных данных были построены зависимости резонансной частоты и амплитуды от положения эластомерного дефекта (рисунки 3 и 4 соответственно). Частотная зависимость имеет симметричную форму относительно центрального положения ( $L = 20.5$  мм), при этом частота изменяется от 8.3 до 10.1 ГГц. Это подтверждает наблюдаемую в моделировании зеркальную симметрию поля внутри структуры.

Зависимость амплитуды резонансного пика от положения дефекта, напротив, носит нерегулярный, флуктуирующий характер. Амплитуда резко падает в отдельных точках (например, при  $L = 4$  мм и 35 мм), достигая значений ниже -40 дБ, тогда как в других положениях (например, при  $L = 14$  мм) наблюдаются выраженные минимумы ослабления (до -0.19 дБ). Такая картина обусловлена сложным распределением поля внутри структуры, а также взаимодействием мод и поглощением в объемном дефекте.

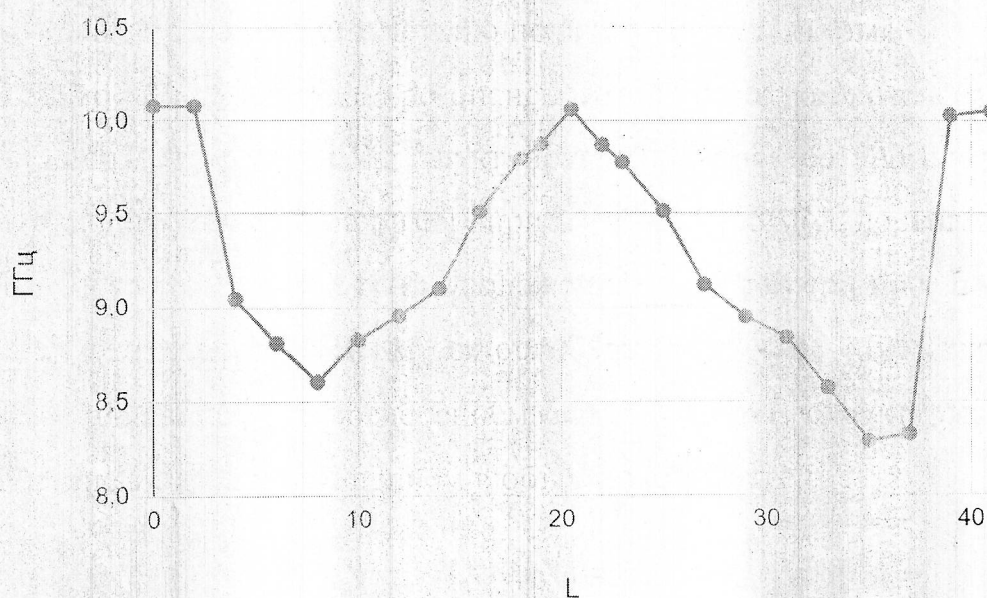


Рисунок 3 – Зависимость резонансной частоты от положения дефекта

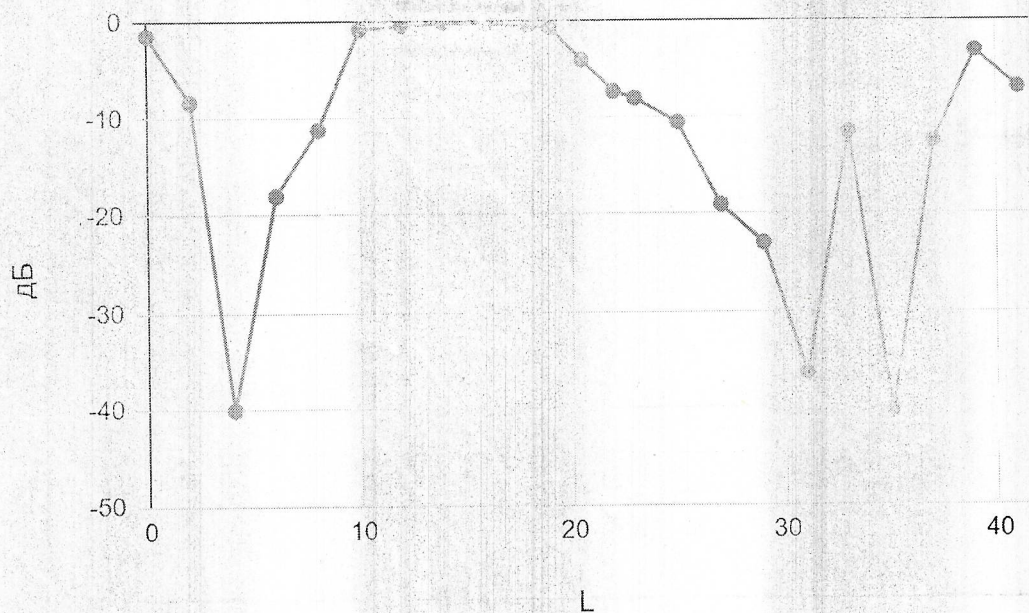


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды резонанса от положения дефекта

В четвертой главе для оценки корректности численного моделирования и выявления расхождений между теорией и практикой были сопоставлены амплитудно-частотные характеристики и зависимости резонансных параметров, полученные в ходе эксперимента и моделирования. Сравнение проводилось по значениям коэффициентов отражения ( $R = S_{11}$ ) и пропускания ( $T = S_{21}$ ), представленных на одних графиках для каждой конфигурации.

На рисунке 5 представлена сравнительная зависимость резонансной частоты от положения дефекта, а на рисунке 6 – соответствующая зависимость амплитуды. На первом графике наблюдается хорошее согласование формы кривых: и в эксперименте, и в модели частота изменяется симметрично относительно центрального положения, достигая максимальных значений при смещении дефекта к краям и в центре структуры.

На втором графике поведение амплитуды в обоих случаях носит нелинейный и неустойчивый характер. В обеих кривых присутствуют резкие перепады, максимумы и провалы, не образующие четкой зависимости. Такое поведение может быть обусловлено сложной интерференцией внутри структуры, чувствительностью мод к конкретной конфигурации поля, а также влиянием экспериментальных факторов, включая механические отклонения и

поглощение в дефекте. Несмотря на расхождения, общая картина подтверждает высокую чувствительность амплитудных характеристик к положению дефектного слоя.

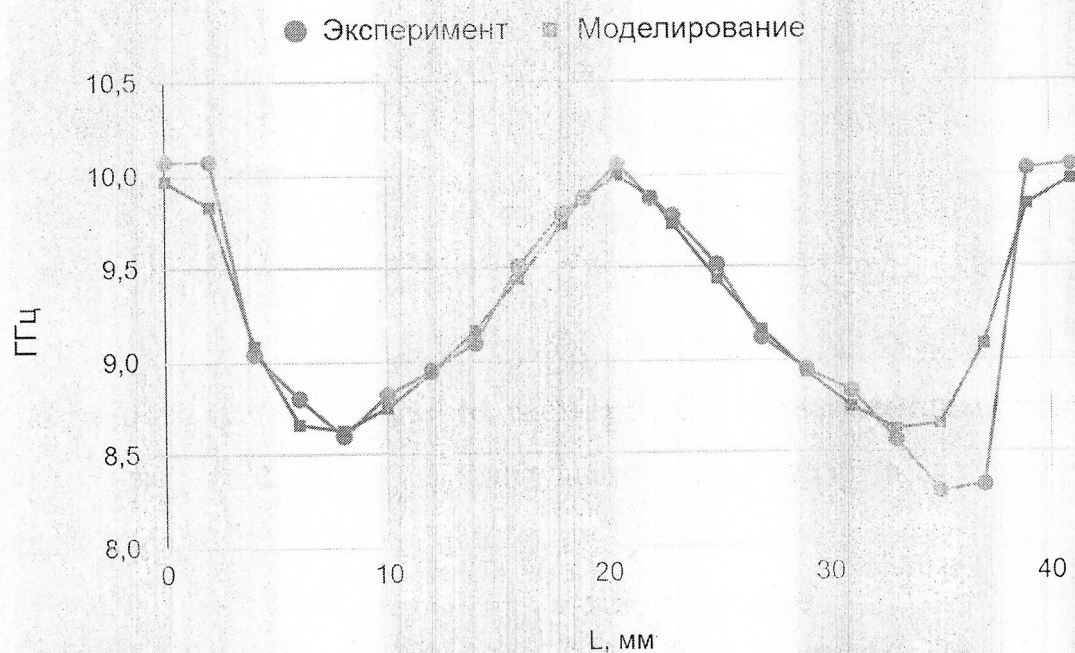


Рисунок 5 – Сравнение зависимости резонансной частоты основной моды от положения дефекта (моделирование и эксперимент)

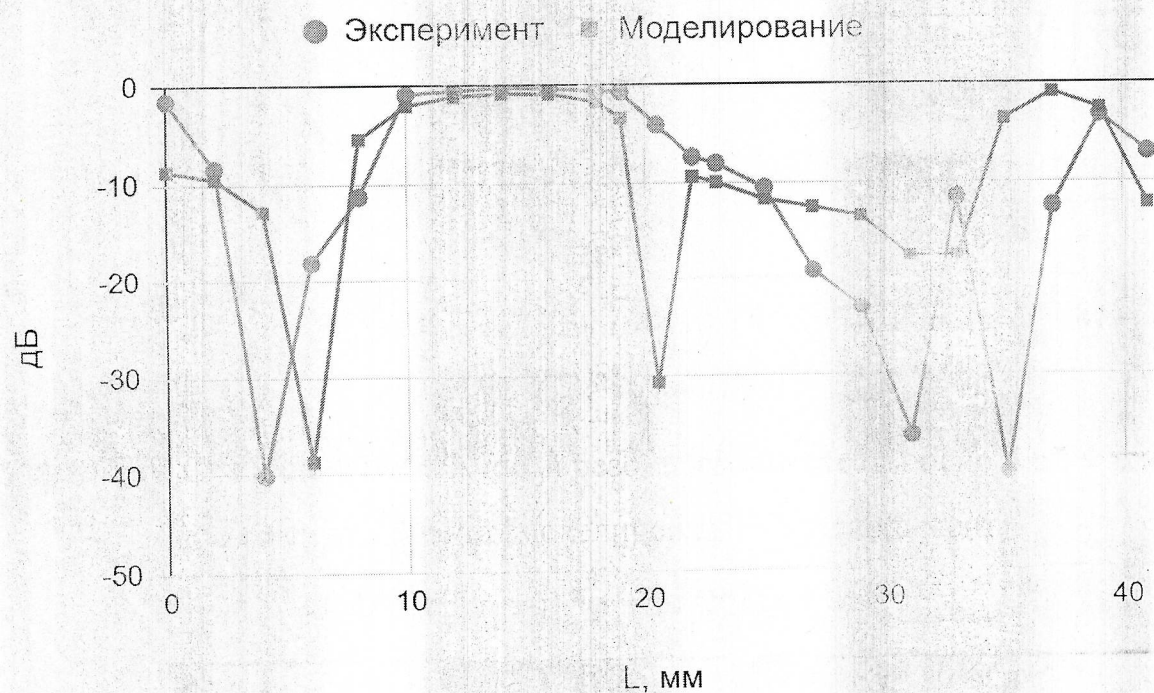


Рисунок 6 – Сравнение зависимости амплитуды резонансного пика от положения дефекта (моделирование и эксперимент)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была рассмотрена задача управления резонансными характеристиками одномерного фотонного кристалла с изменяемым объемным нарушением, помещенного в прямоугольный волновод. На основе проведенного моделирования и эксперимента были сделаны следующие выводы:

1. Разработана и реализована математическая модель фотонного кристалла с изменяемым нарушением. Модель построена с использованием метода матриц передачи. В среде Mathcad проведены расчеты коэффициентов отражения и пропускания в диапазоне 7-13 ГГц при различных структурах дефекта. Дополнительно выполнена визуализация распределения поля и частотных характеристик с помощью Python;

2. Изготовлен и протестирован экспериментальный образец фотонного кристалла, содержащий 11 чередующихся диэлектрических слоев, в которых центральный слой заменялся объемным воздушным нарушением с последующим введением перемещаемого радиопоглощающего эластомера. Измерения S-параметров в диапазоне 7-13 ГГц выполнены с использованием векторного анализатора цепей Agilent Technologies PNA-X N5242A;

3. Экспериментально подтверждена перестройка резонансной моды при смещении дефекта вдоль структуры. Полученные амплитудно-частотные характеристики демонстрируют хорошее качественное совпадение с результатами численного моделирования. Отмечены положения дефекта, при которых влияние на АЧХ оказывается минимальным, что связано с распределением поля в структуре;

4. Практическая значимость работы заключается в демонстрации возможности создания настраиваемых СВЧ-фильтров на основе фотонных кристаллов с внутренним дефектом. Управление положением резонансного пика может использоваться для разработки фильтров, резонаторов и сенсоров с адаптивными свойствами.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. СВЧ фотонные кристаллы – новая разновидность периодических структур в радиоэлектронике: учеб. пособие. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2016. – 84 с.
2. Усанов Д. А., Мерданов М. К., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. СВЧ фотонные кристаллы: новые сферы применения // Известия Саратовского ун-та. Новая серия. Физика. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 57–73.
3. Булыгина Е. В. и др. Наноразмерные структуры: классификация, формирование и исследование. – М., 2006.
4. Ивахненко Д. В., Пирогова А. А., Самаренкина С. З. К вопросу о классификации фотонных кристаллов // Современная техника и технологии. – 2015. – № 11. – С. 124–129.
5. Домкин К. И. Фотонные кристаллы и устройства // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2012. – Т. 2. – С. 252–254.
6. Войтова Т. А., Сухоруков А. П. Фотонные кристаллы. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2008.
7. Горелик В. С. Оптика глобулярных фотонных кристаллов // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37, № 5. – С. 409–432.
8. Абрамова В. В., Синицкий А. С., Третьяков Ю. Д. Фотонные кристаллы с заданной шириной запрещенной зоны // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2007. – Т. 86, № 5. – С. 370–373.
9. Гуляев Ю. В. и др. Низкоразмерные волноводные СВЧ-фотонные кристаллы // Доклады академии наук. – 2014. – Т. 458, № 4. – С. 406.
10. Усанов Д. А. и др. Волноводный фотонный кристалл, выполненный в виде диэлектрических матриц с воздушными включениями // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, № 2. – С. 65–70.