

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

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

Кафедра физики твёрдого тела

Исследование резонансных свойств СВЧ фотонных кристаллов с ферромагнитными эластомерами

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

магистранта 2 курса
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
профиль «Формирование и диагностика микро-, нано- и биомедицинских
систем»
Института физики

Александрова Артёма Алексеевича

Научные руководители:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч.
звание



подпись, дата

А.В.Скрипаль

инициалы, фамилия

к.ф.-м.н. доцент

должность, уч. степень, уч.
звание



подпись, дата

Д.В.Пономарёв

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч.
звание



подпись, дата

А.В.Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов, 2025

Введение

В настоящее время одним из самых динамично развивающихся направлений науки является разработка и изучение фотонных кристаллов — искусственных периодических структур, размер которых сопоставим с длиной волны проходящего через них электромагнитного излучения. Эти структуры имеют сходство с обычными кристаллами, такими как кремний, поскольку в них также существуют разрешённые и запрещённые зоны для распространения электромагнитных волн. Особый интерес к фотонным кристаллам связан с возможностью придания им уникальных свойств путём внедрения композитных материалов, нарушающих их периодичность.

Использование композитных материалов в составе фотонных кристаллов открывает дополнительные возможности управления их свойствами. Например, изменяя концентрацию включений, можно регулировать положение «окна прозрачности» — диапазона длин волн, в котором среда проявляет минимальное поглощение излучения.

Все материалы при взаимодействии с электромагнитными волнами демонстрируют определённые характеристики: отражательную способность, прозрачность или поглощение. Обычно эти параметры имеют сложную природу, но один из них может преобладать.

Целью магистерской работы являлось исследование особенностей амплитудно-частотных характеристик СВЧ одномерных фотонных кристаллов с нарушениями периодичности, содержащих образцы ферромагнитных эластомеров с разными степенями воздушных включений.

1. Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонных кристаллов, содержащих слои ферромагнитного эластомера

Ниже представлен план исследования компьютерных моделей и данных амплитудно-частотных характеристик, который будет проведён в работе:

- Моделирование базовой структуры фотонного кристалла, на основе которой будут проводиться дальнейшие исследования
- Моделирование амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонных кристаллов с изменяющимся зазором между исследуемым ферромагнитным эластомером и периодической 11-слойной структурой одномерного СВЧ фотонного кристалла
- Моделирование амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонных кристаллов с образцом, прилегающим к 11-ому слою структуры вплотную и изменяющим свои свойства посредством введения воздушных включений в виде 15-ти отверстий разных диаметров.
- Объединение двух предыдущих методов: одновременное изменение зазора между 11-слойной структурой и образцом, изменяющим свои характеристики посредством введения воздушных включений

При моделировании рассматривалась 11-слойная структура (рис. 1.1), помещённая в прямоугольный волновод сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$ длиной 100 мм, в которой нечётные слои были выполнены из керамики (Al_2O_3) толщиной 0.5 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 9.6$, а чётные слои из фторопласта (тефлон) толщиной 18 мм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.1$. На структуру подавалось электромагнитное излучение в диапазоне частот 7-13 ГГц. Диапазон выбирался таким образом, чтобы можно было наблюдать запрещённую зону. Расчёт АЧХ представлен на рисунке 1.2.

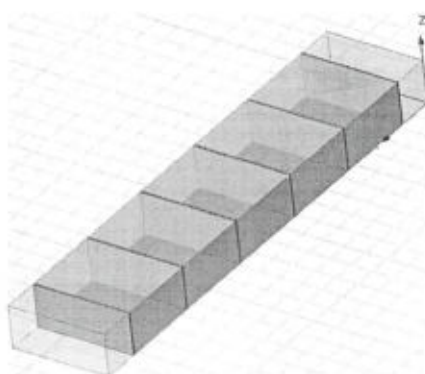


Рисунок 1.1 – 3D-модель фотонного кристалла без нарушений. Тонкие слои – керамика, широкие слои – фторопласт

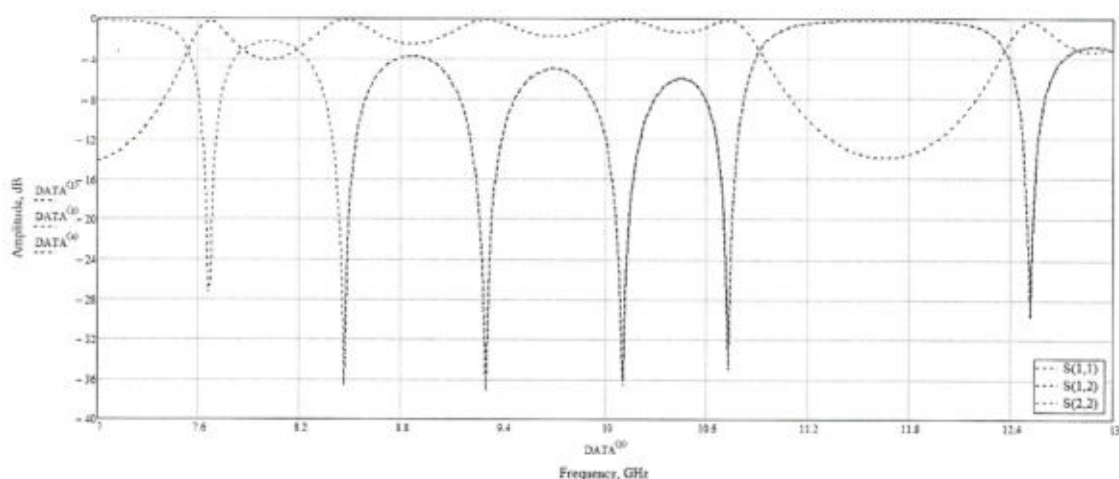


Рисунок 1.2 – Расчётная АЧХ фотонного кристалла без нарушений

На рисунке 1.2 отчётливо видна так называемая запрещённая зона в диапазоне частот от 10.78 ГГц до 12.52 ГГц. В середине запрещённой зоны на частоте 11.67 ГГц коэффициент пропускания ($S_{1,2}$) равен -13.98 дБ, что означает прохождение лишь 4% излучения. Судя по графику коэффициента отражения ($S_{1,1}$; $S_{2,2}$), остальная часть излучения отразилась от структуры.

Далее 12-ым слоем в структуру добавлялся образец ферромагнитного эластомера с радиопоглощающими свойствами. Ниже представлены характеристики материала:

- Толщина – 1,22 мм
- Действительная часть диэлектрической проницаемости ϵ' – 12,6
- Мнимая часть диэлектрической проницаемости ϵ'' – 6

Таким образом, после внесения в структуру образца периодичность диэлектрической проницаемости нарушается (рис. 1.3), что приводит к появлению фотонных таммовских состояний в запрещённых зонах структуры, которые являются аналогами таммовских резонансов в кристаллах на краю обрыва решётки. Расчёт АЧХ полученной структуры представлен на рисунке 1.4.

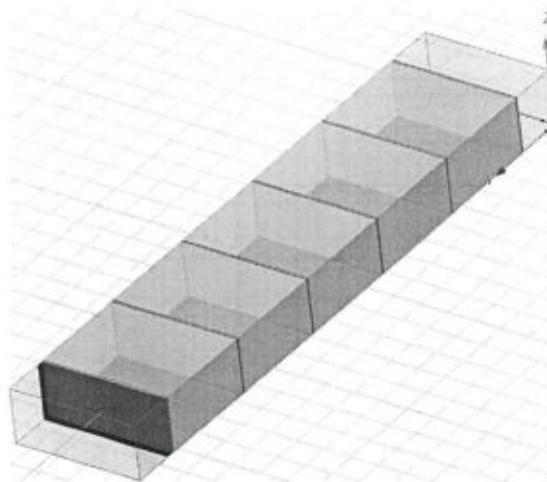


Рисунок 1.3 – 3D-модель фотонного кристалла с нарушением в центральном слое. Тонкие слои – поликор, широкие слои – фторопласт.

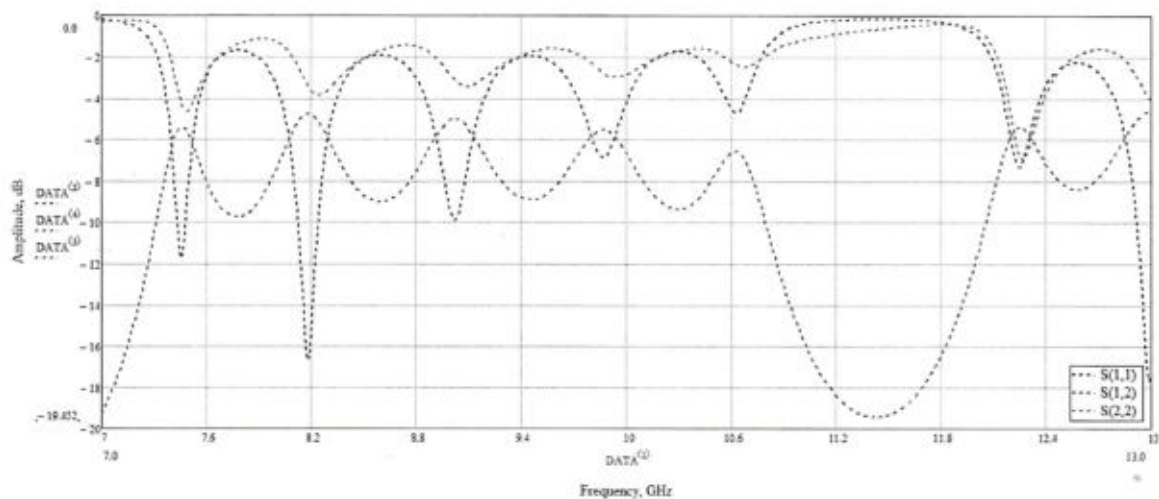


Рисунок 1.4 – Расчётная АЧХ фотонного кристалла с нарушением периодичности. Образец помещался вплотную к 11-ому слою структуры.

Из рисунка 1.4 видно, что благодаря внесению нарушения произошло уменьшение амплитуд всех коэффициентов по всем частотам, что свидетельствует о наличии поглощающих слоёв в структуре, коим и является образец ферромагнитного эластомера. Также заметно незначительное увеличение запрещённой зоны до значений от 10.64 ГГц до 12.6 ГГц. Амплитуда дна зоны составляет -19 дБ, что означает прохождение лишь 1.26% падающего излучения структуры. Что более важно, в фотонной запрещённой зоне появляется фотонный таммовский резонанс на частоте 12.25 ГГц, на которой коэффициент пропускания составляет -5,4 дБ. Данное явление и свидетельствует о наличии нарушения в периодической структуре.

На основе модели, изображённой на рисунке 1.3 было проведено следующее моделирование: образец предлагается перемещать от 11-ого слоя структуры фотонного кристалла на расстояние до 5 мм с шагом 0.5 мм, тем самым добавляя 12-ым слоем воздух, а 13-ым слоем является исследуемый образец ферромагнитного эластомера. Одновременно с этим в слое эластомера будут проделываться 15 отверстий диаметрами 0.6 мм, 1.0 мм, 1.5 мм, 2.0 мм, 2.5 мм с целью уменьшения эффективной диэлектрической проницаемости. Для удобства представления на каждом графике будут выводиться все 6 графиков с разными вариациями диаметров отверстий в образце.

Сравнивая полученные данные можно заметить, что при увеличении воздушного зазора (12-ый слой) между ФК и образцом фотонный таммовский резонанс смещается в область более низких частот. Также, чем ближе резонанс к середине запрещённой зоны, тем ниже его амплитуда по коэффициенту пропускания $S(1,2)$. Чем ближе к краям зоны таммовский резонанс – тем он выше. Коэффициент отражения имеет обратную зависимость от коэффициента пропускания. Также из-за увеличения воздушных включений в образце ферромагнитного эластомера эффективная диэлектрическая проницаемость образца становится меньше и, как следует из графиков, по всем частотам коэффициенты прохождения и отражения увеличивают свою амплитуду, что свидетельствует о большем прохождении СВЧ излучения и заметном уменьшении отражения от структуры.

2. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонных кристаллов, содержащих слои ферромагнитного эластомера

В данном исследовании использовался анализатор цепей Agilent PNA-X Network Analyzer.

К его каналам через коаксиально-волноводный переход был присоединен прямоугольный волновод длиной 100 мм и внутренним сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$, в котором и реализовывалась структура фотонного кристалла.

После расположения фотонного кристалла в волноводе на его структуру подавалось электромагнитное излучение и получали амплитудно-частотные характеристики полученной структуры.

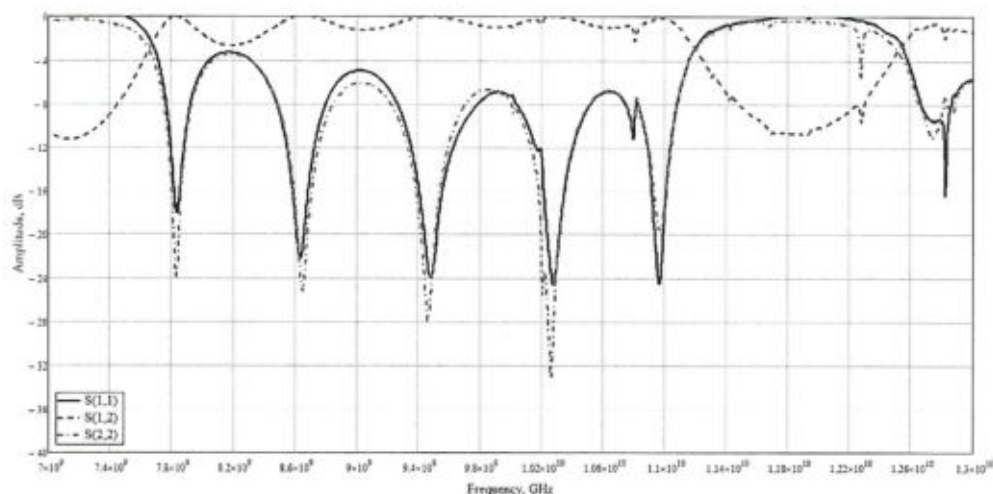


Рисунок 2.1 – Экспериментальная АЧХ фотонного кристалла без нарушений

Далее, вплотную к 11-ому слою структуры размещался образец исследуемого ферромагнитного эластомера. Данный поглотитель имеет следующие характеристики:

- Площадь – $23 \times 10 \text{ мм}^2$
- Толщина – 1,22 мм
- Комплексная диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{def}} = 12,6 + 6i$

Состав эластомера на 10 грамм компаунда следующий:

- СКТН-А каучук синтетический термостойкий низкомолекулярный, марки А – 1.5 грамма
- Силиконовый герметик У-4-21 (цвет белый) – 1.05 гамма
- Ферритовый порошок 1000НМ – 7,5 грамм

После размещения образца с краю структуры также был произведён замер амплитудно-частотных характеристик, которые представлены на рисунке 2.2.

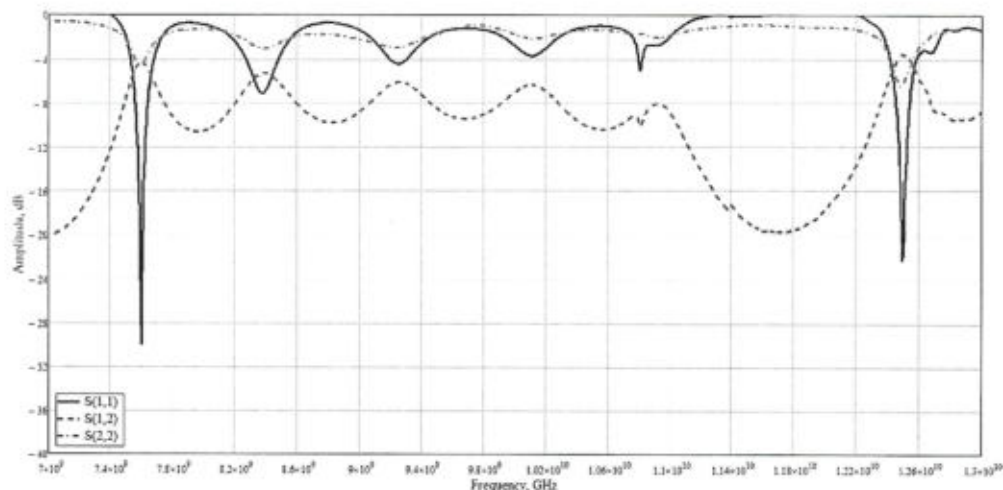


Рисунок 2.2 – Экспериментальная АЧХ фотонного кристалла без нарушений

Сравнивая рисунки 2.1 и 2.2 с рисунками 1.2 и 1.4 можно сказать, что полученные при компьютерном моделировании данные сопоставимы по всем значениям с экспериментальными.

В эксперименте исследовались АЧХ коэффициентов отражения и прохождения структуры при перемещении исследуемого образца ферромагнитного эластомера от 11-ого слоя структуры фотонного кристалла на расстояние до 5 мм с шагом 0.5 мм, тем самым добавляя 12-ым слоем воздух и одновременное введение воздушных включений посредством высверливания 15 отверстий диаметрами 0.6 мм, 1.0 мм, 1.5 мм, 2.0 мм, 2.5 мм с целью уменьшения эффективной диэлектрической проницаемости

Сравнивая результаты компьютерного моделирования и экспериментальных данных можно заметить, что значения амплитуд фотонных таммовских резонансов совпадают с некоторой незначительной погрешностью. Общий частотный сдвиг в область более высоких частот на 0.2-0.3 ГГц тут также сохраняется и при учёте данного отличия частотные положения всех резонансов также сопоставимы, что говорит об успешном проведении экспериментов. Такой вывод позволяет нам с точностью утверждать, что компьютерное моделирование структур одномерных фотонных кристаллов с нарушениями, прилегающими к 11-ому слою,

позволит точно предсказать будущее поведение структуры в реальном исполнении.

Заключение

В ходе выполнения магистерской работы были получены следующие результаты:

Проведён критический обзор литературы, посвящённой методам исследования параметров материалов с использованием фотонных кристаллов с нарушенной периодичностью структуры. Разработана модель взаимодействия композитных материалов с СВЧ-излучением, применяемая в численном моделировании для прогнозирования коэффициентов прохождения и отражения в объёме фотонного кристалла с дефектом. В слой нарушения периодичности помещался ферромагнитный эластомер в двух вариантах: сплошной и с воздушными включениями, при различных положениях внутри дефектного слоя.

Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования показало, что внедрение эластомера в структуру фотонного кристалла с дефектом приводит к изменению частотного положения и амплитуды фотонного таммовского резонанса. При этом степень этих изменений зависит как от состава ферромагнитного эластомера, так и от его локализации в дефектном слое.

Таким образом, применение эластомера с регулируемыми радиопоглощающими свойствами, что достигается путём введения воздушных включений, позволяет формировать фотонные таммовские состояния в запрещённых зонах кристалла. Их частотное положение и интенсивность определяются толщиной и эффективной диэлектрической проницаемостью эластомера. Управление параметрами таммовских резонансов открывает возможности для характеристики свойств радиопоглощающих материалов на основе ферромагнитных эластомеров.

