

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**МИКРОПОЛОСКОВЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ СВЧ ФОТОННЫХ
КРИСТАЛЛОВ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 2251 группы
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
Института Физики

Кузнецовой Анастасии Николаевны



Научные руководители:

профессор, д.ф.-м.н.

Должность, ученая степень, уч. звание



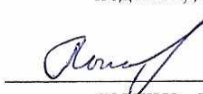
подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

Инициалы Фамилия

доцент, к.ф.-м.н.

Должность, ученая степень, уч. звание



подпись, дата

Д.В. Пономарев

Инициалы Фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

Должность, ученая степень, уч. звание



подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

Инициалы Фамилия

Саратов 2025 г.

Введение

Одним из требований, предъявляемых к современным методам измерения электрофизических параметров материалов, является использование возможности проводить их бесконтактно, не разрушая материал и не изменяя его свойства. К таким методам измерений относятся СВЧ-методы, которые являются оптимальными при исследовании материалов и структур, используемых при создании приборов полупроводниковой СВЧ-электроники [1, 2].

Среди различных типов планарных схем микрополосковые являются наиболее часто используемыми в СВЧ-электронике. При этом микрополосковые структуры демонстрируют наибольшую универсальность при создании измерительных систем [3]. Особенно перспективно их применение для измерения параметров материалов, в частности, материалов подложек плоских СВЧ-линий передачи.

Целью выпускной квалификационной работы являлось создание сенсора на основе микрополоскового ФК с дефектным слоем для контроля диэлектрической проницаемости материалов.

Задачами выпускной квалификационной работы являлись:

- Разработка математической модели микрополоскового СВЧ фотонного кристалла;
- Компьютерное моделирование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения микрополоскового фотонного кристалла с периодически изменяющейся шириной или длиной микрополоска и содержащими нарушения периодичности;
- Компьютерное моделирование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения микрополоскового фотонного кристалла с наложенным диэлектрическим образцом поперек нарушений модели;
- Моделирование распределения электромагнитного поля в области дефекта;
- Экспериментальное исследование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения микрополоскового фотонного кристалла с наложенным диэлектрическим образцом поперек нарушений модели;

- Изучение зависимости изменения частоты дефектной моды от диэлектрической проницаемости наложенного образца.

Структура и объем ВКР

Выпускная квалификационная работа (магистерская работа) состоит из: Введения; шести основных разделов: 1 Фотонные кристаллы, 2 Микрополосковая линия, 3 Микрополосковая модель фотонного кристалла, 4 Микрополосковые сенсоры, 5 Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик микрополоскового фотонного кристалла, 6 Экспериментальное исследование; Заключение; Списка использованных источников, состоящего из 25 наименований;

Материалы работы изложены на 57 страницах.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы выпускной квалификационной работы, определены цель и задачи работы.

В разделе 1 дано понятие «фотонные кристаллы».

Фотонные кристаллы (photonic crystals, «коллоидные кристаллы» по старой терминологии) — это материалы с упорядоченной структурой, характеризующейся строго периодическим изменением коэффициента преломления в масштабах, сопоставимых с длинами волн излучений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Фотонные кристаллы, благодаря периодическому изменению коэффициента преломления, позволяют получить разрешенные и запрещенные зоны для энергий фотонов, аналогично полупроводниковым материалам, в которых наблюдаются разрешенные и запрещенные зоны для энергий носителей заряда.

Если внести нарушение в периодичность структуры фотонного кристалла, например, путем изменения геометрических размеров и/или электрофизических параметров одного или нескольких слоев, в запрещенной зоне возникает специальное явление - узкое "окно прозрачности", также известное как "примесная мода колебаний".

Важным свойством фотонных кристаллов, можно выделить то, что они чувствительны к частотным положениям примесной моды колебаний из-за изменений параметров нарушения периодичности слоев ФК. При изменении геометрических размеров и/или электрофизических параметров нарушения периодичности происходит частотный сдвиг и изменение формы примесной моды колебаний в запрещенной зоне периодической структуры.

В разделе 2 рассказано, что такое микрополосковая линия.

Полосковой линией передачи называют линию, в которой проводник ленточного, круглого или квадратного сечения расположен на некотором расстоянии от металлической плоскости (основания) или заключен между двумя металлическими основаниями. Пространство между проводником и основаниями может быть заполнено воздухом или диэлектриком. В зависимости от конструкции различают два основных типа таких линий: несимметричные и симметричные [4].

Микрополосковая линия состоит из узкого проводящего полоска на верхней стороне тонкой диэлектрической подложки и сплошной заземлённой плоскости на нижней стороне. Её ключевое отличие от классической несимметричной линии заключается в крайне малой толщине подложки, что представляет собой компромисс между добротностью и тепловым сопротивлением. Благодаря такой конструкции электромагнитное поле концентрируется между полоском и землей, что существенно снижает потери на излучение. В микрополосковых линиях распространяется квази-ТЕМ-волна, которая приближена к ТЕМ-волне, но имеет продольные компоненты поля из-за неоднородности диэлектрической среды.

В разделе 3 приведена аналогия одномерного фотонного кристалла с его микрополосковой моделью.

В разделе 4 дано понятие микрополосковых сенсоров и приведены примеры их использования.

Микрополосковые сенсоры — это устройства, предназначенные для измерения различных физических величин (температуры, давления, влажности,

перемещения и др.) посредством изменения характеристик электромагнитных волн, распространяющихся вдоль полоскового проводника. Основой конструкции является тонкий металлический слой (обычно медь), нанесенный на диэлектрический материал (например, керамика, полиимид). Такие датчики используются преимущественно в радиочастотных диапазонах, включая сверхвысокие частоты (СВЧ).

Использование открытых СВЧ-линий передачи позволяет сочетать достаточно высокую чувствительность СВЧ-методов измерений с технологичностью изготовления структур и оправок для измерения и отсутствием жестких требований на размеры образцов. К недостаткам измерительных систем на открытых линиях передачи можно отнести наличие потерь на излучение на открытых концах передающих линий, неоднородностях, например, связанных с необходимостью использования коаксиально-микрострипковых переходов, трудности в проведении локальных измерений.

В разделе 5 приведены результаты компьютерного моделирования исследуемой структуры, в том числе разработка математической модели, исследование структуры без наложенного образца и исследование структуры с наложенными диэлектрическими образцами.

При моделировании рассматривалась 11-слойная структура с нарушенным центральным слоем из ФЛАН с диэлектрической проницаемостью $\epsilon=8.8$. Сводная таблица по слоям 11-слойного фотонного кристалла представлена в табл. 1. Где первый и последний слои – внешняя линия.

Таблица 1 – Структура фотонного кристалла

№ слоя	l, м	d, м
0	$9 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
1	$8.319 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
2	$9 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-3}$
3	$8.319 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
4	$4 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-3}$

5	$3 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-3}$
6	$4 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-3}$
7	$3 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-3}$
8	$4 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-3}$
9	$8.319 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
10	$9 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-3}$
11	$8.319 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
12	$9 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$

Для расчета коэффициента пропускания и отражения электромагнитной волны через микрополосковый фотонный кристалл в квазистатическом приближении использовалась матрица передачи T четырехполюсника сложной структуры, представляющего собой каскадное соединение элементарных четырехполюсников с известными матрицами передачи, которые имеют вид [4]:

$$T = \begin{pmatrix} T[1,1] & T[1,2] \\ T[2,1] & T[2,2] \end{pmatrix} = T'_N \prod_{i=1}^{N-1} (T''_{i,i+1} \cdot T'_i), \quad (1)$$

где T'_i и $T''_{i,j}$ – матрицы передачи четырехполюсников, описывающих соответственно i -й отрезок и прямое соединение i -го и $(i+1)$ -го отрезков микрополосковой линии передачи.

$$T'_i = \begin{pmatrix} e^{\gamma_i l_i} & 0 \\ 0 & -e^{\gamma_i l_i} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$T''_{i,j} = \begin{pmatrix} \frac{R_{i,i+1} + 1}{2\sqrt{R_{i,i+1}}} & \frac{R_{i,i+1} - 1}{2\sqrt{R_{i,i+1}}} \\ \frac{R_{i,i+1} - 1}{2\sqrt{R_{i,i+1}}} & \frac{R_{i,i+1} + 1}{2\sqrt{R_{i,i+1}}} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Здесь l_i – длина i -го отрезка, γ_i – постоянная распространения электромагнитной волны в i -м отрезке $R_{i,i+1} = \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i}$, где ρ_i – волновое сопротивление i -го отрезка структуры; ϵ_i , h_i – диэлектрическая проницаемость

и толщина подложки i -го отрезка; w_i – ширина полоскового проводника i -го отрезка.

$$\rho_i = \frac{377h_i}{\sqrt{\epsilon_i}w_i \left(1 + 1.735\epsilon_i^{-0.0724} \left(\frac{w_i}{h_i}\right)^{-0.836}\right)}$$

Коэффициент прохождения СВЧ-мощности через элемент $T[1,1]$ матрицы передачи:

$$t = \frac{1}{|T[1,1]|^2} \quad (4)$$

Коэффициент отражения СВЧ-мощности от микрополосковой структуры определяется квадратом модуля элемента $S[1,1]$ матрицы рассеяния

$$r = |S[1,1]|^2, \quad (5)$$

элементы которой связаны с элементами матрицы передачи T соотношением:

$$S = \begin{pmatrix} S[1,1] & S[1,2] \\ S[2,1] & S[2,2] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{T[2,1]}{T[1,1]} & \frac{T[1,1]T[2,2] - T[1,2]T[2,1]}{T[1,1]} \\ \frac{1}{T[1,1]} & -\frac{T[1,2]}{T[1,1]} \end{pmatrix}.$$

Для расчета частотных зависимостей коэффициентов отражения S_{11} и прохождения S_{21} электромагнитной волны при ее взаимодействии с исследуемой структурой в диапазоне частот 0-12 ГГц была использована программа электродинамического моделирования и проектирования HFSS.

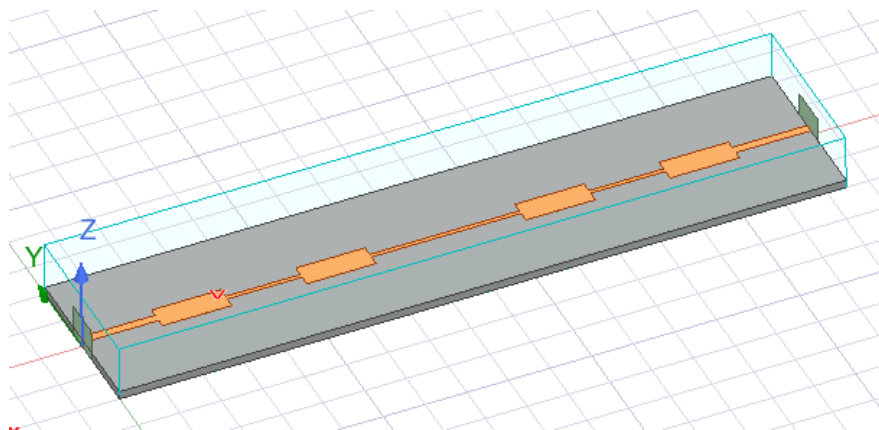


Рисунок 1 – Топология микрополоскового СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности

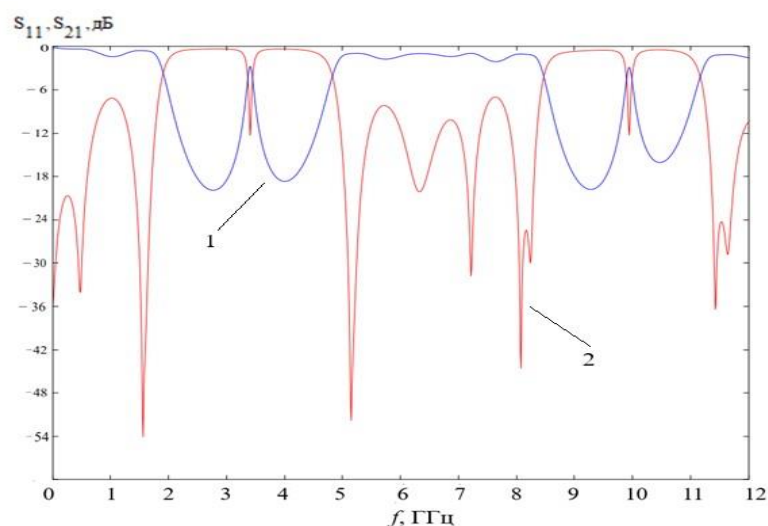


Рисунок 2 – АЧХ первой структуры микрополоскового СВЧ фотонного кристалла (кривая 1 – коэффициент S_{21} , кривая 2 – коэффициент S_{11})

В этом случае, из результатов следует, что дефектная мода возникает на частотах $f_1=3.39$ ГГц и $f_2=9.91$ ГГц. На этих частотах было проведено моделирование распределения поля электромагнитной волны вдоль структуры.

На рисунке 3 представлено распределение поля в первой структуре фотонного кристалла с нарушенным центральным слоем.

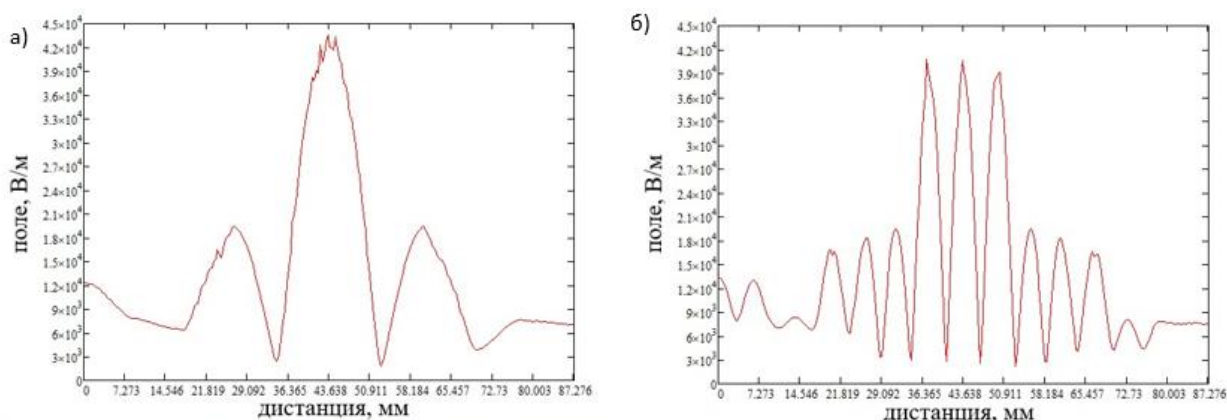


Рисунок 3 – Распределение поля вдоль модели первой структуры а) на частоте 3.39 ГГц и б) на частоте 9.91 ГГц

На частоте 3.39 ГГц (рис. 3 (а)) поле локализовано преимущественно в центральной области дефекта, с затуханием к краям структуры. Это характерно для основной моды с максимальной энергией в центре.

На частоте 9.91 ГГц (рис. 3 (б)) распределение поля имеет более сложную структуру, что указывает на высшую моду.

Для анализа влияния диэлектрических свойств образцов на резонансные характеристики были использованы два типа наложенных пластин:

Малый образец: $10 \times 5 \times 1$ мм;

Большой образец: $23 \times 10 \times 1$ мм.

Диэлектрическая проницаемость пластины изменялась от 2 до 12 с шагом 2. Анализ проводился в том же диапазоне частот от 1 ГГц до 12 ГГц.

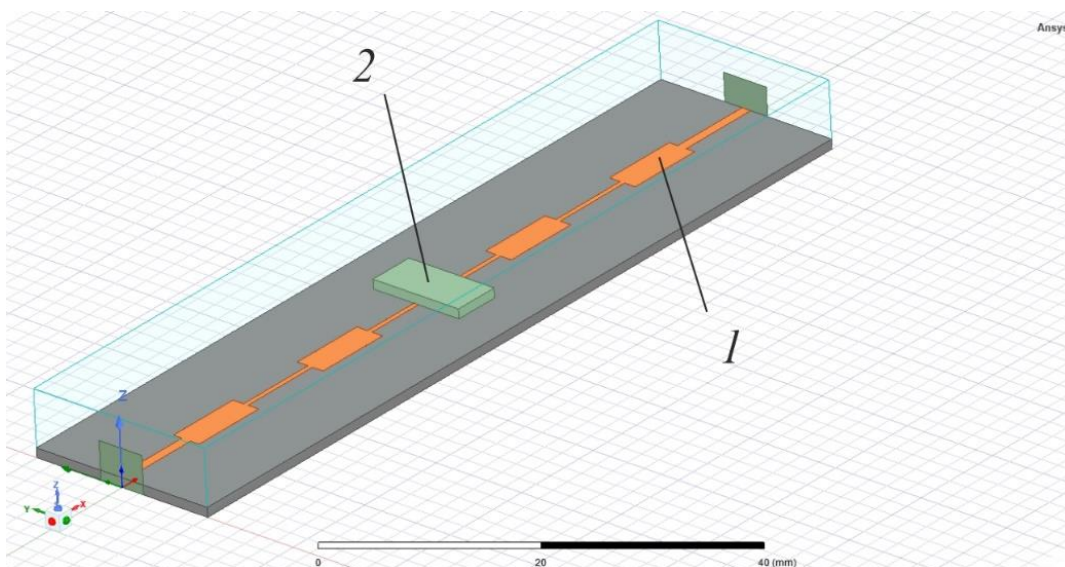


Рисунок 4 – Топология микрополоскового СВЧ фотонного кристалла с диэлектрической пластиной, расположенной в области нарушения периодичности, 1 – микрополосок, 2 – диэлектрическая пластина

Была исследована зависимость частоты дефектной моды от величины диэлектрической проницаемости образцов в первой и второй запрещенных зонах. Так же исследовалась зависимость частоты дефектной моды от диэлектрической проницаемости для образцов разной толщины.

Из полученных зависимостей частот дефектной моды от диэлектрической проницаемости видно, что с увеличением диэлектрической проницаемости пластины - частота дефектной моды уменьшается. Наблюдаемый сдвиг резонансных частот в область низких значений при увеличении ϵ наложенной

пластины обусловлен ростом эффективной диэлектрической проницаемости системы.

В разделе 6 рассказано про изготовление макета методом фотолитографии и приведены результаты экспериментального исследования.

Проведение эксперимента планируется на пластине ФЛАНА с металлизацией размером 140 мм*20 мм.

Изготовление макета методом фотолитографии [5]:

1) Подготовка, 2) Термостабилизация, 3) Нанесение фоторезиста 4) Сушка, 5) Экспонирование, 6) Проявление фоторезиста, 7) Просмотр точности нанесения фотошаблона, 8) Ретушь, 9) Травление меди, 10) Снятие фоторезиста, 11) Подпиливание, 12) Пайка переходов СРГ-50-751 ФВ

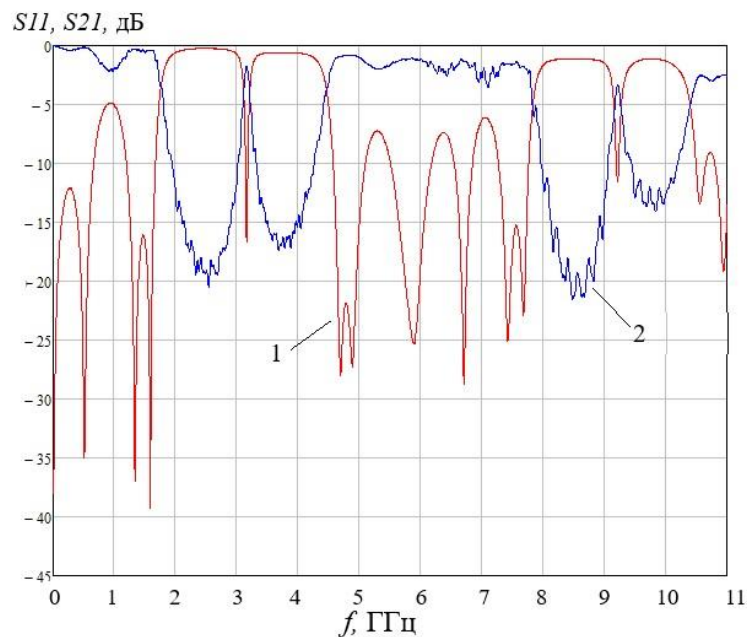


Рисунок 5 – Экспериментальная АЧХ фотонного кристалла с нарушенным центральным слоем (кривая 1 - коэффициент S_{11} , кривая 2 – коэффициент S_{21})

После измерения АЧХ структуры без наложенного образца было проведено исследование структуры с наложенными диэлектрическими образцами.

Использовались материалы с известной диэлектрической проницаемостью и размерами.

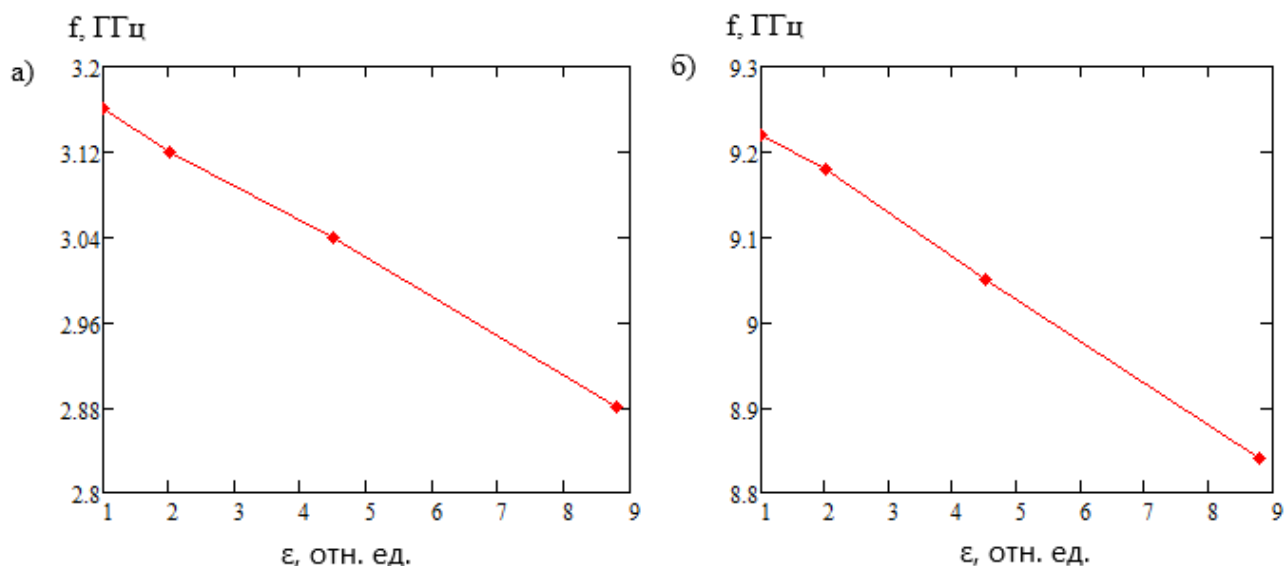


Рисунок 6 – Зависимость частоты дефектной моды от диэлектрической проницаемости наложенного образца размерами $23 \times 10 \times 4$ а) первая зона и б) вторая зона

Полученные результаты демонстрируют, что увеличение диэлектрической проницаемости образца приводит к снижению резонансной частоты микрополоскового фотонного кристалла. Это согласуется с теоретическими представлениями, поскольку рост ϵ увеличивает эффективную диэлектрическую постоянную структуры и приводит к сдвигу резонанса в низкочастотную область.

В дополнение к этому проанализируем, как изменяется частотная характеристика при варьировании только толщины образца при постоянной диэлектрической проницаемости.

Для этого используем образцы из поликора с диэлектрической проницаемостью 9.6 и размерами $23 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \times t$, где $t = 0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.5; 2.9; 4$ мм, расположенного с левого края нарушения.

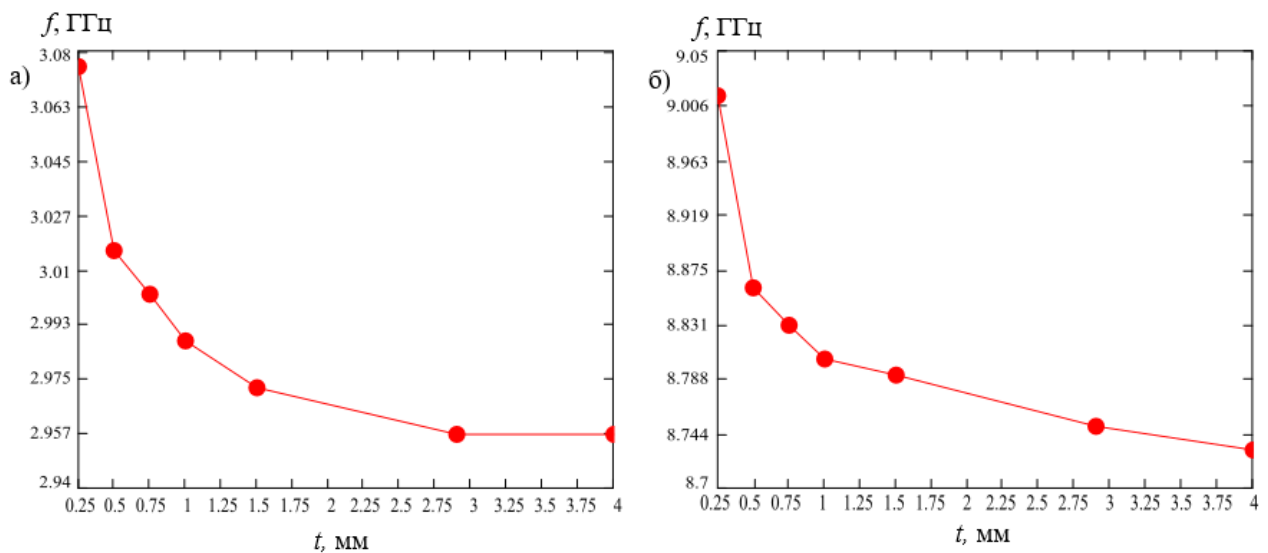


Рисунок 7 – Зависимость частоты дефектной моды от толщины наложенного образца с постоянной диэлектрической проницаемостью а) первая зона и б) вторая зона

Исследование зависимости АЧХ от толщины образца при постоянной диэлектрической проницаемости выявило аналогичную тенденцию: увеличение толщины приводит к снижению резонансной частоты. Данный эффект объясняется усилением взаимодействия электромагнитного поля с диэлектриком, что эквивалентно увеличению его эффективного воздействия на структуру фотонного кристалла.

Заключение

В ходе выпускной квалифицированной работы была исследована идея создания сенсора для контроля диэлектрической проницаемости образцов на основе микрополоскового фотонного кристалла.

Анализ показал, что с увеличением ϵ пластины резонансная частота сенсора снижается, что обуславливается ростом эффективной диэлектрической проницаемости системы и, как следствие, приводит к смещению резонанса в низкочастотную область. Экспериментальные исследования подтвердили данную зависимость.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают перспективность использования микрополосковых фотонных кристаллов в качестве основы для СВЧ-сенсоров диэлектрических параметров материалов.

Список использованных источников

1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю. Фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов // Известия вузов. Электроника. 2008. №5. С. 25-32.
2. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Скворцов В.С., Мерданов М.К. СВЧ-фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов и создания функциональных устройств СВЧ-электроники // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11, № 3. С. 51-59.
3. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей // Журнал технической физики. 2010. Т. 80, вып. 8. С. 143-148.
4. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях – «Советское радио», 1972г. – 232 с.
5. Кручинин, Д. Ю. Фотолитографические технологии в производстве оптических деталей: учебное пособие / Д. Ю. Кручинин, Е. П. Фарафонтова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014 – 51 с.

