

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

Кафедра физики твердого тела

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ СВЧ
ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 2251 Группы

направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
код и наименование направления

института физики

наименование факультета, института, колледжа

Рыбкиной Натальи Павловны

фамилия, имя, отчество (именительный падеж)

Научные руководители:

д.ф.-м.н., профессор
должность, уч. степень, уч. звание

 17.06.2024
подпись, дата

А.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

к.ф.-м.н. доцент
должность, уч. степень, уч. звание

 13.06.2024
подпись, дата

Д.В. Пономарев
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., профессор
должность, уч. степень, уч. звание

 17.06.2024
подпись, дата

А.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Саратов, 2024

Разработка современных приборов твердотельной микро- и нанoeлектроники во многом зависит от уровня развития технологии изготовления полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев толщиной от нескольких нанометров до десятков микрометров [1].

В настоящее время одним из активно развивающихся направлений науки является изучение фотонных кристаллов и их свойств. Реальные и фотонные кристаллы схожи тем, что у них есть разрешенные и запрещенные зоны для распространения электромагнитного излучения [2].

Использование микрополосковых фотонных СВЧ-кристаллов обеспечивает изменение коэффициента отражения от значений близких к нулю, до значений близких к единице в измеряемом диапазоне частот [7].

Целью выпускной квалификационной работы являлось создание фотонного кристалла с управляемыми характеристиками с помощью величины управляющего тока, а также исследование и выявление особенностей взаимодействия сверхвысокочастотного излучения с ФК в микрополосковом исполнении, содержащими в качестве нарушенного центрального слоя $n-i-p-i-n$ -структуру.

Задачами выпускной квалификационной работы являлось:

1. Систематизация и обобщение существующих данных, выявление актуальных проблем, а также обоснование выбора темы и актуальности проводимого исследования.
2. Изучение основных свойств фотонных кристаллов, представляющих собой микрополосковую структуру, содержащую различные толщины полоскового проводника.
3. Исследование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения микрополосковых фотонных кристаллов с периодически изменяющейся длиной микрополоска и содержащими нарушения в виде центрального слоя, содержащим $n-i-p-i-n$ -структуру.
4. Исследование влияния оптического излучения на некоторые характеристики микрополоскового фотонного кристалла.

5. Исследование влияния электрического взаимодействия на АЧХ микрополоскового СВЧ фотонного кристалла.

6. Создание микрополосковых конструкций фотонных кристаллов СВЧ-диапазона.

7. Сравнение результатов расчета и эксперимента.

Магистерская работа состоит из введения, 9 глав, заключения и списка использованных источников.

Во введении сформулирована цель работы, а также основные задачи, описана структура работы.

В первой главе представлено понятие микрополосковой линии, представлены основные типы линий, приведена аналогия параметров и характеристик одномерного фотонного кристалла и его микрополосковой модели.

Вторая глава посвящена фотонным кристаллам. Приведено определение фотонного кристалла и их особенностей. Продемонстрированы примеры применения фотонных кристаллов и микрополосковых фотонных кристаллов, особенности микрополосковых фотонных кристаллов.

Третья глава описывает р-і-п-диоды. Наиболее уверенно р-і-п-диоды заняли свою нишу в ВЧ- и СВЧ-диапазонах для управления уровнем и (или) фазой СВЧ-сигналов, коммутации ВЧ- и СВЧ-мощности в линиях передач, для защиты радиотехнической аппаратуры от случайных СВЧ-импульсов, для стабилизации СВЧ-мощности, а также в аттенюаторах ВЧ-диапазона. В отечественной практике р-і-п-диоды СВЧ-диапазона получили название переключательных и ограничительных (в зависимости от рода использования), в ВЧ-диапазоне их называют коммутационными и регулируемые резистивными (для аттенюаторов). В зарубежной практике в их названии сохранен конструктивно-технологический маркер «PIN-Diodes».

Четвертая глава посвящена конструкциям фотонного кристалла в микрополосковом исполнении с характеристиками, управляемыми n-і-p-і-n-

диодами.

Пятая глава описывает теоретическую модель взаимодействия СВЧ-излучения. Сверхвысокочастотное излучение (СВЧ-излучение) — электромагнитное излучение, включающее в себя дециметровый, сантиметровый и миллиметровый диапазоны радиоволн, частоты микроволнового изменяются от 300 МГц до 300 ГГц (длина волны от 1 м до 1 мм). По-другому СВЧ волны ещё называют микроволнами.

Для расчета коэффициента прохождения электромагнитной волны в микрополосковом фотонном кристалле в квазистатическом приближении использовалась матрица передачи T четырехполюсника сложной структуры, представляющего собой каскадное соединение элементарных четырехполюсников с известными матрицами передачи, которые имеют вид:

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

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

Выражения для матриц передачи T'_i и $T''_{i,j}$ соответствующих элементарных четырехполюсников имеют вид:

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

$$T''_{i,i+1} = \begin{bmatrix} (r_{i,i+1} + 1)/(2\sqrt{r_{i,i+1}}) & (r_{i,i+1} - 1)/(2\sqrt{r_{i,i+1}}) \\ (r_{i,i+1} - 1)/(2\sqrt{r_{i,i+1}}) & (r_{i,i+1} + 1)/(2\sqrt{r_{i,i+1}}) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Здесь d_i — длина i -го отрезка, γ_i — постоянная распространения электромагнитной волны в i -ом отрезке, $r_{i,i+1} + 1 = \rho_{i+1}/\rho_i$,

где $\rho_i = 377 * h_i / \left(\sqrt{\varepsilon_i} * W_i (1 + 1,735 * \varepsilon_i^{-0,0724} * (W_i/h_i)^{-0,836}) \right)$ — 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.

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

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

Шестая глава посвящена фольгированному материалу СВЧ-диапазона марки ФЛАН. Фольгированные материалы СВЧ - диапазона - листовые материалы, основой которых являются высокотемпературные полимеры с превосходными диэлектрическими характеристиками, покрытие (облицованные) медной гальваностойкой фольгой.

ФЛАН ТУ 16-503.148-80 – листовый материал, изготавливаемый на основе наполненных простых полиэфиров и облицованный (покрытый) с обеих сторон медной гальваностойкой электролитической фольгой толщиной 35 мкм. Основой материала являются полиэфиры (РРО, РРЕ), которые способны сохранять превосходные свойства электроизоляции при различных температурах и в различных условиях эксплуатации. ФЛАН выпускается с различной диэлектрической проницаемостью от 2,8 до 16,0 (измерения при частоте 10 ГГц).

В седьмой главе представлены результаты компьютерного моделирования характеристик микрополосковых фотонных кристаллов СВЧ-диапазона без нарушений и с нарушениями в центральном слое в среде Mathcad с различными ширинами микрополосков.

Восьмая глава описывает результаты компьютерного моделирования характеристик микрополосковых фотонных кристаллов СВЧ-диапазона в среде трехмерного электродинамического моделирования ANSOFT HFSS. Основные этапы работы с HFSS, для получения окончательного результата:

1. Описание анализируемой структуры, в том числе:
 - создание трехмерной графической модели структуры (чертежа);
 - задание параметров материалов.
2. Решение электродинамической задачи, включающее:
 - задание граничных условий в структуре;

- определение и калибровка портов;
- задание параметров решения.

3. Визуализация результатов решения, включающая:

- задание формата выходных данных;
- анимация распределения поля и т.д.

HFSS – это мощный пакет программ, который вычисляет многомодовые S-параметры и электромагнитные поля в трехмерных пассивных структурах произвольной формы [20].

Черчение проекта начиналось с прямоугольного параллелепипеда (в англоязычной литературе часто используется термин бокс – коробка, вместо математического термин «параллелепипед»), который играл роль диэлектрической подложки. Боксу задали размеры: $68*21*1$ мм, далее центрировали объект относительно системы координат. Затем создали границу нижнего проводника. Далее был создан микрополосковый фотонный кристалл на верхнем слое подложки: ширина нечетных слоев микрополосков составляла $d_1=3.0$ мм, ширина четных слоев $d_2=1.2$ мм. Длина отрезков микрополоска: $l=4$ мм. После того, как геометрия была готова, приступили к заданию материалов.Использовалось диалоговое окно Material Assignment, для определения типов материалов.

В качестве материала для микрополоскового фотонного кристалла и нижнего проводника использовалась медь, а в качестве диэлектрика выступал ФЛАН с диэлектрической проницаемостью 8.8.

Затем были созданы два порта через которые электромагнитная волна входила в микрополосковый фотонный кристалл и выходила из него. Порт – это поверхность, на которой граничные условия задаются в виде набора собственных волн эквивалентной линии передачи, поперечное сечение которой совпадает с плоскостью порта. По умолчанию принято, что структура полностью находится в проводящем экране без распространения энергии к земляной плоскости или от неё.

Следом задавалась область для анализа: установили частоту решения –

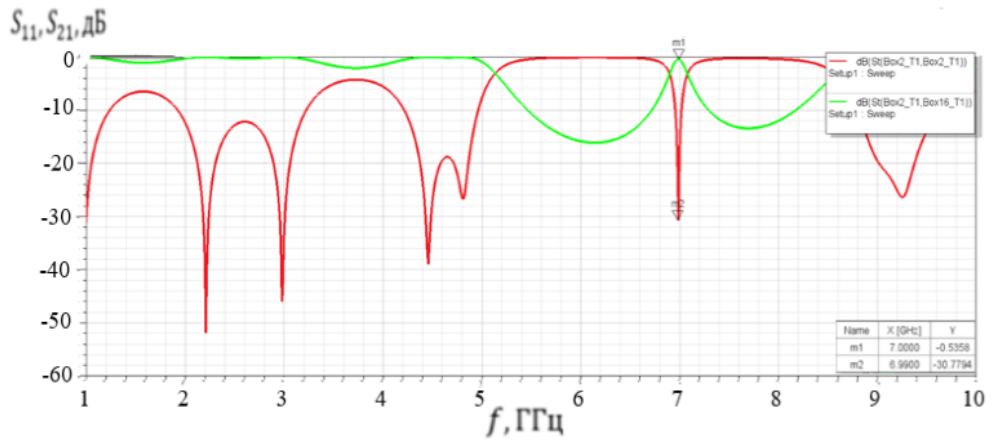


Рисунок 3 – АЧХ 13-слойного фотонного кристалла с центральным нарушенным слоем (красная кривая - коэффициент отражения, зеленая кривая – коэффициент прохождения)

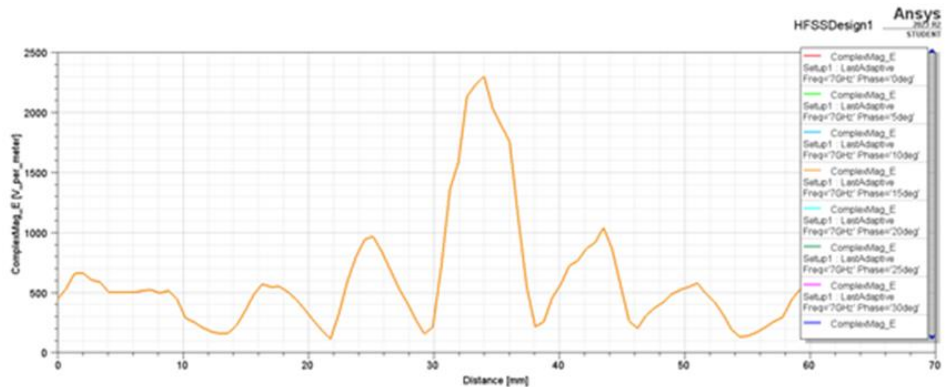


Рисунок 4 – Распространение электрического поля вдоль оси OX на частоте резонанса $f_{рез} = 7.0$ ГГц

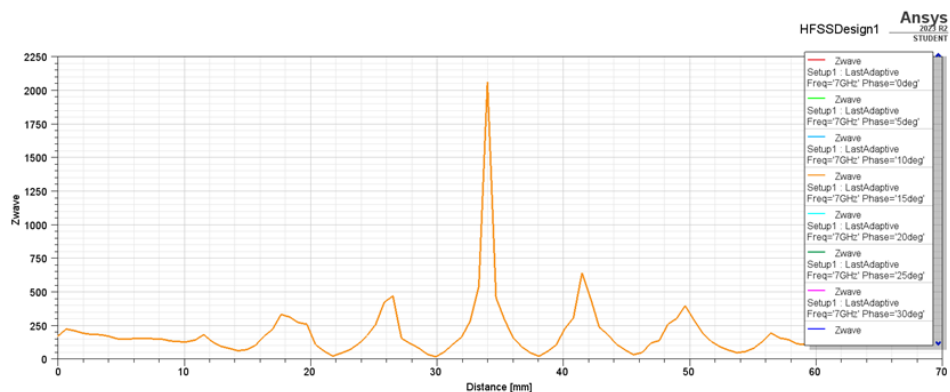


Рисунок 5 – Импеданс вдоль оси OX на частоте резонанса

$$f_{рез} = 7.0 \text{ ГГц}$$

При рассмотрении расчетных зависимостей коэффициентов отражения

и прохождения электромагнитной волны можно прийти к выводу, что они имеют выраженный резонансный характер. Из полученных амплитудно-частотных характеристик видно, что коэффициенты отражения и прохождения зависят от значения электропроводности. Установлено, что при увеличении удельной электропроводности отрезка полосковой линии от $50 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ до $100000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ коэффициент прохождения на частоте дефектной моды увеличивается от -19.5 дБ до -0.6 дБ . При этом частота дефектной моды практически не изменялась.

Кроме этого, показана возможность управления АЧХ микрополоскового фотонного кристалла с нарушением периодичности с помощью изменения удельной электропроводности отрезка полосковой линии в области нарушения.

Девятая глава посвящена экспериментальной части. Полосковая периодическая структура была выполнена на диэлектрической подложке из ФЛАНА [21]. Полосковая линия представляла собой последовательно соединённые металлические полосы с периодически изменяющимися размерами: длина 4 мм, ширина 3 мм и 1.2 мм. Полоски выполнены из меди толщиной 10 мкм. Количество отрезков полосковой линии равно 11.

Для создания нарушения периодичности была увеличена длина центрального слоя до 8 мм [22].

Для исследования возможности управления АЧХ фотонного кристалла были выполнены расчёты при различных значениях величины тока I , протекающего через n-i-p-i-n-структуру в области нарушения периодичности фотонного кристалла [22].

В соответствии с результатами расчёта был создан макет микрополоскового СВЧ фотонного кристалла с использованием лазерного маркера, представленный на рисунке 6.

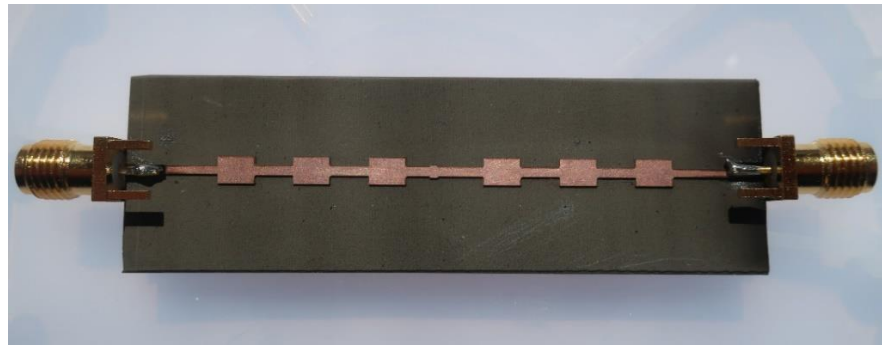


Рисунок 6 – Экспериментальный макет микрополоскового СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности

Эксперимент проводился на пластине ФЛАНА (рисунок 7) размером 68*20 мм.

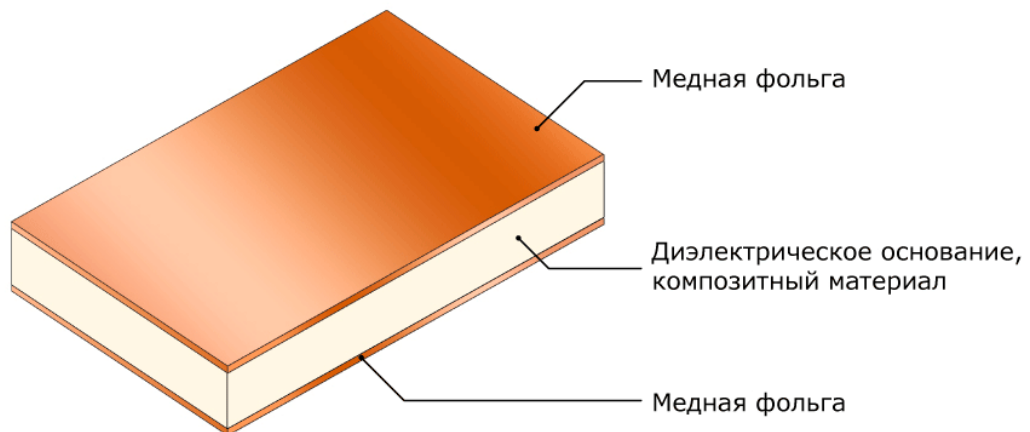


Рисунок 7 – Структура ФЛАНА

Как следует из результатов эксперимента, представленных на рисунке 8, в запрещённой зоне микрополоскового СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности, возникает дефектная мода на частоте $f=7.056$ ГГц, что совпадает с результатами численного моделирования.

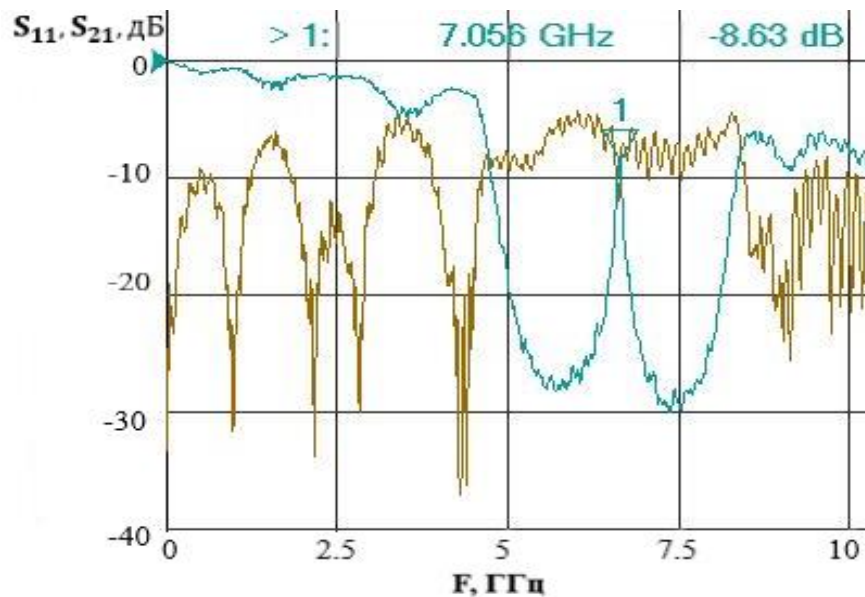


Рисунок 8 – Экспериментальная АЧХ фотонного кристалла с увеличенной длиной центрального отрезка микрополосковой линии

Кроме этого, была рассмотрена структура с выжженным центральным слоем. На амплитудно-частотной характеристике данного микрополоскового фотонного кристалла (рисунок 9) в запрещённой зоне возникала дефектная мода на частоте $f=7.39 \text{ ГГц}$.

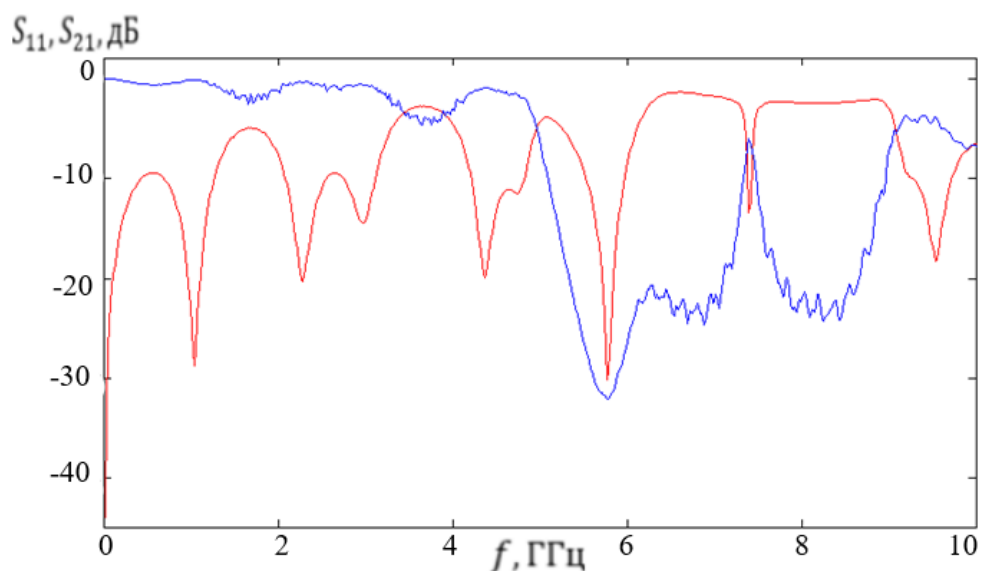


Рисунок 9 – Экспериментальная АЧХ фотонного кристалла с увеличенной длиной центрального отрезка микрополосковой линии с выжженным центральным слоем

Таким образом, способ создания микрополосковых СВЧ фотонных кристаллов с помощью лазерного маркера подходит для изготовления микрополосковых фотонных кристаллов, но требует подбор режима для создания топологии с щадящим режимом для ФЛАНа.

Кроме этого, топология микрополоскового фотонного кристалла была создана при помощи метода фотолитографии (рисунок 10).

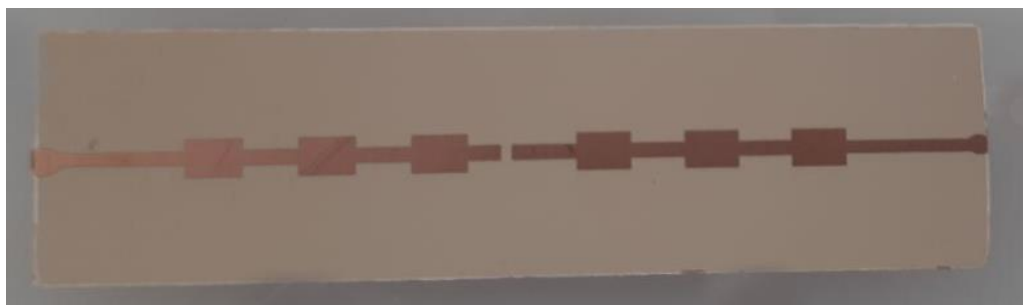


Рисунок 10 – Экспериментальный макет микрополоскового СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности, созданный при помощи метода фотолитографии

После проведения процесса фотолитографии к топологии микрополоскового фотонного кристалла были припаяны вывода и p-i-n-диод (таблица 1, рисунок 11) для дальнейшего управления амплитудно-частотными характеристиками СВЧ ФК.

Таблица 1 – Результаты измерений

U, В	I, мА
0.39	0.01
0.42	0.02
0.44	0.05
0.48	0.11
0.53	0.34
0.60	1.53

Продолжение таблицы 1

0.65	3.36
0.71	7.53
0.80	19.17
0.86	30.86
0.90	41.00
1.00	64.8
1.06	81.3
1.10	91.2

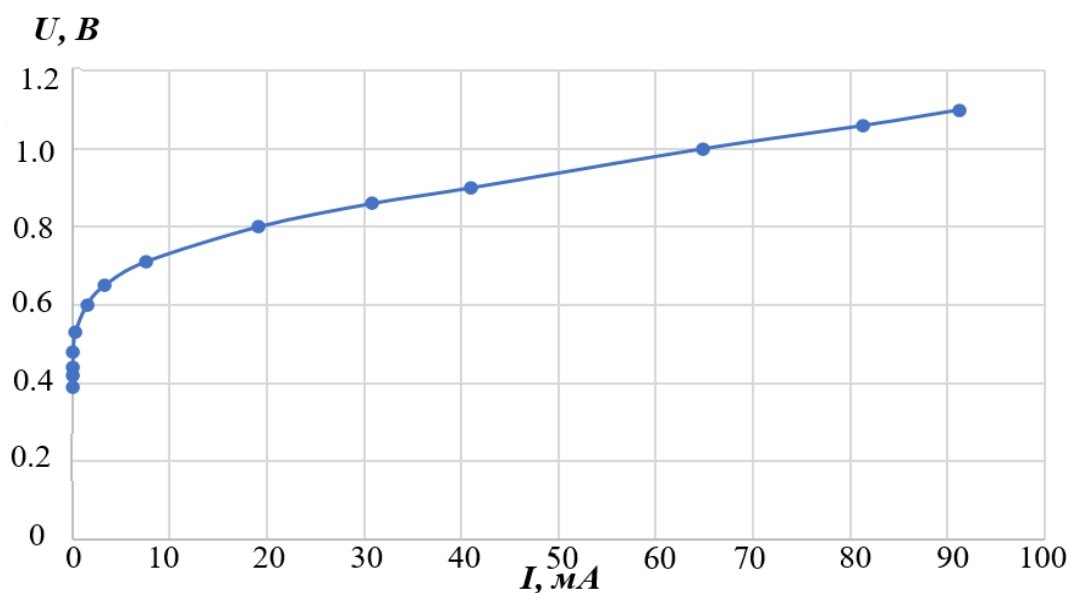


Рисунок 11 – ВАХ n-i-p-i-n-диода

Показана возможность управления АЧХ микрополоскового фотонного кристалла с нарушением периодичности при воздействии управляющего тока на отрезок полосковой линии в области нарушения.

Установлено, что при увеличении силы тока отрезка полосковой линии от 0.01 мА до 91.2 мА коэффициент прохождения на частоте дефектной моды увеличивается от -30.14 дБ до -5.91 дБ.

В ходе выполнения магистерской работы были получены следующие результаты:

Подобраны и изучены литературные источники по теме исследования.

Представлены результаты исследования и выявления особенностей взаимодействия сверхвысокочастотного излучения с фотонными кристаллами в микрополосковом исполнении, содержащими в качестве нарушенного центрального слоя полупроводниковый материал и n-i-p-i-n-структуру.

Рассмотрены основные свойства фотонных кристаллов, представляющих собой микрополосковую структуру, содержащую различные толщины полоскового проводника.

Исследованы частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения микрополосковых фотонных кристаллов с периодически изменяющейся шириной или длиной микрополоска и содержащими нарушения в виде центрального слоя, содержащим полупроводниковый материал и n-i-p-i-n-структуру. Исследовано влияния оптического излучения на некоторые характеристики микрополоскового фотонного кристалла, а именно рассмотрены зависимости коэффициентов отражения и прохождения от величины оптического сигнала.

Произведены расчеты с помощью метода матриц передачи в среде MathCad. В методе матриц передачи система делилась на ячейки, и поле в каждой такой ячейке представляло собой комбинацию полей в соседних ячейках. Таким образом, может была определена матрица передачи, которая связывала поля на противоположных сторонах структуры. Главное преимущество данного метода состоит в том, что коэффициенты пропускания и отражения определяются напрямую из вычислений.

В рамках проведения исследования микрополосковых СВЧ фотонных кристаллов с изменяемой проводимостью полоска была создана модель с помощью компьютерного моделирования в среде трехмерного электродинамического моделирования Ansoft HFSS. Кроме этого, был выполнен расчёт АЧХ микрополоскового фотонного кристалла с нарушением периодичности с изменяемой удельной электропроводностью отрезка полосковой линии в области нарушения. Из полученных амплитудно-

частотных характеристик видно, что коэффициенты отражения и прохождения зависят от значения электропроводности. Установлено, что при увеличении удельной электропроводности отрезка полосковой линии от $50 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ до $100000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ коэффициент прохождения на частоте дефектной моды увеличивался от -19.5 дБ до -0.6 дБ . При этом частота дефектной моды практически не изменялась.

В соответствии с результатами расчёта был создан макет микрополоскового СВЧ фотонного кристалла с использованием лазерного маркера. Как следует из результатов эксперимента, в запрещённой зоне микрополоскового СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности, возникает дефектная мода на частоте $f=7.056 \text{ ГГц}$, что совпадает с результатами численного моделирования.

Кроме этого, была создана модель микрополоскового СВЧ фотонного кристалла при помощи метода фотолитографии. Установлено экспериментальным путем, что при увеличении силы тока отрезка полосковой линии от 0.01 мА до 91.2 мА коэффициент прохождения на частоте дефектной моды увеличивался от -30.14 дБ до -5.91 дБ .

Таким образом, в ходе выполнения магистерской работы показана возможность управления АЧХ микрополоскового фотонного кристалла с нарушением периодичности с помощью изменения удельной электропроводности отрезка полосковой линии и силы тока в области нарушения.

Закономерности, расписанные и описанные в рамках выполнения выпускной квалификационной работы, могут быть интересны при разработке, основанных на фотонных кристаллах, элементов СВЧ-схем и высокочувствительных методов измерений электрофизических параметров нанометровых металлических, полупроводниковых и диэлектрических материалов, а также структур, используемых в микро-, нано- и СВЧ-электронике [24].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Физика работы полупроводниковых приборов в схемах СВЧ – Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 1999 376 с.
2. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Горлицкий В.О. Волноводный фотонный кристалл, выполненный в виде диэлектрических матриц с воздушными включениями - Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 2. С.65-70
3. 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
4. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Лабораторные работы «Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов» (учебное пособие)– Саратов: Электронное издание Саратов. ун-та, 2014. – 32 с.
5. 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
6. Беляев Б.А., Лексиков А.А., Сержантов А.М., Шабанов В.Ф. Физические основы создания электрически управляемых микрополосковых устройств – Известия высших учебных заведений. Физика, 2008, №9, С. 36-45.
7. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Куликов М.Ю. Микрополосковый р-і-п-диодный СВЧ-выключатель – Известия вузов. Радиоэлектроника, 2011, Т.54, №4, С.51-54
8. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях – «Советское радио», 1972г. -232 с.

9. Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и узлов СВЧ, Москва, Советское радио, 1976, С.10-43
10. Ковалева И.С. Конструирование и расчет полосковых устройств СВЧ, Москва, Советское радио, 1974, С.10-81
11. Проектирование полосковых устройств СВЧ (учебное пособие) – УГТ, 2001 г.
12. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Феклистов В.Б., Вениг С.Б. Измерение параметров полупроводников, микро- и наноструктур на СВЧ (учебное пособие)– Саратов: Электронное издание Сарат. ун-та, 2012. – 55 с.
13. Названов В.Ф. Фотонные кристаллы в примерах и задачах. – Саратов, изд-во ООО «Новый ветер», 2015. – 114 с.
14. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В.// СВЧ фотонные кристаллы–новая разновидность периодических структур в радиоэлектронике (учебное пособие) - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2016. — 84 с.
15. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. — 184 с.
16. А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, О. М. Рузанов, И. О. Тимофеев Резонансные особенности в разрешенных и запрещенных зонах сверхвысокочастотных коаксиальных брэгговских структур с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением - Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 1, стр. 29-41.
17. Хелзайн Дж. Пассивные и активные цепи СВЧ – М.: Радио и связь, 1981
18. Полупроводниковые диоды и схемы – 9. p-i-n-диоды// Х.Олсон
19. Мительман Ю.Е. Проектирование антенных систем в ANSOFT HFSS – Учебное электронное текстовое издание

Подготовлено кафедрой высокочастотных средств радиосвязи и телевидения – Екатеринбург, 2012 – 49с.

20. С.Е. Банков, А.А. Курушин, В.Д. Разевиг // Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS – Москва, 2004

21. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Постельга А.Э., Пономарев Д.В. Определение параметров тонких полупроводниковых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов// Доклады Академии Наук. Т. 443, № 5, Апрель 2012, С. 564-566

22. А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, Н.П. Рыбкина Микрополосковые СВЧ фотонные кристаллы с изменяемой проводимостью полоска // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей одиннадцатой Всероссийской научной школы-семинара/ под ред. Проф. Ал.В. Скрипаля- Изд-во «Саратовский источник», 2024.

23. Машкина Е.С., Бормонтовв Е.Н. Литографические процессы в технологии твердотельной электроники// Учебно-методическое пособие для ВУЗов, 2013. – 37с.

24. Усанов Д.А., Скрипаль А.В Измерение электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения- Учебное пособие для студ. фак. Нано- и биомедицинских технологий. – Саратов, СГУ, 2007. - 84 с.

