

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

«Микрополосковые фотонные кристаллы с характеристиками,
управляемыми $p-i-n$ -диодами»

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 411 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Наумова Александра Александровича

Научные руководители

профессор, д.ф.-м.н

А.В. Скрипаль

доцент, к.ф.-м.н.

Д.В. Пономарев

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

Д.А. Усанов

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов 2016

Введение

Фотонный кристалл — это материал, структура которого характеризуется периодическим изменением диэлектрической проницаемости материала в разных пространственных направлениях.

Одномерный фотонный кристалл, в СВЧ-диапазоне, может быть реализован с помощью волноводов имеющих диэлектрическим заполнение, и микрополосковых линий передачи с периодически изменяющейся структурой.

Из-за периодического изменения диэлектрической проницаемости материала, можно получить разрешённые и запрещённые зоны для энергий фотонов, такие же, как в полупроводниковых материалах, в которых наблюдаются разрешённые и запрещённые зоны для энергий носителей заряда.

Для разработки современных телекоммуникационных систем, приемопередающих устройств и контрольно-измерительного оборудования для проведения неразрушающих ВЧ бесконтактных измерений электрофизических параметров материалов и структур, используемых в микро-, нано-, и СВЧ-электронике важное практическое значение имеет исследование сверхвысокочастотных фотонных кристаллов. По сравнению с уже существующими методами измерения параметров материалов в СВЧ-диапазоне на данный момент разработан ряд методов с использованием СВЧ-фотонных кристаллов. При изменении параметров нарушения периодичности фотонного кристалла происходит сдвиг «окна прозрачности» по оси частот. Таким образом определяя толщину или электропроводность тонких нанометровых металлических пленок, а так же комплексную диэлектрическую проницаемость жидких и твердых диэлектриков.

Целью бакалаврской работы является разработка и исследование микрополоскового фотонного кристалла с характеристиками, управляемыми с помощью $p-i-n$ -диодных структур.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы бакалаврской работы, сформулирована цель работы.

В первом разделе проведен анализ современного состояния исследований фотонных кристаллов в СВЧ - диапазоне.

Во втором разделе представлена теоретическая модель, которая позволит рассчитывать коэффициенты отражения и прохождения СВЧ-излучения. Представлены результаты компьютерного моделирования спектров прохождения одномерных микрополосковых фотонных кристаллов при изменении геометрических размеров и электрофизических параметров микрополосковой линии передач, воздушных зазоров и подложки фотонного кристалла, а так же результаты моделирования фотонного кристалла с нарушением периодичности микрополосковой линии передач, путем изменения длины третьего воздушного зазора.

Что бы рассчитать коэффициент пропускания и отражения электромагнитной волны через микрополосковый фотонный кристалл в квазистатическом приближении использовалась матрица передачи \mathbf{T} четырехполюсника сложной структуры, которая имеет вид:

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

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

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

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

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

Здесь d_i — длина i -го отрезка, γ_i — постоянная распространения электромагнитной волны в i -м отрезке $r_{i,i+1} = (\rho_{i+1})/\rho_i$, где ρ_i — волновое сопротивление i -го отрезка структуры, рассчитываемое по формуле:

$$\rho = \frac{377 \cdot h}{\sqrt{\varepsilon} \cdot W \cdot \left(1 + 1,735 \cdot \varepsilon^{-0,0724} \cdot \left(\frac{W}{h} \right)^{-0,836} \right)}. \quad (4)$$

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 \mathbf{T} :

$$D = \frac{1}{|T[1,1]|^2}. \quad (5)$$

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

$$R = |S[1,1]|^2. \quad (6)$$

элементы, которой связаны с элементами матрицы передачи \mathbf{T} соотношением:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S[1,1] & S[1,2] \\ S[2,1] & S[2,2] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{T[2,1]}{T[1,1]} & \frac{T[1,1] \cdot T[2,2] - T[1,2] \cdot T[2,1]}{T[1,1]} \\ 1 & \frac{T[1,1]}{T[1,2]} \\ \frac{1}{T[1,1]} & -\frac{T[1,2]}{T[1,1]} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

В ходе компьютерного моделирования рассматривалась микрополосковая фотонная структура, состоящая из тринадцати последовательно соединенных чередующихся отрезков микрополосковой линии передачи с периодически изменяющимся сопротивлением полоска. Структура такого микрополоскового фотонного кристалла представлена на рис. 1

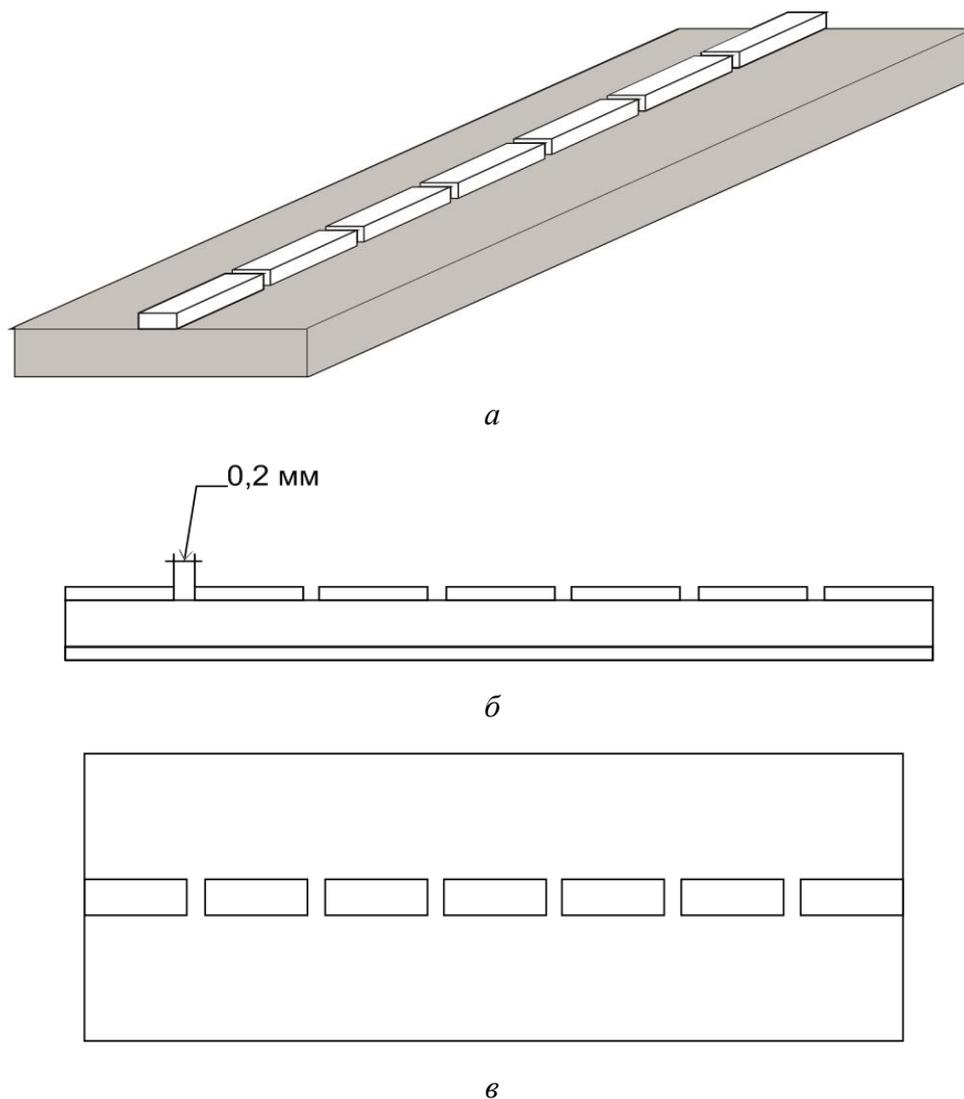


Рис. 1 Микрополосковая фотонная структура: *a* - 3D модель *б* - вид сбоку; *в* - вид сверху

Структура имеет зазоры размером 0.2 мм, в слое полоскового проводника. Подложка, на которой располагается структура выполнена из поликора (Al_2O_3 , диэлектрическая проницаемость $\epsilon=9.6$). Ширина полоскового проводника составляла 1 мм, толщина диэлектрической подложки — 1 мм.

В микрополосковую фотонную структуру было введено нарушение путем изменения длины 3 зазора до 0.5 мм, туда помещался $p-i-n$ диод. Длина 1-го и 7-го отрезков полоскового проводника составляла 9.25 мм, а длина 2, 3, 4, 5 и 6-го отрезков полоскового проводника составляла 8 мм, длина зазоров 1-го, 2-го и с 4-го по 6-ой, с воздушным заполнением, составляла 0.2 мм. Предполагалось, что сопротивление нагрузки на входе и выходе фотонной структуры составляло 50 Ом.

Изменения ширины, толщины, длины полоска и диэлектрической проницаемости подложки приводят к смещению частотной зависимости коэффициента прохождения по оси частот. При увеличении ширины полоска от 0.5 до 1.25 мм частотная зависимость коэффициента прохождения смещается влево по оси частот на 0.71 ГГц, как показано на рис. 2. Но при увеличении толщины полоска от 5 до 100 мкм частотная зависимость коэффициента прохождения смещается вправо по оси частот на 0.21 ГГц. Увеличивая длину полоска, от 3 до 10 мм частотная зависимость коэффициента прохождения смещается влево по оси частот на 11.1 ГГц, а также происходит уменьшение зоны пропускания и уменьшение запрещенной зоны.

При изменении диэлектрической проницаемости подложки от 2.1 до 10 смещается влево по оси частот на 6.86, однако такое изменение диэлектрической проницаемости подложки приводит не только к смещению частотной зависимости, но и к уменьшению ширины зоны пропускания и запрещенной зоны.

Изменения толщины подложки и изменения длину зазора приводят к изменению ширины запрещенной зоны и пиков пропускания. Однако увеличение толщины подложки приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны, а увеличение длины зазора приводит к увеличению запрещенной зоны.

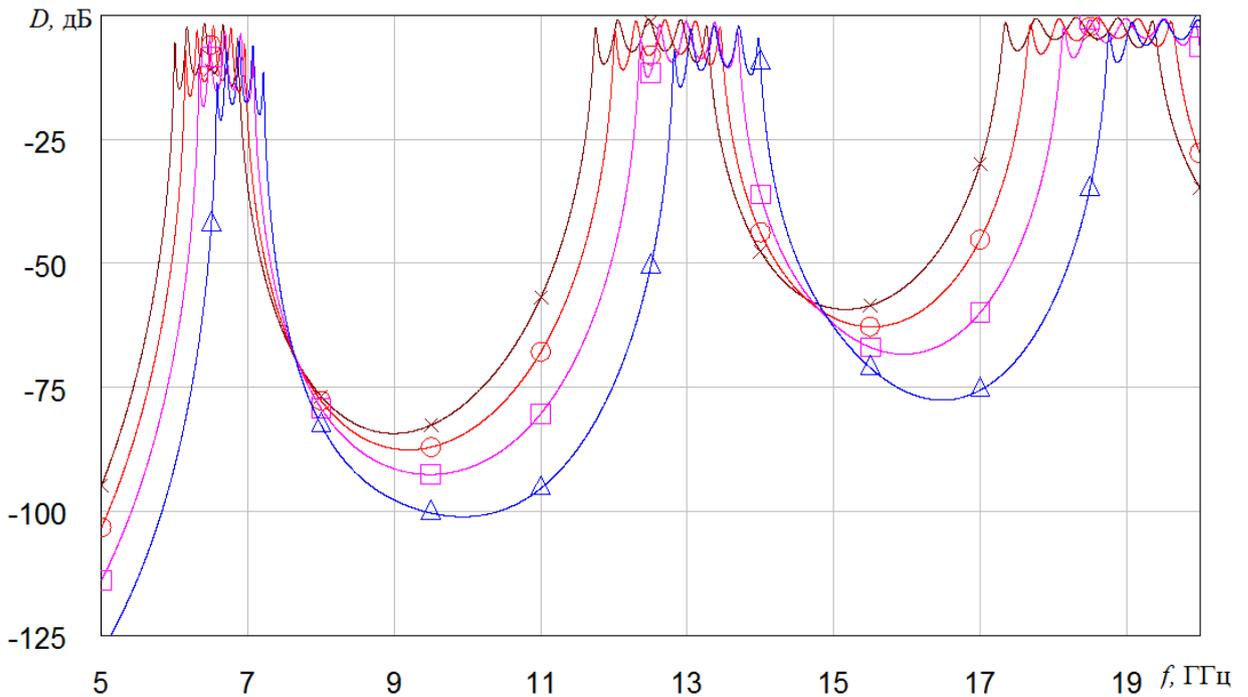


Рис. 2 Частотная зависимость коэффициента прохождения при различной ширине полоска (W), Δ – $W=0.5$ мм; \square – $W=0.75$ мм; \circ – $W=1$ мм; \times – $W=1.25$ мм.

Подача прямого напряжения на $n-i-p-i-n$ -структуру, приводящее к инжекции свободных носителей заряда в i -область, моделировалось изменением сопротивления i -области от высоких (1..10 кОм) до низких значений ($R=1..3$ Ом).

При внесении неоднородности в структуру мы наблюдаем уменьшение коэффициента прохождения, а при добавлении в эту неоднородность $n-i-p-i-n$ -структуры с малым сопротивлением ($R=1..3$ Ом) наблюдаем возникновение окна пропускания в запрещенной зоне, это обуславливается инверсным режимом работы $n-i-p-i-n$ -структуры: при увеличении сопротивления коэффициент прохождения уменьшается, тем самым обеспечивая управление характеристиками микрополоскового фотонного кристалла $n-i-p-i-n$ -структурой, что и наблюдается на рис. 3.

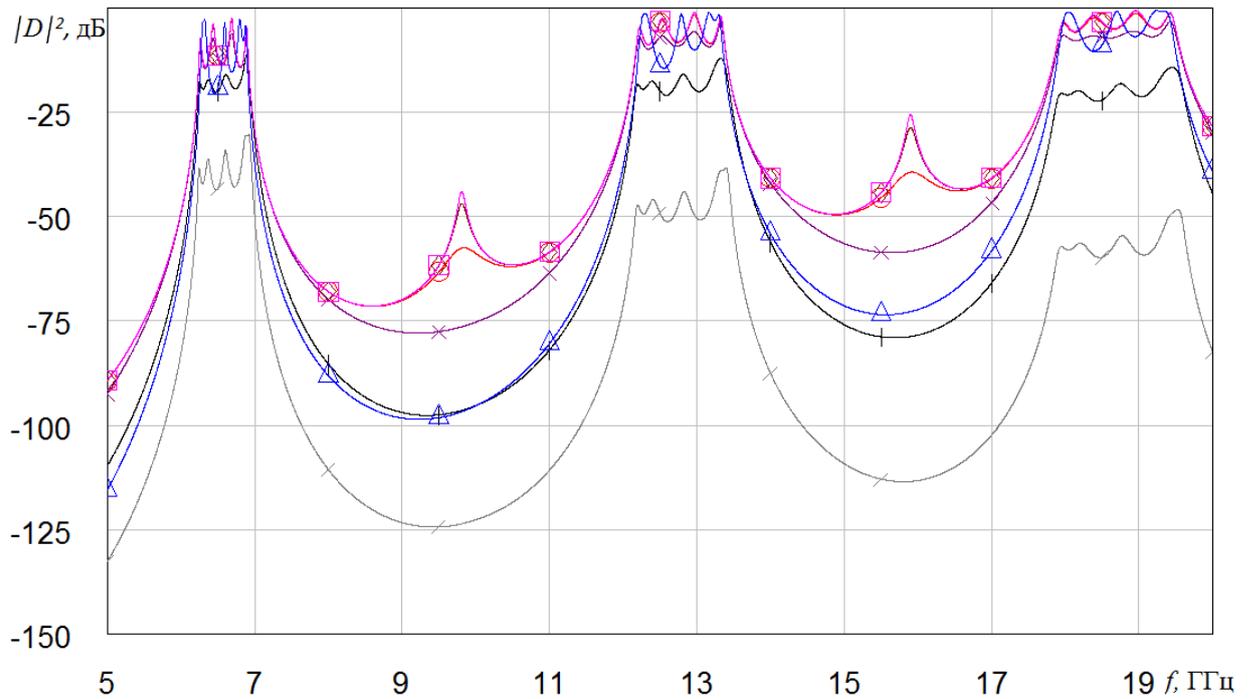


Рис. 3 Частотная зависимость коэффициента прохождения с внесением неоднородности в структуру, путем изменения длины третьего воздушного зазора и добавления в эту неоднородность $p-i-n$ -диодной структуры и изменяя сопротивление i -области (R),
 Δ –нарушение без $p-i-n$ -диода; \square - $R = 1$ Ом; \diamond – $R = 2$ Ом; \circ - $R = 10$; \times - $R = 100$ Ом;
 $|$ - $R = 1000$ Ом; $/$ - $R = 10000$ Ом.

В данной структуре фотонного кристалла при внесении неоднородности в виде изменения длины и ширины зазора микрополосковой линии изменяется число резонансов в разрешенных зонах, однако резонансная особенность в виде образованию окна пропускания в запрещенной зоне не наблюдается.

В третьем разделе приведено экспериментальное исследование микрополоскового фотонного кристалла. Исследование спектра пропускания фотонного кристалла проводилось на анализаторе цепей серии PNA Agilent Technologies

Проведено сравнения результатов компьютерного моделирования и эксперимента, который демонстрирует хорошее совпадение с экспериментом. Разница в размере запрещенных зон и зоны прохождения обусловлена тем, что в компьютерной модели рассматривался идеальный случай микрополоскового фотонного кристалла. В результатах эксперимента

присутствуют погрешности связанные с точностью напыления микрополосков, а так же созданием точных геометрических размеров и электрофизических параметров подложки и зазоров. Из-за этого график, получившийся в ходе эксперимента, смещен по оси частот относительно графика построенного в ходе компьютерного моделирования.

На рис. 4 представлена частотная зависимость коэффициента прохождения с заполнением в неоднородности фотонного кристалла. При изменении диэлектрической проницаемости материала помещенного в неоднородность фотонного кристалла наблюдается уменьшение прохождения.

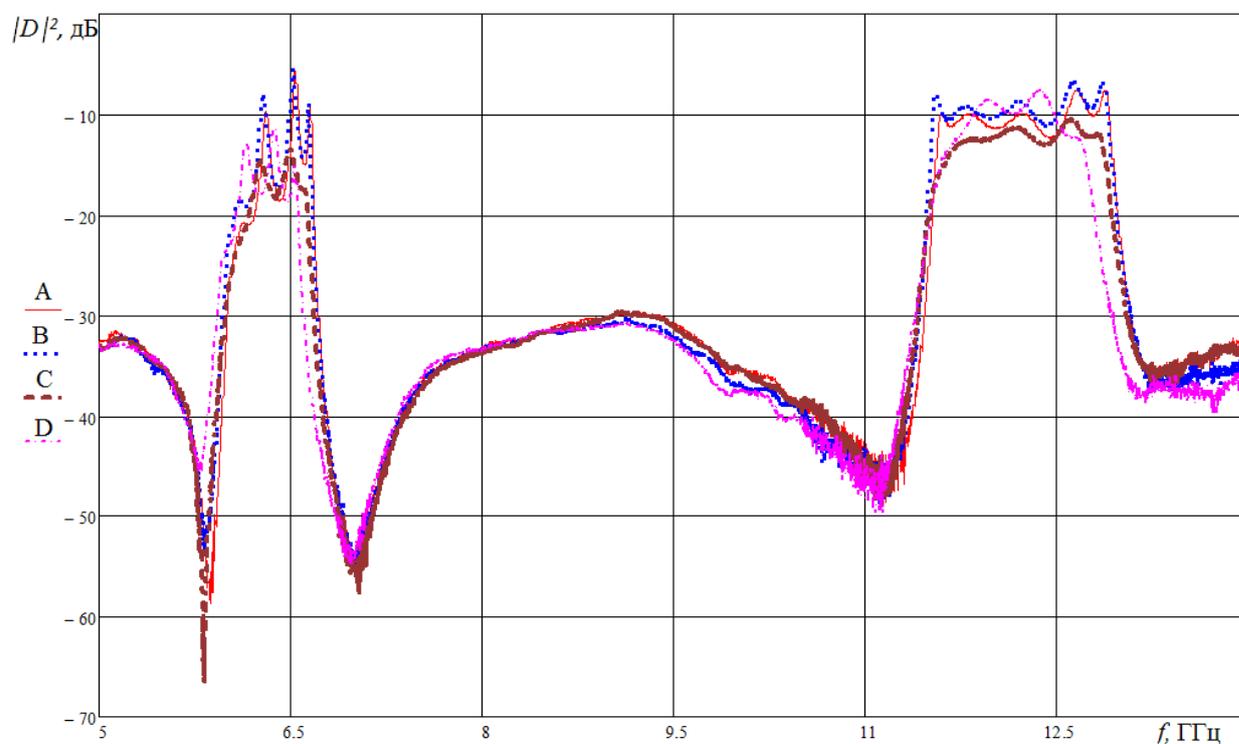


Рис. 4 Частотная зависимость коэффициента прохождения с заполнением в неоднородности А – воздух; В – вакуумное масло; С – вода; D – спирт

Заключение

Таким образом, в ходе выполнения бакалаврской работы:

1. Разработан микрополосковый фотонный кристалл СВЧ-диапазона с характеристиками, управляемыми $p-i-n$ -диодными структурами.

2. Проведено компьютерное моделирование спектра прохождения одномерных микрополосковых фотонных кристаллов СВЧ-диапазона без нарушения и с нарушением периодичности в виде измененной длины третьего зазора, а также дополнительно введенного в неоднородность $p-i-n$ -диода.
3. Установлено, что создание нарушения периодичности в одномерных волноводных фотонных кристаллах в виде изменения толщины центрального слоя и введения неоднородности в виде $p-i-n$ -диода при изменении сопротивления i -области приводит к появлению узкого «окна прозрачности» в «запрещенной зоне» микрополоскового фотонного кристалла. При этом частотное положение и форма «окна прозрачности» определяются длинами и электрофизическими параметрами слоев, формирующих нарушение периодичности, и позицией исследуемых слоев внутри слоя, нарушающего периодичность.
4. Исследованы частотные зависимости коэффициента прохождения с изменением физических и электрофизических параметров микрополоскового фотонного кристалла.
5. Установлена возможность управления спектрами прохождения и отражения. Изменяя геометрические и электрофизические параметры микрополоскового фотонного кристалла, можно управлять запрещенными и разрешенными зонами микрополосковой фотонной структуры.
6. Экспериментально получены и исследованы частотные зависимости коэффициента прохождения микрополоскового фотонного кристалла с однородной периодической структурой и со структурой, имеющей нарушение в виде измененной длины 3-го зазора.
7. Экспериментально исследовано влияние заполнения нарушенного слоя на частотные зависимости коэффициентов прохождения и отражения фотонного кристалла.

Список использованных источников

1. Усанов Д.А., Никитов С.А. Скрипаль А.В., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Измерение параметров твердых и жидких диэлектриков на сверхвысоких частотах с использованием микрополосковых фотонных структур// Радиотехника и электроника. 2012, том. 57. № 2. С. 230–236.
2. Пономарев Д.В. Особенности взаимодействия СВЧ-излучения с фотонными кристаллами содержащими в качестве неоднородностей диэлектрические, полупроводниковые и металлические включения: диссертация ... кандидата физико-математических наук Саратов. гос. ун-т им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, 2012
3. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., М.Ю.Куликов, Пономарев Д.В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения электрофизических свойств жидких диэлектриков: Учеб. Пособие для студентов факультета nano- и биомедицинских технологий, обучающихся по магистерской программе «Электроника и наноэлектроника» – Саратов, 2014. –35 с.: ил. Электронное издание.