

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

**ВОЛНОВОДНЫЕ СВЧ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ НА ОСНОВЕ
МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2251 группы
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
института физики
Логинова Андрея Александровича

Научные руководители

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

подпись, дата

Скрипаль А.В.
инициалы, фамилия

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

подпись, дата

Латышева Е.В.
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

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

подпись, дата

Скрипаль А.В.
инициалы, фамилия

Саратов 2024

Введение

Одной из основных областей применения диэлектрических резонаторов в технике СВЧ является создание малогабаритных фильтров. Большинство их разновидностей построено на основе диэлектрических резонаторов с высокой диэлектрической проницаемостью при возбуждении низших типов колебаний.

Наиболее часто волноводно- диэлектрические полосно - пропускающие фильтры создают путём каскадного включения волноводно- диэлектрического резонатора реализуют фильтры с амплитудно- частотными характеристиками, близкими к максимально плоской либо чебышевской. В случае двухмодовых волноводно- диэлектрических резонаторов представляет интерес построение фильтров с эллиптической амплитудно- частотной характеристикой.

Ярко выраженная резонансная особенность на амплитудно - частотных характеристиках (АЧХ) может возникнуть в результате взаимодействия электромагнитного излучения с волноводным фотонным кристаллом с нарушением периодичности.

Фотонные структуры – представляют собой структуры с периодическим изменением диэлектрической проницаемости в пространстве, с периодом сравнимым с длиной распространяющегося в них электромагнитного излучения

Периодические СВЧ-структуры, называемые брэгговскими СВЧ-структурами или фотонными СВЧ-кристаллами, привлекают интерес исследователей для многочисленных приложений в различных диапазонах частот в связи с перспективой создания таких устройств как волноводы, устройства, позволяющие осуществлять управление тепловым излучением, лазеры с пониженным порогом накачки, перестраиваемые резонаторы,

направленные ответвители, миниатюрные антенны, согласованные нагрузки, различные типы СВЧ-фильтров.

Системы направленной передачи энергии электромагнитных волн в СВЧ-диапазоне могут быть созданы как на основе экранированных линий передачи: металлических волноводов, коаксиалов, так и открытых линий передачи: микрополосковых, копланарных, щелевых линий.

Микрополосковая линия состоит из диэлектрической подложки, на одну сторону которой нанесен тонкий металлический проводник прямоугольного сечения — полосок, а на другую — сплошное токопроводящее покрытие, играющее роль экрана. Коаксиальная линия также содержит 2 направляющих элемента — центральный проводник круглого сечения и экран.

На основе сочетания экранированных и открытых линий передачи могут быть созданы структуры, характеризующиеся разрешёнными и запрещёнными зонами в частотном диапазоне, обладающие низкими потерями и высокой степенью технологичности их изготовления.

Целью настоящей выпускной квалификационной работы является исследование взаимодействия электромагнитного излучения с волноводными фотонными кристаллами СВЧ-диапазона на основе металлодиэлектрических структур.

В настоящей работе были исследованы характеристики СВЧ волноводных фотонных кристаллов на основе волноводно-щелевой линии передачи, на основе металлодиэлектрической структуры, частично заполняющей поперечное сечение волновода, а также фотонных кристаллов, включающих отрезки задельного волновода при различных параметрах.

1 Компьютерное моделирование спектров отражения и прохождения электромагнитной волны, взаимодействующей с фотонным кристаллом на основе металлодиэлектрической структуры

2 Компьютерное моделирование спектров отражения и прохождения электромагнитной волны, взаимодействующей с фотонным кристаллом на основе металлодиэлектрической структуры, частично заполняющей поперечное сечение волновода

В настоящей работе в различных диапазонах частот исследовались характеристики одномерного СВЧ волноводного фотонного кристалла на основе металлодиэлектрической структуры, частично заполняющей поперечное сечение волновода. В центре поперечного сечения прямоугольного волновода (23×10 мм) в Е-плоскости размещался отрезок диэлектрической пластины, на которую были нанесены металлические полосы с периодически изменяющимися геометрическими размерами.

СВЧ- фотонный кристалл на основе металлодиэлектрической структуры смоделирован в виде поликоровой (Al_2O_3 , $\epsilon = 9,6$) пластины толщиной 1 мм, состоящей из чередующихся элементов длиной 7 мм, высотой 2.5 мм и элементов длиной 7.6 мм, высотой 1 мм.

Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик исследуемой структуры с различными геометрическими размерами элементов было проведено при помощи системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS.

Общий вид СВЧ- фотонного кристалла на основе металлодиэлектрической структуры, частично заполняющей поперечное сечение волновода, в системе электродинамического моделирования и проектирования HFSS представлен на рис. 1.

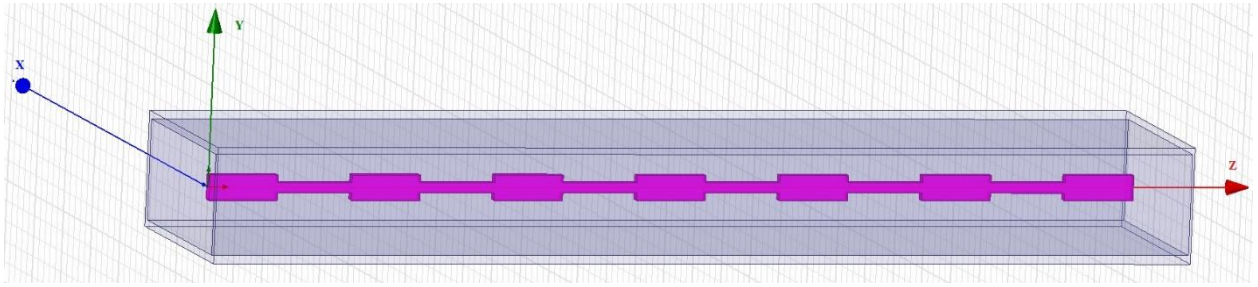
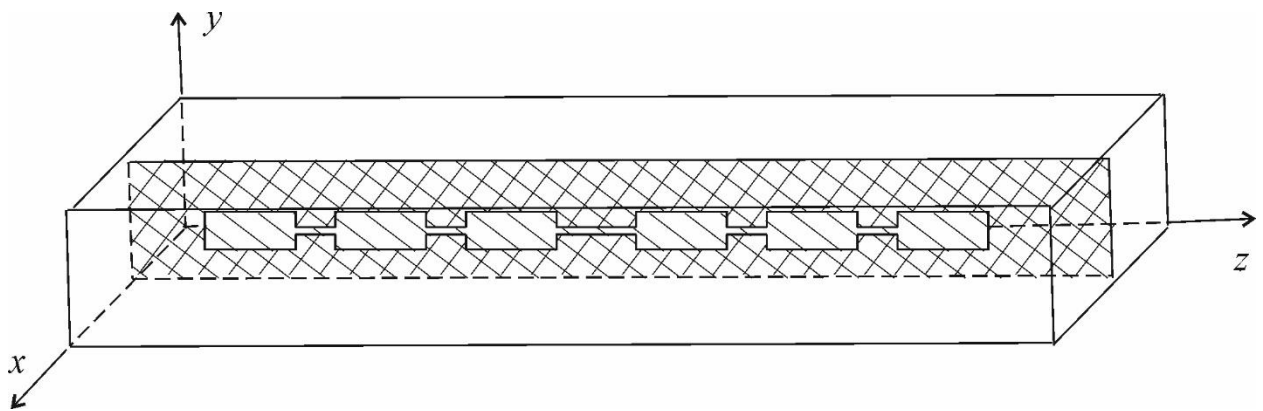


Рис. 1 Модель фотонного кристалла в системе электродинамического моделирования и проектирования HFSS


Данная структура исследовалась в диапазоне частот 8-12 ГГц. Длина элементов фотонного кристалла варьировалась в диапазоне от 3.8 мм до 15.2 мм, высота элементов – в диапазоне от 2.5 мм до 5 мм.

Общий вид СВЧ- фотонного кристалла на основе металлодиэлектрической структуры представлен на рис. 2. В нижней части рисунка вынесены размеры периодической структуры без нарушения периодичности (рис. 2а) и с нарушением периодичности (рис. 2б).

Параметры фотонного кристалла с нарушением периодичности подбирались таким образом, чтобы запрещенная зона охватывала большую часть трехсантиметрового диапазона длин волн, а пик пропускания располагался посередине запрещенной зоны.



 – подложка из ФЛАНА;

 – структура из меди, расположенная на подложке

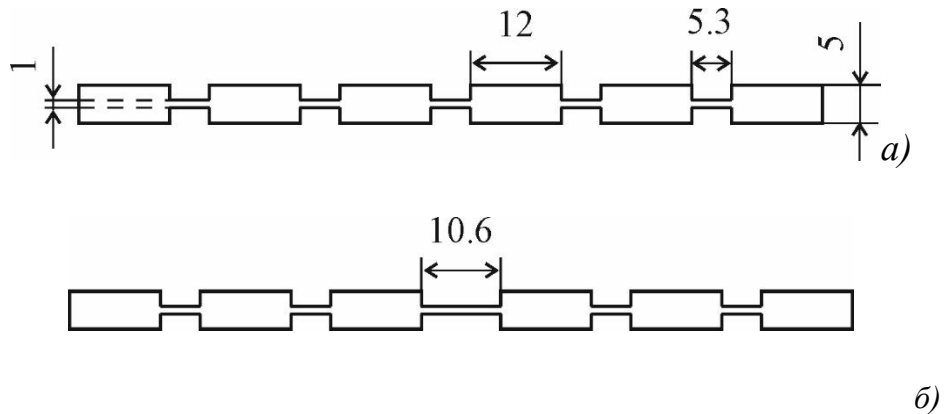


Рис.2 Схематичное изображение исследуемой структуры фотонного кристалла на основе металлodieлектрической структуры:

a) – без нарушения периодичности;

б) – с нарушением периодичности

Для расчета частотных зависимостей коэффициентов отражения $R(\omega)$ и прохождения $D(\omega)$ электромагнитной волны при ее взаимодействии с исследуемой структурой в диапазоне частот 8 – 12 ГГц была использована система электродинамического моделирования и проектирования HFSS.

В ходе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований показана возможность возникновения дефектной моды в запрещенной зоне фотонного кристалла с нарушением периодичности.

При изменении размера нарушения происходит изменение частоты дефектной моды и формы амплитудно-частотной характеристики фотонного кристалла.

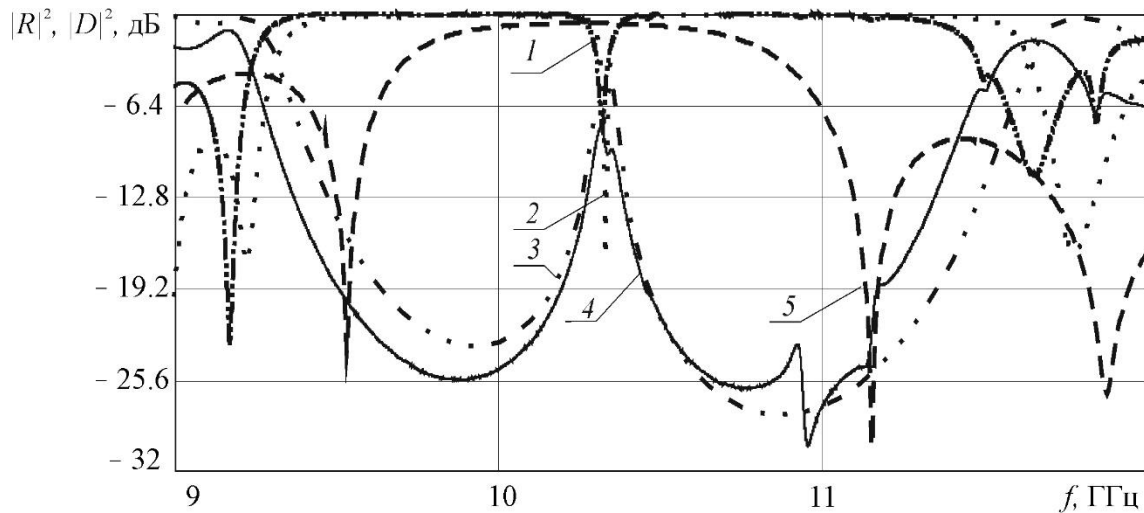


Рис. 3 Экспериментальные (кривые 2, 4) и расчетные (кривые 1, 3) частотные зависимости $|D|^2$ (кривые 3, 4) и $|R|^2$ (кривые 1, 2) для фотонного кристалла на основе диэлектрической пластины с металлическим покрытием, состоящим из чередующихся элементов длиной 7 мм, высотой 2.5 мм и элементов длиной 7.6 мм, высотой 1 мм с нарушением периодичности длиной 10.6 мм. Кривая 5 – расчетная частотная зависимость $|D|^2$ для структуры без нарушения.

Продemonстрировано, что при увеличении диэлектрической проницаемости пластины ($\epsilon = 10$) резонансное состояние в фотонной запрещенной зоне сдвигается в область более низких частот.

На следующем этапе работы были исследованы АЧХ для отрезка подобной линии передачи, который размещался в центре поперечного сечения в Е-плоскости прямоугольного волновода 7.11×3.56 мм. Волноводный фотонный кристалл выполнен на основе поликоровой (Al_2O_3 , $\epsilon = 9.6$) пластины толщиной 1 мм, состоящей из чередующихся элементов длиной 7 мм, высотой 2.5 мм и элементов длиной 7.6 мм, высотой 1 мм. На одну сторону пластины было нанесено металлическое покрытие, выполненное из титана толщиной 0.012 мм.

Заключение

Проведено компьютерное моделирование и экспериментальное исследование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны от волноводных фотонных кристаллов на основе металлодиэлектрической структуры, частично заполняющей поперечное сечение волновода, состоящих из 11 и 13-ти элементов. Показано:

- увеличение коэффициента отражения на частотах минимума, при нанесении металлического покрытия на диэлектрическую пластину, состоящую из чередующихся элементов, расположенную в E -плоскости прямоугольного волновода;
- частотное положение и форма примесной моды колебаний определяются размерами и электрофизическими параметрами создаваемого нарушения;
- хорошее количественное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными.

Проведено компьютерное моделирование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны от волноводных фотонных кристаллов на основе волноводно-щелевой линии передачи, состоящих из 11-ти элементов. Показано:

- возможность возникновения дефектной моды в запрещенной зоне фотонного кристалла с нарушением периодичности;
- изменение частоты дефектной моды и формы амплитудно-частотной характеристики фотонного кристалла при изменении размера нарушения;

Список использованных источников

1 Podgorski A., Macphie R. H. Quarter – wavelength Coupled Dielectric Plate Resonators for High Selectivity Te_{10} - mode Filters – IEEE Trans. - 1980. - Vol. MTT – 28, № 4. – P. 405 – 408.

2. Коробкин В.А., Хижняк Н. А. Волноводно — диэлектрический резонанс диэлектрического образца в прямоугольном волноводе// Изв. вузов, СССР. Сер. Радиофизика. - 1978. Т. - 21, №4 С. 558 — 565.

3. Коробкин В.А., Пятак Н.И., Ющенко А.Г. Расчёт резонансных частот некоординатного параллелепипеда в стандартном волноводе// Проектирование и применение радиоэлектронных устройств на диэлектрических волноводах и резонаторах: Тез. докл. и сообщений. - Саратов, изд — во СГУ. - 1983. - С. 65 — 66.

4. Повышение собственной добротности волноводно — диэлектрических резонаторов на прямоугольных волноводах/ В. А Коробкин, В. Я. Двадненко, В. Н. Великоцкий, и др.// Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. - 1982. Вып. - 8. С. 26 — 28.

5. Kach A. Der Quasidielektrische Resonator – ein Neuartiges Bauelement für Mikrowellen Filter// AEU. - 1978. Bd. 32, № 10. - S. 409 – 416.

6. Kobayashi Y., Yoshida S. Bandpass Filters Using TM_{010} Dielectric Rod Resonators// In IEEE MTT – S Int. Microwave Sump. Dig. - New York. - 1978. - 233 – 235.

7. Makimoto M., Jamashita S. Compact Bandpass Filters Using Stepped Impedance Resonators// Proc. IEEE. - 1979. - V. 67, №1. - P. 16 – 19.

8. Coupling and Tuning of Trapped – Mode Microwave Resonators/E. Bonek, M. Knecht. G. Magerle et al// AEU. - 1978. Bd. 32, H. 5/6. - S. 209 – 214.

9. Коробкин В. А., Пятак Н. И., Груцьяк В. И. Невзаимное возбуждение волноводно — диэлектрического резонанса поперечно — намагниченного ферритового образца в прямоугольном волноводе//Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. - 1979. - Вып. 1. - С. 17 — 23.

10. Бергер М. Н., Капилевич Б. Ю., Ручкан Л. Н. СВЧ фильтр с магнитной перестройкой на запердельном волноводе//Радиотехника. - 1981. - Т. 36, №8. - С. 75 — 77.

11. Капилевич Б. Ю., Бергер М. Н., Ищук А. А. Двухмодовый волноводно — диэлектрический резонатор с запердельными связями//Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. - 1983. - Т. 26, №7. - С. 881 — 887.

12. Электродинамический анализ волноводно — диэлектрических фильтров/В. П. Ляпин, М. Б. Мануилов, Г.П. Синявский и др.//Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. - 1986. - Т. 29, №7. - С. 809 — 815.

13. Капилевич Б. Ю., Безуглова О. Н. Машинный синтез запердельных волноводно — диэлектрических фильтров//Тез. докл. Всесоюз. науч. - техн. конф. «Развитие и внедрение новой техники радиоприёмных устройств». Горький. - 1981. С. 83.

14. Ильченко М. Е. Проектирование СВЧ твердотельных фильтров//Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. - 1986.- Вып. 1. - С. 13 — 16.

15. Капилевич Б. Ю., Трубехин Е. Р. Аналитический синтез запердельных волноводно — диэлектрических фильтров//Радиотехника и Электроника. - 1983. - Т. 28, № 12. - С. 2359 — 1365.

16. Капилевич Б. Ю. Волноводные — диэлектрические фильтры. - М.: Связь, 1980. - 137с.

17. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С. Измерения нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения//ЖТФ. 2006 Т. 76, вып. 5, с. 112–117.

18. Чаплыгин Ю. А., Усанов Д. А., Скрипаль А.В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С. Методика измерения электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения//Известия вузов. Электроника. 2006. № 6. С. 27–35.

19. Kuriazidou C. A., Contopanagos H. F., Alexopolos N. G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials//IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2001. – Vol. 49, N 2. – P. 297–306.

20. Морозов Г. А., Морозов О. Г., Насыбулин А. Р., Севастьянов А. А., Фархутдинов А.Р. Коаксиальные Брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 3. С. 65–70.

21. Силин Р. А., Сазонов В. П. Замедляющие системы. М.: Сов. радио, 1966, 631с.

22. Cohn S. B. Direct-coupled-resonator filters. Proc. IRE. 1957. Vol. 45. Feb. pp. 187–196 .

23. Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopolos N.G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2001. – Vol. 49, N 2. – P. 297–306.

24. Беляев Б. А., Волошин А. С., Шабанов В. Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно — пропускающих фильтров на

одномерных фотонных кристаллах//Доклады Академии Наук. 2005. Т. 403, № 3. С. 319—324.

25. Ozbay E., Temelkuran B., and Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals//Progress in Electromagnetics Research, 2003. Vol. 41, P. 185–209.

26. Gerard W. Burns, I. G. Thayne, J. M. Arnold “Improvement of Planar Antenna Efficiency When Integrated With a Millimetre-Wave Photonic,” in Proc. of European Conference on Wireless Technology, Amsterdam, Netherlands, 11–12th October 2004, P. 229-232.

27. Hsien-Shun Wu, Ching-Kuang C. Tzuang Miniaturized High-Gain Synthetic Rectangular Waveguide Antenna of Near-Omnidirectional Radiation // Proc. of 34-rd European Microwave Conf. (Amsterdam, Netherlands, 12–14-th October 2004). –2004. – Vol. 2. – P. 1189–1192.

28. Усанов Д. А., Горбатов С. С., Кваско В. Ю., Фадеев А. В. Ближнеполевой СВЧ-микроскоп для определения анизотропных свойств диэлектрических материалов// Приборы и техника эксперимента. 2015. № 2. С. 77–83.

29. Yablonovitch E. Photonic Crystals// Journal of Modern Optics. 1994. Vol. 41, no. 2, pp. 173–194.

30. Гуляев Ю. В., Никитов С. А. Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации// Радиотехника. 2003. № 8. С. 26–30.

31. Беляев Б. А., Волошин А. С., Шабанов В. Ф. Исследование добротности резонанса примесной моды в микрополосковой модели одномерного фотонного кристалла//Доклады Академии Наук. 2005. Т. 403, № 3, С. 319—324.

32. Усанов Д. А. Измерение параметров полупроводников, микро-и наноструктур на СВЧ / Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Феклистов В. Б., Вениг С. Б.//учебное пособие – Саратов: Электронное издание Саратов. ун-та, 2012. – 91 с.: ил.

33. Усанов Д. А. Измерение параметров полупроводников, микро-и наноструктур на СВЧ / Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Феклистов В. Б., Вениг С. Б.//учебное пособие – Саратов: Электронное издание Саратов. ун-та, 2012. – 55 с.: ил.

34. Компьютерное моделирование фотонных структур СВЧ-диапазона: учеб. пособие для студентов факультета nano- и биомедицинских технологий, обучающихся по магистерской программе «Электроника и наноэлектроника» / А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, Е. В. Латышева – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2019. – 64 с. : ил. Электронное издание.

35. Скрипаль А.В., Латышева Е.В., Логинов А.А. Волноводные фотонные кристаллы на основе металлодиэлектрических. Саратов, 2024.