

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

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

Кафедра физики твердого тела

**«ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОДНЫХ ФОТОННЫХ
КРИСТАЛЛОВ СВЧ-ДИАПАЗОНА, ВКЛЮЧАЮЩИХ
УЧАСТКИ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА»**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4051 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Института физики

Логинова Андрея Александровича

Научный руководитель

профессор, д.ф. - м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

 15.06.2022
подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф. - м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

 15.06.2022
подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2022

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей выпускной квалификационной работы является исследование взаимодействия электромагнитного излучения с волноводными фотонными кристаллами СВЧ-диапазона, включающими отрезки за предельного волновода при различных параметрах.

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 – это периодические структуры с периодом, сравнимым с длиной распространяющегося в них электромагнитного излучения.

Периодическое изменение как электрофизических свойств, так и геометрических размеров [1, 2] элементов фотонного кристалла приводит к появлению четко выраженного зонного характера спектров отражения и прохождения взаимодействующего с ним электромагнитного излучения, проявляющегося в чередовании разрешенных и запрещенных для распространения электромагнитного излучения различных частотных диапазонов. В случае, когда посредством изменения геометрических размеров и/или электрофизических параметров одного или нескольких элементов

создается нарушение периодичности в фотонной структуре, в запрещенной зоне фотонного кристалла возникает резонансная особенность – узкое «окно прозрачности» с минимальным значением коэффициента отражения [1, 3], называемое также примесной модой колебаний, частотное положение и форма которого определяются размерами и электрофизическими параметрами создаваемого нарушения.

1 Волноводно - диэлектрические резонаторы. Диэлектрические и волноводно — диэлектрические фильтры. Фильтры СВЧ на основе многослойных структур

Отдельный вид металлодиэлектрических резонаторов составляют колебательные системы, содержащие одновременно диэлектрические и металлические элементы с $\epsilon_r = 2 \dots 20$. При этом металлический элемент имеет вид отрезка волновода стандартного сечения, а диэлектрический элемент расположен внутри него в виде локальной диэлектрической неоднородности. Совокупность металлического элемента и диэлектрического элемента в единой конструкции создаёт условия для формирования волновых процессов, зависящих одновременно от параметров диэлектрика и волновода. Наблюдаемые при этом волноводно — диэлектрические резонансы имеют ряд специфичных особенностей, которые зависят от вида конкретных конструкций волноводно — диэлектрических резонаторов. В простейшем случае волноводно — диэлектрический резонатор на основе волновода с распространяющейся волной содержит отрезок прямоугольного или круглого (волновода с диэлектрическим вкладышем, полностью или частично заполняющим поперечное сечение волновода. При полном заполнении затруднительно реализовать колебательные системы с высокими значениями добротности, что обусловлено большими потерями в стенках волноводов. Поэтому более предпочтительны варианты конструкций с диэлектрическими элементами, частично заполняющим поперечное сечение волноводов, или конструкции, образованные двумя диэлектрическими элементами [1]. В последнем случае толщина каждого диэлектрического элемента L_2 должна быть несколько меньше четверти длины волны в заполненном волноводе, а расстояние между диэлектрическим элементом L_{12} удовлетворять соотношению $n\lambda_B/2 < L_{12} < 3n\lambda_B/4$, где $n = 1, 2, \dots, \lambda_B$ — длина волны в незаполненном волноводе.

2 Компьютерное моделирование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны, взаимодействующей с фотонным кристаллом. Математическая модель волноводного фотонного кристалла

Необходимость разработки численных методов, способных точно прогнозировать свойства фотонных кристаллов возникла довольно давно. Можно проследить аналогию между кристаллами в привычном понимании этого слова и фотонными кристаллами, а эвристические интерпретации физики твердого позволяют получить основные физические характеристики фотонных кристаллов. Однако для конструирования фотонного кристалла с теми или иными заданными свойствами необходимо сочетание фундаментальных законов электромагнетизма, математики и сложных методов численного анализа. Численное моделирование рассеяния электромагнитных волн на периодических структурах исследовалось в середине 20 века. С конца 1960-х гг. появление мощных вычислительных инструментов привело к впечатляющим успехам в численном моделировании оптических явлений. Особенно значительные успехи были достигнуты в описании взаимодействия электромагнитного излучения с дифракционной решеткой.

Методы моделирования свойств электрона в кристалле были адаптированы и взяты за основу моделирования первых методов, разработанных для фотонных кристаллов.

Важным моментом было желание физиков твердого тела использовать простые методы, которые уже были тщательно проверены в данной области.

Одним из наиболее широко распространённых типов линий передачи энергии в диапазоне СВЧ является прямоугольный волновод, представляющий собой полую металлическую трубу с прямоугольным поперечным сечением (рис. 4). Поэтому для компьютерного моделирования выбрана структура волноводного фотонного кристалла с отрезком запердельного волновода в качестве нарушения периодичности.

Для расчета коэффициента прохождения и отражения электромагнитной волны в волноводном фотонном кристалле с нарушением в виде отрезка запредельного волновода использовалась матрица передачи T четырехполюсника сложной структуры, представляющего собой каскадное соединение элементарных четырехполюсников с известными матрицами передачи, которые имеют вид:

$$T = \begin{pmatrix} T[1,1] & [1,2] \\ T[2,1] & T[2,2] \end{pmatrix} = (T^0 T_N^i \times \prod_{i=1, i=1}^{N-1, N-1} T_{i, i+1} + 1 \times T_i') \quad (1)$$

где T'_i и $T''_{i, i+1}$ – матрицы передачи четырехполюсников, описывающих соответственно i – тый отрезок и прямое соединение i - того и $(i+1)$ - ого отрезков линии передачи. Выражения для матриц передачи T'_i и $T''_{i, i+1}$ соответствующих элементарных четырехполюсников имеют вид:

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

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

Здесь l_i – длина i - того отрезка, γ_i – постоянная распространения электромагнитной волны в i -том отрезке, $r_{i, j+1} = \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i}$, где ρ_i – волновое сопротивление i - того отрезка коаксиальной линии передачи с диэлектрической проницаемостью заполнения ε , рассчитываемое по формуле:

$$\rho = \frac{2\omega\mu\mu_0\frac{b}{a}}{\sqrt{\omega^2\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0 + j\omega\sigma\mu\mu_0 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}} \quad (4)$$

Постоянная распространения γ_i имеет вид:

$$\gamma_i \gamma_i = \alpha_i \alpha_i + j\beta_i \beta_i. \quad (5)$$

Коэффициенты прохождения и отражения СВЧ мощности определяются через элементы матрицы передачи T по известным соотношениям:

$$D = \frac{1}{[T[1,1]^2] |T[1,1]|^2}, \quad (6)$$

$$R = \frac{[|T[2,1]|]^2}{[|T[1,1]|]^2} \quad (7)$$

Сопротивление нагрузки на входе и выходе фотонной структуры составляло 50 Ом.

Были рассмотрены две структуры: одна состояла из чередующихся слоев диэлектрических материалов с нарушением периодичности в виде запредельного волновода, вторая состояла из чередующихся диэлектрических слоев и слоев, представляющих собой отрезки запредельного волновода.

3 Компьютерное моделирование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения волноводного фотонного кристалла при различных размерах участка запердельного волновода и различных параметрах материала запердельного волновода

В численном эксперименте рассматривалась 11-слойная структура чередующихся слоев, четные слои которого выполнены из отрезков фторопласта с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.0$ толщиной $d = 9$ мм, нечетные – из отрезков поликора с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 9.8$, и толщиной $d = 1$ мм. Геометрические размеры слоев подбирались таким образом, чтобы спектры отражения и прохождения взаимодействующего со структурой электромагнитного излучения имели четко выраженный зонный характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Таким образом, в ходе выполнения выпускной квалификационной работы бакалавра была построена математическая модель и проведено компьютерное моделирование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения для периодической 11-слойной структуры с нарушением в виде запердельного волновода с различными геометрическими размерами широкой стенки и узкой стенки, а также при различных значениях диэлектрической проницаемости и толщины материала, заполняющего отрезок запердельного волновода.

Из полученных результатов сделаны следующие выводы:

1) при уменьшении размера узкой стенки запердельного волновода, расположенного в центральном слое волноводного фотонного кристалла, увеличивается частота «окна прозрачности»;

2) при уменьшении размера широкой стенки запердельного волновода, расположенного в центральном слое волноводного фотонного кристалла, уменьшается частота «окна прозрачности»;

3) при увеличении значений диэлектрической проницаемости материала запердельного волновода, расположенного в центральном слое волноводного фотонного кристалла, уменьшается ширина запрещенной зоны фотонного кристалла;

4) при уменьшении значений толщины запердельного волновода, расположенного в центральном слое волноводного фотонного кристалла, увеличивается частота «окна прозрачности»;

Кроме того, в ходе выполнения выпускной квалификационной работы бакалавра было проведено компьютерное моделирование частотных зависимостей коэффициентов отражения и прохождения для периодической 11-слойной структуры, состоящей из периодически расположенных отрезков фторопласта и отрезков запердельного волновода без нарушения периодичности. Из полученных результатов сделаны следующие

ВЫВОДЫ:

5) при уменьшении толщины периодически расположенных отрезков фторопласта СВЧ фотонного кристалла на основе отрезков запердельного волновода коэффициент прохождения увеличивается;

6) при уменьшении размера широкой стенки отрезков запердельного волновода СВЧ фотонного кристалла коэффициент прохождения уменьшается.

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. Magerletall// 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 нано- 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. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Мерданов М. К., Евтеев С. Г. Волноводные фотонные структуры на резонансных диафрагмах// Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63, № 1. С. 65–71.

36. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., Латышева Е.В. Многопараметровые измерения эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных сверхвысокочастотных фотонных кристаллов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 1. С. 45–53]

37. М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятыхшев, Л. Г. Гассанов и др. Диэлектрические резонаторы. - М.: Радио и связь, 1989. - 328с.

38. Дьяченко П. Н. Метаматериалы и фотонные кристаллы. – Самара, 2012. – 63с.

