

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

Кафедра физики твердого тела

**АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса

по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Агейкина Никиты Алексеевича

Научные руководители

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Д. В. Пономарев

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2020

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкие перспективы при разработке современных радиоэлектронных устройств и систем открываются благодаря применению метаматериалов – искусственно созданных материалов, которые позволяют модифицировать новые свойства, в отличие от природных материалов. Применения метаматериалов охватывают области, в которых используется электромагнитное излучение – военная промышленность, космические системы, медицина. Фотонные кристаллы используются в качестве фильтров, резонаторов, усилителей.

Подклассом метаматериалов являются фотонные кристаллы. Изменяя параметры периодичности и создаваемых нарушений фотонных кристаллов, можно осуществлять управление шириной и глубиной фотонной запрещенной зоны, а также частотными положениями «окон прозрачности».

Исследование взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ диапазона с фотонными кристаллами является актуальным.

Целью магистерской работы являлось выявление особенностей амплитудно-частотных характеристик одномерных фотонных кристаллов и распределения напряженности электрического поля электромагнитной волны в структурах одномерных СВЧ фотонных кристаллов, в случае наличия и отсутствия нарушения периодичности.

Для достижения этой цели:

- при помощи системы автоматизированного проектирования High Frequency Structural Simulator (HFSS) было выполнено построение электродинамической конфигурации фотонных волноводных кристаллов;
- выполнено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик и распределение амплитуды напряженности электрического поля одномерных волноводных фотонных кристаллов в СВЧ-диапазоне.

- проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов, а также их сравнение с результатами компьютерного моделирования.

Выпускная квалификационная работа содержит 4 главы:

- 1) КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ
- 2) РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОДОМЕРНОГО ВОЛНОВОДНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛА С ЭЛКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ СВЧ ДИАПАЗОНА
- 3) РЕЗУЛЬТАТЫ ЭПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СВЧ ВОЛНЫ В ОДНОМЕРНОМ ВОЛНОВОДНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ
- 4) РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОДОМЕРНОГО КОАКСИАЛЬНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛА С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ СВЧ ДИАПАЗОНА

Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик одномерных волноводных фотонных кристаллов.

Для теоретического исследования были выбраны следующие модели одномерных волноводных фотонных кристаллов:

1. 7-слойная структура, состоящая из чередующихся нечетных слоёв фторопласта размером 23x10x4.15 мм (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=2$) и чётных слоев воздуха размером 23x10x9 мм (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=1$). Все слои полностью заполняли поперечное сечение волновода. Фторопласт имел продольный вырез для прохода зонда вдоль фотонного кристалла. Вырез размерностью 1x1x4.15 мм. (Рис.1)
2. В одномерном волноводном фотонном кристалле, описанном в пункте 1, было сделано нарушение в центральном четвертом слое путем уменьшения толщины слоя до 2-ух мм.
3. В одномерном волноводном фотонном кристалле, описанном в пункте 1, было сделано нарушение в центральном четвертом слое путем увеличения толщины слоя до 19.5-ти мм
4. Также были смоделированы подобные модели одномерные фотонные кристаллы, представленные в пунктах 1-3, но без специального выреза.

Исследование фотонных кристаллов по пункту 4 необходимо для сравнения и анализа влияния выреза (щели) на амплитудно-частотную характеристику и напряженность электрического поля.

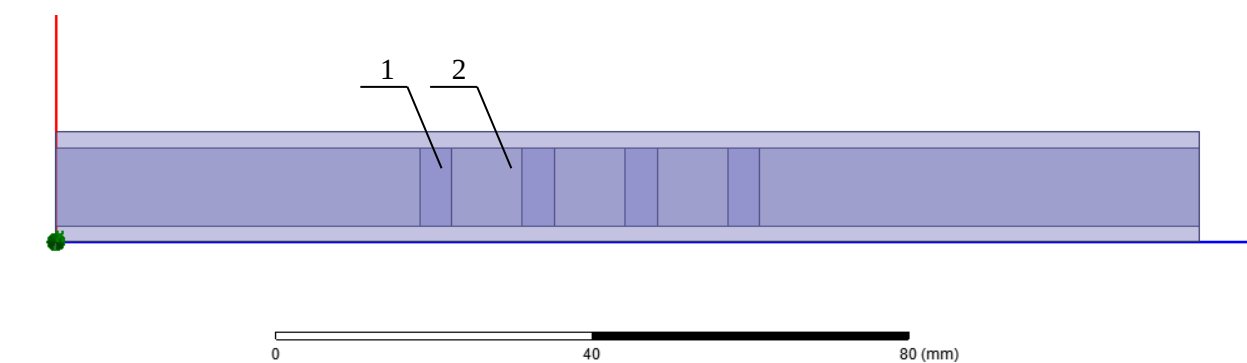


Рис.1. Одномерный волноводный фотонный кристалл: 1- слои фторопласта (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=2$); 2- слои воздуха (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=1$)

Вырез, в слоях фторопласта, представленный на рисунке, предназначался для прохождения зонда, во время измерения распределения электрического поля вышеперечисленных фотонных кристаллов (пункт 1-3).

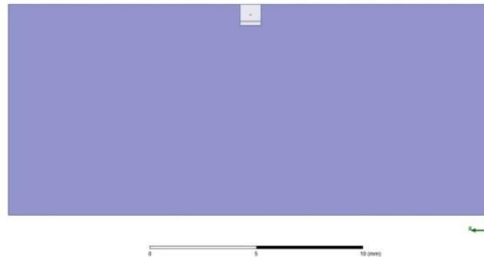


Рис.2. Слой фторопласта с вырезом (щелью)

Для теоретического расчета АЧХ электромагнитной волны и распределения поля вдоль и поперек фотонных кристаллов использовалась программа Ansoft HFSS 13. Расчет программы был использован метод конечных элементов (Finite Element Method).

Рассчитаны теоретически амплитудно-частотные характеристики одномерных фотонных кристаллов по пунктам 1-3. Расчет проводился в диапазоне частот 8-12 ГГц с шагом в 0,005 ГГц для фотонных кристаллов.

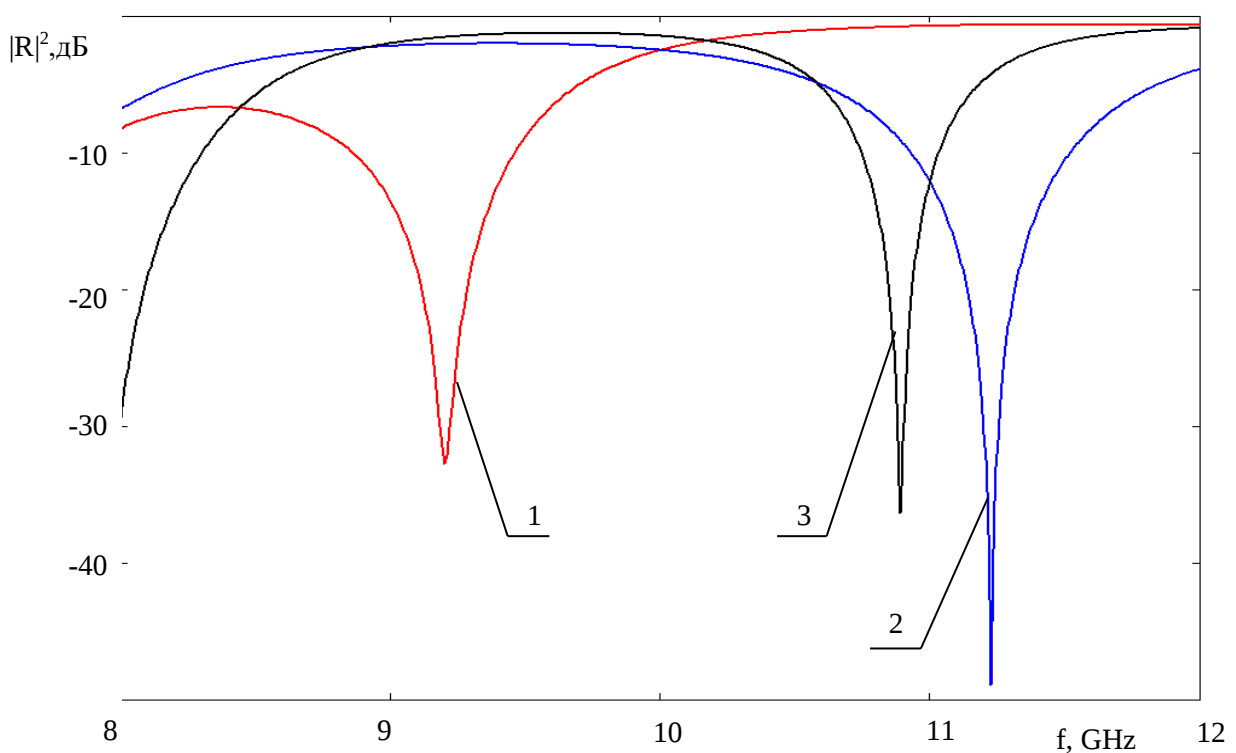


Рис.3. Коэффициенты отражения теоретических моделей с вырезами: 1- фотонный кристалл без нарушения; 2- фотонный кристалл с нарушением в 2мм; 3- фотонный кристалл с нарушением 19.5 мм;

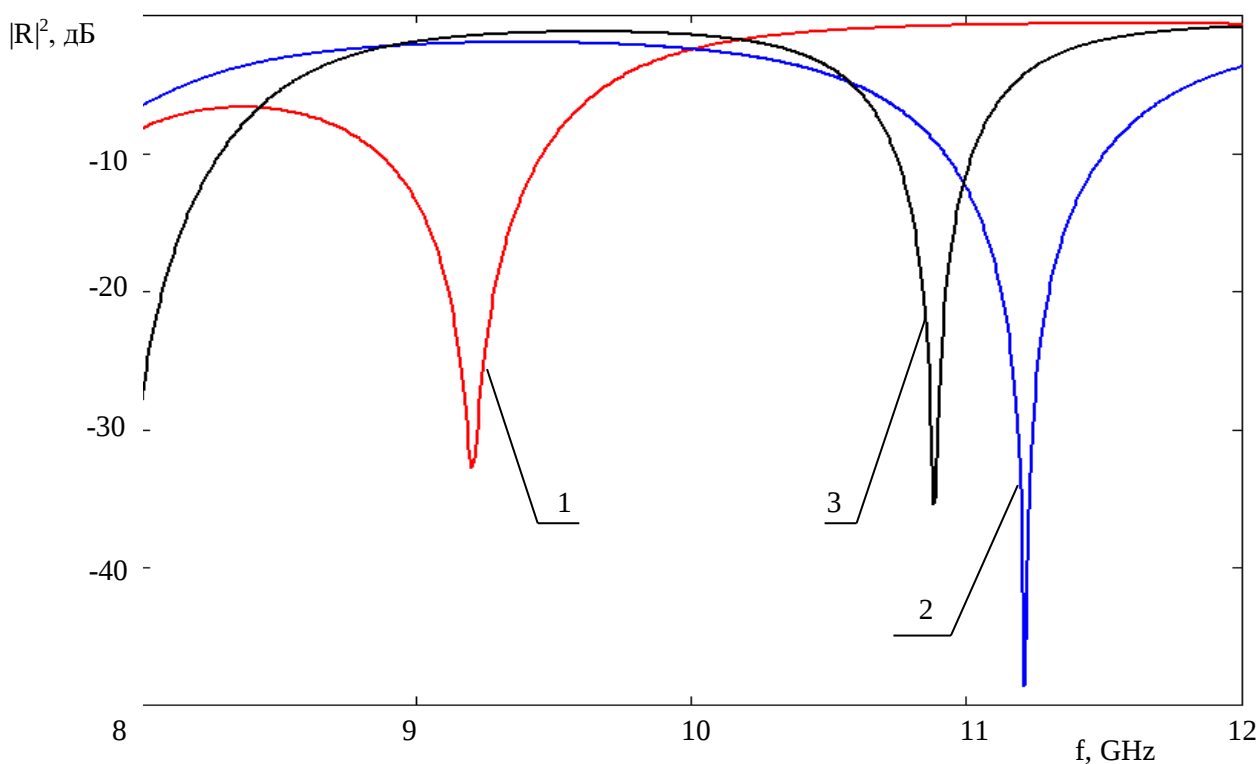


Рис.4. Коэффициенты отражения теоретических моделей без вырезов: 1- фотонный кристалл без нарушения; 2- фотонный кристалл с нарушением в 2мм; 3- фотонный кристалл с нарушением 19.5 мм;

Анализируя теоретические частотные зависимости коэффициентов отражения на рисунках смоделированных одномерных фотонных кристаллов в пунктах 1-3, выявлены резонансные частоты для каждого из фотонных кристаллов соответственно:

- 1) 9.202 ГГц с вырезом (щелью); 9.19 ГГц без выреза (щели)
- 2) 11.225 ГГц с вырезом (щелью); 11.21 ГГц без выреза (щели)
- 3) 10,89 ГГц с вырезом (щелью); 10.88 ГГц без выреза (щели)

Результаты экспериментального исследования амплитудно-частотных характеристик одномерных волноводных фотонных кристаллов с разным типом нарушений.

В ходе эксперимента исследовались модели одномерных волноводных фотонных кристаллов, созданные в соответствии с теоретическими моделями которые были представлены в предыдущей главе (пункты 1-3).

Для измерения амплитудно-частотной характеристики одномерных фотонных волноводных кристаллов использовался векторный анализатор цепей PNA-X Network Analyzer N5242A работающий в диапазоне 10MHz-26.5GHz (Рис.). Предварительна была произведена калибровка.

Одномерные волноводные фотонные кристаллы помещались в волноводно измерительную линию P1-28. Все фотонные кристаллы были расположены на расстоянии 5мм от зонда. Начальное положение зонда было на расстоянии 95мм относительно начала волновода, зонд опущен внутрь волновода на 0.8 мм. Размеры волновода 23x10x146 мм.

По полученным амплитудно-частотным характеристикам, представленные на рисунках 3.2-3.4, выявлены резонансные частоты для каждого одномерного фотонного кристалла, представленные в пунктах 1-3 соответственно: 7.488 ГГц фотонный кристалл без нарушения; 11.241ГГц фотонный кристалл с нарушением; 11.046 ГГц фотонный кристалл с нарушением 19.5 мм

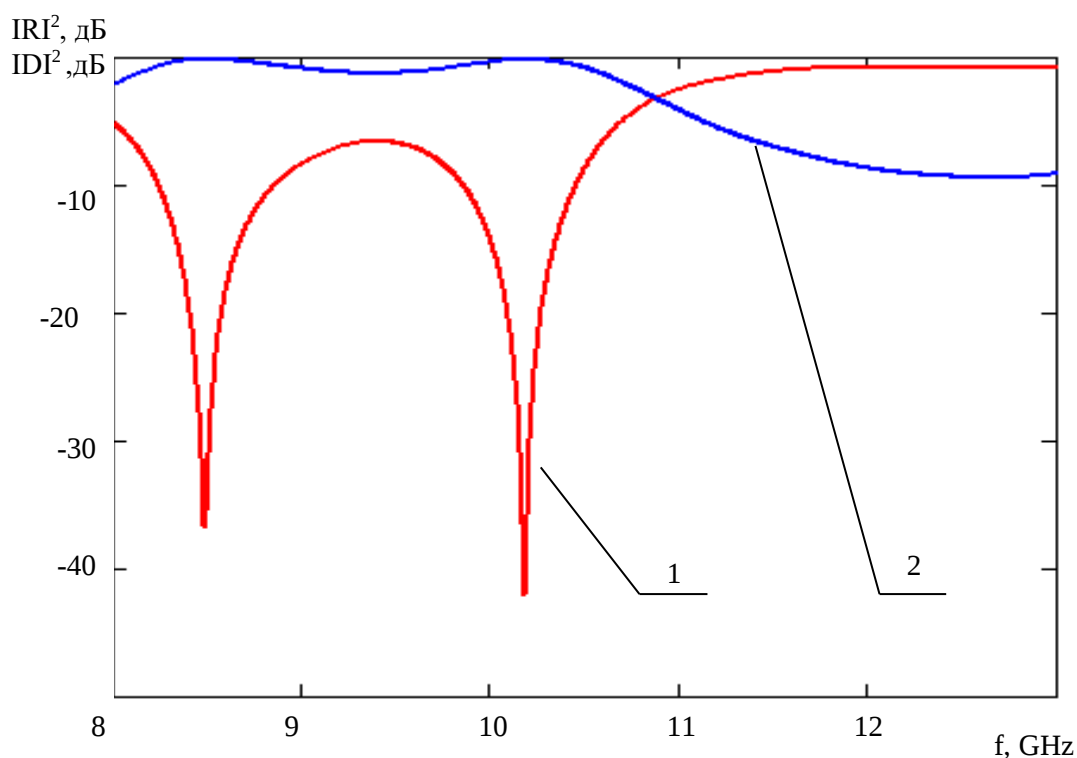


Рис.5. Экспериментальная частотная зависимость коэффициентов отражения (1) и прохождения (2) для одномерного фотонного кристалла без нарушения.

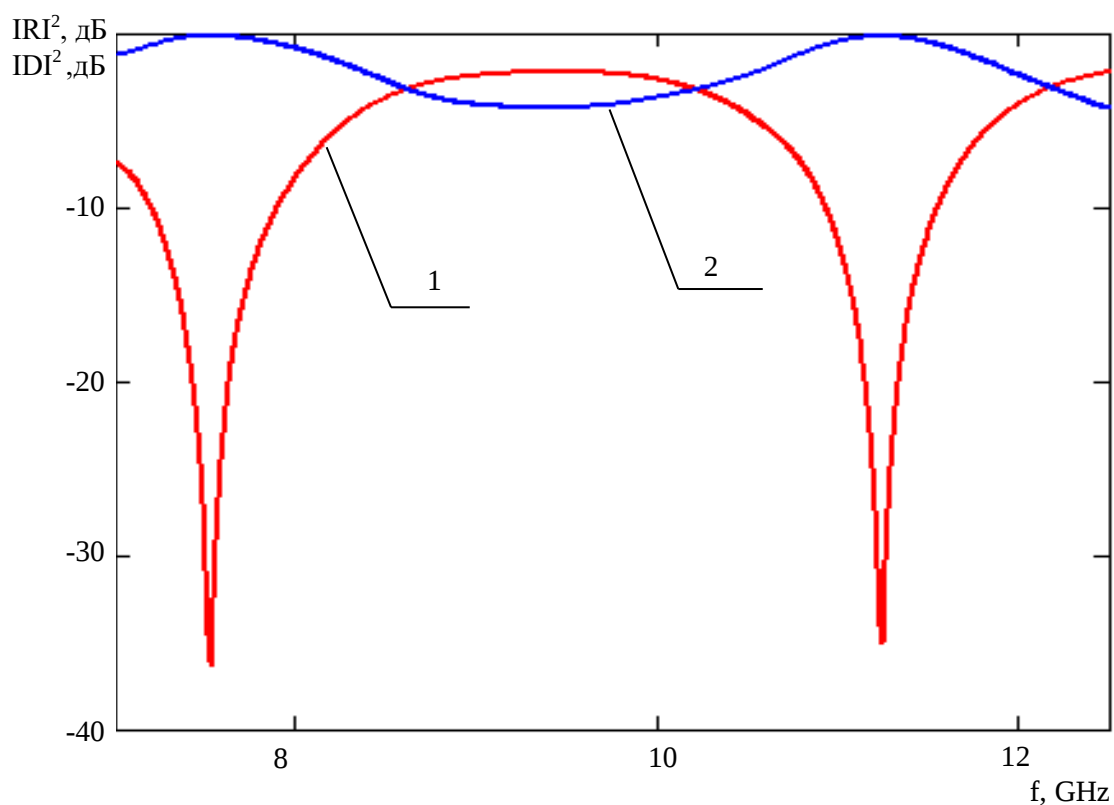


Рис.6. Экспериментальная частотная зависимость коэффициентов отражения (1) и прохождения (2) для одномерного фотонного кристалла с нарушением 2 мм в центральном четвертом слое.

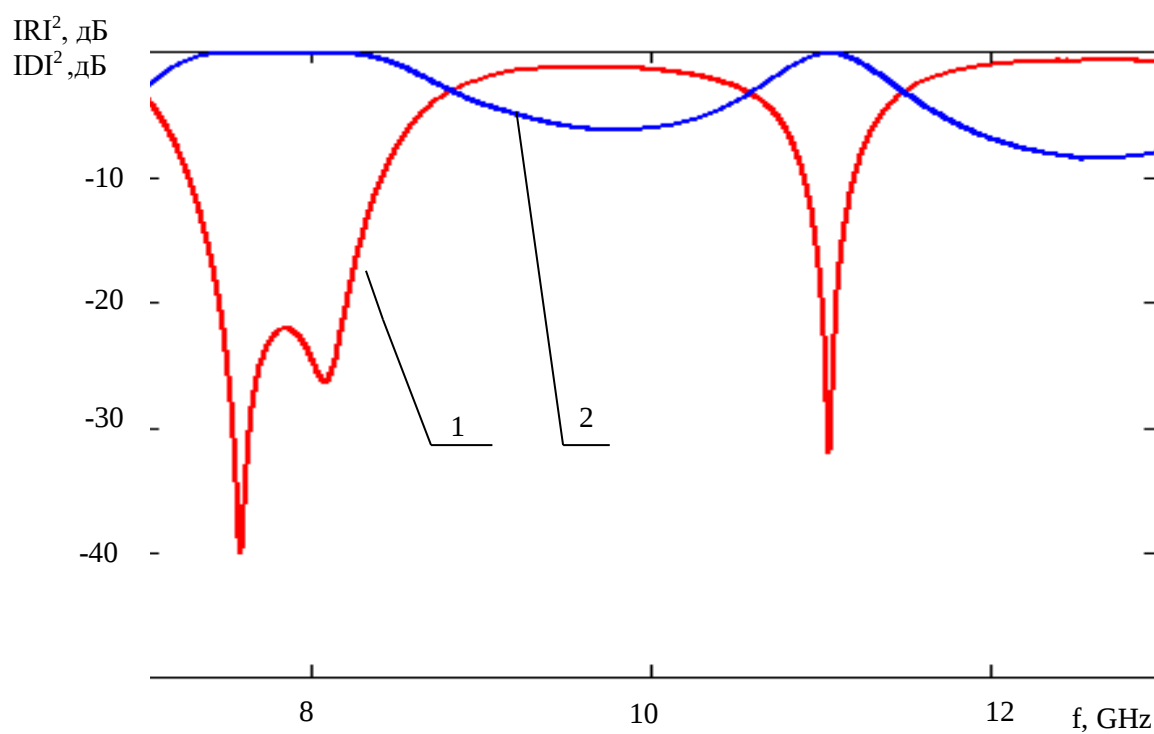


Рис.7 Экспериментальная частотная зависимость коэффициентов отражения (1) и прохождения (2) для одномерного фотонного кристалла с нарушением 19.5 мм в центральном четвертом слое.

Получены резонансные частоты для фотонных кристаллов без нарушения, нарушение 2мм и нарушение 19.5 мм соответственно:

- 7.488 ГГц
- 11.241 ГГц
- 11.046 ГГц

Результаты компьютерного моделирования взаимодействия одомерного коаксиального фотонного кристалла с электромагнитной волной свч диапазона

В данной работе представлено следующее: в коаксильную линию передачи (коаксиальный волновод) помещались трёхкомпонентные ФКы с различными вариациями структур, с различными нарушениями. Целью исследования были амплитудно - частотные характеристики и распределении амплитуды электрического поля многокомпонентных каоксиальных брэгговских структур.

Для теоретического исследования, в данной работе, были выбраны следующие модели одномерных ФК:

1. Симметричный ФК (по краям ФК Флан):

слойный ФК, структура до 7ого слоя (1–3, 4–6 слои) флан – воздух – фторопласт, 7ой слой флан, после 7ого слоя (8-10, 11–13 слои) фторопласт – воздух – флан;

2. Симметричный ФК с нарушением в 7 центральном слое (по краям ФК Флан):

13 слойный ФК, структура до 7ого слоя (1–3, 4–6 слои) флан – воздух – фторопласт, 7ой слой флан, после 7ого слоя (8-10, 11–13 слои) фторопласт – воздух – флан. Нарушение в 7ом слое путём уменьшения слоя до 1 мм;

3. Асимметричный ФК:

12 слойный ФК, структура до 7ого слоя (1–3, 4–6 слои) флан – воздух – фторопласт, 7ой слой флан, после 7ого слоя (8-10) фторопласт – воздух – флан, 11-12 слои фторопласт – воздух;

4. Асимметричный ФК с нарушением в 7 слое:

12 слойный ФК, структура до 7ого слоя (1–3, 4–6 слои) флан – воздух – фторопласт, 7ой слой флан, после 7ого слоя (8-10) фторопласт – воздух – флан, 11-12 слои фторопласт – воздух. Нарушение в 7ом слое вызвано путём уменьшения длины слоя до 1 мм;

5. Симметричный ФК (по краям ФК Фторопласт):

13 слойный ФК, структура до 7ого слоя (1–3, 4–6 слои) фторопласт – воздух – флан, 7ой слой флан, после 7ого слоя (8-10, 11–13 слои) флан – воздух – фторопласт;

6. Симметричный ФК с нарушением в 7 центральном слое (по краям ФК Фторопласт):

13 слойный ФК, структура до 7ого слоя (1–3, 4–6 слои) фторопласт – воздух – флан, 7ой слой флан, после 7ого слоя (8-10, 11–13 слои) флан – воздух – фторопласт. Нарушение вызвано путём уменьшения длины 7ого слоя до 1 мм;

7. Асимметричный ФК:

12 слойный ФК, структура до 7ого слоя (1–3, 4–6 слои) фторопласт – воздух – флан, 7ой слой флан, после 7ого слоя (8-10) флан – воздух – фторопласт, 11-12 слои флан - воздух.

8. Асимметричный ФК с нарушением в 7 слое:

12 слойный ФК, структура до 7ого слоя (1–3, 4–6 слои) фторопласт – воздух – флан, 7ой слой флан, после 7ого слоя (8-10) флан – воздух – фторопласт, 11-12 слои флан - воздух. Нарушение вызвано путём уменьшения длины 7ого слоя до 1 мм.

Симметричный ФК (по краям ФК Флан/ Фторопласт) в пунктах 1,2,5,6 являются симметричными относительно седьмого центрального слоя. Данный слой является как бы зеркалом, вокруг которого строится структура ФК.

Асимметричный ФК в пунктах 3,4,7,8 являются не симметричный ФК относительно седьмого центрального слоя, Эта асимметрия вызвана одним изменением – отсутствие последнего 13го слоя в ФК.

Все типы ФК являются трёхкомпонентными, с различными толщинами компонент и различными диэлектрическими проницаемостями. В пунктах 1-4 выше, компонентами ФК являются Флан – Воздух – Фторопласт. В пунктах 5-8, компонентами ФК являются Фторопласт - Воздух – Флан.

Диэлектрическая проницаемость компонент ФКов:

$$\epsilon_{\text{флан}} = 8,8; \epsilon_{\text{воздух}} = 1; \epsilon_{\text{фторопласт}} = 2.$$

Слои ФК толщиной (высотой): Флан 2мм, воздух 5,94 мм, фторопласт 4,2 мм.

Симметричный ФК (по краям Флан)

На рисунках 31, 32 изображена структура 13слойного коаксиального одномерного ФК, который является симметричным относительно центрального 7ого слоя. Толщина слоёв $H_{\text{флан}} = 2$ мм; $H_{\text{воздух}} = 5.94$ мм; $H_{\text{фторопласт}} = 4.2$ мм. Физические параметры компонент Флан $\epsilon_{\text{флан}} = 8,8$, воздух $\epsilon_{\text{воздух}} = 1$, фторопласт $\epsilon_{\text{фторопласт}} = 2$.

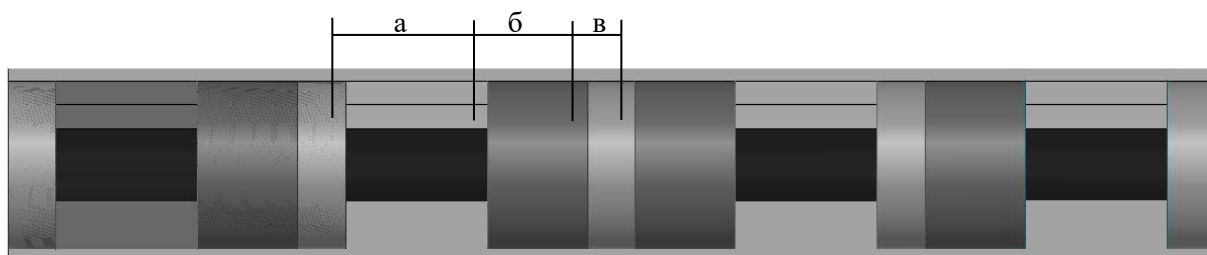


Рисунок 8. АЧХ 13слойного симметричный ФК вид сбоку. а) воздух, б) фторопласт, в) флан.

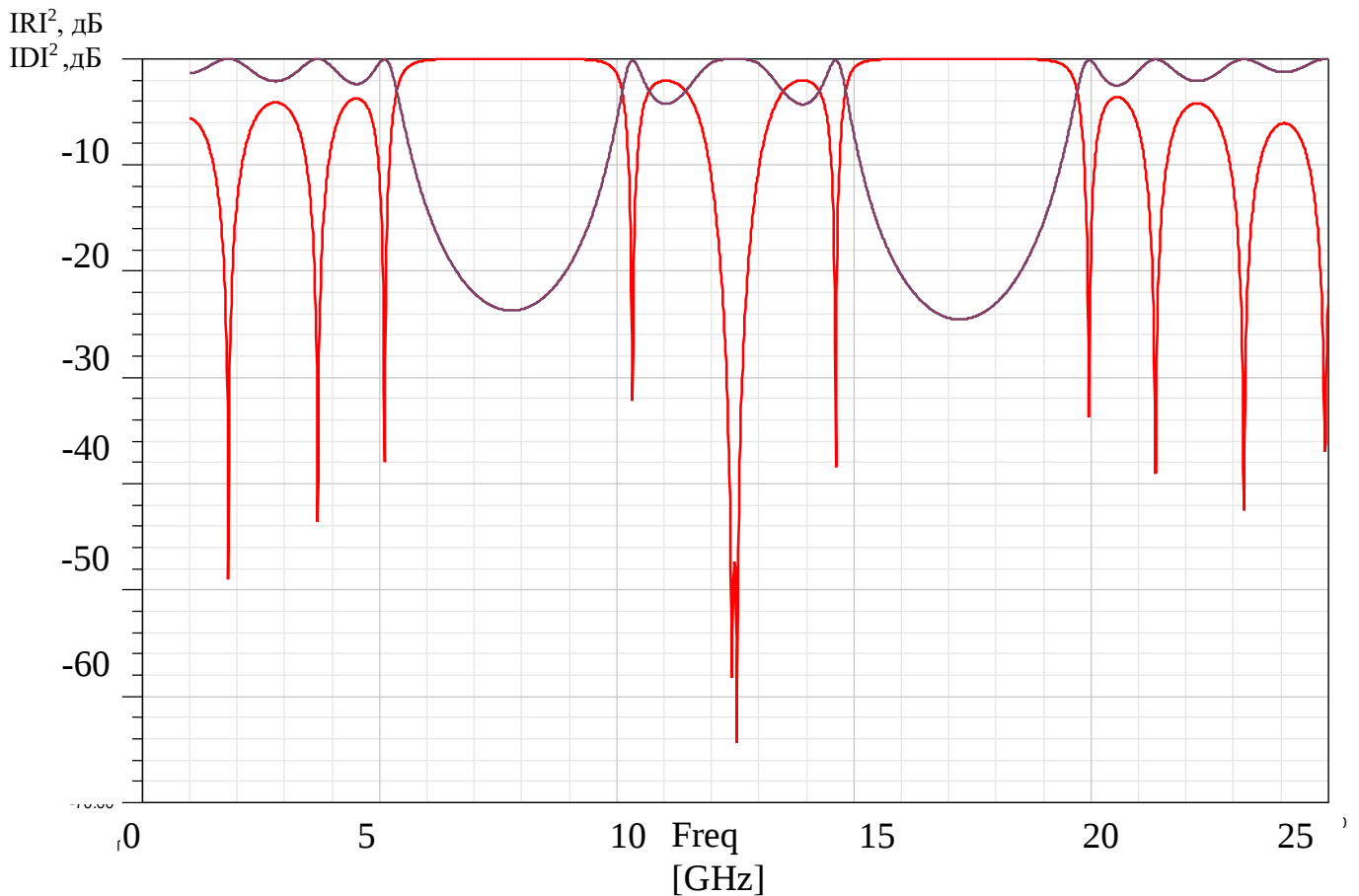


Рисунок 9. АЧХ 13слойного ФК.

АЧХ данного фотонного кристалла без дефектов, демонстрирует на диапазоне 1...25 ГГц две равные запрещенные зоны, равной глубины, разделенные разрешенной зоной. На частоте $F = 10.33$ ГГц произведён расчёт амплитуды напряженности электрического поля для данного кристалла вдоль трёх линий.

Симметричный с дефектом (по краям Флан)

На рисунках 37, 38 изображена структура 13слойного коаксиального одномерного ФК, который является симметричным относительно центрального 7ого слоя. Относительно пункта 4.2.1, в данном фотонном кристалле введено нарушение, путём уменьшения длины 7ого слоя до 1 мм. Толщина слоёв $H_{\text{флан}} = 2$ мм; $H_{\text{воздух}} = 5.94$ мм; $H_{\text{фторопласт}} = 4.2$ мм. Физические параметры компонент Флан $\epsilon_{\text{флан}} = 8.8$, воздух $\epsilon_{\text{воздух}} = 1$, фторопласт $\epsilon_{\text{фторопласт}} = 2$.

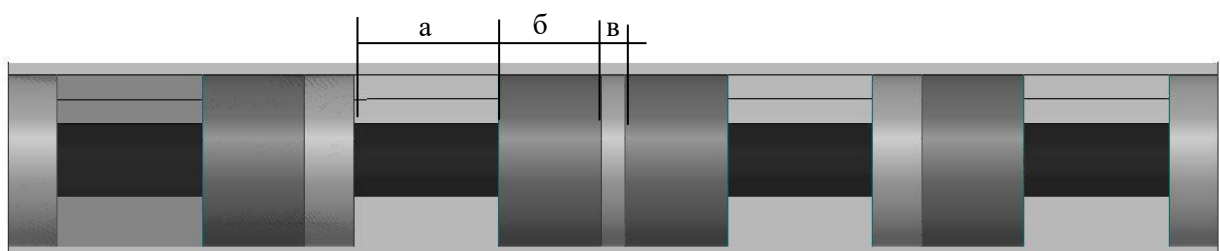


Рисунок 10. 13слойный ФК с нарушением, вид сбоку. а) воздух, б) фторопласт, в) флан.

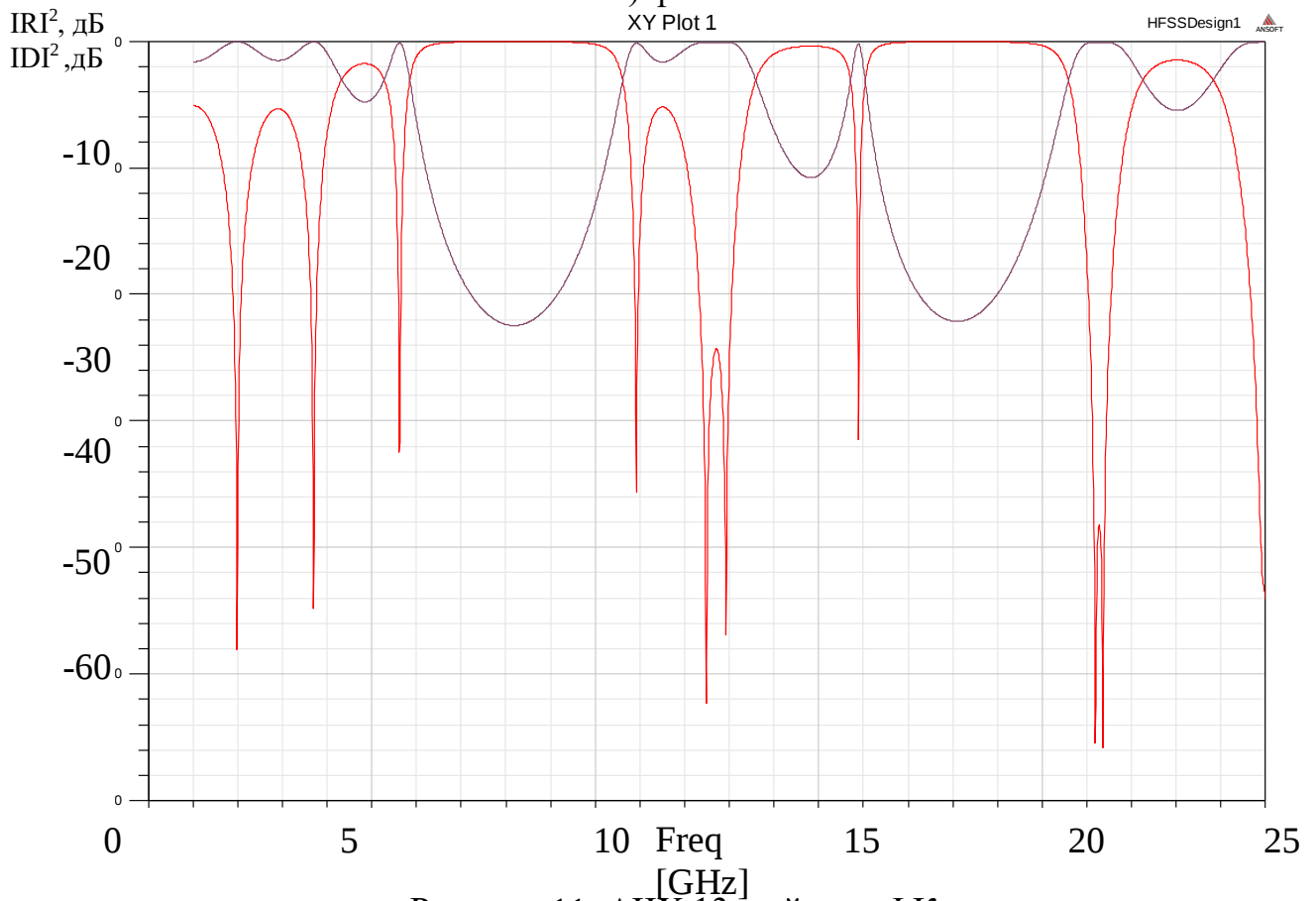


Рисунок 11. АЧХ 13слойного ФК

На АЧХ данного фотонного кристалла видно как играет роль дефект в 7ом центральном слое. По сравнению с предыдущим пунктом 4.2.1, дефект создает окно прозрачности во второй запрещенной зоне от 15 до 20 ГГц. Между этими запрещенными зонами также остается разрешенная зона. На частоте $F = 15.89$ ГГц произведён расчёт амплитуды напряженности электрического поля для данного кристалла вдоль трёх линий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской работы были созданы модели фотонных кристаллов волноводных и коаксиальных, проведено компьютерное моделирование, определены частотные характеристики коэффициентов отражения и прохождения, получены данные о напряженности электрического поля вдоль фотонных кристаллов в трёх областях коаксиальной линии передач.

В результате проведенного компьютерного моделирования установлено, что создание нарушения периодичности в виде измененной длины центрального слоя фотонного кристалла, приводит к появлению «окна прозрачности» в запрещенной зоне как у волноводных, так и у коаксиальных ФК, такая особенно хорошо проявлялась у симметричных фотонных кристаллов, за счёт структуры.

Также компьютерное моделирование показало, что появление щели, в слоях фторопласта одномерного волноводного фотонного кристалла, приводило к искажению амплитуды напряженности электрического поля вдоль фотонного кристалла относительно фотонного кристалла без наличия щели.

Проведено исследование амплитудно-частотных характеристик симметричных и асимметричных волноводных фотонных кристаллов с различным типом нарушения. Также получены данные о распределении напряженности электрического поля вдоль фотонных кристаллов. Результаты компьютерного моделирования по распределению амплитуды напряженности электрического поля показали отличный результат для каждого типа фотонных кристаллов и подтвердили теоретические знания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов С.А. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения// Вестник Российской Академии Наук. 2008. Т. 78, № 5. С. 438–457.
2. Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. № 24. P. 3380.
3. Беляев Б. А., Волошин А. С., Шабанов В. Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах// Докл. АН. 2005. Т. 403, №3. С.319-324.
4. Кособукин, В.А. Фотонные кристаллы// Окно в мир. №4. 2002. г.
5. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрофизики. М.: Наука. Физматлит, 1985. С.336
6. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals// Progress in Electromagnetics research. 2003. Vol 41. P. 185-209.
7. Dmitry Usanov, Alexander Skripal, Anton Abramov, Anton Bogolubov, Vladimir Skvortsov, Merdan Merdanov. Measurement of the Metal Nanometer Layer Parameters on Dielectric Substrates using Photonic Crystals based on the Waveguide Structures with Controlled Irregularity in the Microwave Band // Proc. of 37th European Microwave Conference. Munich, Germany. 8–12th October 2007. P. 198–201.
8. Гуляев Ю.В., Никитов С.А. Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации// Радиотехника. 2003. №8. С. 26–30
9. Усанов Д. А. , Скрипаль Ал. В., Рыгалин Б. Н.// Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами// Материалы Всероссийской научной школы-семинара. 2014. С. 16-19.

10. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Резонансное пропускание волны в прямоугольном волноводе, содержащем близкорасположенные диафрагмы с неперекрывающимися отверстиями // Радиотехника и электроника. 2004. Том. 49. № 4. С. 458–459.
11. Усанов Д.А., Мерданов М.К., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. // Известия Сар. гос. ун-та. Новая серия. Сер. 1. Физика. 2015. Т. 15. Вып. 1. С. 57–73.
12. Hsien-Shun Wu, Ching-Kuang C. Tzuang // Proc. of 34-rd European Microwave Conf. (Amsterdam, Netherlands, 12–14-th October 2004). 2004. Vol. 2. P. 1189–1192.
13. Никитов С.А., Гуляев Ю.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. // ДАН. 2013. Т. 448. № 1. С. 35–37.
14. Joannopoulos I.D., Villeneuve Pierre R., Fan Shanhui // Nature. 1997. Vol. 386. N 13. P. 143–149.
15. Вендик И.Б., Вендик О.Г. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 1. С. 3–28.
16. Самойлович М.И., Цветков М.Ю. Редкоземельные опаловые нанокompозиты для нанофотоники // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 10. С. 8–14.
17. Кульчин Ю.Н., Багаев С.Н., Букин О.А., Вознесенский С.С., Дроздов А.Л., Зинин Ю.А., Нагорный И.Г., Пестряков Е.В., Трунов В.И. Фотонные кристаллы на основе природных биоминералов океанического происхождения // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, N 15. – С. 1–7
18. Устройства СВЧ и антенны. Часть 2. Антенны [Электронный ресурс]: учебное пособие. - Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012 - . Устройства СВЧ и антенны. Часть 2. Антенны / Гошин Г.Г. - 2012. - 159 с. Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks.
19. Усанов Д. А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Использование коаксиальной брэгговской структуры для измерения параметров

диэлектриков // Раздел 7. Радиофизические явления в твердых теле и плазме.
2019 г.

20. Wei Tao, Wu Songping, Huang Jie *et al.* // Appl. Phys. (Lett). 2011. V. 99. № 11. P. 113517.
21. Насыбуллин А.Р., Морозов О.Г., Севастьянов А.А // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 3. С.1.
22. Электродинамика и распространение радиоволн [Текст]: учебное пособие / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. - 5-е изд. - Москва: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2011. - 542, [2] с. (В НБ СГУ 114 экз.)
23. Green, A.E. Thermoelasticity without energy dissipation / A.E. Green, P.M. Naghdi // J. Elasticity. 1993. Vol. 31. P. 189–208.
24. С. А. Иванов, Б. В. Сестрорецкий, А. Н. Боголюбов. Метод импедансного аналога электромагнитного пространства для решения начально-краевых задач электродинамики // Вычислительные методы и программирование. 2008. Т. 9. С. 274-304.
25. Усанов Д. А., Горбатов С. С. Резонансы в волноводной системе "штырь с зазором – близкорасположенный поршень" // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2006. Т. 49. № 2. С. 27–33.
26. Управляемый магнитным полем СВЧ – выключатель на р-и-п диодах / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов // ПТЭ. 2003. №1. С. 72-73.
27. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Резонансы в системе диафрагма-короткозамыкающий поршень // Изв. вузов Радиофизика. 2001. Т. 44. №12. С. 1046–1049.
28. Anlage S. M., Steinhauer D. E., Feenstra B. J., Vlahacos C. P., Wellstood F. C. Near-Field Microwave Microscopy of Materials Properties, in Microwave Superconductivity. – Amsterdam: Kluwer, 2001. P. 239

29. U. Ozgur, Y. Alivov, H. Morkoc Microwave ferrites, part 2: passive components and electrical tuning // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 2009. V. 20. №10. P. 911-952.g
30. Krawczyk M., Grundler D. Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure // J. Phys.: Condens. Matter. 2014. V. 26. P. 123202.