

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

Кафедра физики твёрдого тела

**Эффект прохождения электромагнитного излучения через фотонный
кристалл с радиопоглощающим материалом**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4051 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

Института физики

Скрябина Игоря Анатольевича



Научные руководители:

профессор, д.ф.-м.н.

должность, ученая степень, ученое звание



подпись, дата

А. В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики твёрдого
тела:

профессор, д.ф.-м.н.

должность, ученая степень, ученое звание



подпись, дата

А. В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Объем и структура:

Количество страниц – 46, количество рисунков – 16, количество использованных источников литературы – 26.

Ключевые слова:

Электромагнитное излучение, фотонный кристалл, радиопоглощающий материал, эластомер, амплитудно-частотные характеристики.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Одним из видов материалов, поглощающих радиоволновое излучение являются радиопоглощающие эластомеры – полимеры с наполнителями в виде ферромагнитных и проводящих микрочастиц. Использование таких материалов в СВЧ-устройствах на основе периодических структур позволяет обнаружить новые эффекты, связанные с особенностями прохождения электромагнитного излучения в частотном диапазоне, называемом запрещённой зоной.

Цель

Целью данной работы является исследование резонансных характеристик одномерного СВЧ волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности, внутри которого располагается радиопоглощающий материал, выполненный в виде эластомера с ферромагнитными и проводящими частицами, и исследование эффекта прохождения электромагнитного излучения через СВЧ фотонный кристалл.

Задачи

1) Разработка модели СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности в виде воздушного зазора с частичным заполнением ферромагнитным эластомером

2) Выполнение компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонных кристаллов с нарушением

периодичности в виде воздушного зазора с частичным заполнением ферромагнитным эластомером.

3) Проведение экспериментальных исследований.

Структура бакалаврской работы

Кроме ВВЕДЕНИЯ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ И СПИСКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ работа включает 6 основных разделов:

Раздел 1. СВЧ-методы измерений параметров материалов;

Раздел 2. Радиопоглощающий материал, выполненный в виде эластомера с ферромагнитными и проводящими частицами;

Раздел 3. Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона;

Раздел 4. Математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами;

Раздел 5. Компьютерное моделирование АЧХ СВЧ-фотонного кристалла с нарушением в виде ферромагнитного эластомера;

Раздел 6. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик волноводных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона.

Основная теория и результаты исследования

СВЧ-методы

Контроль электрофизических характеристик материалов и структур представляет собой ключевой этап в технологическом процессе производства современных СВЧ-устройств. Современные экспериментальные методики в сочетании с точными теоретическими моделями, исключая упрощающие допущения, позволяют существенно расширить функциональные возможности резонансных методов СВЧ-диагностики параметров материалов.

Особое значение среди методов контроля электрофизических параметров многослойных структур, содержащих полупроводниковые и

нанометровые металлические слои, занимают СВЧ-методики. Эти методы базируются на анализе характеристик распространения электромагнитного излучения в волноводных системах, содержащих металлические, диэлектрические и полупроводниковые элементы. Преимущество СВЧ-методов обусловлено их высокой информативностью при исследовании материалов для СВЧ-электроники, поскольку данные, полученные низкочастотными методами, часто оказываются недостаточными для проектирования СВЧ-устройств с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

Радиопоглощающий материал

Эластомеры — полимеры, обладающие высокоэластичными свойствами и вязкостью. Резиной или эластомером называют любой упругий материал, который может растягиваться до размеров, во много раз превышающих его начальную длину (эластомерная нить), и, что существенно — возвращаться к исходному размеру, когда нагрузка снята.

Данный материал способен переносить многократные деформации и возвращаться в исходное состояние при снятии механического воздействия. Свои уникальные упругие свойства эластомеры проявляют в широком диапазоне температур от -60° до $+200^{\circ}\text{C}$.

Наиболее известные их представители — это каучук, открытый в 1751 году французским исследователем Шарль Мари де ла Кондамином в столице Эквадора Кито; созданная на основе каучука резина, первые образцы которой появились ещё в начале XIX века.

Фотонные кристаллы

Прогресс в микроэлектронике и развитие информационных технологий столкнулось с проблемой, которая заключается в фундаментальном ограничении быстродействия полупроводниковых приборов. Благодаря этому большое количество исследований направлено на разработку принципиальных альтернативных основ полупроводниковой электронике областей — микроэлектронике сверхпроводников, спинтронике и фотонике. В

фотонике основой многих приборов являются фотонные кристаллы. Фотонные кристаллы представляют собой пространственно-упорядоченные системы со строго периодической модуляцией диэлектрической проницаемости. Такая периодичность, похожа на электронную зонную структуру в кристаллической решетке, которая обуславливает появление фотонной запрещенной зоны – спектральной области.

Фотонные кристаллы демонстрируют избирательное подавление распространения электромагнитных волн, которое может проявляться либо во всех пространственных направлениях (формируя абсолютную фотонную запрещенную зону), либо только в определенных выделенных направлениях. Характерно, что при сохранении прозрачности для широкого спектра излучения, такие структуры эффективно блокируют распространение света с длиной волны, соизмеримой с периодом их собственной пространственной модуляции.

Компьютерное моделирование

Был выполнен расчет амплитудно-частотных характеристик ФК, состоящего из чередующихся слоёв поликора и фторопласта. Толщина фторопласта 9 мм, толщина поликора 1 мм. Для создания нарушения 6-й слой фторопласта был заменён на слой воздуха.

В данной работе были проведены расчёты для нескольких положений образца ферромагнитного эластомера в воздушном зазоре: от «нулевой точки» – когда ферромагнитный эластомер установлен плотно к пятому слою 13-слойного фотонного кристалла, то есть: величина воздушного зазора с одной из сторон равна нулю – до условной середины общей величины нарушения.

Рассматривалось три случая, когда общая толщина воздушного зазора составляла: 3 мм, 4 мм и 5 мм.

Амплитудно-частотные характеристики коэффициента отражения и прохождения для величины воздушного дефекта, равной 3 мм, представлены на рисунках 1, 2.

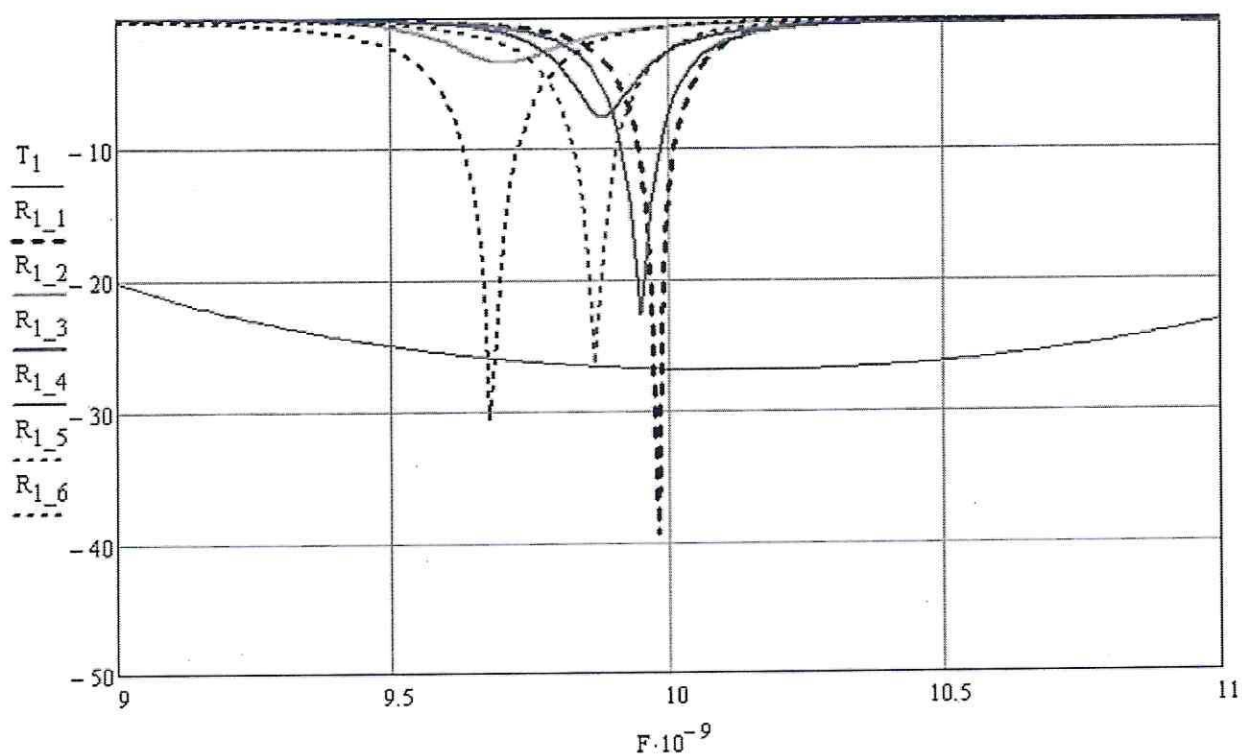


Рис. 1. АЧХ коэффициента отражения фотонного кристалла с эластомером. Расстояние образца эластомера от края нарушения равно: 1-0 мм; 2-0,5 мм; 3-1,0 мм; 4-1,5 мм; 5-2,0 мм; 6-2,5 мм. с размером нарушения, равном 3 мм.

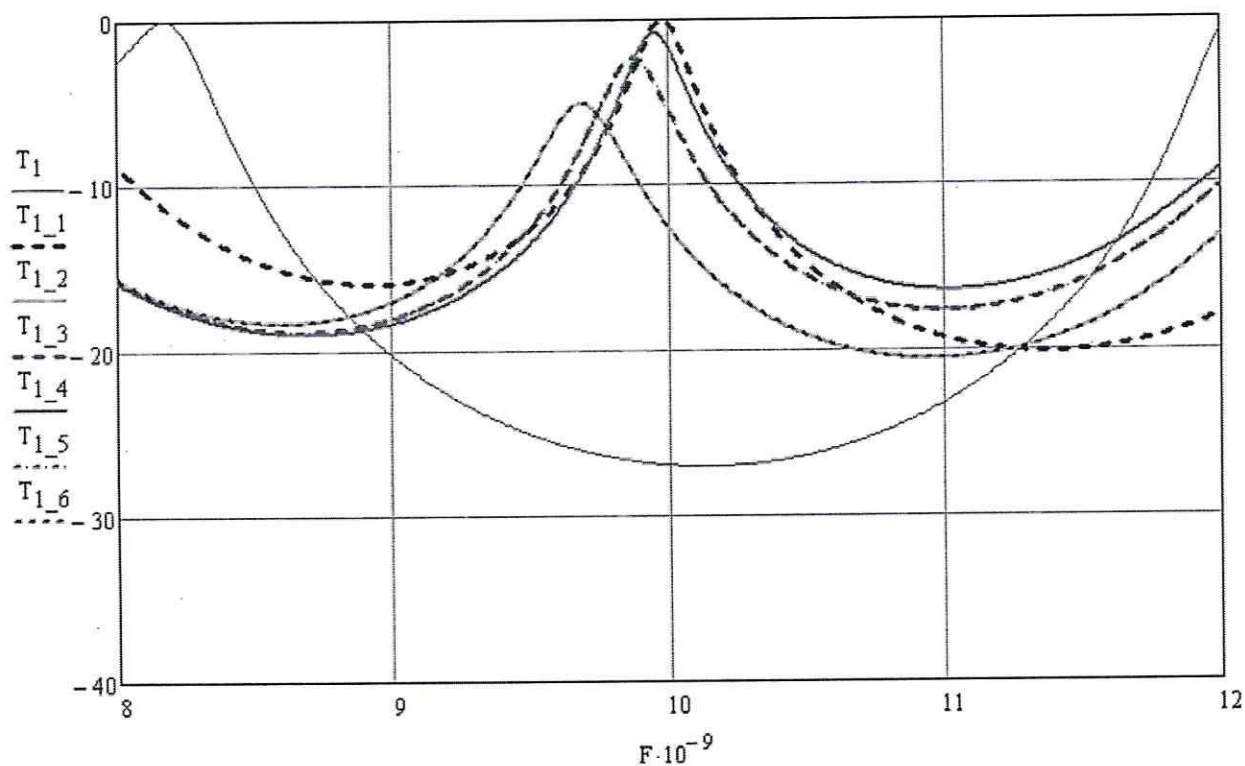


Рис. 2. АЧХ коэффициента прохождения фотонного кристалла с эластомером. Расстояние образца эластомера от края нарушения равно: 1-0

мм; 2-0,5 мм; 3-1,0 мм; 4-1,5 мм; 5-2,0 мм; 6-2,5 мм. с размером нарушения, равном 3 мм.

Амплитудно-частотные характеристики коэффициента отражения и прохождения для величины воздушного дефекта, равной 4 мм, представлены на рисунках 3, 4.

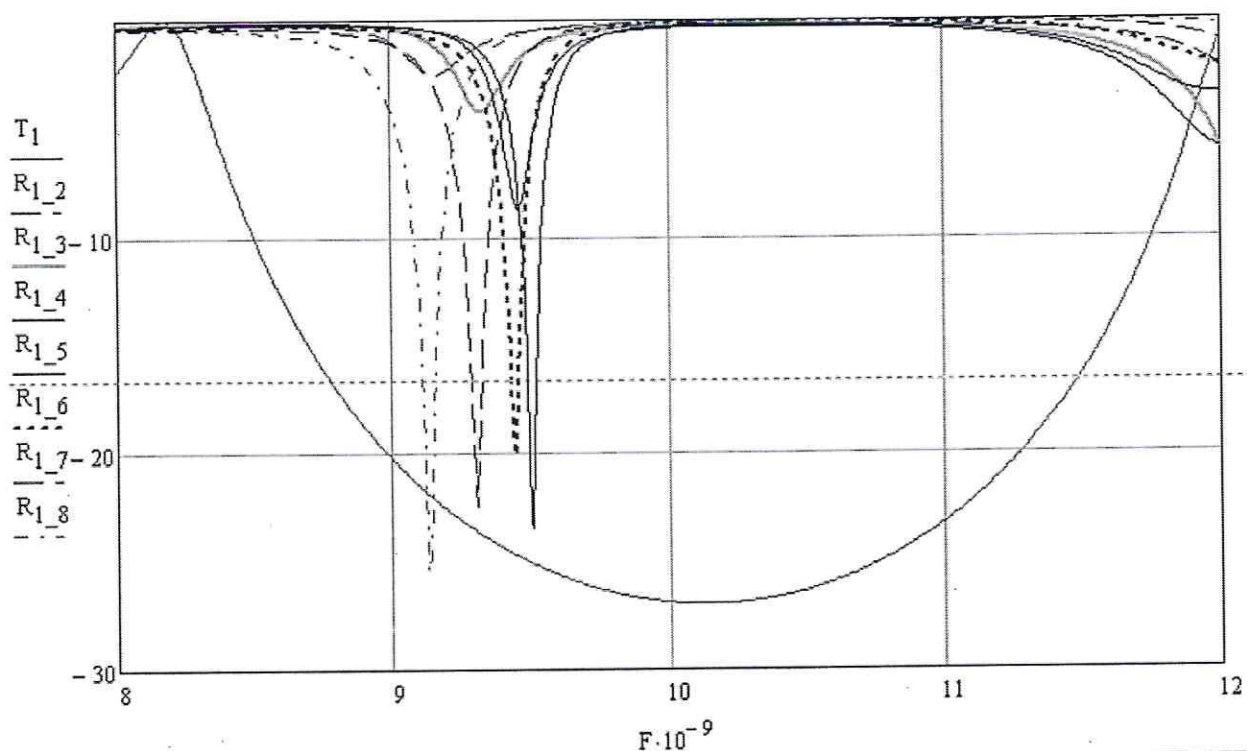


Рис. 3. АЧХ коэффициента отражения фотонного кристалла с эластомером. Расстояние образца эластомера от края нарушения равно: 1-0 мм; 2-0,5 мм; 3-1,0 мм; 4-1,5 мм; 5-2,0 мм; 6-2,5 мм; 7-3,0 мм; 8-3,5 мм. с размером нарушения, равном 4 мм.

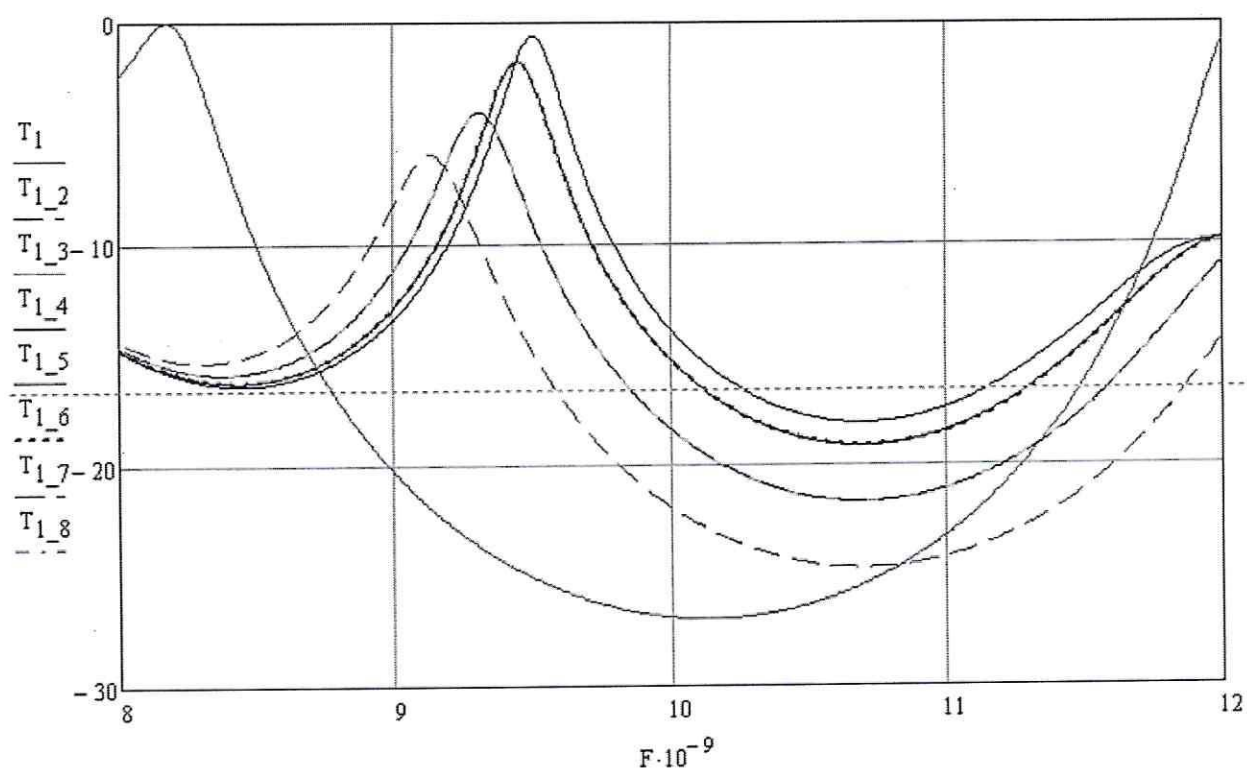


Рис. 4. АЧХ коэффициента прохождения фотонного кристалла с эластомером. Расстояние образца эластомера от края нарушения равно: 1-0 мм; 2-0,5 мм; 3-1,0 мм; 4-1,5 мм; 5-2,0 мм; 6-2,5 мм; 7-3,0 мм; 8-3,5 мм с размером нарушения, равном 4 мм.

Амплитудно-частотные характеристики коэффициента отражения и прохождения для величины воздушного дефекта, равной 5 мм, представлены на рисунках 5, 6.

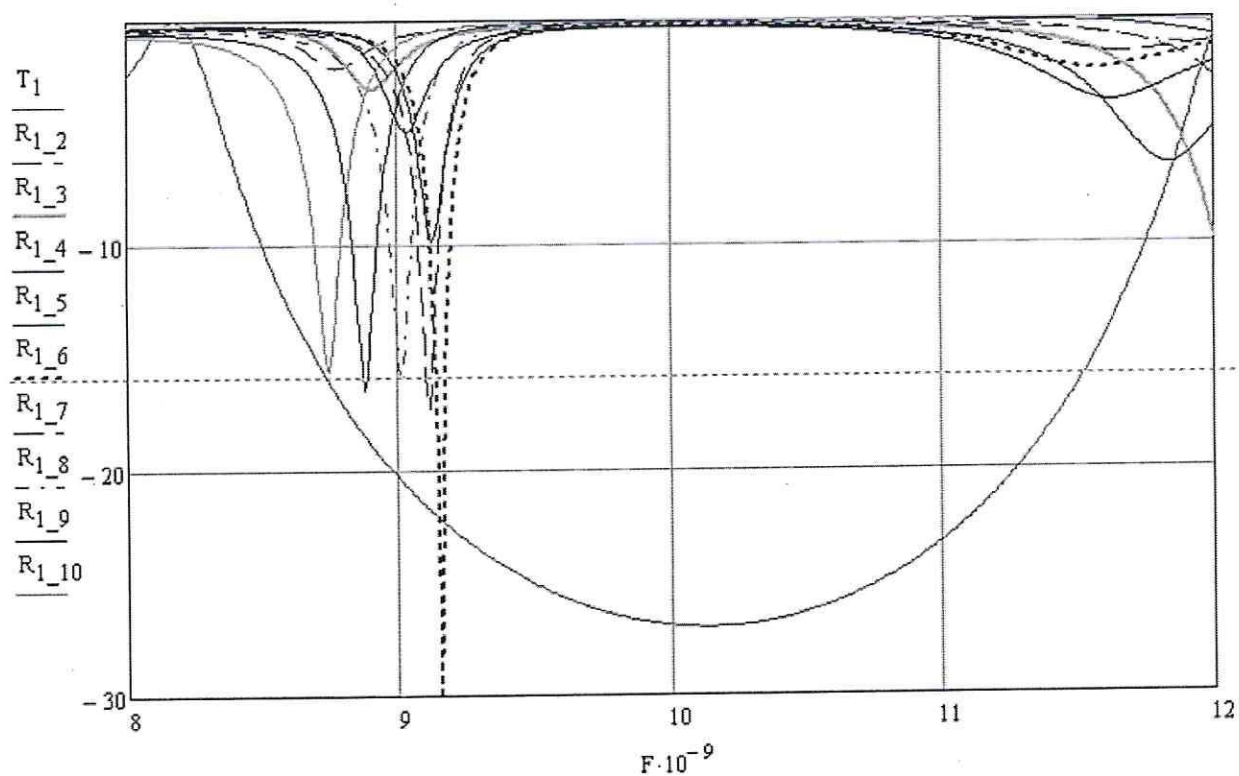


Рис. 5. АЧХ коэффициента отражения фотонного кристалла с эластомером. Расстояние образца эластомера от края нарушения равно: 1-0 мм; 2-0,5 мм; 3-1,0 мм; 4-1,5 мм; 5-2,0 мм; 6-2,5 мм; 7-3,0 мм; 8-3,5 мм; 9-4,0 мм; 10-4,5 мм. с размером нарушения, равном 5 мм.

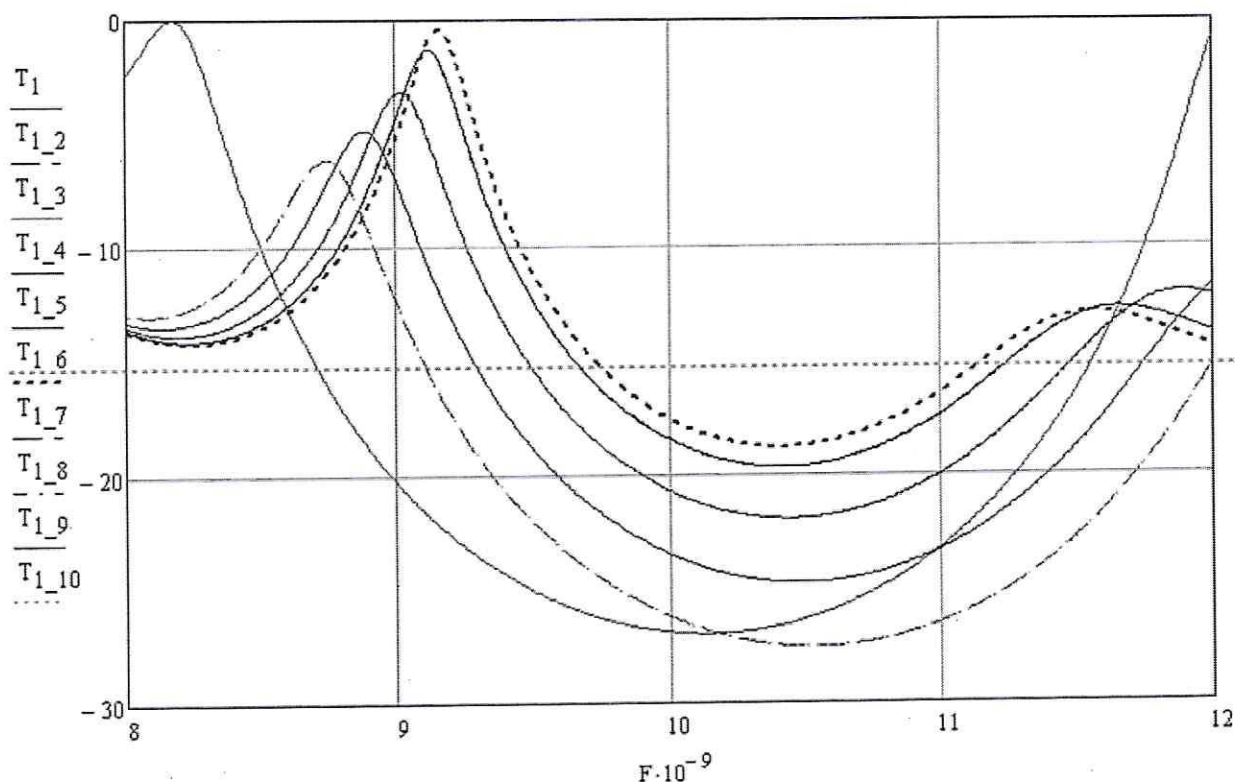


Рис. 6. АЧХ коэффициента прохождения фотонного кристалла с эластомером. Расстояние образца эластомера от края нарушения равно: 1-0 мм; 2-0,5 мм; 3-1,0 мм; 4-1,5 мм; 5-2,0 мм; 6-2,5 мм; 7-3,0 мм; 8-3,5 мм; 9-4,0 мм; 10-4,5 мм. с размером нарушения, равном 5 мм.

Из результатов компьютерного моделирования следует, что создание в СВЧ фотонном кристалле нарушения в виде воздушного слоя приводит к возникновению дефектной моды в запрещённой зоне.

Расположение внутри воздушного нарушения радиопоглощающего материала, выполненного в виде эластомера с ферромагнитными и проводящими частицами, приводит к искажению резонанса на частоте дефектной моды. При этом степень искажения определяется уровнем взаимодействия электромагнитного излучения с образцом эластомера.

При размере нарушения, меньшем половины длины электромагнитной волны, расположение образца эластомера в центре нарушения не вызывает значительного искажения резонанса на частоте дефектной моды.

Экспериментальное исследование

Выбранный слой помещался внутри отрезка волновода, контролировалось отсутствие воздушных зазоров. Отрезок волновода с помощью коаксиального кабеля и коаксиально-волноводного перехода соединялся с векторным анализатором цепей «Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A» (рис. 7). С помощью анализатора цепей (рис. 8) были получены частотные зависимости. Измерения были перенесены в программу Mathcad для наглядного представления в виде графика зависимости частоты от диэлектрической проницаемости.

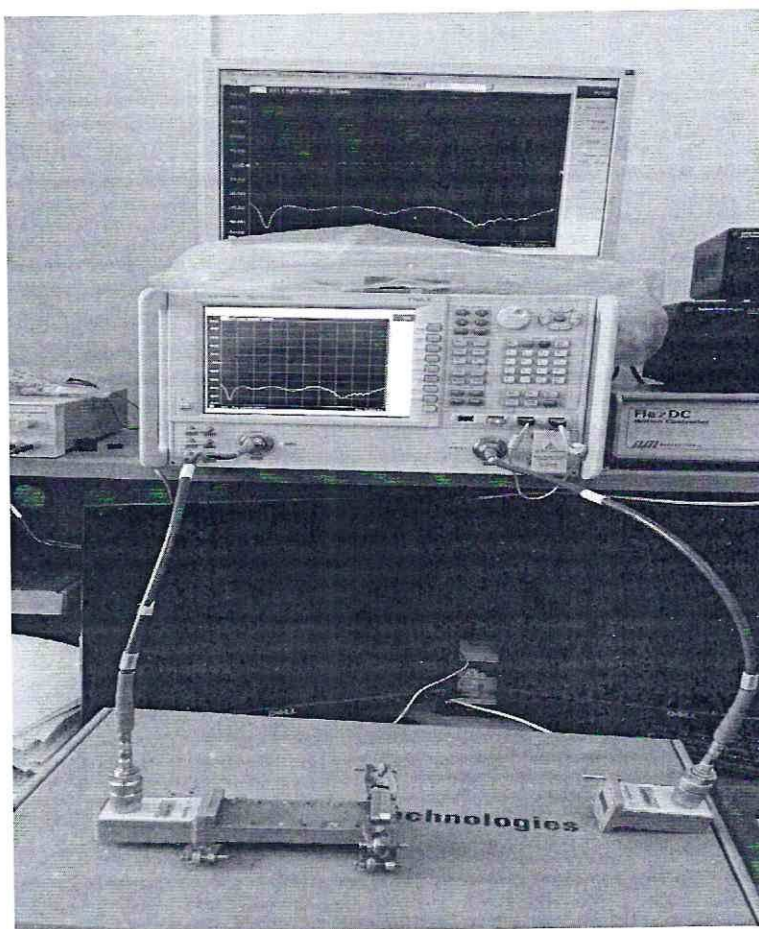


Рис. 7. Установка для проведения эксперимента.

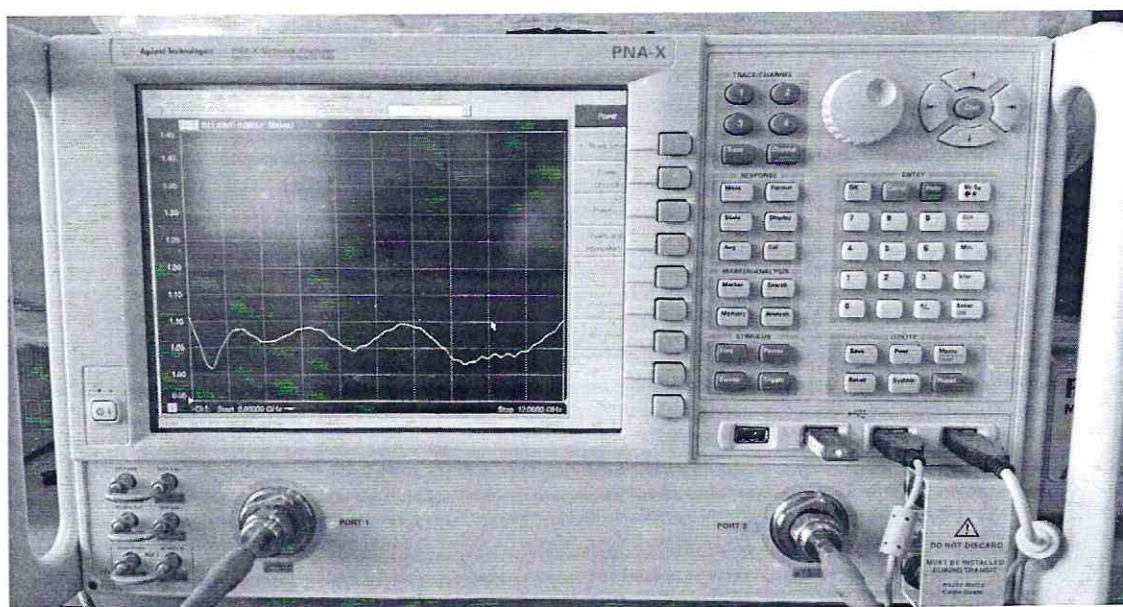


Рис. 8. Векторный анализатор цепей «Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A»

Амплитудно-частотные характеристики коэффициента отражения и прохождения для величины воздушного дефекта, равной 3 мм, представлены на рисунках 9, 10.



Рис. 9. Экспериментальные АЧХ коэффициента отражения фотонного кристалла с эластомером. Расстояние образца эластомера от края нарушения равно: 1-0 мм; 2-1,0 мм; 3-2 мм с размером нарушения, равном 3 мм.

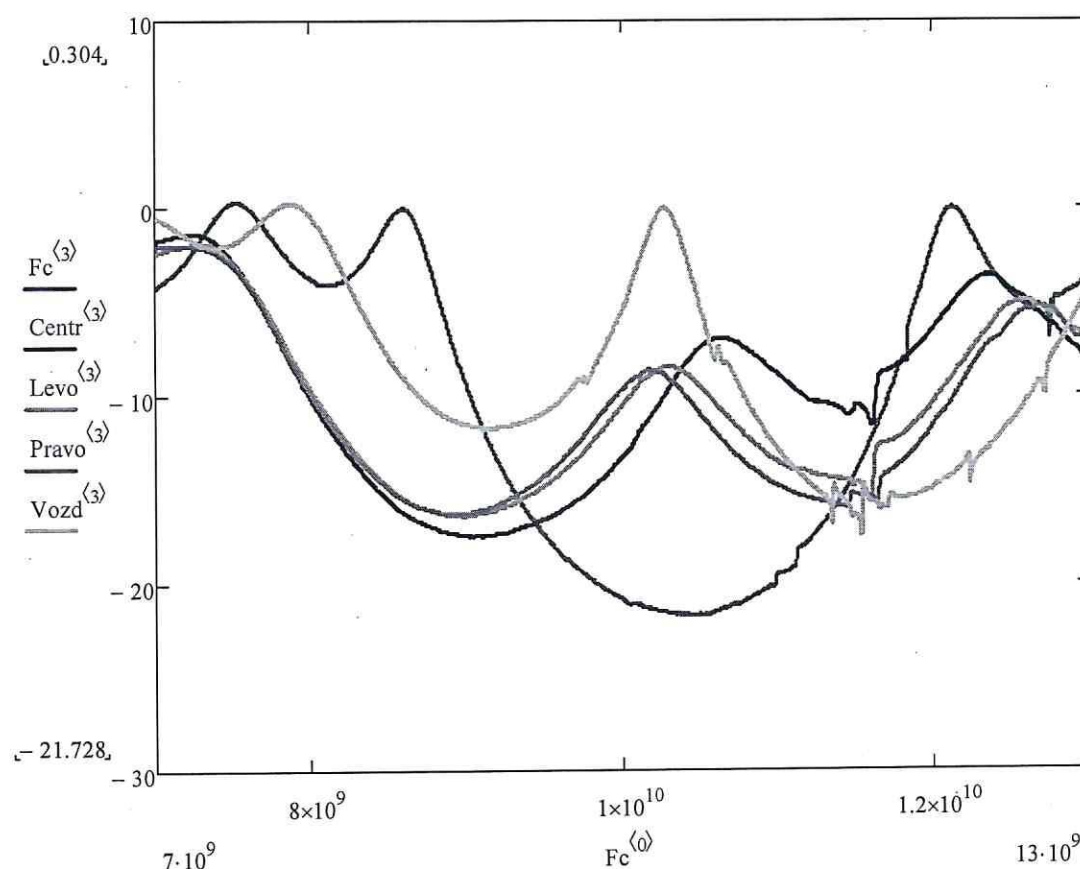


Рис. 10. Экспериментальные АЧХ коэффициента прохождения фотонного кристалла с эластомером. Расстояние образца эластомера от края нарушения равно: 1-0 мм; 2-1,0 мм; 3-2 мм с размером нарушения, равном 3 мм.

Амплитудно-частотные характеристики коэффициента отражения и прохождения для величины воздушного дефекта, равной 4 мм, представлены на рисунках 11, 12.

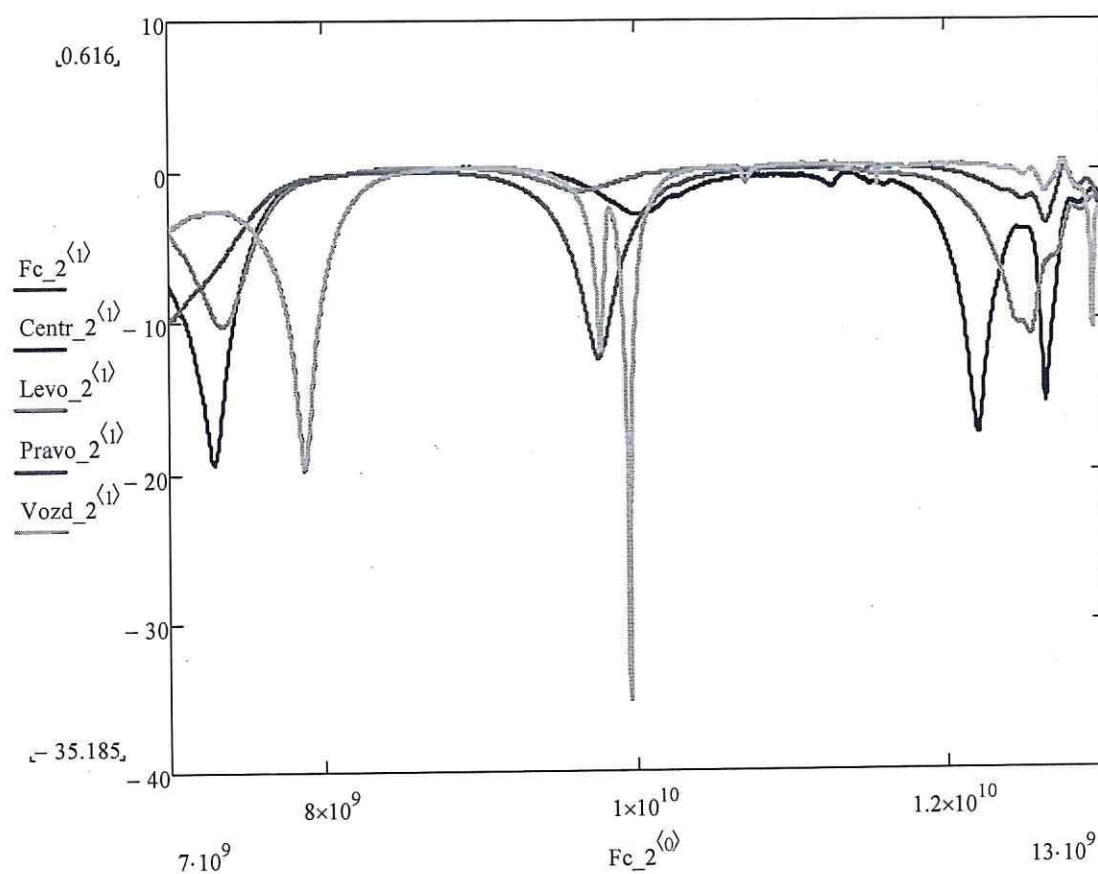


Рис. 11. Экспериментальные АЧХ коэффициента отражения фотонного кристалла с эластомером. Расстояние образца эластомера от края нарушения равно: 1-0 мм; 2-1,5 мм; 3-3.0 мм с размером нарушения, равном 4 мм.

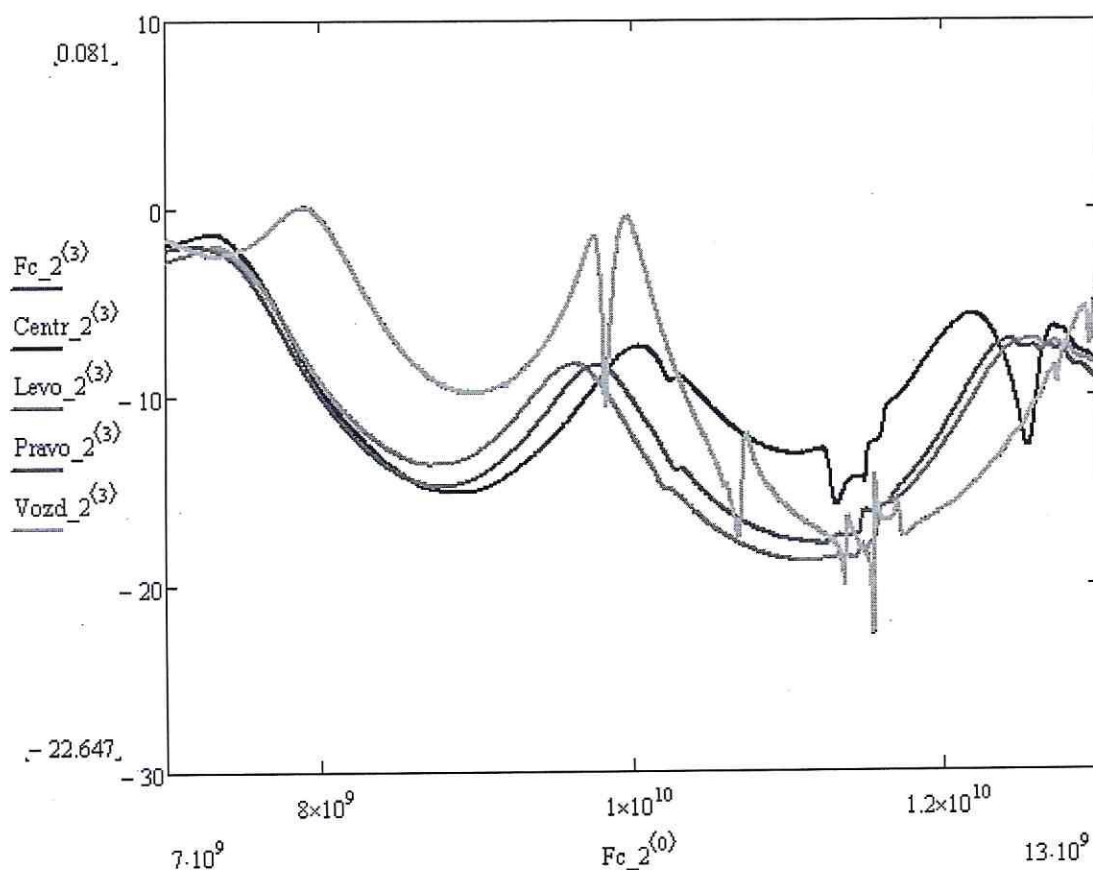


Рис. 12. Экспериментальные АЧХ коэффициента прохождения фотонного кристалла с эластомером. Расстояние образца эластомера от края нарушения равно: 1-0 мм; 2-1,5 мм; 3-3.0 мм с размером нарушения, равном 4 мм.

Из результатов эксперимента следует, что создание в СВЧ фотонном кристалле нарушения в виде воздушного слоя приводит к возникновению дефектной моды в запрещённой зоне.

Расположение внутри воздушного нарушения радиопоглощающего материала, выполненного в виде эластомера с ферромагнитными и проводящими частицами, как это и предсказывалось в ходе компьютерного моделирования, приводит к искажению резонанса на частоте дефектной моды.

Из экспериментальных исследований также следует, что расположение образца в центре нарушения вызывает меньшие искажения резонанса на частоте дефектной моды, чем при расположении образца на краю нарушения.

Заключение. Основные результаты работы

1 Разработана модель СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности в виде воздушного зазора с частичным заполнением ферромагнитным эластомером

2 Выполнено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонных кристаллов с нарушением периодичности в виде воздушного зазора, внутри которого располагается радиопоглощающий материал, выполненный в виде эластомера с ферромагнитными и проводящими частицами.

3 Проведено исследование эффекта прохождения электромагнитного излучения через СВЧ фотонный кристалл.

4 Собран макет СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности в виде воздушного зазора, внутри которого располагается радиопоглощающий материал, выполненный в виде эластомера с ферромагнитными и проводящими частицами.

5 Измерены амплитудно-частотные характеристики СВЧ фотонного кристалла, содержащего слой эластомера с ферромагнитными и проводящими частицами.

Библиографический список

1. Гершензон Е. М., Литвак – Горская Л. Б., Плохова Л. А., Зарубина Т. С. Методы определения параметров полупроводников и полупроводниковых пленок на СВЧ. — В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Е. А. Федотова, М., 1970, вып. 23. С. 3 – 48.
2. Усанов Д.А. СВЧ-методы измерения параметров полупроводников. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1985. 55 с.
3. Арапов Ю.Г., Давыдов А.Б. Волноводные методы измерения электрофизических параметров полупроводников на СВЧ // Дефектоскопия. 1978. № 11. С. 63–87.
4. M.N. Asfar, J.R. Birch, R.N. Clarke The Measurement of the Properties of Materials // Proc. IEEE. 1986, vol. 74, № 1. P. 183–199.

5. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Эффекты ближнего поля в электродинамических системах с неоднородностями и их использование в технике СВЧ. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2011. 392 с.
6. Microwave Electronics. Measurement and Materials Characterization / Chen L. F., Ong C. K., Neo C. P., Varadan V. V. and Varadan V. K. // The Atrium, Sousethern Gate, Chichester, West Sussex, England. John Wiley & Sons Ltd. 2004. 538 p.
7. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Измерения толщины 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.
8. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Феклистов В.Б., Вениг С.Б. Лабораторный практикум «Измерение параметров полупроводников, микро- и наноструктур на СВЧ» (учебное пособие)– Саратов: Электронное издание Сарат. ун-та, 2012. – 91 с.
9. Усанов Д.А. СВЧ методы измерения параметров полупроводников. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1985. 55с.
- 10 Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1970. Т.1. 440с.
- 11 Давыдов Ю.Г., Арапов А. Б. Волноводные методы измерения электрофизических параметров полупроводников на СВЧ //Дефектоскопия.1978. №11. С. 63–87 с.
- 12 Семенов Н. А. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973.310с.
- 13 Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз,1963.403с.
- 14 Стариков В.Д. Методы измерения на СВЧ с применением измерительных линий. М.: Сов. Радио, 1972.144с.
- 15 Павлов, Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов / Л.П. Павлов. – Москва: Высш. шк., 1987, 1987. – 238 с.

16 Чэмплин К. С., Армстронг Д. Б., Гандерсон П. Д. Инерция носителей заряда в полупроводниках// ТИИЭР.1964. Т. 52, С. 720–729 с.

17 Коробкин В. А., Хижняк Н. А. Волноводно-диэлектрический резонанс диэлектрического образца в прямоугольном волноводе // Изв. ВУЗов. Радиофизика. - 1978. – Т.21, № 4. – С.558 – 565 с.

18. 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, том. 61. № 1. С. 45–53.

19. 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. Т. 86, вып. 2. С. 65–70.

20. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Посадский В.Н., Тяжлов В.С., Байкин А.В. Дефектная мода в низкоразмерном волноводном СВЧ фотонном кристалле// Письма в Журнал технической физики. 2016. Т. 42, вып. 10. С. 106–110.

21. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Пономарев Д.В., Евтеев С.Г. СВЧ фотонные кристаллы - новый тип функциональных структур, применяемых в радиоэлектронике// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2016. Т. 19. №3. С. 17–24.

22. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.А. Характеристики дефектной моды одномерного СВЧ волноводного фотонного кристалла с металлическим включением в элементе, нарушающем его периодичность// Журнал технической физики. 2017. Т. 87, вып. 6. С. 884–887.

23. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г. Волноводные фотонные кристаллы на резонансных диафрагмах с управляемыми $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками// Радиотехника и электроника. 2018. Том. 63, № 1. С. 65–71.

24. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Мерданов М.К. Сogласованная нагрузка на брэгговских структурах терагерцевого диапазона частот// Письма в Журнал технической физики. 2018. Т. 44, вып. 5. С. 63–68.

25. 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.

26. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Скворцов В.С., Мерданов М.К. СВЧ-фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов и создания функциональных устройств СВЧ-электроники/ Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11, № 3. С. 51–59.