

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

**«СВЧ фотонные кристаллы на основе отрезков коаксиальной линии
передачи»**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 411 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Тимофеева Ильи Олеговича

Научные руководители

профессор, д.ф.-м.н.

А. В. Скрипаль

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

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

Актуальность проблемы

Научно технический прогресс немислим без микро и наноэлектроники, а интенсивное развитие нанотехнологий провоцирует широкое применение в современной электронике полупроводниковых материалов, многослойных структур и метаматериалов на основе которых изготавливают различные полупроводниковые приборы и микросхемы. Исходя из этого все наши предыдущие исследования были, на прямую или косвенно, связаны с физикой процессов протекающих в данных структурах, методами измерения их параметров, видами и способами их изготовления.

Метаматериалы представляют собой искусственно созданные гетерогенные среды, в которых геометрические размеры и электрофизические параметры специально подобранных составляющих элементов периодически изменяются вдоль одного или нескольких пространственных направлений. Уникальные радиофизические, оптические, магнитные и акустические свойства метаматериалов, обусловленные резонансным взаимодействием электромагнитной волны с периодической структурой, позволяют создавать на их основе новые типы структур и устройств с управляемыми параметрами. К метаматериалам относится класс фотонных кристаллов – искусственных периодических структур с периодом, сравнимым с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения[1].

По существу фотонные кристаллы представляют собой систему связанных резонаторов, именно поэтому они обладают окнами прозрачности и полосами заграждения[2]. В результате ФК представляют большой интерес для исследователей не только как элементы для создания перспективных устройств радио- и оптоэлектроники, в частности, полосно-пропускающих фильтров, но и как модельные объекты для изучения особенностей

распространения и локализации электромагнитных волн в пространстве взаимодействующих резонаторов.

Создание периодических фотонных структур СВЧ-диапазона и исследование их свойств имеют важное практическое значение в виду стремительного развития современных систем связи и телекоммуникации, антенн и радарной техники, измерительного оборудования и различного рода датчиков [1]. Для всех частотных диапазонов, физические особенности взаимодействия электромагнитных волн с фотонными кристаллами носят схожий характер, однако СВЧ -фотонные кристаллы обладают рядом преимуществ, а именно: технологичность изготовления периодических структур;хорошее совпадение численного расчета с экспериментом; возможность модификации структуры фотонного кристалла в силу того, что его составные части имеют макроскопические размеры; конструктивно фотонный кристалл может быть создан на основе стандартных элементов СВЧ-схем; результаты исследований особенностей взаимодействия СВЧ-излучения с фотонным кристаллом могут быть использованы для создания структур, работающих в более высокочастотных диапазонах[3-4].

Исследование периодических СВЧ фотонных кристаллов представляет также особый интерес в связи с перспективой их использования при создании различных устройств, материалов и композитов, изначально предназначенных для работы в СВЧ-диапазоне.

В связи с этим является актуальным проведение исследований особенностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с одномерными коаксиальными фотонными кристаллами, определение чувствительности частотной зависимости «окон прозрачности» в запрещенной зоне фотонного кристалла к параметрам нарушения периодичности.

Цель бакалаврской работы:

Выявление особенностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с одномерными коаксиальными фотонными кристаллами.

Новизна исследований, проведенных в ходе бакалаврской работы, состоит в следующем:

Установлена зависимость спектра прохождения коаксиальной фотонной структуры от изменения таких параметров диэлектрического заполнения как: изменения диэлектрической проницаемости слоев, изменения количество слоев в фотонной структуре и варьирование длин слоев диэлектрического заполнения.

Также в процессе моделирования было получено узкое «окно прозрачности» в фотонной «запрещенной зоне» одномерного фотонного кристалла и исследована частотная зависимость «окна прозрачности» от изменения длины среднего слоя диэлектрического заполнения.

Экспериментально реализован коаксиальный фотонный кристалл СВЧ-диапазона с двумя видами диэлектрического заполнения, а также экспериментально исследована зависимость окна прозрачности от изменения длины среднего слоя коаксиальной одномерной фотонной структуры.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описана актуальность выбранной темы бакалаврской работы, поставлена цель работы.

В первом разделе приведен теоретический обзор о видах и свойствах фотонных кристаллов СВЧ-диапазона, а так же, для некоторых видов одномерных фотонных структур, расчет коэффициентов отражения и прохождения.

Во втором разделе представлено компьютерное моделирование одномерных коаксиальных фотонных структур СВЧ диапазона. В ходе компьютерного моделирования рассматривалась коаксиальная фотонная структура, состоящая из последовательно соединенных чередующихся отрезков коаксиальной линии передачи с различными параметрами слоев, включенная в 50-омную линию передачи (см. рисунок 1).

С помощью программы моделирования СВЧ-схем Microwave Office, была создана схема коаксиальной линии передачи, в которую далее был помещен фотонный кристалл СВЧ диапазона. Диаметр внешнего проводника коаксиальной линии составляет 7,7 мм, диаметр внутренней жилы 3,2мм.

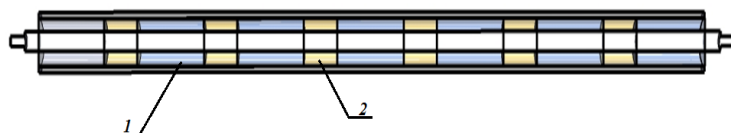


Рисунок 1 Блок схема диэлектрической слоистой структуры в коаксиальной линии передачи: 1— слой «первого» типа, 2— слой «второго» типа

В работе было исследовано влияние параметров диэлектриков многослойной структуры, путем анализа спектра прохождения электромагнитной волны прошедшей через коаксиальный фотонный кристалл: изменение толщины четных или нечетных слоев заполнения, изменение диэлектрической проницаемости слоев, количество слоев в фотонной структуре, изменение нарушений периодичности структуры.

В первом случае рассматривалось зависимость коэффициента прохождения D от количества слоев в одномерной коаксиальной фотонной структуре. Было построено два вида коаксиальных фотонных структур: с четным и нечетным количеством слоев и промоделированы частотные зависимости коэффициента прохождения от количества слоев в структуре,

для «нечетных» было выбрано 5, 7, 9, 11, 13, 15 слоев, а для «четных» 6, 8, 10, 12, 14 и 16. В качестве слоев «первого» типа, были выбраны слои с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=1$ и длиной $x=20$ мм, в качестве слоев «второго» типа – $\varepsilon=3$ и длиной $l=10$ мм. Все измерения проводились в диапазоне частот от 0,4 ГГц до 7 ГГц.

На рисунке 2 представлена расчетная частотная зависимость коэффициента пропускания D для коаксиальных фотонных кристаллов без нарушения периодичности, состоящих из нечетного числа слоев (5, 7, 9, 11, 13, 15).

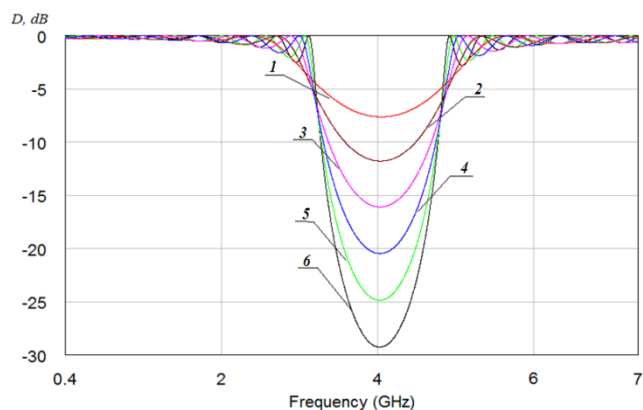


Рисунок 2 Частотная зависимость коэффициента прохождения D от количества слоев в «не четной» коаксиальной фотонной структуре: 1–5 слоев; 2–7 слоев; 3–9 слоев; 4–11 слоев; 5–13 слоев; 6–15 слоев

В ходе компьютерного моделирования было установлено (см. рисунок 4), что при увеличении количества слоёв коаксиального фотонного кристалла, представляющего собой одномерную структуру с фиксированным значением диэлектрической проницаемости, ширина запрещенной зоны монотонно уменьшается, а её глубина монотонно увеличивается.

С фотонными структурами с четным количеством слоев, было проделано то же самое и в результате расчетов было установлено, что частотная зависимости коэффициента прохождения D «четной» структуры идентична частотной зависимости «нечетной» (см. Рисунок 2). Это связано с

тем, что слоем «первого» типа является материал с диэлектрической проницаемостью равной $\epsilon=1$, другими словами это воздушное заполнение между слоями «второго» типа с $\epsilon=3$, но при прохождении электромагнитной волны через «нечетную» коаксиальную фотонную структуру первым и последним слоем все равно является воздушное заполнение и при уменьшении числа слоев до четного числа не вносит значительного изменения в спектр прохождения нашей структуры.

Во втором случае исследовалась зависимость коэффициента прохождения D от изменения диэлектрической проницаемости ϵ слоев «второго» типа коаксиальной фотонной структуры, таким образом, у первого, третьего, пятого, седьмого, девятого и одиннадцатого слоя изменялась диэлектрическая проницаемость в диапазоне от 2 до 5 с шагом 0,5. Подразумевалось, что у слоев «первого» типа диэлектрическая проницаемость остается постоянной и равной $\epsilon=1$. Внутренние и внешние диаметры всех слоев оставались в соответствии с ранее выбранными внешним и внутренним проводниками, толщина слоев не изменялась, для четных слоев составляла 20 мм, а для не четных 10 мм. Все измерения проводились в диапазоне частот от 0,4 ГГц до 7 ГГц.

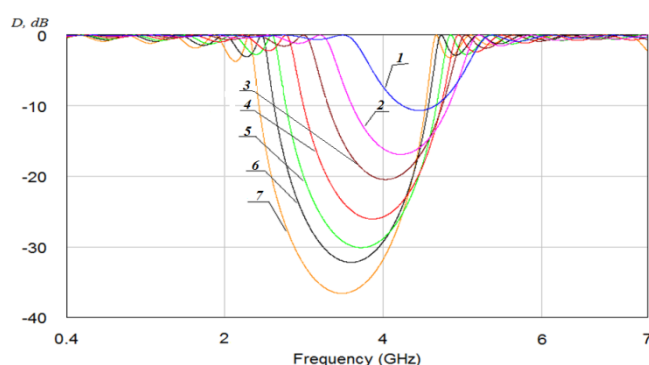


Рисунок 3 Зависимость коэффициента прохождения D одномерного коаксиального фотонного кристалла от изменения ϵ слоя «второго» типа: 1— $\epsilon=2$; 2— $\epsilon=2,5$; 3 — $\epsilon=3$; 4 — $\epsilon=3,5$; 5— $\epsilon=4$; 6 — $\epsilon=4,5$; 7— $\epsilon=5$

Из полученной зависимости (см. Рисунок 3) было выявлено, что с увеличением диэлектрической проницаемости глубина фотонной «запрещенной зоны» монотонно увеличивается, а сама зона становится шире и смещается в сторону более низких частот.

Далее были промоделированы зависимости коэффициента прохождения от толщины слоя «первого» и «второго» типа одномерного коаксиального фотонного кристалла, в диапазоне от 0.4 до 7 ГГц. В первом случае длина слоя «первого» типа с $\epsilon=1$ оставалась постоянной и равной $x=20$ мм, а толщина слоев «второго» типа l с $\epsilon=3$ изменялась от 10 до 5 мм с шагом в 1 мм. Из полученной зависимости видно, что с увеличением толщины слоя с $\epsilon=3$, «запрещенная зона» коаксиального фотонного кристалла углубляется и смещается в низкочастотную область диапазона (Рисунок 4).

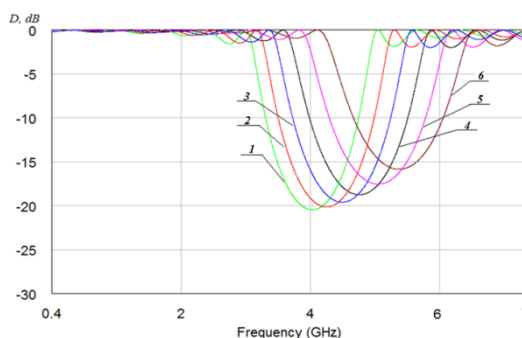


Рисунок 4 Зависимость коэффициента прохождения D от толщины слоя «второго» типа коаксиальной фотонной структуры: 1 – 10 мм; 2 – 9 мм; 3 – 8 мм; 4 – 7 мм; 5 – 6 мм; 6 – 5 мм

Во втором случае l является постоянной и равной 10 мм, толщина слоя «первого» типа x изменяется от 40 мм до 15 мм, с шагом 5 мм. При детальном рассмотрении данной зависимости видно, что при увеличении толщины слоев «первого» типа в одномерном коаксиальном фотонном кристалле, запрещенная зона, так же как и в первом случае, сдвигается в низкочастотную область (Рисунок 5). В некоторых случаях в нашем диапазоне появлялись две запрещенные зоны для распространения электромагнитного излучения.

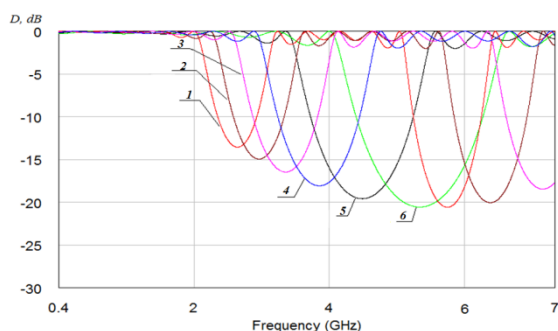


Рисунок 5 Зависимость коэффициента прохождения D от увеличения толщины слоя «первого» типа с $\varepsilon=1$ в коаксиальной фотонной структуре:

1 – 40 мм; 2 – 35 мм; 3 – 30 мм; 4 – 25 мм; 5 – 20 мм; 6 – 15 мм

Далее была выбрана коаксиальная одномерная фотонная структура с наиболее подходящими нам параметрами, в которой толщина слоя «второго» типа составляла $l=10$ мм, а величина слоев «первого» типа $x=20$ мм. В данной фотонной структуре были сделаны неоднородности, в частности изменялась длина среднего слоя с $\varepsilon=1$ от 7 мм до 1 мм, чтобы получить в запрещенной зоне узкое «окно» прозрачности. В результате моделирования было установлено, что при уменьшении толщины среднего слоя «первого» типа, «окно прозрачности» сдвигается в высокочастотную область, тем самым изменяя ширину среднего слоя, 7 мм, 6 мм, 5 мм, 4 мм, 3 мм, 2 мм, 1 мм, можно менять положение окна прозрачности в фотонной «запрещенной зоне».

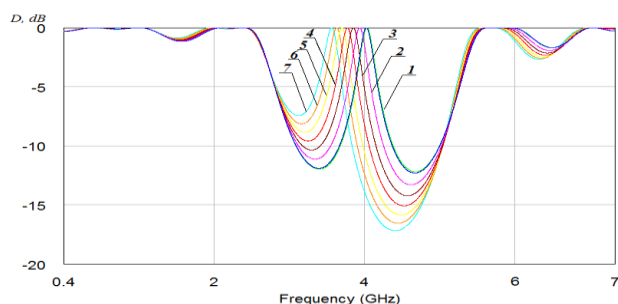


Рисунок 6 Частотная зависимость окон прозрачности в запрещенной зоне

фотонного кристалла при нарушении его однородности изменением среднего слоя «первого» типа: 1 – 1 мм; 2 – 2 мм; 3 – 3 мм; 4 – 4 мм; 5 –

5 мм; 6 – 6 мм; 7 – 7 мм

В третьем разделе было проведено экспериментальное исследование коаксиальных одномерных фотонных структур. В результате исследования были получены спектры прохождения, в диапазоне от 0,4 ГГц до 7 ГГц, коаксиальных фотонных кристаллов с двумя видами диэлектрического заполнения: воздух-капролон и воздух-эбонит (рисунок 7).

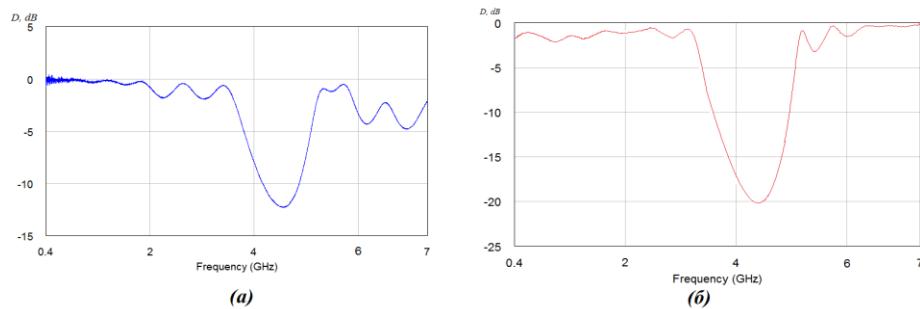


Рисунок 7 Экспериментальные частотные зависимости коэффициента прохождения D одномерного коаксиального фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением: (а) воздух-капролон, (б) воздух-эбонит

А так же получены частотные зависимости окон прозрачности при изменении длины среднего слоя диэлектрического заполнения коаксиальной линии, и установлено, что в обоих случаях при уменьшении длины среднего слоя возникает окно прозрачности и сдвигается в сторону высоких частот (рисунок 8).

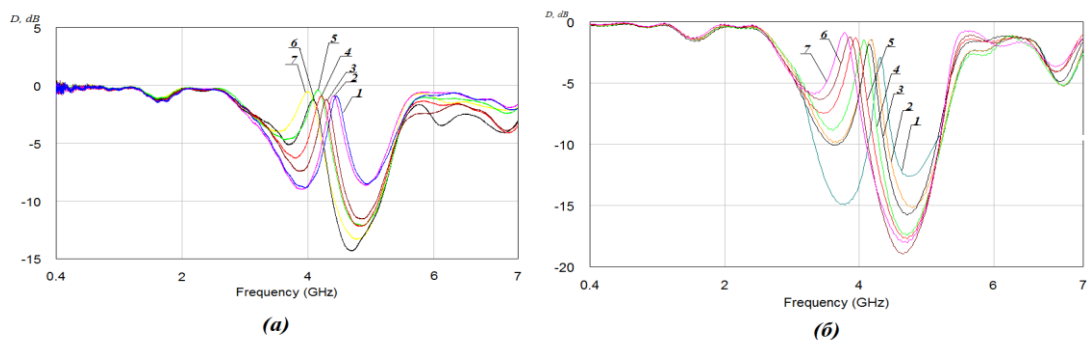


Рисунок 8 Экспериментальные частотные зависимости «окна прозрачности» в запрещенной зоне ФК при изменении длины среднего слоя диэлектрического заполнения: (а) воздух-капролон: 1 – 1 мм; 2 – 2 мм; 3 – 3 мм; 4 – 4 мм; 5 – 5 мм; 6 – 6 мм; 7 – 7 мм; (б) воздух-эбонит: 1 – 1 мм; 2 – 2 мм; 3 – 3 мм; 4 – 4 мм; 5 – 5 мм; 6 – 6 мм; 7 – 7 мм

А также по зависимостям коэффициента прохождения D одномерного коаксиального фотонного кристалла, были определены диэлектрические проницаемости используемых в качестве заполнения коаксиальной линии слоев. В результате было установлено, что диэлектрическая проницаемость капролона равна $\epsilon \approx 2$, эбонита $\epsilon \approx 2,6$ (рисунок 9-10)

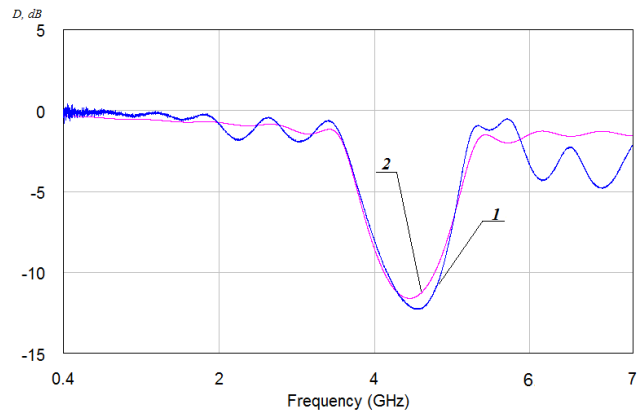


Рисунок 9 Частотные зависимости коэффициента прохождения D одномерного коаксиального фотонного кристалла с заполнением воздухом-капролон: (1) экспериментального образца, (2) подобранного в САПР с наиболее подходящими параметрами

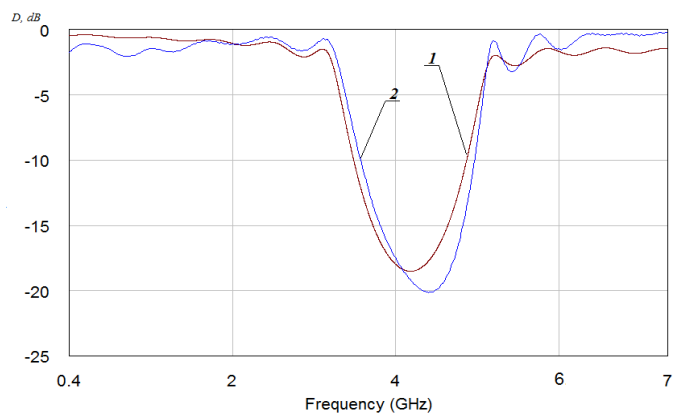


Рисунок 10 Частотные зависимости коэффициента прохождения D одномерного коаксиального фотонного кристалла с заполнением воздухом-эбонит: (1) подобранного в САПР с наиболее подходящими параметрами, (2) экспериментального образца

В заключении приведены основные результаты и сформулированы выводы бакалаврской работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Таким образом, в ходе выполнения бакалаврской работы:

1. Проведено компьютерное моделирование спектров прохождения одномерных коаксиальных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона при изменении параметров слоев, а также при наличии в них нарушений периодичности в виде измененной длины центрального слоя.
2. Установлено, что при изменении тех или иных параметров слоев диэлектрического заполнения коаксиальной линии, фотонная «запрещенная зона» может изменять свое положение по частотному диапазону, а также изменяется ее ширина и глубина. При создании нарушения периодичности в одномерных коаксиальных фотонных кристаллах в виде изменения толщины центрального слоя приводит к появлению узкого «окна прозрачности» в «запрещенной зоне» коаксиального фотонного кристалла. При этом частотное положение и форма «окна прозрачности» зависит от ширины слоя нарушения.
3. Представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия СВЧ-излучения с одномерными коаксиальными фотонными кристаллами, с двумя видами диэлектрического заполнения, в частотном диапазоне 0,4-7 ГГц. Экспериментально исследован спектр прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с одномерными коаксиальными фотонными кристаллами, содержащими нарушения периодичности в виде измененной длины центрального слоя.
4. На основании полученных результатов была определена диэлектрическая проницаемость слоев внутреннего диэлектрического заполнения коаксиальной линии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарев Д. В. Особенности взаимодействия СВЧ-излучения с фотонными кристаллами, содержащими в качестве неоднородностей диэлектрические, полупроводниковые и металлические включения. Саратов, 2012.–139с.
2. Yablonovitch E. Photonic band-gap crystals// Journal of Physics-Condensed Matter. 1993. Vol.5, no.16. pp. 2443–2460.
3. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей. Саратов, 2014.–38с.
4. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров материалов. Саратов, 2014. –32 с.