

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЧ-ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ С РАЗЛИЧНОГО РОДА ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Петухова Наталья Александровна

магистр, аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, РФ, г. Санкт-Петербург

Electrodynamic properties of microwave photonic crystals from various genus inclusions

Natalia Petukhova

master, PhD student, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia, St. Petersburg

Аннотация. В статье работы проведён аналитический обзор литературных источников об исследованиях особенностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысококачественного диапазона с микрополосковыми фотонными кристаллами. Также показана возможность использования данных методик для измерения параметров жидких диэлектриков.

Abstract. An analytical review of the literature on the investigation of the features of the interaction of electromagnetic radiation of the microwave range with microstrip photonic crystals is carried out in the article. The possibility of using these techniques for measuring the parameters of liquid dielectrics is also shown.

Ключевые слова: СВЧ; микрополосковый ; фотонные кристаллы; Брэгговские структуры; метаматериалы; диэлектрическая проницаемость; диэлектрик.

Keywords: microwave; microstrip; photonic crystals; Bragg structures; metamaterials; dielectric constant; dielectric.

В последнее время растёт интерес к исследованиям нового класса периодических структур, называемых «фотонными кристаллами». Эти структуры состоят из периодически расположенных составляющих, размеры которых сравнимы с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. В спектре пропускания такой структуры имеется частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны – аналог запрещенной зоны в кристаллах. При наличии нарушений в периодичности слоистой структуры в запрещенной зоне фотонного кристалла могут возникать узкие «окна» прозрачности. В СВЧ-диапазоне одномерный фотонный кристалл может быть реализован как с помощью волноводов с диэлектрическим заполнением [6; 9; 7], так и планарных линий передачи с периодически изменяющейся структурой [10; 8].

Использование открытых СВЧ-линий передачи позволяет сочетать достаточно высокую чувствительность СВЧ-методов измерений с технологичностью изготовления структур и

оправок для измерения и отсутствием жестких требований на размеры образцов. К недостаткам измерительных систем на открытых линиях передачи можно отнести наличие потерь на излучение на открытых концах передающих линий, неоднородностях, например, связанных с необходимостью использования коаксиально-микрополосковых переходов, трудности в проведении локальных измерений.

Среди различных типов планарных схем микрополосковые являются наиболее часто используемыми в СВЧ-электронике. Микрополосковые схемы достаточно широко используются при реализации СВЧ-методов измерения параметров материалов, в частности, материалов подложек СВЧ-схем.

В связи с высокой чувствительностью частотной зависимости «окон» прозрачности в запрещенной зоне фотонного кристалла к параметрам нарушения периодичности, перспективным представляется использование микрополосковых фотонных кристаллов для определения параметров материалов в СВЧ-диапазоне.

СВЧ-устройства, которые можно обобщить определением структуры с периодическими неоднородностями, широко известны в теории и технике направляющих и излучающих систем. Подобные устройства, принцип действия которых основан на взаимодействии прямых и многократно отраженных от неоднородностей электромагнитных волн, нашли применение при создании фильтрующих схем, формирователей и преобразователей радиочастотных сигналов.

Наблюдающаяся на современном этапе научно-технического развития тенденция трансферта оптических и радиочастотных технологий обусловила повышенный интерес к этим устройствам как аналогам оптических фотонных кристаллов, Брэгговских структур и метаматериалов. Исследование свойств таких устройств в одном диапазоне электромагнитных колебаний может помочь открыть новые качества и явления в другом диапазоне.

Одним из направлений обмена технологий являются сенсорные приложения. Примером может служить волоконно-оптическая решетка Брэгга, широко используемая в измерительной технике, аналогом которой в радиодиапазоне можно назвать коаксиальный волновод с продольными периодическими неоднородностями [8].

В работе [5] описана предложенная её авторами методика измерения диэлектрической проницаемости материалов при использовании одномерных периодических структур миллиметрового диапазона длин волн. Для этого предлагается использовать волновод, содержащий чередующиеся диэлектрические вкладыши с двумя различными значениями диэлектрической проницаемости. Структура рассматривается, как СВЧ-аналог одномерного распределенного диэлектрического зеркала, (брэгговского отражателя), образованного чередованием слоев с различными показателями преломления и характерными толщинами, удовлетворяющими резонансному условию Брэгга [1]. В спектре пропускания такой микроструктуры появляется частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны – фотонная запрещенная зона. Локальное изменение любого параметра такой структуры, например, периода- чередования слоев- или диэлектрической проницаемости одного из слоев, приводит к образованию дефекта в строгой пространственной периодичности структуры и позволяет получить узкий пик пропускания в области запрещенной зоны.

В [5] предлагается использовать фазочувствительные свойства пика пропускания для определения диэлектрической проницаемости различных образцов материалов СВЧ-диапазона, которые выполняют роль нарушения пространственной периодичности.

Важным выводом, который и доказывает возможность прикладного использования данной методики для измерения диэлектрической проницаемости материалов, является монотонная, зависимость изменения резонансной частоты пика пропускания (см. рис. 1) от величины

ϵ_{DEF} .

Таким образом, имея калибровочную кривую $f_{RES}(\epsilon_{DEF})$ подобную изображенной на рис.

2, определенную для нескольких известных (калиброванных) значений ϵ_{DEF} , можно определить диэлектрическую проницаемость неизвестного материала, зная положение его пика пропускания на АЧХ периодической структуры.

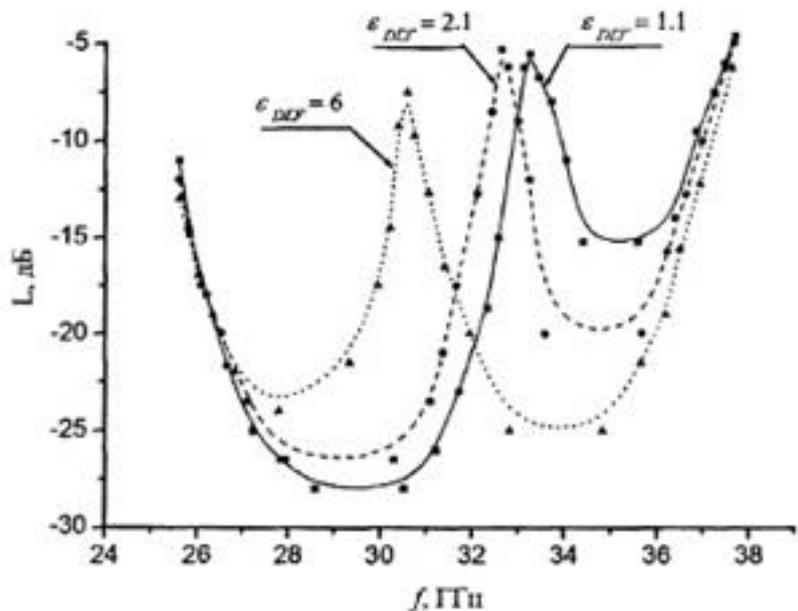


Рисунок 1. Характерная АЧХ брэгговской структуры с дефектом

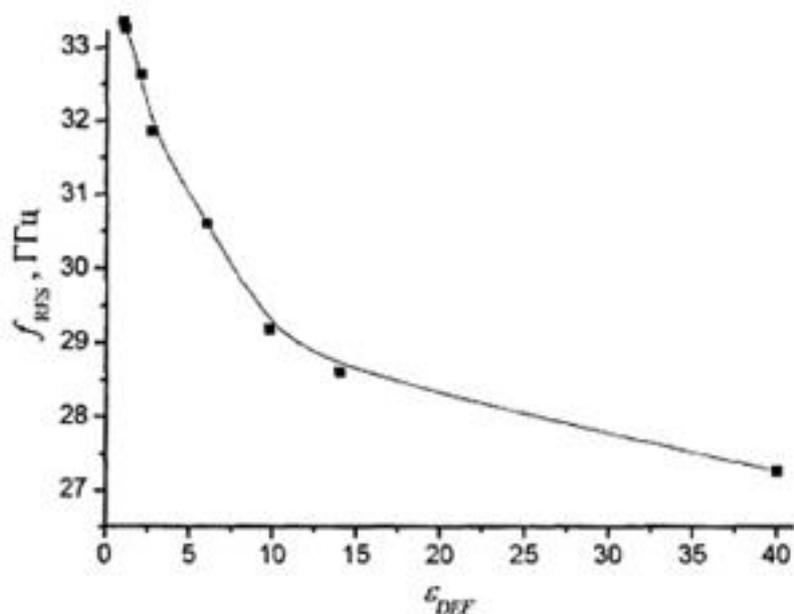


Рисунок 2. Изменение спектрального положения пика пропускания АЧХ брэгговской структуры от величины ϵ_{DEF}

Авторы [5], однако, рассматривали лишь материалы с малыми потерями на СВЧ и потому измеряли только действительную часть комплексной диэлектрической проницаемости. К тому

же предложенный ими метод является чисто калибровочным, что приводит к снижению гарантированной точности измерений. К недостаткам этого метода также можно отнести трудность его применения для измерения параметров жидкостей вследствие необходимости решать проблему обеспечения герметичности. Кроме того, использование волноводных систем затрудняет возможность измерений параметров материалов в условиях воздействия на нее внешних электромагнитных полей, так как для измерения используется закрытая волноводная система, представляющая своего рода экранирующую систему.

В работе [3] приведены результаты исследований характеристик запрещенной зоны волноводной брэгговской структуры, которая является аналогом одномерного фотонного кристалла в оптике. Показана возможность управления этими характеристиками при изменении периода подобной структуры. Предлагалось использовать брэгговские структуры в качестве режекторных волноводных фильтров миллиметрового, субмиллиметрового и терагерцового диапазонов с различными частотными характеристиками.

Рассматривались периодические структуры, представляющие собой чередующиеся слои диэлектриков: пенопласта с $\epsilon_1 = 1,1$ и поликора (Al_2O_3) с $\epsilon_2 = 9,8$. Исследуемые структуры заполняли прямоугольный волновод сечением $7,2 \times 3,4$ мм. Исследовались параметры запрещенной зоны при изменении периода l диэлектрической структуры, причем изменение периода структуры происходило за счет изменения толщины пенопласта, при этом толщина второго диэлектрика (поликора) оставалась постоянной. При таком увеличении периода структуры авторы [3] наблюдали уменьшение ширины запрещенной зоны, и смещение ее центральной частоты в область меньших частот, как это видно из графиков, приведенных на рис. 3.

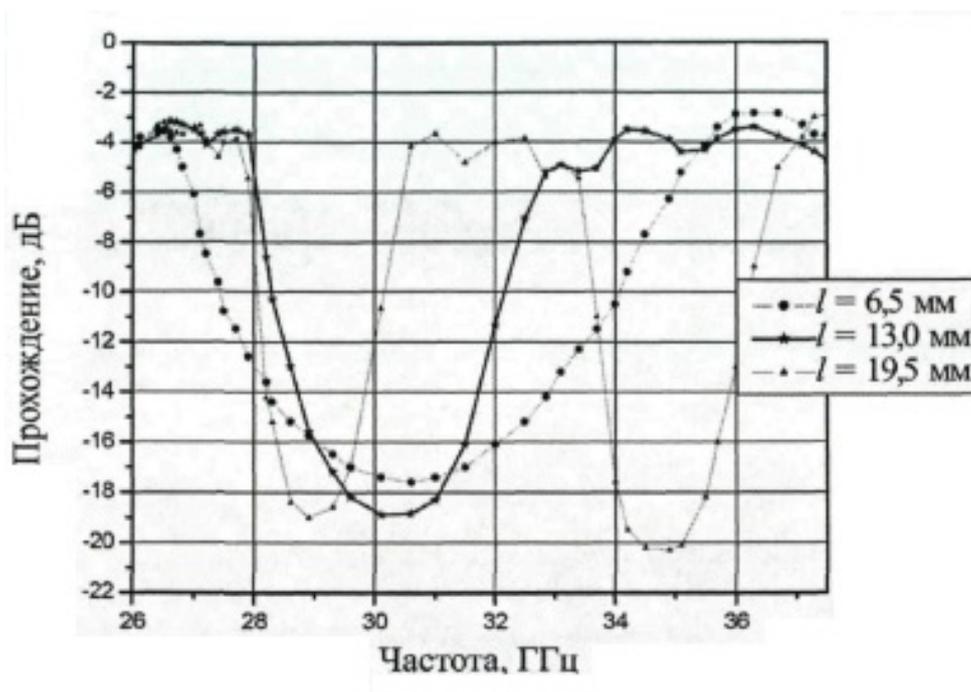


Рисунок 3. Экспериментальные АЧХ брэгговских структур с различными периодами

Полученные результаты позволили авторам [3] говорить о возможности создания эффективных режекторных фильтров с несколькими частотными полосами заграждения. Добавление количества периодов структуры приводило к увеличению ослабления в запрещенной зоне, тем самым улучшая прямоугольность амплитудно-частотных характеристик подобных режекторных фильтров.

Авторы [13] рассматривали СВЧ-фотонный кристалл (рис.4), представляющий собой воздушную полосковую линию, в которой в полосковом проводнике шириной 20 мм создана периодическая система прямоугольных отверстий 3x12 мм, расположенных с периодом 4 мм.

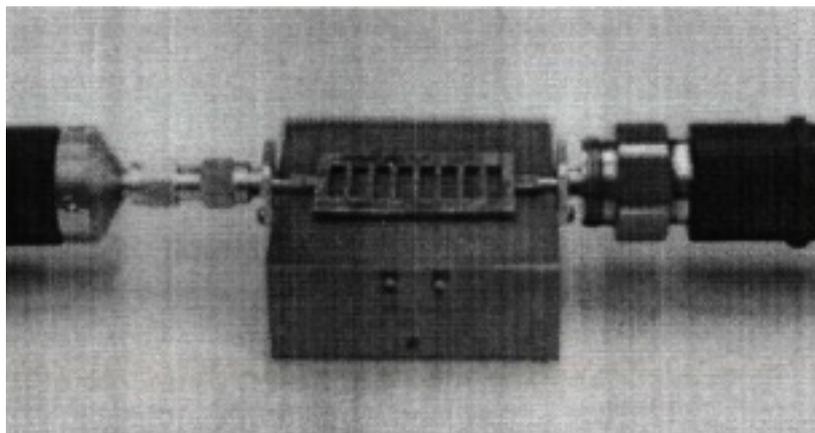


Рисунок 4. СВЧ-фотонный кристалл на основе воздушной полосковой линии с отверстиями в полосковом проводнике

В работе [13] изучен спектр пропускания такой структуры с целью исследовать возможность появления в нем полосы заграждения - так называемой, фотонной запрещенной зоны. Расчет производился с использованием аналитических выражений для краевых частот фотонной запрещенной зоны в одномерных фотонных кристаллах. Причем рассматривались аналитические выражения, полученные при условии, что волновое сопротивление периодически изменяется вдоль структуры ввиду ее пространственной периодичности и

выражения, построенные с использованием эффективного показателя преломления n_{eff} , величина которого также периодична. В этой работе наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных спектров пропускания СВЧ-фотонного кристалла, как это можно наблюдать на графиках рис. 5. Образование фотонных запрещенных зон объясняется явлением отражения электромагнитной волны на границах слоев. Приводятся расчеты показывающие образование дефектной моды в фотонной запрещенной зоне, порожденной нарушением периодичности структуры, рассматриваемым в виде изменения длины одного из слоев.

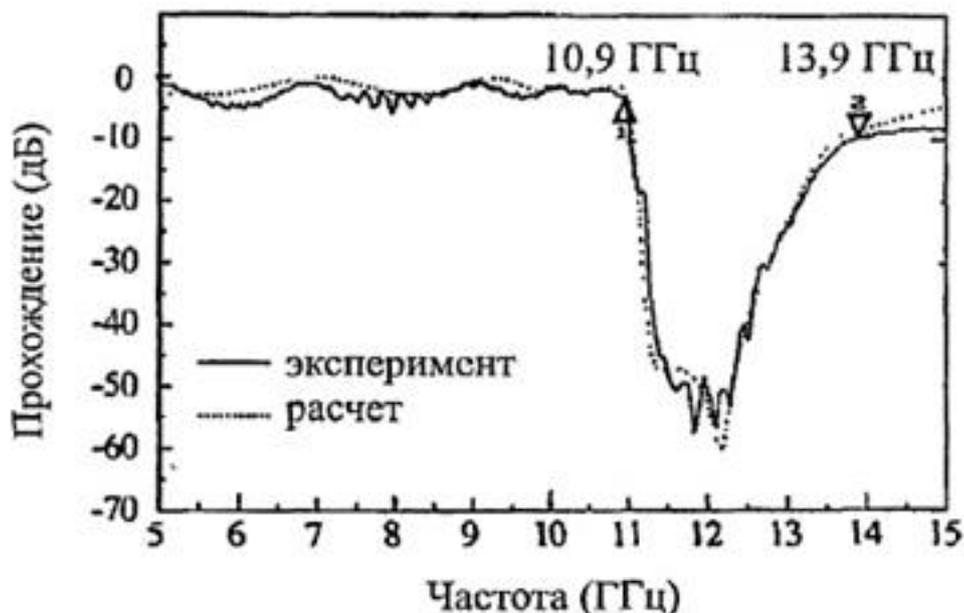


Рисунок 5. Расчетный и измеренный спектры пропускания структуры, изображенной на рис. 1.4

В работе [1] предложили слоистые структуры, обладающие свойствами фотонных кристаллов, в которых в качестве составных элементов использовались тонкие металлические пленки. В [1] рассматривалась возможность численного моделирования многослойных металлических структур с использованием аналитических формул, при этом толщина слоев могла быть до 1000 раз меньше толщины скин-слоя и достигать нескольких ангстрем. Авторы предложили использовать подобные структуры при создании высокочастотных резонаторных систем. Прирост добротности по сравнению с монолитными металлическими аналогами зависит от числа слоев и от их толщины и при некоторых условиях может достигать 170 раз.

В работе [11] рассматриваются импедансные поверхности с запрещенными зонами, представляющие собой периодические системы выступов грибовидной формы, объединенные в двумерную решетку (рис. 6), называемые двухслойными высокоимпедансными поверхностями. Такие поверхности, хорошо проводящие постоянный ток и токи малой частоты, в СВЧ-диапазоне имеют запрещенную зону (диапазон частот), в которой коэффициент передачи электромагнитной волны по поверхности близок к нулю.

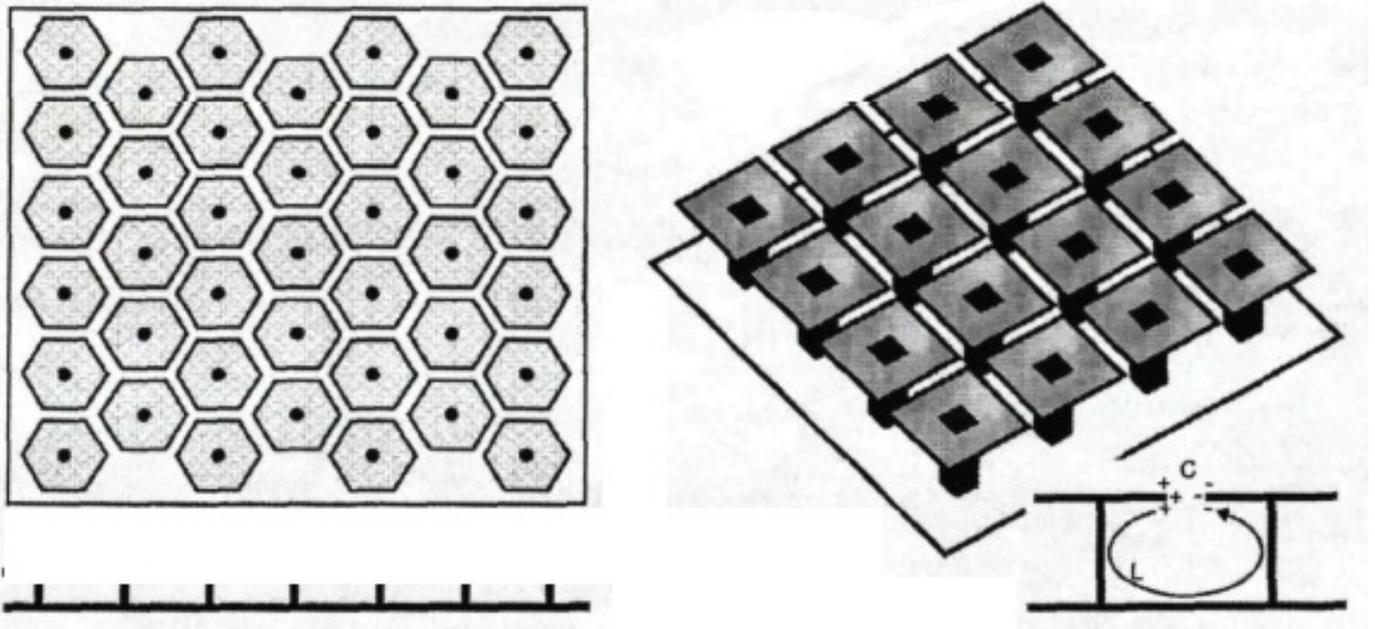


Рисунок 6. Примеры двухслойных импедансных поверхностей

Авторы провели серию измерений частотной зависимости коэффициента прохождения электромагнитного излучения по импедансной поверхности. При этом отдельно измеряли вертикальную (ТМ поверхностные волны) и горизонтальную (ТЕ поверхностные волны) составляющие электрического поля. Результаты, приведенные на рис. 7 и 8 демонстрируют наличие запрещенной зоны.

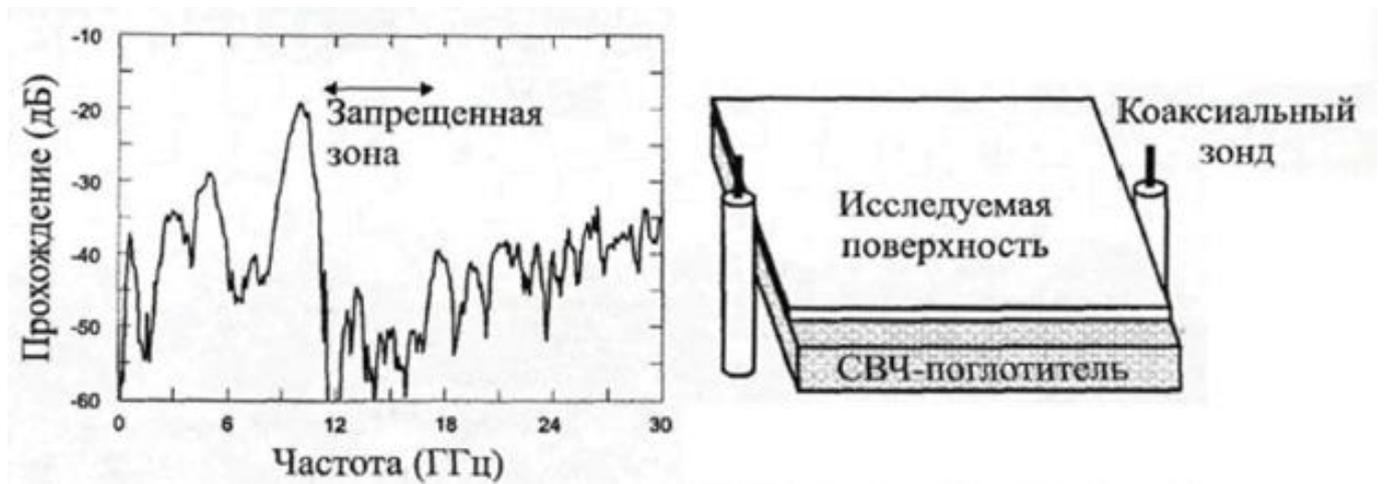


Рисунок 7. Спектр прохождения ТМ волн по импедансной поверхности и измерительная схема

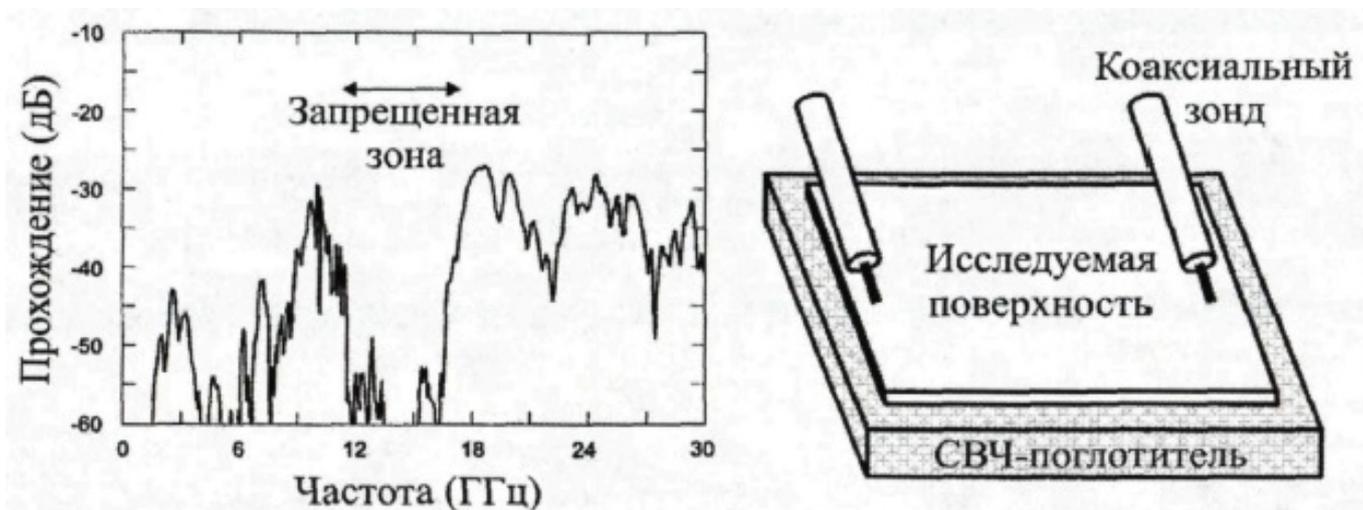


Рисунок 8. Спектр прохождения TE волн по импедансной поверхности и измерительная схема

В работе [11] рассмотрены также трехслойные высокоимпедансные поверхности, отличающиеся от двухслойных наличием еще одного ряда грибовидных выступов большей высоты. Экспериментальные результаты (рис.9) для такой структуры также демонстрируют наличие запрещенной зоны в спектре поверхностных электромагнитных волн, но на более низких частотах из-за значительно большей межрезонаторной емкости.

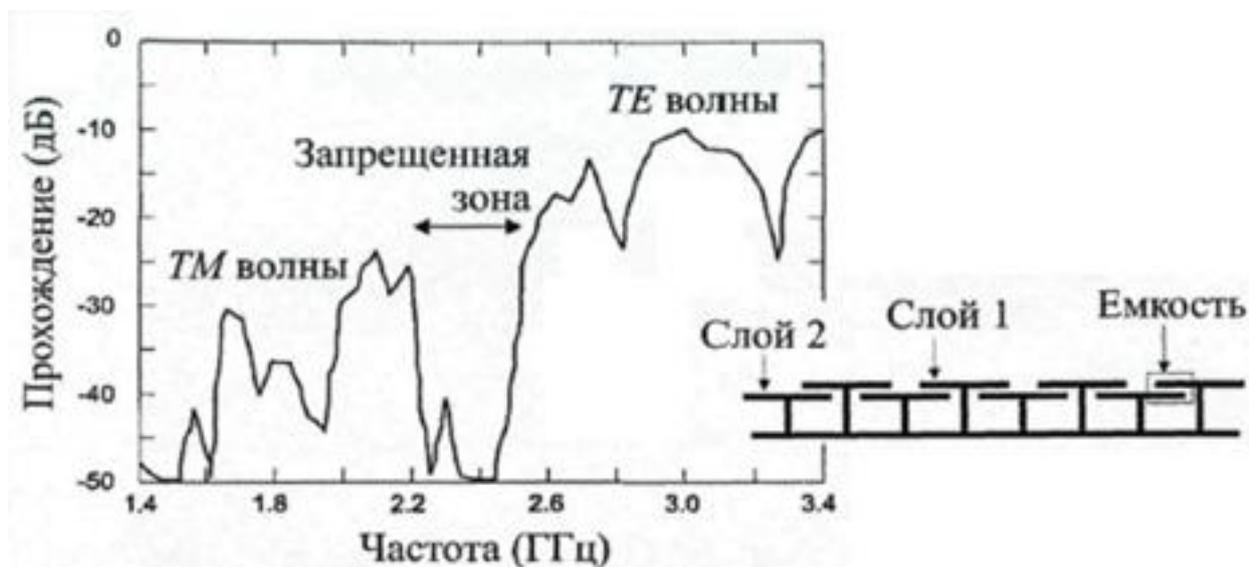


Рисунок 9. Спектр поверхностных волн и структура трехслойных импедансных поверхностей

В работе [12] рассматривается периодическая структура, изображенная на рис. 10, содержащая несколько диэлектрических пластин с нанесенными на них круглыми металлическими отражателями. Теоретические расчеты прохождения и отражения электромагнитного излучения в таких структурах, произведенные с использованием аналитических уравнений, демонстрируют хорошее совпадение с результатами измерений, как это можно наблюдать на графиках (рис. 11), построенных для четырехслойной структуры.

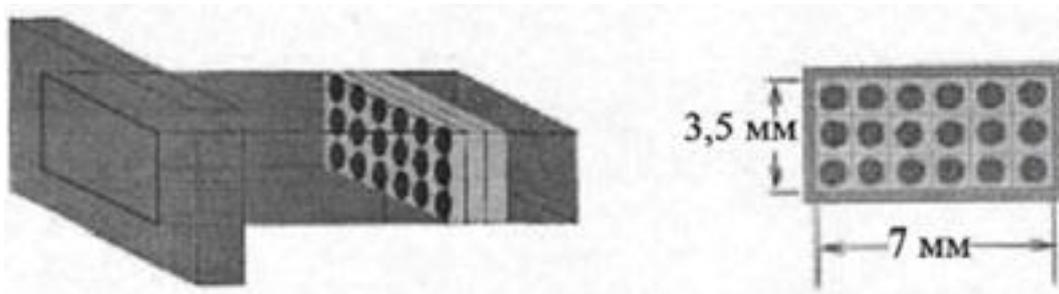


Рисунок 10. Волноводная структура

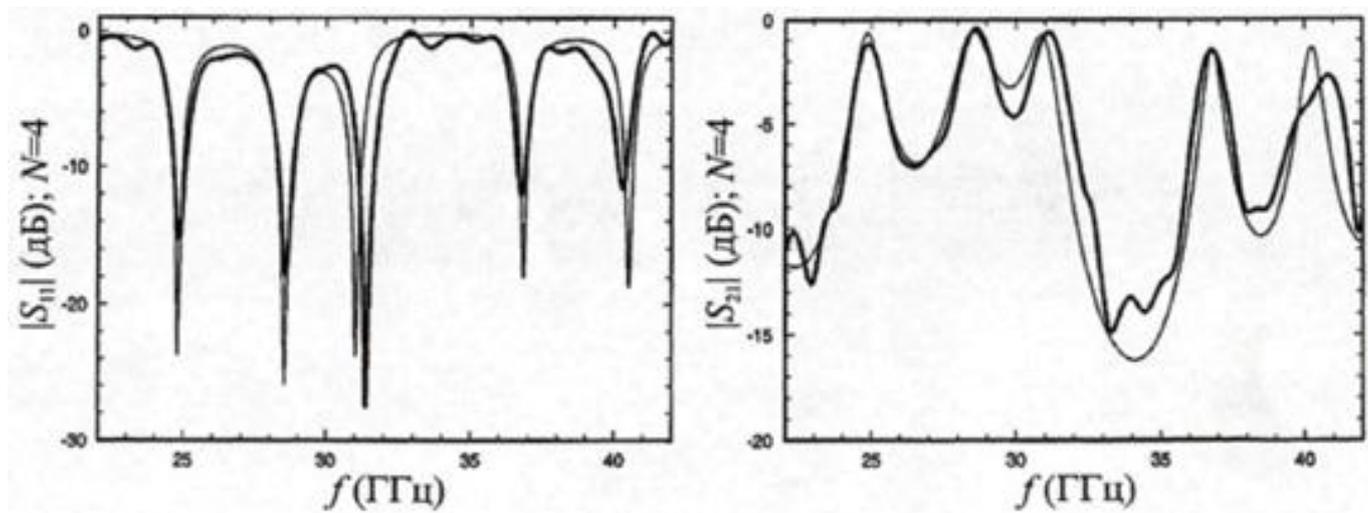


Рисунок 11. Спектры отражения (слева) и пропускания (справа) четырехслойной структуры

Используя разработанную методику расчета многослойных структур, состоящих из пластин с отражательными элементами, авторы решили задачу подбора толщины пластин, количества и размеров отражательных элементов с целью получения полосы пропускания в заданном частотном диапазоне. Рассчитанные частотные зависимости прохождения электромагнитной волны через структуру с оптимизированными параметрами, представленные на рис.12, позволили авторам говорить о возможности создания полосно- пропускающих СВЧ-фильтров на основе таких структур со сверхплоской полосой пропускания (0,25 дБ) и высоким подавлением (100 дБ).

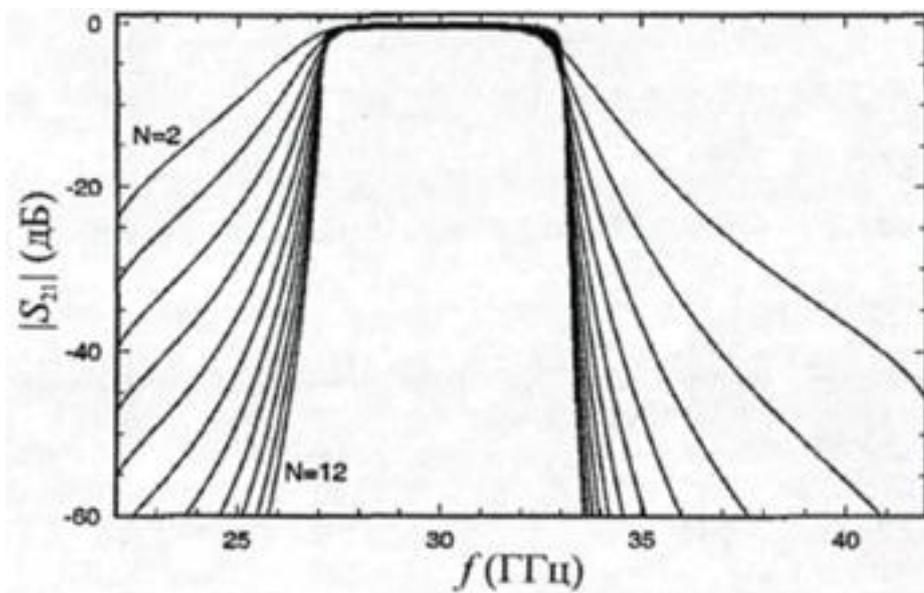


Рисунок 12. Расчетные спектры пропускания структур с оптимизированными параметрами, построенные для различного числа слоев

Результаты численного моделирования с использованием аналитических уравнений, проведенные авторами [12], хорошо совпадают с результатами моделирования с использованием коммерческого пакета проектирования СВЧ-схем Ansoft HFSS.

Авторы [13] рассматривают одномерные структуры с фотонной запрещенной зоной, созданные с использованием планарных линий передачи. Были изготовлены периодические структуры на основе копланарных волноводов, копланарной полосковой линии и щелевых линий, в которых параметры линии передачи периодически изменялись в направлении распространения волны. Авторы провели серию измерений S-параметров изготовленных структур, а также компьютерное моделирование прохождения и отражения СВЧ-излучения. При этом исследовались как строго периодические структуры, так и структуры содержащие нарушение периодичности в виде удлинения одного из периодов повторения геометрических параметров. На рис. 13 представлены расчетные и измеренные спектры пропускания и отражения для копланарной структуры, демонстрирующие появление запрещенной зоны в спектре периодической структуры и появление пика пропускания в запрещенной зоне при внесении в структуру неоднородности, слева - строго периодичная структура, справа - с нарушением периодичности. Для структур на основе копланарных волноводов и щелевых линий передачи авторы получили качественно похожие частотные зависимости.

В работе [13] предлагается на основе строго периодических структур создавать полосно-подавляющие фильтры, а на основе структур с нарушением периодичности высокодобротные резонаторы.

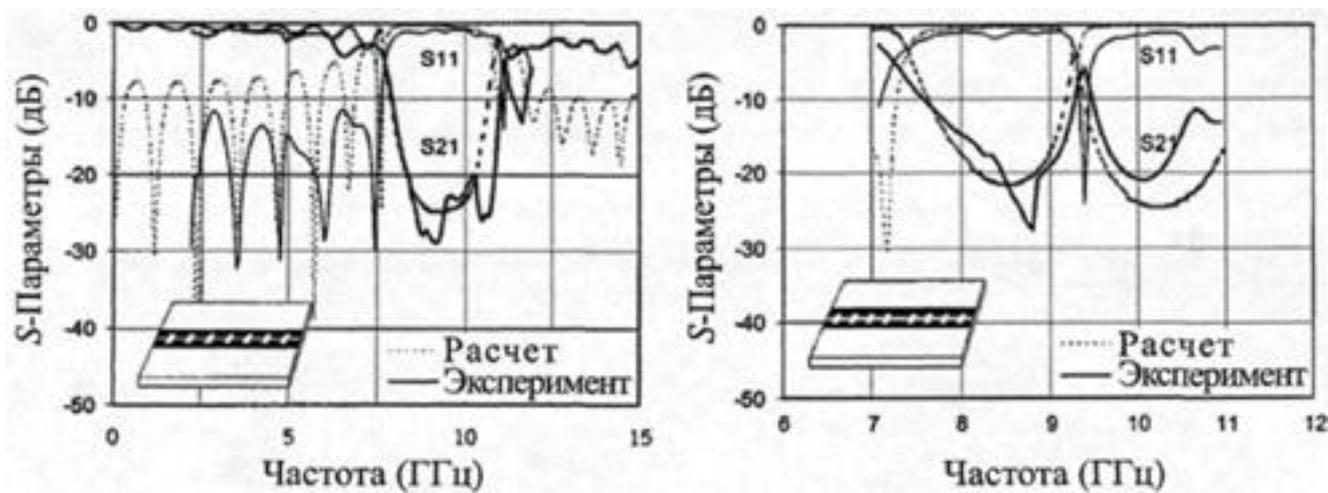


Рисунок 13. Расчетные и измеренные спектры пропускания и отражения периодической структуры на основе копланарной полосковой линии

В статье [4] рассматриваются микрополосковые модели одномерной сверхрешетки, созданные на основе нерегулярных микрополосковых структур, отличающихся простотой и технологичностью в изготовлении. Такие конструкции рассматриваются в качестве СВЧ-аналогов диэлектрических сверхрешеток, состоящих из материалов с различным показателем преломления, и представляют интерес при исследовании свойств периодических структур. Принимая во внимание тот факт, что процесс изготовления многослойных структур технологически сложен и дорог, в некоторых случаях первоначальные экспериментальные исследования свойств сверхрешеток целесообразно проводить на объемных (не пленочных) аналогах, работающих на частотах, значительно ниже оптических.

Авторами [4] на основе энергетических соотношений предложен метод, позволяющий получить частотные зависимости коэффициентов связи резонаторов в микрополосковой модели одномерной сверхрешетки. Модель учитывает явления на границе соединения микрополосковых линий с различным волновым сопротивлением Z , для которого приводится соотношение:

$$Z = \begin{cases} \frac{120\pi/\epsilon_{эф}}{1,393 + \frac{w}{h} + 0,667 \ln(\frac{w}{h} + 1,444)}, & w \geq h \\ \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{эф}}} \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right), & w < h, \end{cases}$$

где: w - ширина полоскового проводника, h - толщина диэлектрической подложки, $\epsilon_{эф}$ - проницаемость, определяющая скорость распространения и, соответственно, длину электромагнитной волны в микрополосковой линии передачи, которая связана с диэлектрической проницаемостью материала подложки ϵ и геометрическими размерами элементов линии соотношением:

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2} P, \text{ где } P = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1 + 12w/h}}, & w \geq h, \\ \frac{1}{\sqrt{1 + 12w/h}} + 0,04(1 - w/h)^2, & w < h. \end{cases}$$

Разработанная модель использовалась для расчета прохождения и отражения излучения в структурах, содержащих три последовательно включенных резонатора, из которых средний имел отличные от двух крайних- резонаторов параметры. Измерения, проведенные на ряде микрополосковых структур, показали достаточно хорошее совпадение теории с экспериментом.

Авторами [2] рассматриваются микрополосковые структуры, содержащие большее число слоев. На рис. 14 изображены топология и амплитудно-частотные характеристики многослойных периодических микрополосковых структур, настроенных как полосно-пропускающий фильтр на центральную частоту полосы пропускания $f_0 = 3$ ГГц и

относительную ширину полосы пропускания $\Delta f / f_0 = 40\%$, измеренную по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь. Такие структуры также могут быть рассмотрены как аналоги оптических фильтров и зеркал, причем, в качестве последних особый интерес представляет структура, состоящая из двух подрешеток (рис. 14, справа, сплошные линии - прямые потери, штриховые - потери на отражение), обладающая полосой заграждения в диапазоне частот, превышающем октаву.

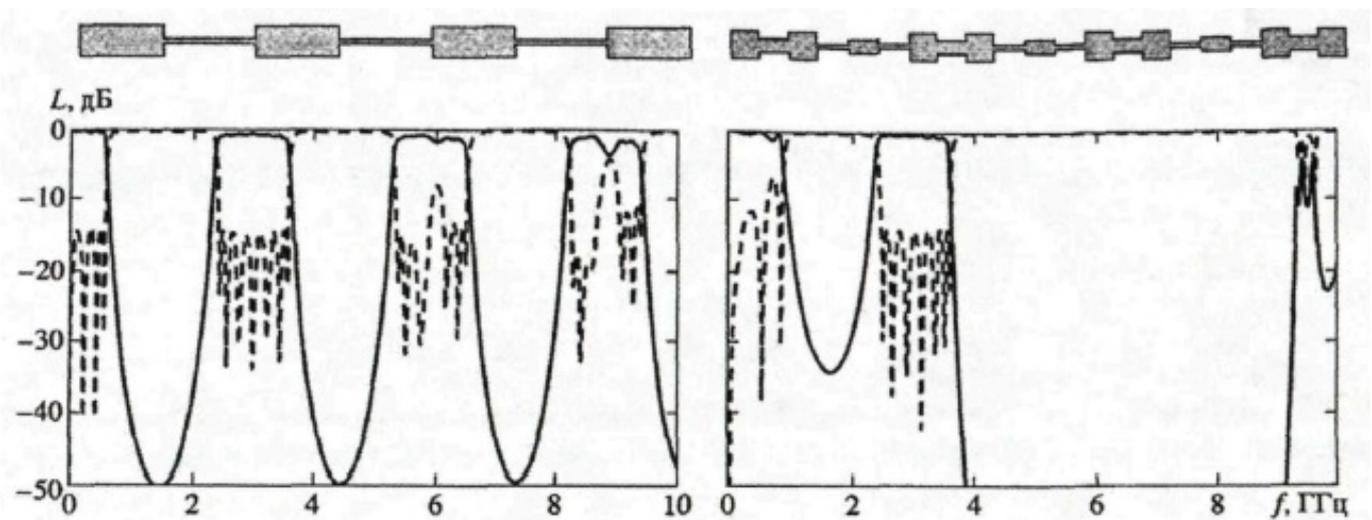


Рисунок 14. Амплитудно-частотные характеристики микрополосковых моделей одномерного ФК с обычной решеткой (слева) и с решеткой, состоящей из двух подрешеток (справа)

Области частот, где коэффициент отражения света падающего на ФК близок к единице, принято называть фотонными запрещенными зонами. Очевидно, что введение дефекта в ФК, например, слоя, отличающегося толщиной или диэлектрической проницаемостью от основной периодической структуры, приводит к искажению АЧХ за счет проявления резонансов в этом слое-дефекте. Такие дефекты называют примесными, а их спектральные частоты - примесными модами колебаний. При описании примесных мод в работе [2] оперируется понятием нагруженной добротности, отмечая, что резонанс примесной моды обладает высокой нагруженной добротностью, если он попадает в центр фотонной запрещенной зоны.

Экспериментальная проверка, проведенная авторами [2] на микрополосковых конструкциях, изготовленных методом гравировки по лаку, показала достаточно хорошее согласие полученных результатов с численным расчетом одномерных моделей нерегулярных структур с использованием квазистатического приближения. Это можно видеть из приведенных на рис. 15 расчетных и измеренных амплитудно-частотных характеристик микрополосковой модели фотонного кристалла с дефектом.

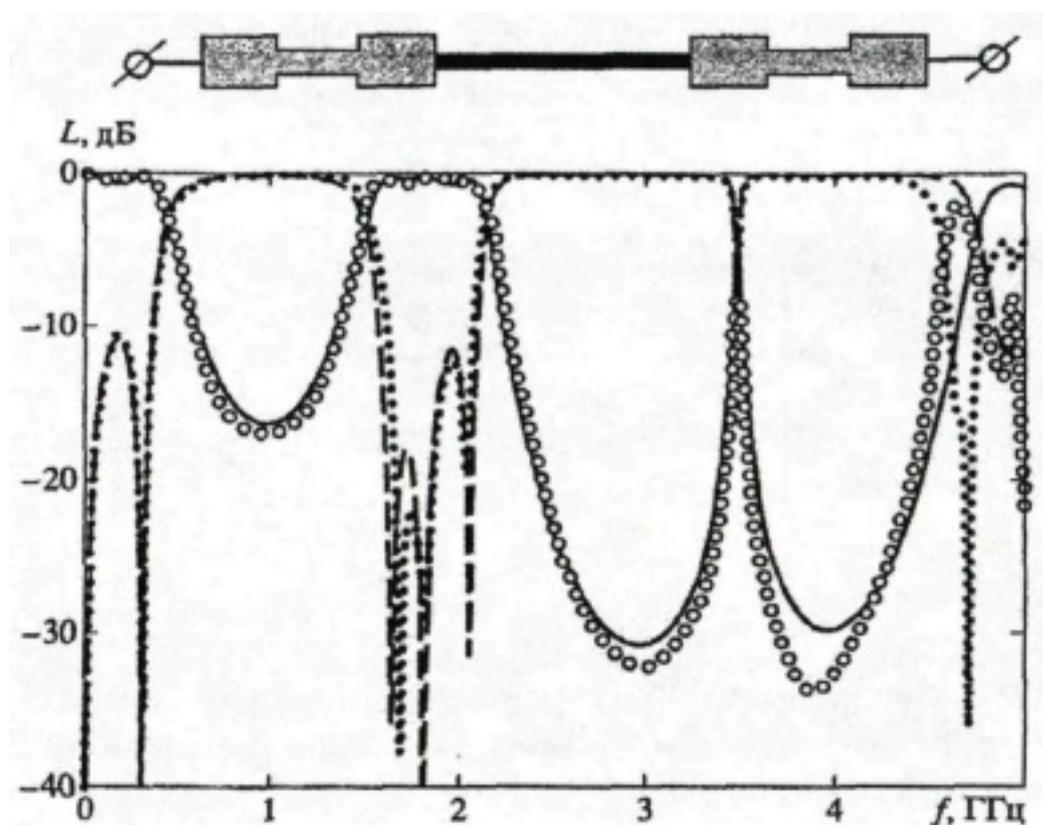


Рисунок 15. Топология и частотные зависимости прямых и обратных потерь для микрополосковой модели одномерного фотонного кристалла с дефектом. Линии - расчет, точки - эксперимент

Таким образом проведён аналитический обзор литературных источников об исследованиях особенностей взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона с микрополосковыми фотонными кристаллами.

Список литературы:

1. Акиба С., Утака К. Динамические одночастотные полупроводниковые лазеры. – М.: Мир, 1989.
2. Беляев Б. А., А. С. Волошин, В. Ф. Шабанов, Исследование добротности резонанса примесной моды в микрополосковой модели одномерного фотонного кристалла // Доклады Академии Наук, 2005, том 403, № 3, С. 319-324.
3. Данилов В. В., Олейник В. В., Волноводные брэгговские структуры с запрещенными зонами в К-диапазоне // Материалы 16-ой: Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо-2006. Украина, Севастополь, 11-15 сентября 2006 г. С. 830-831.

4. Милкин С.С., Стародубов А.В., Горин Д.А., Калинин Ю.А. Коаксиальная ячейка для измерения параметров жидких диэлектриков на сверхвысоких частотах (СВЧ) // патент на полезную модель RUS 119124 26.03.2012.
5. Олейник В. В., Макаров Д. Г., Данилов В. В., Измерение: диэлектрической проницаемости с использованием волноводной брэгговской структуры // Материалы 15-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо--2005. Украина, Севастополь, 12-16 сентября 2005 г. С. 785-786.
6. Петухова Н.А., Куракин А.С. К вопросу о измерении параметров жидких диэлектриков // Сборник научных трудов SWORLD - 2015. - С. 82-85.
7. Петухова Н.А. Моделирование установки для измерения параметров жидких диэлектриков // Вестник Тихоокеанского государственного университета. - 2016. № 3 (42). С. 23-32.
8. Севастьянов А.А. Измерение диэлектрических характеристик жидкостей с помощью решеток брэгга в радиочастотном коаксиальном кабеле // Современные проблемы науки и образования. - 2014. № 4. С. 213.
9. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Измерение параметров твердых и жидких диэлектриков на сверхвысоких частотах с использованием микрополосковых фотонных структур // Радиотехника и электроника. -2012. Т. 57. № 2. С. 230.
10. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Романов А.В., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Фотонные структуры в свч-диапазоне и их применение для измерения параметров композитов с включениями из углеродных нанотрубок и жидких диэлектриков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2010. Т. 13. № 3. С. 26-34.
11. Dan Sievenpiper, Lijun Zhang, Romulo F. Jimenez Broas, Nicholas G. Alexopolous, and Eli Yablonovitch, High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, VOL.47, №. 11, november 1999, P. 2059-2074.
12. 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. V. 49. №. 2. P. 297-306.
13. Tae-Yeoul and Kai Chang. Uniplanar one-dimensional photonic-bandgap structures and resonators // IEEE Transactions on-Microwave Theory and Techniques. - 2001. - Vol. 49, №. 3. - P. 549-553.