



УДК 621.372.2

Резонансные особенности в разрешенных и запрещенных зонах сверхвысокочастотных коаксиальных брэгговских структур с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением



А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, О. М. Рузанов, И. О. Тимофеев

Скрипаль Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, skripala_v@info.sgu.ru

Пономарев Денис Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, ropomarev87@mail.ru

Рузанов Олег Михайлович, аспирант кафедры физики твердого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, zodiark@list.ru

Тимофеев Илья Олегович, аспирант кафедры физики твердого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, timmon20@mail.ru

Исследована взаимосвязь строения разрешенных и запрещенных зон сверхвысокочастотной коаксиальной брэгговской структуры (КБС) с электрическими параметрами её структурных единиц. Показано, что в зависимости от соотношения электрических длин элементарных структурных единиц, КБС можно рассматривать как несколько вложенных друг в друга брэгговских решеток с различным числом ячеек. Установлено, что частотное положение дефектной моды в КБС с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением практически не зависит от местоположения нарушения периодичности внутри КБС, а определяется электрофизическими параметрами слоя, нарушающего периодичность, при этом амплитуда дефектной моды максимальна при расположении нарушения периодичности в центре КБС.

Ключевые слова: коаксиальные брэгговские структуры, амплитудно-частотные характеристики, электрические длины элементарных структурных единиц, дефектная мода.

Поступила в редакцию: 18.11.2019 / Принята: 30.12.2019 / Опубликовано: 02.03.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-1-29-41>

Введение

Брэгговские структуры СВЧ-диапазона, также называемые фотонными кристаллами или структурами с запрещенной зоной, которые являются разновидностью метаматериалов с пери-

одической модуляцией геометрических размеров и электрофизических параметров в одном или нескольких пространственных направлениях, обладают свойствами, обеспечивающими возможность создания различных типов СВЧ-устройств, среди которых перестраиваемые резонаторы, направленные ответвители, миниатюрные антенны, согласованные нагрузки, различные типы СВЧ-фильтров, в том числе с управляемыми характеристиками [1–8].

СВЧ фотонные кристаллы используются также в качестве новых типов электродинамических систем при измерении параметров материалов и структур СВЧ-методами. В основу СВЧ-методов, использующих в качестве измерительной системы фотонные кристаллы, положено явление остро селективного изменения частоты и амплитуды примесной моды колебаний в запрещенной зоне фотонного кристалла при изменении параметров измеряемой структуры, выступающей в качестве нарушения его периодичности [9–13].

В СВЧ-диапазоне брэгговские структуры создаются на основе прямоугольных волноводов, микрополосковых, копланарных, щелевых и волноводно-щелевых линий передачи [14–23].

Волноводная конфигурация обладает достаточно узким рабочим диапазоном частот в сантиметровом диапазоне и длинноволновой части миллиметрового диапазона, поэтому для реализации резонансных свойств брэгговских структур в разрешенных и запрещенных зонах высокого порядка необходимо значительно увеличить электрический размер брэгговской ячейки. В случае использования одномерных структур это может быть достигнуто двумя способами: во-первых, увеличением её геометрической длины, что приводит как к увеличению общей длины брэгговской структуры, так и возрастанию потерь, во-вторых, значительным увеличением диэлектрической проницаемости элементов, образующих брэгговскую ячейку, что резко повышает требования к контролю их геометрических размеров и электрофизических характеристик.



Использование СВЧ брэгговских структур на основе плоских линий передачи, с одной стороны, обеспечивает технологичность элементной базы, создаваемой на их основе, с другой стороны, такие структуры характеризуются значительным возрастанием потерь на излучение на высоких частотах. Это искажает их передаточные характеристики при работе в разрешенных и запрещенных зонах высокого порядка.

Коаксиальные брэгговские структуры (КБС), выполненные на основе коаксиальных элементов, являющихся одними из наиболее распространенных типов элементов СВЧ волноведущих систем, характеризуются широким рабочим диапазоном частот и отсутствием потерь на излучение.

В [24] представлены периодические структуры, сформированные из соединенных между собой в определенной последовательности стандартных сверхвысокочастотных коаксиальных коннекторов различных типов. Нарушение периодичности создается посредством присоединения к коаксиальному тройнику, входящего в состав одной из элементарных ячеек брэгговской структуры, различного числа дополнительных коннекторов. Авторы [25] предложили использовать вместо коаксиальных коннекторов стандартные коаксиальные кабели с различным волновым сопротивлением, при этом дефект реализуется посредством изменения длины одного из кабелей. Такой подход позволяет реализовать теоретическое описание спектров прохождения с высокой степенью точности. В работах [26–29] брэгговские структуры созданы на основе стандартного коаксиального кабеля, содержащего периодически расположенные отверстия, высверленные во внешнем проводнике и диэлектрическом заполнении. Массив созданных в структуре коаксиального кабеля неоднородностей формирует упорядоченную периодическую структуру. Спектры прохождения и отражения СВЧ-излучения изменяются при деформации кабеля, что позволяет использовать такую электродинамическую конфигурацию в качестве основы датчика механических напряжений.

Несомненный практический интерес представляет возможность управления примесным состоянием в запрещенной зоне брэгговской структуры в широком диапазоне частот. Авторы [24] отмечают, что использование различных типов дефектов позволяет перестраивать частоту примесной моды в запрещенной зоне. Введение дефекта в ячейки, расположенные непосредственно у источника или приемника СВЧ-сигнала, не

приводит к заметным изменениям в спектре пропускания по сравнению со случаем отсутствия дефекта. Степень влияния дефекта на спектры прохождения возрастает при его перемещении к центру брэгговской структуры и приводит к увеличению амплитуды примесного пика. Авторы [29, 30] обнаружили, что с ростом числа введенных в брэгговскую структуру примесей расширяется полоса запираения и растут ширина и амплитуда примесного пика, при этом его частота остается неизменной.

Необходимо отметить, что СВЧ-устройства, создаваемые на основе рассмотренных выше КБС, обладают значительными, до нескольких метров длиной, размерами.

Внесение в коаксиальный кабель необратимых конструктивных изменений, например, посредством высверливания массива отверстий, создает такую электродинамическую конфигурацию, модификация которой в дальнейшем становится невозможной. Также стоит указать, что зачастую рассматривается достаточно узкий частотный диапазон, соответствующий только одной фотонной запрещенной зоне. Выходом из такой ситуации может стать формирование брэгговской структуры в виде набора периодически расположенных отрезков коаксиальной линии с различным диэлектрическим заполнением. Предлагаемый подход позволяет реализовать легко модифицируемую и отличающуюся малыми габаритами брэгговскую структуру, представляющую собой естественное продолжение стандартной коаксиальной линии передачи.

В настоящей работе сверхвысокочастотная КБС реализована на основе разборного отрезка коаксиальной линии передачи, содержащего внутри диэлектрическое заполнение с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью, который с помощью двух коаксиальных переходов подключается к внешним коаксиальным линиям передачи. Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование влияния параметров регулярных отрезков КБС с переменным диэлектрическим заполнением и создаваемых в ней нарушений периодичности на спектры отражения и прохождения СВЧ-излучения.

Теоретическое описание

Конструктивно КБС представляет собой отрезок коаксиальной линии передачи с помещенной внутрь него структурой в виде периодически чередующегося диэлектрического заполнения



между внешним и внутренним проводниками коаксиальной линии из двух типов диэлектриков с различными значениями толщины и диэлектрической проницаемости.

Для расчета коэффициента прохождения и отражения электромагнитной волны в КБС использовалась матрица передачи \mathbf{T} четырехполюсника сложной структуры, представляющего собой каскадное соединение элементарных четырехполюсников с известными матрицами передачи, которые имеют вид:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T[1,1] & T[1,2] \\ T[2,1] & T[2,2] \end{pmatrix} = \mathbf{T}'_N \times \prod_{i=1}^{N-1} (\mathbf{T}''_{i,i+1} \times \mathbf{T}'_i), \quad (1)$$

где \mathbf{T}'_i и $\mathbf{T}''_{i,i+1}$ – матрицы передачи четырехполюсников, описывающих соответственно i -тый отрезок и прямое соединение i -того и $(i+1)$ -того отрезков коаксиальной линии передачи.

Выражения для матриц передачи \mathbf{T}'_i и $\mathbf{T}''_{i,i+1}$ соответствующих элементарных четырехполюсников имеют вид [35, 36]:

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

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

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

$$\rho = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \log_{10} \left(\frac{d_{\text{внеш}}}{d_{\text{внутр}}} \right). \quad (4)$$

Постоянная распространения γ_i имеет вид:

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

Здесь $\alpha_i = \alpha_{mi} + \alpha_{di}$ – постоянная затухания i -того отрезка коаксиальной линии [30], равная сумме постоянных затухания в металлических проводниках α_{mi} и в диэлектрическом заполнении α_{di} ; $\beta_i = 2\pi/\lambda_i$ – фазовая постоянная, где λ_i – длина электромагнитной волны в i -том отрезке коаксиальной линии.

Постоянные затухания α_{mi} , α_{di} имеют вид:

$$\alpha_{mi} = \frac{0.023 R_s (d_{\text{внеш}} + d_{\text{внутр}}) \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}}{d_{\text{внеш}} d_{\text{внутр}} \ln \left(\frac{d_{\text{внеш}}}{d_{\text{внутр}}} \right)}, \quad (6)$$

$$\alpha_{di} = \frac{27.3 \text{tg} \delta \sqrt{\epsilon}}{\lambda}, \quad (7)$$

где μ – магнитная проницаемость диэлектрического заполнения, R_s – удельное поверхностное сопротивление проводника, $\text{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Коэффициенты прохождения и отражения СВЧ мощности определяются через элементы матрицы передачи \mathbf{T} по известным соотношениям [31]:

$$D = \frac{1}{|T[1,1]|^2}, \quad (8)$$

$$R = \left| \frac{T[2,1]}{T[1,1]} \right|^2. \quad (9)$$

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

Компьютерное моделирование

Рассматривались одномерные двухкомпонентные симметричные относительно центрального слоя КБС (рис. 1), составленные из 11 или 19 слоёв, в диапазоне частот 0.1–26 ГГц. Нечетные слои КБС представляли собой отрезки с диэлектрическим заполнением из ФЛАНА (листовой наполненный арилокс) ($\epsilon_a = 8.8$), четные – с диэлектрическим заполнением из тефлона ($\epsilon_b = 2.0$). Внутренний диаметр внешнего проводника $d_{\text{внеш}}$ составлял 7 мм, внешний диаметр внутреннего проводника $d_{\text{внутр}} = 3$ мм.

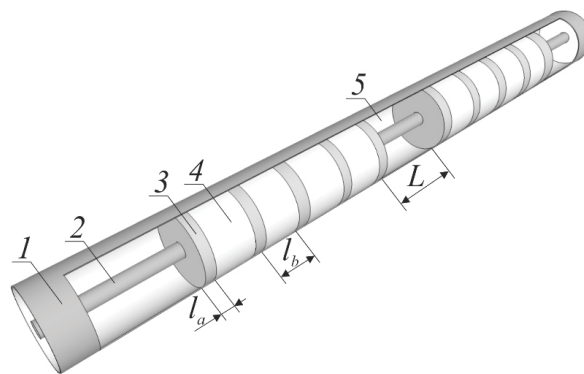


Рис. 1. Конструкция одномерной СВЧ КБС с нарушением периодичности: 1 и 2 – внешний и внутренний проводники, 3 и 4 – элементы, образующие периодическую структуру, 5 – нарушение периодичности

Fig. 1. Design of the one-dimensional microwave coaxial Bragg structure with defect: 1 and 2 – external and internal conductors, 3 and 4 – elements forming a periodic structure, 5 – defect

Результаты компьютерного моделирования продемонстрировали зависимость строения запрещенных и разрешенных зон в спектрах прохождения и отражения СВЧ-излучения от величины



электрической длины отрезков коаксиальной линии $l_a\sqrt{\epsilon_a}$ и $l_b\sqrt{\epsilon_b}$, где l_a и l_b – геометрические длины отрезков коаксиальной линии, ϵ_a и ϵ_b – диэлектрические проницаемости заполнения.

Длина нечетных слоёв КБС l_a выбиралась равной 4.0 мм, длина четных – $l_b = 8.4$ мм. Таким образом, элементарная ячейка моделируемой КБС состоит из двух расположенных друг за другом отрезков КБС с заполнением из ФЛАНА длиной 4.0 мм и из фторопласта длиной 8.4 мм. При выбранных геометрических длинах отрезков ФЛАНА и фторопласта их электрические длины оказываются равными друг другу: $l_a\sqrt{\epsilon_a} = l_b\sqrt{\epsilon_b}$.

АЧХ такой структуры характеризуются наличием периодически чередующихся разрешенных и запрещенных зон в общем случае разной ширины (рис. 2). Однако все запрещенные зоны оказываются одинаковыми по размерам и фор-

ме, все разрешенные зоны также одинаковы по размерам и форме между собой.

Известно, что разрешенные зоны фотонных кристаллов имеют изрезанную структуру, представляющую собой набор отдельных резонансов, число которых определяется числом брэгговских ячеек в исследуемой структуре, что следует из условия цикличности для дискретной структуры (граничное условие Борна – Кармана).

При равенстве электрических длин отрезков с заполнением из ФЛАНА (6 отрезков) и с заполнением из фторопласта (5 отрезков) 11-слойной КБС число резонансов N_{res} , формирующих разрешенные зоны КБС, равно 11 (см. рис. 2). Это позволяет сделать вывод, что каждый из 11-ти отрезков, являющихся структурной единицей КБС, представляет собой элементарную брэгговскую ячейку.

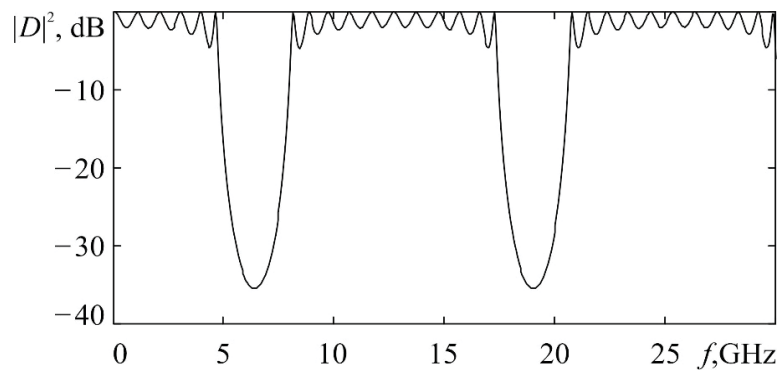


Рис. 2. АЧХ 11-слойной КБС при равенстве электрических длин отрезков с заполнением из ФЛАНА и фторопласта. $l_a = 4.0$ мм, $l_b = 8.4$ мм, $\epsilon_a = 8.8$, $\epsilon_b = 2.0$

Fig. 2. Amplitude-frequency characteristic of the 11-layer coaxial Bragg structure with equal electrical lengths of FLAN and teflon segments. $l_a = 4.0$ мм, $l_b = 8.4$ мм, $\epsilon_a = 8.8$, $\epsilon_b = 2.0$

В случае, когда элементарная брэгговская ячейка составлена из двух отрезков, заполненных диэлектриками с различными значениями диэлектрической проницаемости, электрические длины которых не совпадают, но при этом кратны друг другу, в спектре прохождения возникают дополнительные наборы разрешенных и запрещенных зон.

Если электрическая длина нечетных отрезков КБС кратна длине четных, т. е. $l_a\sqrt{\epsilon_a}/l_b\sqrt{\epsilon_b} = M \geq 2$, то возникают дополнительные разрешенные зоны с числом резонансов N_{res} , образующих эти зоны, равным 6. При этом число дополнительных разрешенных зон на единицу меньше, чем величина кратности,

т.е. $M-1$. Если же электрическая длина четных отрезков КБС кратна длине нечетных, т.е. $l_b\sqrt{\epsilon_b}/l_a\sqrt{\epsilon_a} = M$, то число резонансов N_{res} , образующих дополнительные разрешенные зоны, равно 5 (рис. 3).

Поскольку, как было отмечено выше, число резонансов, образующих разрешенные зоны, согласно условию цикличности определяется числом элементарных ячеек брэгговской структуры, то КБС, демонстрирующие наличие двух типов разрешенных зон с числом резонансных пиков 11 и 6 или 11 и 5, можно рассматривать как две вложенные друг в друга брэгговские решетки с числом элементарных ячеек 11 и 6 или 11 и 5 соответственно.

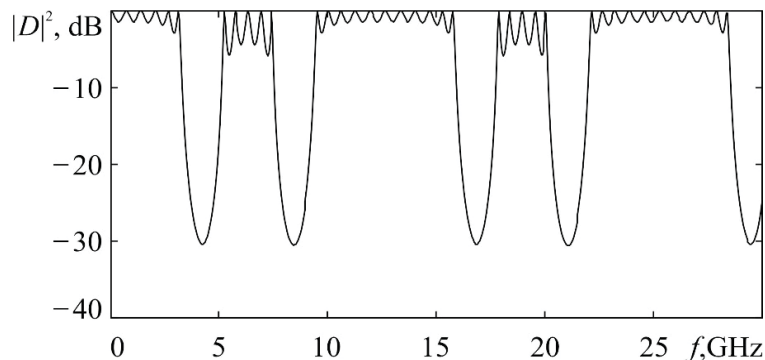


Рис. 3. АЧХ 11-слойной КБС при кратности длины отрезков с заполнением из фторопласта длине отрезков с заполнением из ФЛАНа, равной 2.

$$l_a = 4.0 \text{ мм}, l_b = 16.8 \text{ мм}, \epsilon_a = 8.8, \epsilon_b = 2.0$$

Fig. 3. Amplitude-frequency characteristic of the 11-layer coaxial Bragg structure with a multiplicity of the length of the teflon segments to the length of the FLAN segments equal to 2. $l_a = 4.0 \text{ mm}, l_b = 16.8 \text{ mm}, \epsilon_a = 8.8, \epsilon_b = 2.0$

При отношении электрических длин $l_b \sqrt{\epsilon_b} / l_a \sqrt{\epsilon_a} = 0.5 + M$, возникают два типа дополнительных разрешенных зон с числом резонансов N_{res} , образующих эти зоны, равным 5 и 6 (рис. 4). В этом случае КБС можно рассматривать как три вложенные друг в друга брэгговские решетки с числом элементарных ячеек 11, 6 и 5.

В случае, когда отношение $l_b \sqrt{\epsilon_b} / l_a \sqrt{\epsilon_a}$ не равно целому числу M и не равно $0.5 + M$ на АЧХ коэффициента пропускания формируются разрешенные зоны только с числом резонансов N_{res} , равным 5 и 6, и отсутствуют разрешенные зоны с числом резонансов, равным 11. Следовательно, теперь КБС можно рассматривать как две вложенные друг в друга брэгговские решетки с числом элементарных ячеек 6 и 5.

Отметим, что при кратности $M = 1$ и $M = 2$ электрических длин отрезков КБС все запрещенные зоны одинаковы.

Известно, что создание нарушения периодичности в брэгговской структуре приводит к возникновению дефектной моды в запрещенной зоне, положение которой определяется параметрами нарушения периодичности. В случае, когда в качестве нарушения периодичности выступает диэлектрик, при его расположении симметрично относительно границ брегговской структуры, т.е. в ее центральном отрезке, амплитуда прошедшей волны на частоте дефектной моды максимальна и близка к амплитуде падающей волны. Уменьшение длины центрального слоя приводит к смещению примесного пика в высокочастотную

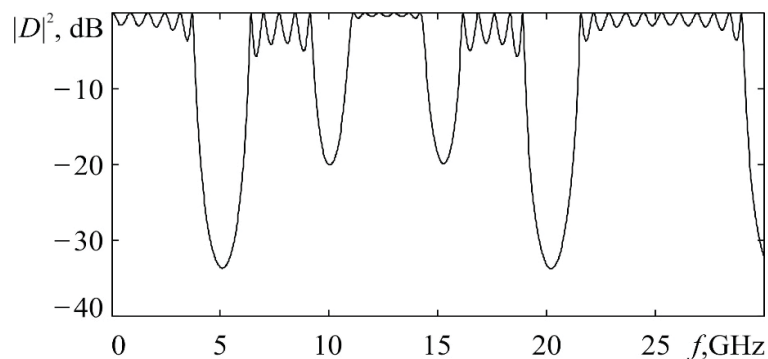


Рис. 4. АЧХ 11-слойной КБС при кратности длины отрезков с заполнением из фторопласта длине отрезков с заполнением из ФЛАНа, равной 1.5.

$$l_a = 4.0 \text{ мм}, l_b = 12.6 \text{ мм}, \epsilon_a = 8.8, \epsilon_b = 2.0$$

Fig. 4. Amplitude-frequency characteristic of the 11-layer coaxial Bragg structure with a multiplicity of the length of the teflon segments to the length of the FLAN segments equal to 1.5. $l_a = 4.0 \text{ mm}, l_b = 12.6 \text{ mm}, \epsilon_a = 8.8, \epsilon_b = 2.0$



область запрещенной зоны, увеличение – в низкочастотную [1, 14]. Расположение примесного пика внутри разных запрещенных зон не совпадает, при этом характер перемещения при изменении размера нарушения периодичности остается одинаковым.

Выполненные расчеты АЧХ показали, что при создании двух КБС, отличающихся лишь длиной введённого нарушения периодичности в виде воздушного отрезка коаксиальной линии, могут быть выбраны такие длины L_1 и L_2 этого воздушного отрезка, при которых наблюдается совпадение резонансных частот $f_1 = f_2$ дефектных мод таких КБС в выбранной запрещенной зоне. При этом на основе расчетов распределения напряженности электрического поля $E(z)$ электромагнитной волны вдоль структуры фотонного кристалла на частоте дефектной моды f_1 с использованием программы трехмерного электродинамического моделирования HFSS установлено, что при малом размере L_1 нарушения периодичности длина электромагнитной волны $\lambda_1 = c/\epsilon_L^{1/2} \cdot f_1$ значительно больше электрической длины нарушения периодичности $\epsilon_L^{1/2} L_1$, поэтому на длине нарушения периодичности не может уложиться ни одна полуволна, и в области нарушения периодичности наблюдается узел стоячей волны. При большом размере L_2 нарушения периодичности его электрическая длина $\epsilon_L^{1/2} L_2$ соизмерима с длиной электромагнитной

волны на частоте дефектной моды f_2 ($f_2 = f_1$) и в пределах неоднородности реализуется условие, необходимое для существования полуволнового резонанса, т. е. на длине неоднородности укладывается половина длины электромагнитной волны λ_2 на этой частоте, и в области нарушения периодичности наблюдается пучность стоячей волны.

Авторы [24], исследовавшие периодические структуры, которые сформированы из соединенных между собой СВЧ коаксиальных коннекторов, отмечали, что степень влияния дефекта на спектры прохождения возрастает при его перемещении к центру брэгговской структуры и приводит к увеличению амплитуды дефектной моды, однако используемые коаксиальные коннекторы характеризовались определенной величиной потерь, что заметно влияет на амплитуду дефектной моды.

Нами было исследовано влияние местоположения нарушения периодичности внутри КБС при малом $L_1 = 1.4$ мм и большом $L_2 = 19.26$ мм размерах нарушения периодичности в виде воздушного отрезка коаксиальной линии. При малых размерах на частоте дефектной моды в первой запрещенной зоне наблюдается узел стоячей электромагнитной волны, а при больших размерах – пучность.

Результаты расчетов АЧХ КБС при различном положении нарушения периодичности размером $L_2 = 19.26$ мм внутри КБС представлены на рис. 5.

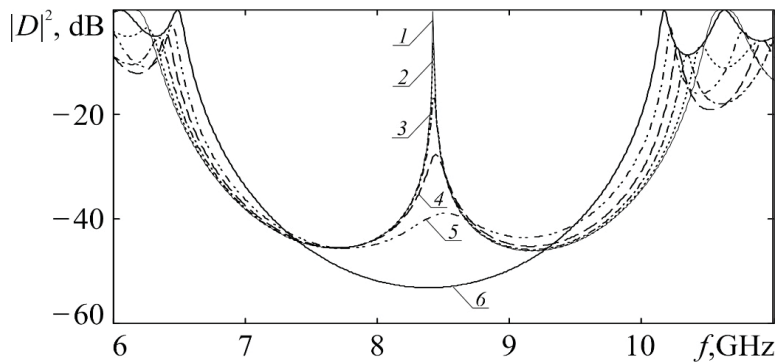


Рис. 5. АЧХ 19-слойной КБС при различном положении нарушения периодичности в виде воздушного отрезка коаксиальной линии L_2 размером 19.26 мм. $l_a = 2.0$ мм, $l_b = 8.4$ мм, $\epsilon_a = 8.8$, $\epsilon_b = 2.0$. Положение нарушения периодичности в КБС: 1 – в 10-м слое, 2 – в 8-м слое, 3 – в 6-м слое, 4 – в 4-м слое, 5 – в 2-м слое, 6 – КБС без нарушения периодичности

Fig. 5. Amplitude-frequency characteristics of the 19-layer coaxial Bragg structure at different positions of the defect in the form of the coaxial line air segment of size $L_2 = 19.26$ mm. $l_a = 2.0$ mm, $l_b = 8.4$ mm, $\epsilon_a = 8.8$, $\epsilon_b = 2.0$. The position of the defect in the coaxial Bragg structure: 1 – in the 10th layer, 2 – in the 8th layer, 3 – in the 6th layer, 4 – in the 4th layer, 5 – in the 2nd layer, 6 – structure without defect



Как следует из результатов расчета при смещении нарушения периодичности из центрального слоя наблюдается значительное уменьшение коэффициента пропускания на частоте дефектной моды. При этом частота дефектной моды остается практически неизменной. Такое поведение примесной моды хорошо согласуется с результатами, представленными в [24].

При этом для конфигурации КБС с узлом стоячей электромагнитной волны в нарушенном слое добротности дефектных мод оказываются меньше, чем добротности соответствующих дефектных мод для конфигурации КБС с пучностью стоячей волны в нарушенном слое. Наи-

большее отличие дефектных мод наблюдается при расположении нарушенного слоя у границ КБС. В этом случае для конфигурации КБС с узлом стоячей электромагнитной волны в нарушенном слое дефектная мода практически исчезает.

Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований была создана измерительная секция в виде разборного отрезка коаксиальной линии передачи, внутри которого формируется КБС, и двух коаксиальных разъемов для подключения к внешним коаксиальным линиям передачи (рис. 6).



Рис. 6. Измерительная секция сверхвысокочастотной КБС
Fig. 6. Measuring section of the microwave coaxial Bragg structure

Длина разборной части измерительной секции составляла 200 мм, внутренний диаметр внешнего проводника коаксиальной линии – 7 мм, внешний диаметр внутреннего проводника – 3 мм. Измерительная секция, содержащая исследуемые КБС, подключалась к векторному анализатору цепей Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A с помощью 50-омной коаксиальной линии передачи.

Измерялись амплитудно-частотные характеристики коэффициентов отражения $R(\omega)$ и прохождения $D(\omega)$ СВЧ-излучения, взаимодействующего с 11-слойным КФК без нарушенного слоя, нечетные слои которого были выполнены из коаксиальных отрезков с диэлектрическим заполнением из ФЛАНА ($\epsilon = 8.8$, длина 4.0 мм), а четные – с диэлектрическим заполнением из тефлона ($\epsilon = 2.0$, длина 8.4 мм).

Экспериментальные АЧХ такой структуры, представленные на рис. 7, характеризуются

наличием периодически чередующихся разрешенных и запрещенных зон. Как это и следовало из результатов расчета, при равенстве электрических длин отрезков из фторопласта и ФЛАНА 11-слойной КБС каждая из разрешенных зон сформирована 11-тью резонансами.

Также были экспериментально исследованы АЧХ 11-слойных КБС с различным соотношением электрических длин отрезков ФЛАНА и фторопласта, что привело к возникновению дополнительных разрешенных зон с числом резонансов, равным 5 (рис. 8), и числом резонансов, равным 6, что полностью соответствует результатам компьютерного моделирования.

В соответствии с результатами расчета нами было проведено экспериментальное исследование влияния местоположения нарушения периодичности внутри КБС при малом $L_1 = 1.4$ мм и большом $L_2 = 19.26$ мм размерах нарушения периодичности в виде воздушного отрезка

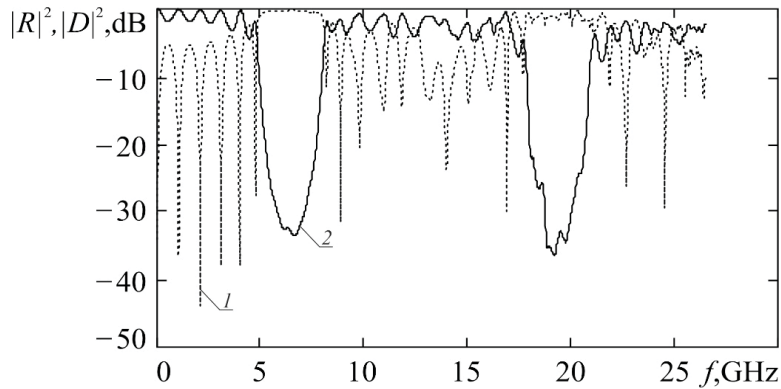


Рис. 7. Экспериментальные АЧХ 11-слойной КБС при равенстве электрических длин отрезков с заполнением из ФЛАНа и фторопласта. $l_a = 4.0$ мм, $l_b = 8.4$ мм, $\epsilon_a = 8.8$, $\epsilon_b = 2.0$

Fig. 7. Experimental amplitude-frequency characteristics of the 11-layer coaxial Bragg structure with equal electrical lengths of FLAN and teflon segments. $l_a = 4.0$ mm, $l_b = 8.4$ mm, $\epsilon_a = 8.8$, $\epsilon_b = 2.0$

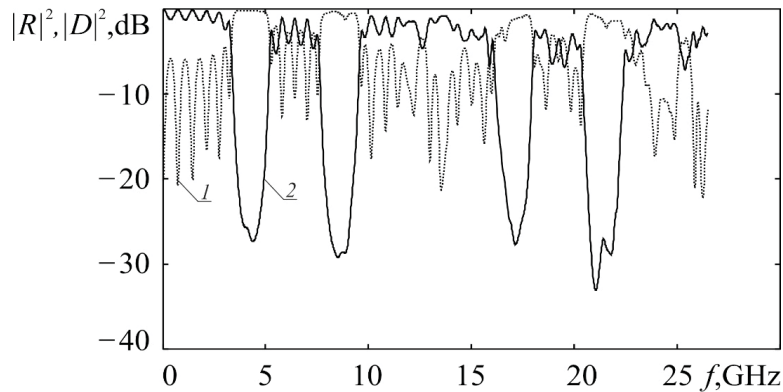


Рис. 8. Экспериментальные АЧХ 11-слойной КБС при кратности длины отрезков с заполнением из фторопласта длине отрезков с заполнением из ФЛАНа, равной 2. $l_a = 4.0$ мм, $l_b = 16.8$ мм, $\epsilon_a = 8.8$, $\epsilon_b = 2.0$

Fig. 8. Experimental amplitude-frequency characteristics of the 11-layer coaxial Bragg structure with a multiplicity of the length of the teflon segments to the length of the FLAN segments equal to 2. $l_a = 4.0$ mm, $l_b = 16.8$ mm, $\epsilon_a = 8.8$, $\epsilon_b = 2.0$

коаксиальной линии. Как следует из результатов экспериментов, представленных на рис. 9, при смещении нарушения периодичности размером $L_2 = 19.26$ мм из центрального слоя наблюдается монотонное уменьшение коэффициента пропускания на частоте дефектной моды. При этом частота дефектной моды хорошо согласуется с расчетными значениями, приведенными на рис. 5, и остается практически неизменной. Однако амплитуда дефектной моды в случае расположения нарушения периодичности в центре КБС оказалась существенно меньше расчетной. Исследования показали, что уменьшение коэффициента пропускания на частоте дефектной

моды в основном определяется наличием заметных потерь в отрезках из ФЛАНа (тангенс угла диэлектрических потерь составляет более 0.01) в исследуемом частотном диапазоне. Этот вывод подтверждается тем, что уменьшение числа слоев КФК с 19-ти до 11-ти приводило к увеличению амплитуды дефектной моды с -12.5 дБ до -1.3 дБ при расположении нарушения периодичности в центральном слое.

Заключение

Исследования АЧХ ненарушенных КБС с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением показали, что в случае, когда элек-

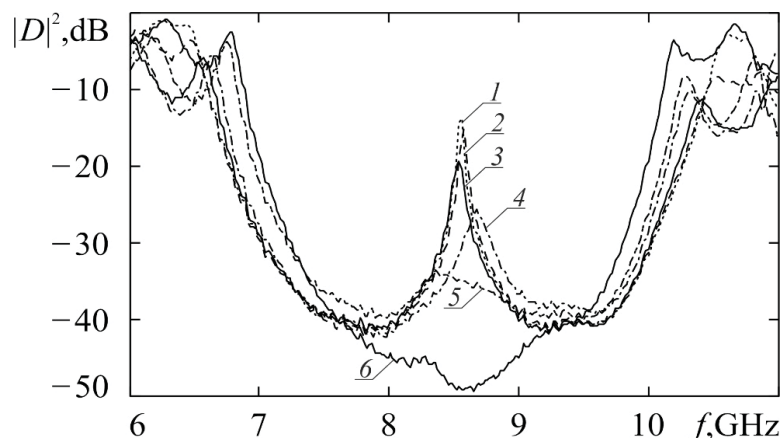


Рис. 9. Экспериментальные АЧХ 19-слойной КБС при различном положении нарушения периодичности в виде воздушного отрезка коаксиальной линии размером $L_2 = 19.26$ мм. $l_a = 2.0$ мм, $l_b = 8.4$ мм, $\epsilon_a = 8.8$, $\epsilon_b = 2.0$. Положение нарушения периодичности в КБС: 1 – в 10-м слое, 2 – в 8-м слое, 3 – в 6-м слое, 4 – в 4-м слое, 5 – в 2-м слое, 6 – КБС без нарушения периодичности

Fig. 9. Experimental amplitude-frequency characteristics of the 19-layer coaxial Bragg structure at different positions of the defect in the form of the coaxial line air segment of size $L_2 = 19.26$ mm. $l_a = 2.0$ mm, $l_b = 8.4$ mm, $\epsilon_a = 8.8$, $\epsilon_b = 2.0$. The position of the defect in the coaxial Bragg structure: 1 – in the 10th layer, 2 – in the 8th layer, 3 – in the 6th layer, 4 – in the 4th layer, 5 – in the 2nd layer, 6 – structure without defect

трические длины каждого из отрезков, являющихся структурной единицей двухкомпонентной, симметричной относительно центрального слоя КБС, равны друг другу, число резонансов, формирующих разрешенные зоны КБС, равно общему числу отрезков КБС. Это означает, что каждый из отрезков КБС представляет собой элементарную брэгговскую ячейку. Однако в случае, когда электрические длины структурных единиц не совпадают, но при этом кратны друг другу, в спектре прохождения возникают дополнительные наборы запрещенных зон и разрешенных зон с количеством резонансов, неравным общему числу отрезков КБС. Это позволяет рассматривать КБС как несколько вложенных друг в друга брэгговских решеток с различным числом ячеек.

Как следует из представленных выше результатов, частотное положение дефектной моды в запрещенной зоне КБС с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением практически не зависит от местоположения нарушения периодичности внутри КБС, а определяется электрофизическими параметрами слоя, нарушающего периодичность, такими как толщина и диэлектрическая проницаемость.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания (проект № FSRR-2020-0005).

Список литературы

1. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д. В. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. 184 с.
2. Беляев Б. А., Ходенков С. А., Шабанов В. Ф. Исследование частотно-селективных устройств, построенных на основе микрополоскового двумерного фотонного кристалла // Докл. АН. 2016. Т. 467, № 4. С. 400–404. DOI: 10.7868/S086956521610008X
3. Kuriazidou C. A., Contopanagos H. F., Alexopoulos N. G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2001. Vol. 49, № 2. P. 297–306. DOI: 10.1109/22.903089
4. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals // PIER. 2003. Vol. 41. P. 185–209. DOI: 10.2528/PIER02010808
5. Burns Gerard W., Thayne I. G., Arnold J. M. Improvement of Planar Antenna Efficiency When Integrated With a



- Millimetre-Wave Photonic // Proc. of European Conference on Wireless Technology. Amsterdam, Netherlands, 2004, 11–12th October. P. 229–232.
6. *Fernandes H. C. C., Medeiros J. L. G., Junior I. M. A., Brito D. B.* Photonic Crystal at Millimeter Waves Applications // PERS Online. 2007. Vol. 3, № 5. P. 689–694. DOI: 10.2529/PERS060901105337
 7. *El-Shaarawy H. B., Coccetti F., Plana R., El-Said M., Hashish E. A.* Defected ground structures (DGS) and uniplanar compact-photonic band gap (UC-PBG) structures for reducing the size and enhancing the out-of-band rejection of microstrip bandpass ring resonator filters // WSEAS Trans. on Communications. 2008. Vol. 7, iss. 11. P. 1112–1121.
 8. *Chul-Sik Kee, Mi-Young Jang, Sung-Il Kim, Ikmo Park, Lim H.* Tuning and widening of stop bands of microstrip photonic band gap ring structures // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 86. P. 181109. DOI: 10.1063/1.1906315
 9. *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 // ЖТФ. 2010. Т. 80, вып. 8. С. 143–148.
 10. *Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Романов А. В.* Комплексная диэлектрическая проницаемость композитов на основе диэлектрических матриц и входящих в их состав углеродных нанотрубок // ЖТФ. 2011. Т. 81, вып. 1. С. 106–110.
 11. *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.
 12. *Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Скворцов В. С., Мерданов М. К.* Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках // Известия вузов. Электроника. 2007. № 6. С. 25–32.
 13. *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. DOI: 10.7868/S0033849416010137
 14. *Gomez A., Vegas A., Solano M. A., Lakhtakia A.* On One- and Two-Dimensional Electromagnetic Band Gap Structures in Rectangular Waveguides at Microwave Frequencies // Electromagnetics. 2005. Vol. 25, iss. 5. P. 437–460. DOI: 10.1080/02726340590957443
 15. *Мухортов В. М., Масычев С. И., Маматов А. А., Мухортов Вас. М.* Электрически перестраиваемый фотонный кристалл на основе копланарного волновода с наноразмерной сегнетоэлектрической пленкой // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 20. С. 70–76.
 16. *Никитин Ал. А., Никитин Ан. А., Устинов А. Б., Lähderanta E., Калиникос Б. А.* Сверхвысокочастотный фотонный кристалл на щелевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой // ЖТФ. 2016. Т. 86, вып. 6. С. 115–120.
 17. *Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Рязанов Д. С.* Брэгговские сверхвысокочастотные структуры на волноводно-щелевых линиях // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 4. С. 321–326. DOI: 10.7868/S0033849416040124
 18. *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. № 1. С. 65–71. DOI: 10.7868/S0033849417010090
 19. *Saib A., Huynen I.* Periodic Metamaterials Combining Ferromagnetic Nanowires and Dielectric Structures for Planar Circuits Applications // Electromagnetics. 2006. Vol. 26, iss. 3–4. P. 261–277. DOI: 10.1080/02726340600570336
 20. *Tae-Yeoul, Kai Chang.* Uniplanar one-dimensional photonic-bandgap structures and resonators // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2001. Vol. 49, № 3. P. 549–553. DOI: 10.1109/22.910561
 21. *Ma Nurunnabi Mollaha, Nemai C. Karmakar, Jeffrey S. Fu* Uniform circular photonic bandgap structures (PBGs) for harmonic suppression of a bandpass filter // International Journal of Electronics and Communications (AEÜ). 2008. Vol. 62. P. 717–724. DOI: 10.1016/j.aeu.2006.10.007
 22. *Nemai Chandra Karmakar, Mohammad Nurunnabi Mollah.* Investigations Into Nonuniform Photonic-Bandgap Microstripline Low-Pass Filters // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2003. February. Vol. 51, № 2. P. 564–572. DOI: 10.1109/TMTT.2002.807817
 23. *Kitahara Hideaki, Kawaguchi Tsuyoshi, Miyashita Junichi, Takeda Mitsuo Wada.* Impurity Mode in Microstrip Line Photonic Crystal in Millimeter Wave Region // J. Phys. Soc. Jpn. 2003. April 15. Vol. 72, № 4. P. 951–955. DOI: 10.1143/JPSJ.72.951
 24. *Ranjit D. Pradhan, George H. Watson.* Impurity effects in coaxial-connector photonic crystals : A quasi-one-dimensional periodic system // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60, № 4. P. 2410–2415. DOI: 10.1103/PhysRevB.60.2410
 25. *Schneider Garrett J., Hanna Stefan, Davis Joshua L., Watson George H.* Defect modes in coaxial photonic crystals // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 90, № 6. P. 2642–2649. DOI: 10.1063/1.1391220
 26. *Tao Wei, Songping Wu, Jie Huang, Hai Xiao, Jun Fan* Coaxial cable Bragg grating // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 99. P. 113517.
 27. *Jie Huang, Tao Wei, Xinwei Lan, Jun Fan, Hai Xiao.* Coaxial cable Bragg grating sensors for large strain measurement with high accuracy // Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012. Proc. of SPIE. Vol. 8345. P. 83452Z. DOI: 10.1063/1.3636406



28. Насыбуллин А. Р., Морозов О. Г., Севастьянов А. А. Брэгговские сенсорные СВЧ-структуры на коаксиальном кабеле // Журн. радиоэлектроники. 2014. № 3. С. 1–17.
29. Морозов Г. А., Морозов О. Г., Насыбуллин А. Р., Севастьянов А. А., Фархутдинов Р. В. Коаксиальные брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17, № 3. С. 65–70.
30. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ: учебник для радиотехн. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.
31. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Сов. радио, 1967. 651 с.

Образец для цитирования:

Скрипаль А. В., Пономарев Д. В., Рузанов О. М., Тимофеев И. О. Резонансные особенности в разрешенных и запрещенных зонах сверхвысокочастотных коаксиальных брэгговских структур с периодически чередующимся диэлектрическим заполнением // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 1. С. 29–41. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-1-29-41>

Resonance Features in the Allowed and Forbidden Bands of Microwave Coaxial Bragg Structures with Periodically Alternating Dielectric Filling

A. V. Skripal, D. V. Ponomarev,
O. M. Ruzanov, I. O. Timofeev

Alexander V. Skripal, <https://orcid.org/0000-0001-7448-4560>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, skripala_v@info.sgu.ru

Denis V. Ponomarev, <https://orcid.org/0000-0002-7822-937X>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, ponomarev87@mail.ru

Oleg M. Ruzanov, <https://orcid.org/0000-0002-2113-2825>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, zodiark@list.ru

Ilya O. Timofeev, <https://orcid.org/0000-0002-7408-2593>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, timmon20@mail.ru

Background and Objectives: Microwave Bragg structures are used to create various types of microwave devices, including tunable resonators, directional couplers, miniature antennas, matched loads, various types of microwave filters with controlled characteristics. Coaxial Bragg structures based on coaxial elements, which are one of the most common types of microwave elements in waveguide systems, are characterized by a wide frequency range and the absence of radiation losses. Existing coaxial Bragg structures have significant dimensions or require irreversible structural changes to be made in their design. In this article, the opportunity to create a small-sized coaxial Bragg structure on the set of periodically arranged coaxial line segments with different dielectric filling is proposed. **Materials and Methods:** The transfer matrix of a complex quadrupole, which is a cascade connection of elementary quadrupole with known transmission matrices, was used to calculate the transmission and reflection coefficients of an electromagnetic wave in coaxial Bragg structures. For experimental studies, a measuring section was created in the form of a dismountable segment of the coaxial transmission line including a formed coaxial Bragg structure. **Results:** Amplitude-frequency

characteristics of 11-layer coaxial Bragg structures without defects for different ratios of the electric lengths of the dielectric segments and 19-layer coaxial Bragg structures with the different defect location inside the structure for small 1.4 mm and large 19.26 mm defect lengths have been investigated. **Conclusion:** The coaxial Bragg structure can be considered as several embedded in each other Bragg gratings with a different number of cells depending on the ratio of the electric lengths of elementary structural units. The frequency position of the defect mode in the coaxial Bragg structure with periodically alternating dielectric filling almost does not depend on the location of the defect inside the structure but on the electrophysical parameters of the defect. The amplitude of the defect mode is maximum for the defect located in the center of the coaxial Bragg structure.

Keywords: coaxial Bragg structures, amplitude-frequency characteristics, electric lengths of elementary structural units, defect mode.

Received: 18.11.2019 / Accepted: 30.12.2019 / Published: 02.03.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Acknowledgements: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the state task (project No. FSRR-2020-0005).

References

1. Usanov D. A., Nikitov S. A., Skripal A. V., Ponomarev D. V. *One-Dimensional Microwave Photonic Crystals: New Applications*. Boca Raton, CRC Press, 2019. 154 p. DOI: 10.1201/9780429276231
2. Belyaev B. A., Khodenkov S. A., Shabanov V. F. Investigation of frequency-selective devices based on a microstrip 2D photonic crystal. *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, iss. 4, pp. 155–159. DOI: 10.1134/S1028335816040017
3. Kuriazidou C. A., Contopanagos H. F., Alexopoulos N. G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2001, vol. 49, no. 2, pp. 297–306. DOI: 10.1109/22.903089



4. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals. *PIER*, 2003, vol. 41, pp. 185–209. DOI: 10.2528/PIER02010808
5. Burns Gerard W., Thayne I. G., Arnold J. M. Improvement of Planar Antenna Efficiency When Integrated With a Millimetre-Wave Photonic. *Proc. of European Conference on Wireless Technology*. Amsterdam, Netherlands, 2004, 11–12th October, pp. 229–232.
6. Fernandes H. C. C., Medeiros J. L. G., Junior I. M. A., Brito D. B. Photonic Crystal at Millimeter Waves Applications. *PIERS Online*, 2007, vol. 3, no. 5, pp. 689–694. DOI: 10.2529/PIERS060901105337
7. El-Shaarawy H. B., Coccetti F., Plana R., El-Said M., Hashish E.A. Defected ground structures (DGS) and uniplanar compact-photonic band gap (UC-PBG) structures for reducing the size and enhancing the out-of-band rejection of microstrip bandpass ring resonator filters. *WSEAS Trans. on Communications*, 2008, vol. 7, iss. 11, pp. 1112–1121.
8. Chul-Sik Kee, Mi-Young Jang, Sung-Il Kim, Ikmo Park, Lim H. Tuning and widening of stop bands of microstrip photonic band gap ring structures. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, vol. 86, pp. 181109. DOI: 10.1063/1.1906315
9. Usanov D. A., Skripal A. V., Abramov A. V., Bogolyubov A. S., Kulikov M. Yu., Ponomarev D. V. Microstrip Photonic Crystals Used for Measuring Parameters of Liquids. *Tech. Phys.*, 2010, vol. 55, no. 8, pp. 1216–1221. DOI: 10.1134/S1063784210080220
10. Usanov D. A., Skripal A. V., Romanov A. V. Complex Permittivity of Composites Based on Dielectric Matrices with Carbon Nanotubes. *Tech. Phys.*, 2011, vol. 56, iss. 1, pp. 102–106. DOI: 10.1134/S1063784211010257
11. Usanov D. A., Skripal A. V., Abramov A. V., Bogolyubov A. S. Determination of the Metal Nanometer Layer Thickness and Semiconductor Conductivity in Metal–Semiconductor Structures from Electromagnetic Reflection and Transmission Spectra. *Tech. Phys.*, 2006, vol. 51, iss. 5, pp. 644–649. DOI: 10.1134/S1063784206050173
12. Usanov D. A., Skripal A. V., Abramov A. V., Bogolyubov A. S., Skvortsov V. S., Merdanov M. K. Use of Waveguide Phonic Structures for Measurements of Parameters of Nanometer Metal Layers on Dielectric Substrates. *Izvestija vuzov. Jelektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2007, no. 6, pp. 25–32 (in Russian).
13. Usanov D. A., Nikitov S. A., Skripal A. V., Ponomarev D. V., Latysheva E. V. Multiparametric Measurements of Epitaxial Semiconductor Structures with the Use of OneDimensional Microwave Photonic Crystals. *J. Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 1, pp. 42–49. DOI: 10.1134/S1064226916010125
14. Gomez A., Vegas A., Solano M. A., Lakhtakia A. On One- and Two-Dimensional Electromagnetic Band Gap Structures in Rectangular Waveguides at Microwave Frequencies. *Electromagnetics*, 2005, vol. 25, iss. 5, pp. 437–460. DOI: 10.1080/02726340590957443
15. Mukhortov V. M., Masychev S. I., Mamatov A. A., Mukhortov Vas. M. Electrically Reconstructable Phonon Crystal Based on a Coplanar Waveguide with a Nanodimensional Ferroelectric Film. *Tech. Phys. Lett.*, 2013, vol. 39, iss. 10, pp. 921–923. DOI: 10.1134/S1063785013100234
16. Nikitin Al. A., Nikitin An. A., Ustinova A. B., Lähderanta E., Kalinikos B. A. Microwave Photonic Crystal on the Slot Transmission Linewith a Ferroelectric Film. *Tech. Phys.*, 2016, vol. 61, iss. 6, pp. 913–918. DOI: 10.1134/S106378421606013X
17. Usanov D. A., Nikitov S. A., Skripal A. V., Ryazanova D. S. Bragg Microwave Structures Based on WaveguideSlot Lines. *J. Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 4, pp. 379–384. DOI: 10.1134/S1064226916040124
18. Usanov D. A., Nikitov S. A., Skripal A. V., Merdanov M. K., Evtcev S. G. Waveguide Photonic Crystals on Resonant Irises with Characteristics Controlled by n-i-p-i-n-Diodes. *J. Communications Technology and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 58–63. DOI: 10.1134/S1064226918010138
19. Saib A., Huynen I. Periodic Metamaterials Combining Ferromagnetic Nanowires and Dielectric Structures for Planar Circuits Applications. *Electromagnetics*, 2006, vol. 26, iss. 3–4, pp. 261–277. DOI: 10.1080/02726340600570336
20. Tae-Yeoul, Kai Chang. Uniplanar one-dimensional photonic-bandgap structures and resonators. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2001, vol. 49, no. 3, pp. 549–553. DOI: 10.1109/22.910561
21. Md. Nurunnabi Mollaha, Nemai C. Karmakar, Jeffrey S. Fu. Uniform circular photonic bandgap structures (PBGs) for harmonic suppression of a bandpass filter. *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)*, 2008, vol. 62, pp. 717–724. DOI: 10.1016/j.aeue.2006.10.007
22. Nemai Chandra Karmakar, and Mohammad Nurunnabi Mollah. Investigations Into Nonuniform Photonic-Bandgap Microstripline Low-Pass Filters. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2003, February, vol. 51, no. 2, pp. 564–572. DOI: 10.1109/TMTT.2002.807817
23. Kitahara Hideaki, Kawaguchi Tsuyoshi, Miyashita Junichi, Takeda Mitsuo Wada. Impurity Mode in Microstrip Line Photonic Crystal in Millimeter Wave Region. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 2003, April 15, vol. 72, no. 4, pp. 951–955. DOI: 10.1143/JPSJ.72.951
24. Ranjit D. Pradhan, George H. Watson. Impurity effects in coaxial-connector photonic crystals: A quasi-one-dimensional periodic system. *Phys. Rev. B.*, 1999, vol. 60, no. 4, pp. 2410–2415. DOI: 10.1103/PhysRevB.60.2410
25. Schneider Garrett J., Hanna Stefan, Davis Joshua L., Watson George H. Defect modes in coaxial photonic crystals. *J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 90, no. 6, pp. 2642–2649. DOI: 10.1063/1.1391220



26. Tao Wei, Songping Wu, Jie Huang, Hai Xiao, Jun Fan. Coaxial cable Bragg grating. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 99, pp. 113517.
27. Jie Huang, Tao Wei, Xinwei Lan, Jun Fan, Hai Xiao. Coaxial cable Bragg grating sensors for large strain measurement with high accuracy. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, Proc. of SPIE*, vol. 8345, pp. 83452Z. DOI: 10.1063/1.3636406
28. Nasybullin A. R., Morozov O. G., Sevast'ianov A. A. Bragg sensor microwave structures on coaxial cable. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radioelectronics], 2014, no. 3, pp. 1–17 (in Russian).
29. Morozov G. A., Morozov O. G., Nasybullin A. R., Sevast'ianov A. A., Farkhutdinov R. V. Bragg coaxial microwave structure in the sensor system. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2014, vol. 17, no. 3, pp. 65–70 (in Russian).
30. Sazonov D. M. *Antenny i ustroistva SVCh*. Uchebnik dlia radiotekhn. spets. vuzov [Microwave circuits and antennas]. Moscow, Vysshiaia shkola, 1988. 432 p. (in Russian).
31. Fel'dshtein A. L., Iavich L. R., Smirnov V. P. *Spravochnik po elementam volnovodnoi tekhniki*. 2-e izdanie, pererab. i dop. [Waveguide Handbook. 2nd ed.]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1967. 651 p. (in Russian).

Cite this article as:

Skripal A. V., Ponomarev D. V., Ruzanov O. M., Timofeev I. O. Resonance Features in the Allowed and Forbidden Bands of Microwave Coaxial Bragg Structures with Periodically Alternating Dielectric Filling. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 1, pp. 29–41 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-1-29-41>
