

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.396.67

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖСЛОЙНОГО ПЕРЕХОДА ДЛЯ EBG-ВОЛНОВОДОВ

© 2022 г. В. И. Калиничев^а, С. Е. Банков^а, *^аИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

*E-mail: sbankov@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.06.2020 г.

После доработки 14.11.2020 г.

Принята к публикации 25.01.2021 г.

Исследованы межслойные переходы для различных типов EBG-волноводов, представляющие собой двухслойную структуру, в которой волноводы связаны по широкой стенке с помощью металлического зонда, проходящего через отверстие в стенках. Показано, что переходы этого типа достаточно хорошо согласованы в диапазоне частот 8...12 ГГц и обладают характеристиками полосно-пропускающего фильтра. Проведен параметрический анализ перехода, который позволил определить для каждого типа волновода зависимость положения минимумов в коэффициенте отражения от параметров перехода и найти наилучшие сочетания параметров для получения сбалансированного согласования во всей рассмотренной полосе частот. Показано, что согласование практически не зависит от взаимной ориентации осей волноводов на двух слоях. Рассчитаны также характеристики межслойного перехода для стандартного прямоугольного металлического волновода, который используется на входе и выходе перехода для EBG-волноводов. Показано, что его характеристика согласования практически не отличается от характеристики согласования перехода для трехрядного EBG-волновода.

DOI: 10.31857/S0033849422070105

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Electromagnetic Bandgap (EBG) волновод представляет собой волноводный канал, сформированный в электромагнитном кристалле (ЭМК) [1]. Такой кристалл может иметь структуру двумерно-периодической решетки металлических цилиндров, расположенных между металлическими экранами плоского волновода (ПВ). В большинстве случаев EBG-волноводы формируются путем удаления одного, двух и трех рядов цилиндров из ЭМК. Полученные этим способом волноводные каналы было предложено называть соответственно однорядным, двухрядным и трехрядным EBG-волноводами. Исследованию EBG-волноводов в СВЧ-диапазоне посвящен ряд работ, часть из них представлена в [2–6].

В большинстве своем предыдущие исследования относились к однослойным EBG-структурам, в которых волноводы и устройства на них располагаются в пределах одного слоя (одного ПВ). Однако функциональные возможности устройств на EBG-волноводах можно было бы значительно расширить, если использовать двухслойные и в перспективе многослойные конструкции, по аналогии с широко применяемыми многослойными микрополосковыми печатными СВЧ-схемами, а

также структурами ЛТСС и вафельного типа, которые находят применение в диапазонах миллиметровых волн.

При проектировании многослойных устройств одним из важных является вопрос осуществления перехода со слоя на слой. В многослойных схемах требуется эффективная передача сигнала не только в горизонтальном направлении в пределах слоя, но также в вертикальном направлении с одного слоя на другой. По теме межслойных переходов в литературе представлены в основном исследования переходов между Substrate Integrated Waveguide (SIW) волноводами и различными линиями передачи, расположенными на разных слоях многослойной структуры. В большинстве случаев в этих работах использовались печатные типы линий передачи (копланарные и микрополосковые). Однако рассматривались также и другие варианты. Например, в [7] рассмотрен вертикальный переход между SIW-волноводом, изготовленным на Printed Circuit Board (PCB), и мини-коаксиальным разъемом в миллиметровом диапазоне волн. Такой переход служит для соединения PCB между собой в устройствах, содержащих несколько PCB. Параметры перехода выбраны из условия эффективной связи и согласования TE_{10} -моды

SIW-волновода и *TEM*-моды коаксиального разьема. Один из торцов волновода закорочен для формирования резонансной области перехода. Приведены результаты тестирования перехода в диапазонах частот 17.0...21.0 и 28...32 ГГц. В [8] представлен переход между копланарной линией и волноводом для многослойной структуры вафельного типа. В предложенном дизайне используется вертикальный металлический зонд, с помощью которого осуществляется связь волны копланарной линии с модой волновода. Вся структура может быть изготовлена в едином технологическом цикле в объеме одной вафельной структуры. Представлены результаты тестирования перехода в диапазоне частот 60...80 ГГц, согласно которым полоса по уровню согласования лучше чем –10 дБ составляет 27% при потерях менее 0.5 дБ. В работе [9] исследуется полосно-пропускающий фильтр чебышевского типа третьего порядка на основе SIW- и LTCC-технологий. В нем используются три SIW-резонатора на разных слоях со щелями связи, а также горизонтальные и вертикальные переходы между копланарными линиями на входе и выходе фильтра. Фильтр спроектирован на центральную частоту 2.6 ГГц с относительной полосой 5%. Представлены результаты измерений. В статье [10] исследуется вертикальный переход между микрополосковой линией и SIW-волноводом, изготовленным с использованием многослойной LTCC-структуры. Переход содержит металлизированное отверстие между проводником линии и нижним проводящим слоем волновода. Предложена модель перехода в виде эквивалентной схемы. Представлены результаты тестирования изготовленного образца, спроектированного на частоту 30 ГГц.

Наиболее близко к теме нашей работы примыкает статья [11], в которой рассмотрены горизонтальные и вертикальные переходы для случая SIW-волноводов, расположенных на разных слоях многослойной РСВ, в диапазоне частот 60...110 ГГц. В частности, проведено исследование вертикального перехода между двумя слоями. Переход осуществляется через апертуру прямоугольной формы в проводящей плоскости, разделяющей оба волноводных слоя. При этом используются металлизированные отверстия с каждой стороны апертуры, чтобы обеспечить условие сонаправленности волн на обоих слоях. Найдены оптимальные размеры апертуры, при которых достигается максимальная передача мощности при переходе между слоями. Однако данные по согласованию перехода не представлены.

Цель данной работы – исследовать межслойный переход между EBG-волноводами. Переход представляет собой двухслойную структуру, в которой связь полей волноводов осуществляется с помощью вертикального металлического цилиндрического зонда, проходящего через отверстие в

широких стенках, которыми волноводы примыкают друг к другу. Рассмотрены несколько вариантов перехода: сонаправленные, а также с поворотом оси волновода на втором слое на 180°, 90° и 45° относительно направления оси на первом слое. Исследование проведено для нескольких типов EBG-волноводов: однорядных, двухрядных и трехрядных.

Насколько известно авторам, в такой постановке характеристики межслойных переходов EBG-волноводов раньше не изучались и данные по их согласованию в литературе не представлены.

2. ИССЛЕДУЕМАЯ СТРУКТУРА И МЕТОД ЕЕ АНАЛИЗА

Схематически структура межслойного перехода для EBG-волновода представлена на рис. 1. Электромагнитная модель для численного исследования характеристик перехода (рис. 2) была составлена на основе программы HFSS (<https://ansys.com>). Период кристалла, в котором сформированы волноводы на каждом слое и, соответственно, период цилиндров в стенках волноводов обозначим P , диаметр цилиндров в стенках D_1 . Переход с одного слоя на другой осуществляется с помощью вертикального металлического зонда длиной L и диаметром D_2 , проходящего через отверстие в широких стенках стыкуемых волноводов, диаметр отверстия D_3 . Толщина ПВ на каждом слое h . Расстояние между зондом и поперечным рядом цилиндров, который служит короткозамыкателем (КЗ) для EBG-волновода, обозначим S . Расстояние S_1 между КЗ волновода и закрытым торцом ПВ полагаем равным $P/2$. Отметим, что этот период разный для разных типов волноводов (см. ниже). Полагаем, что значения S и S_1 на обоих слоях одинаковые. Все металлические поверхности в модели предполагаем идеально проводящими. Вход и выход EBG-волноводов на обоих концах перехода стыкуются со стандартными прямоугольными металлическими волноводами.

Программа HFSS основана на методе конечных элементов, который предполагает разбиение области решения на множество тетраэдров. Требуемая для заданной точности численных расчетов плотность сетки достигается необходимым числом адаптивных шагов. Для решения задачи возбуждения необходимо задать порты на входе и выходе. В данной модели используются волноводные входы, обозначенные стрелками на рис. 1 и волновыми портами 1 и 2 на торцах металлических волноводов на рис. 2. При использовании одноволновых волноводов в результате решения получаем матрицу рассеяния перехода размером 2×2 . В последующих разделах будем строить только модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$, который характеризует согласование перехода. В силу

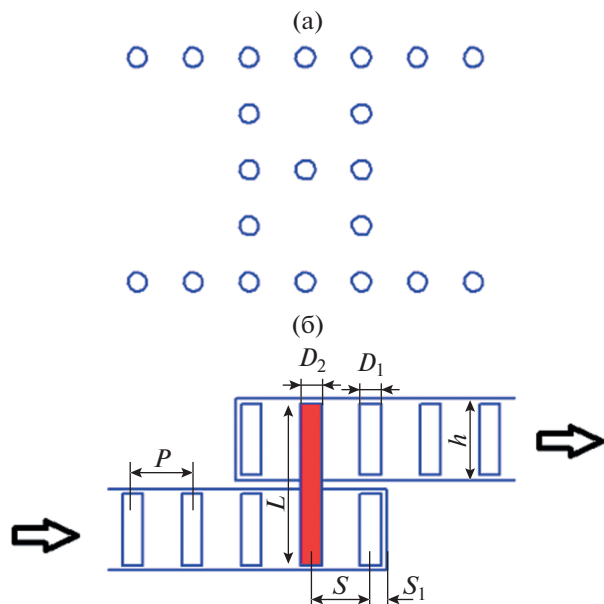


Рис. 1. Схематические изображения сверху (а) и сбоку (б) межслойного перехода с обозначением основных параметров: D_1 – диаметр цилиндров в стенках ЕВГ-волновода, D_2 – диаметр металлического зонда, L – длина зонда.

симметрии структуры исследуемого перехода в продольной плоскости относительно оси зонда (см. рис. 2) имеем $S_{11} = S_{22}$. Коэффициент передачи перехода определяется по формуле $|S_{21}| = [1 - |S_{11}|^2]^{1/2}$. Так как нас интересуют только хорошо согласованные переходы, то для них $|S_{21}| \approx 1$, и поэтому ниже в статье эта величина не приводится.

3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРЕХОДА

Рассмотрим зависимости согласования перехода от его параметров для трех типов ЕВГ-волноводов. Как следует из приведенного выше описания, в структуре исследуемого перехода можно выделить две одинаковые резонансные области между торцом ПВ и зондом на обоих слоях. Эти области связаны с помощью зонда, который проходит через отверстие в стенках стыкуемых по широкой стенке волноводов. Поэтому можем предположить, что параметры структуры, от которых зависят характеристики резонаторов, в основном и будут влиять и на характеристики перехода, при фиксированных параметрах волновода (P , D_1 , h). Диаметр зонда D_2 и диаметр отверстия в стенках D_3 также фиксированы.

Можем выделить два параметра, от которых зависят характеристики резонаторов. Один из них – это расстояние S между зондом и поперечным рядом цилиндров, второй – это длина зонда L . Обозначим $S = NP$, тогда расстояние между

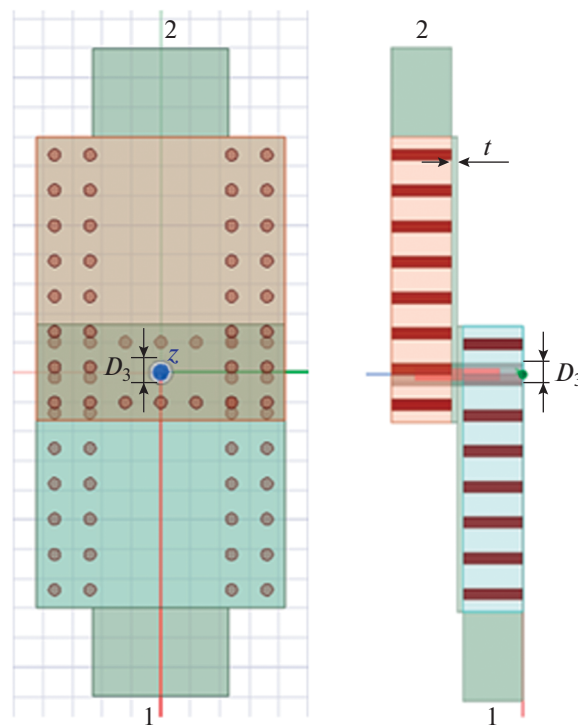
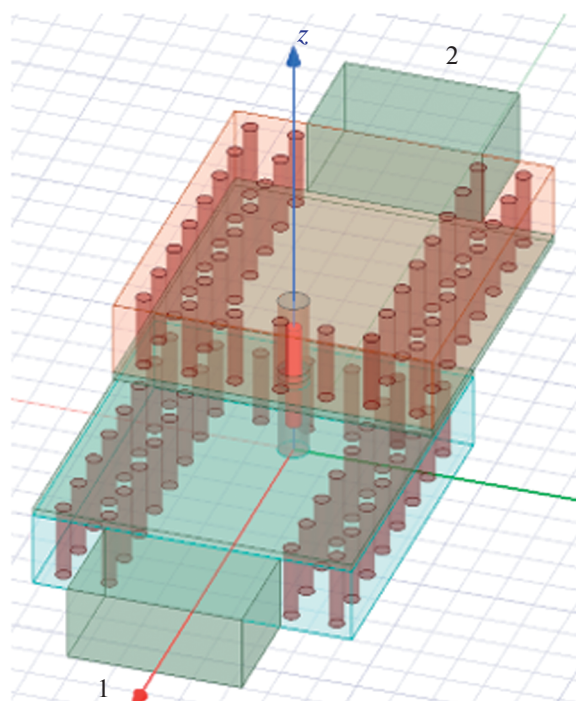


Рис. 2. Модель для численного исследования межслойного перехода ЕВГ-волноводов для случая сонаправленных волноводов: t – толщина стенки, D_3 – диаметр отверстия в стенках; 1, 2 – волноводные входы.

зондом и закрытым торцом ПВ равно $S + S_1 = (N + 0.5)P$.

Трехрядный волновод. Начнем с анализа перехода для трехрядного волновода с параметрами

$P = 6$, $h = 10$, $D_1 = 2$, $D_2 = 2$, $D_3 = 4$, $t = 1$. Здесь и далее все размеры приведены в миллиметрах. На рис. 3 представлены частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} для разных значений параметра N при фиксированной длине зонда L , а на рис. 4 – такие же частотные зависимости построены для разной длины зонда L при фиксированном N .

Из рис. 3 видно, что изменение $N(S)$ влияет в основном на правый минимум, который смещается вниз с увеличением N , так как размер резонансной области при этом возрастает. Левый минимум при изменении N остается примерно на одной частоте. Это позволяет предположить, что его положение зависит в основном от длины зонда. Действительно, на рис. 4 видим, что с увеличением L левый минимум движется вниз по частоте, в то время как правый минимум смещается мало. Таким образом, положение правого минимума в коэффициенте отражения зависит в основном от размера резонансной области между зондом и КЗ волновода, а положение левого минимума – от длины зонда.

Сопоставляя рис. 3, 4 можем выбрать значения $N = 0.85$ (кривая 3 на рис. 3) и $L = 14.5$ (кривая 4 на рис. 4), обеспечивающие сбалансированное согласование во всем рассмотренном диапазоне частот 8...12 ГГц, при котором коэффициент отражения не превосходит -15 дБ в большей части этого диапазона. Значению $N = 0.85$ соответствуют расстояния $S = 5.1$ и $S + S_1 = 8.1$.

Двухрядный волновод. Рассмотрим теперь межслойный переход для двухрядного волновода с параметрами $P = 8$, $h = 10$, $D_1 = 4$, $D_2 = 2$, $D_3 = 4$, $t = 1$. Численная модель в этом случае выглядит аналогично представленной на рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения $|S_{11}|$ для разных значений параметра N при фиксированной длине зонда L показаны на рис. 5, а для разных значений длины зонда L при фиксированном значении N приведены на рис. 6.

В данном случае на рис. 5 также проявляется зависимость положения правого минимума от параметра $N(S)$: с его ростом правый минимум смещается вниз по частоте. В то же время область левого минимума, трансформируясь по форме, занимает примерно одно положение. При изменении L , как видно из рис. 6, правый минимум почти не меняет своего положения, в то время как левый минимум изменяет и свое положение, и форму, как на кривой 2. Таким образом, для двухрядного волновода, так же как и для трехрядного, положение правого минимума в коэффициенте отражения определяется в основном размером резонансной области между зондом и КЗ волновода, а положение левого минимума – длиной зонда. В этом случае оптимальными по критерию сбалансированного согласования во всем диапа-

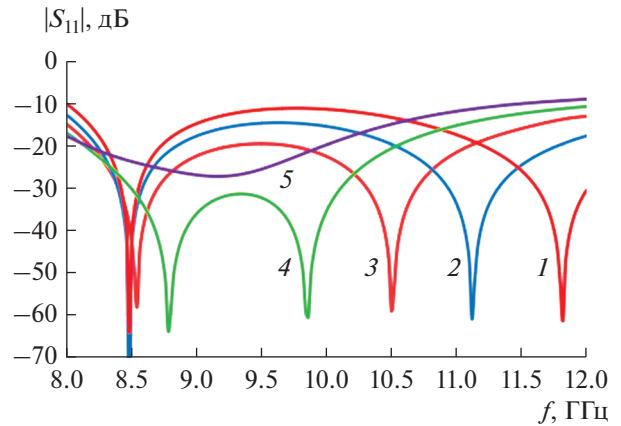


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения перехода для трехрядного волновода для $N = 0.75$ (1), 0.8 (2), 0.85 (3), 0.9 (4), 0.95 (5) при $L = 14.5$.

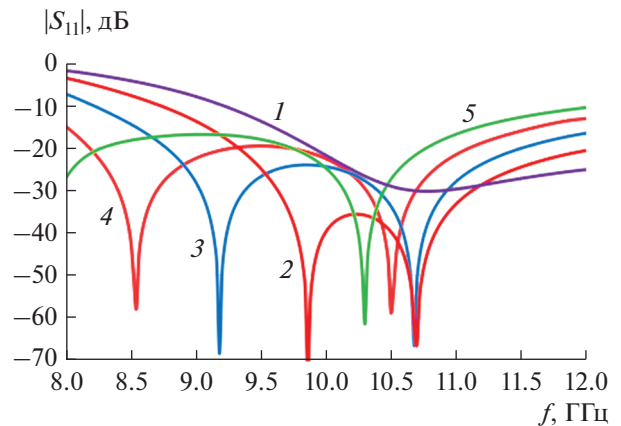


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения перехода для трехрядного волновода для $L = 13.0$ (1), 13.5 (2), 14.0 (3), 14.5 (4), 15.0 (5) при $N = 0.85$.

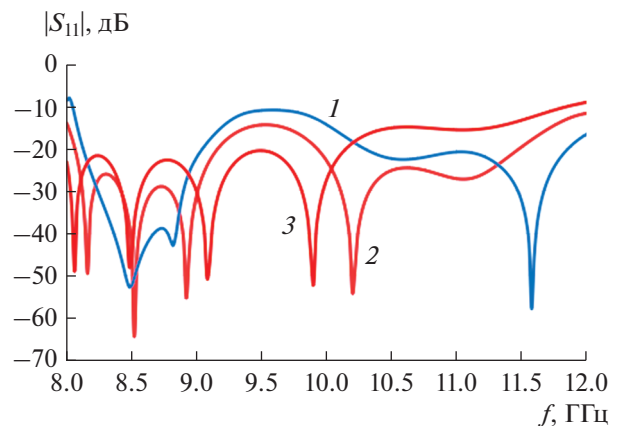


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента отражения перехода для двухрядного волновода для $N = 0.7$ (1), 0.75 (2), 0.8 (3) при $L = 14.0$.

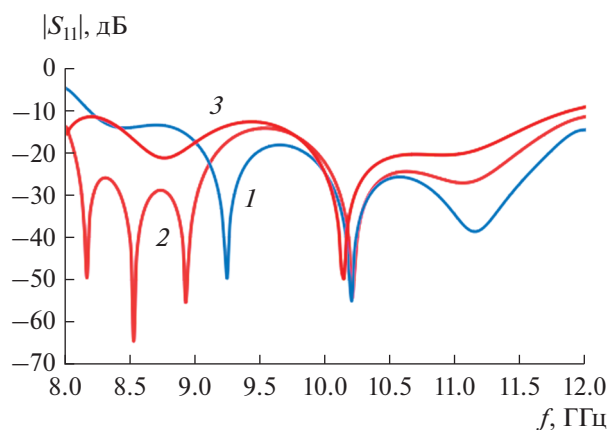


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента отражения перехода для двухрядного волновода для $L=13.5$ (1), 14 (2), 14.5 (3) при $N=0.75$.

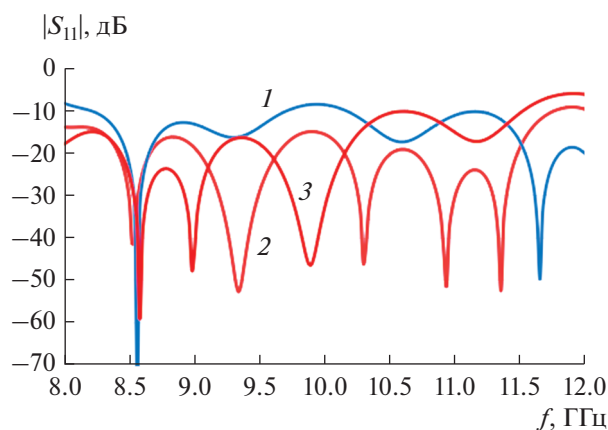


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента отражения перехода для однорядного волновода для $N=0.4$ (1), 0.45 (2), 0.5 (3) при $L=14.5$.

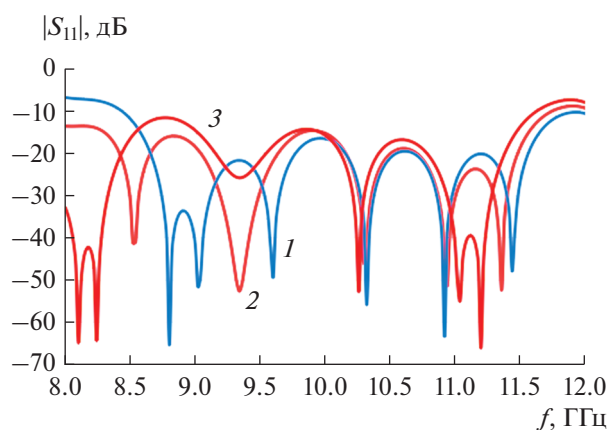


Рис. 8. Частотные зависимости коэффициента отражения перехода для однорядного волновода для $L=14.0$ (1), 14.5 (2), 15.0 (3) при $N=0.45$.

зоне частот 8...12 ГГц являются значения $N=0.75$ (рис. 5, кривая 2) и $L=14$ (рис. 6, кривая 2). Значению $N=0.75$ соответствуют расстояния $S=6.0$ и $S+S_1=10.0$.

Однорядный волновод. Проанализируем также межслойный переход для однорядного волновода с параметрами $P=12$, $h=10$, $D_1=4$, $D_2=2$, $D_3=4$, $t=1$. Частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} для разных значений параметра N при фиксированной длине зонда L представлены на рис. 7, а для разной длины зонда L при фиксированном значении N — на рис. 8. Из этих рисунков можем сделать те же выводы, что и для рассмотренных выше переходов. Из рис. 7 видно, что с изменением N положение левого низкочастотного минимума почти не изменяется, а положение правого высокочастотного минимума изменяется и сопровождается трансформацией формы кривой согласования в области частот, которая ему соответствует. Особенно это заметно на кривой 2. Как видно из рис. 8, при изменении длины L в основном изменяется согласование в низкочастотной области левого минимума, причем это изменение также сопровождается изменением формы кривой. В то же время в высокочастотной области правого минимума изменения в кривых согласования и по уровню, и по форме менее значительные. Эти данные позволяют и в этом случае сделать вывод о преимущественном влиянии рассматриваемых факторов (N и L) на положение соответствующих минимумов в частотных зависимостях согласования перехода. Из рис. 7, 8 следует, что для однорядного волновода оптимальными по критерию сбалансированного согласования в диапазоне частот 8...12 ГГц являются значения $N=0.45$ (рис. 7, кривая 2) и $L=14.5$ (рис. 8, кривая 2). Значению $N=0.45$ соответствуют расстояния $S=5.4$ и $S+S_1=11.4$.

Отметим, что для переходов на двухрядном и однорядном волноводах кривые согласования выглядят более изрезанными в рассмотренном частотном диапазоне в сравнении с кривой согласования для трехрядного волновода. Можно предположить, что это объясняется более заметным влиянием для них дополнительного отражения от стыков EBG-волновода и прямоугольного металлического волновода, которые присутствуют в модели перехода на входе и выходе. В подтверждение в следующем разделе проведем расчет уровня этого отражения.

4. ОТРАЖЕНИЕ ОТ СТЫКОВ EBG-ВОЛНОВОДА И ПРЯМОУГОЛЬНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Для оценки уровня отражения от стыка EBG-волновода и стандартного прямоугольного металлического волновода с сечением 23×10 была составлена модель (рис. 9), которая содержит секцию

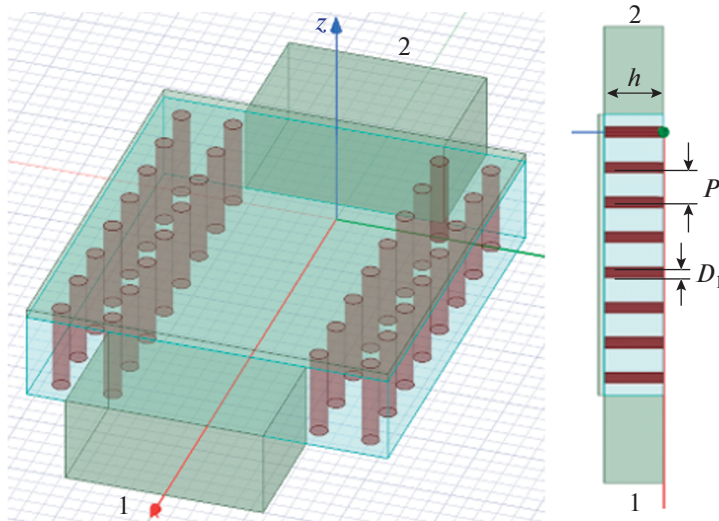


Рис. 9. Модель для расчета коэффициента отражения от секции ЕВГ-волновода, состыкованного с двумя прямоугольными металлическими волноводами; 1, 2 – волноводные входы.

ЕВГ-волновода конечной длины и два одинаковых стыка на входе и выходе. Величина отражения от двух стыков позволяет судить об уровне отражения от каждого из них.

Результаты расчета по этой модели (рис. 10) показывают, что отражения от стыков ЕВГ-волновода и стандартного металлического волновода могут вносить определенный вклад в согласование рассмотренных выше межслойных переходов, особенно для двухрядных и однорядных волноводов. Вероятно, этим дополнителным отражением от стыков могут быть обусловлены неравномерные частотные зависимости коэффициента отражения на рис. 5–8. Составленные и используемые в данной работе численные модели для расчета согласования межслойных переходов содержат стыки ЕВГ-волновода и стандартного металлического волновода на обоих слоях (см. рис. 2), и поэтому представленные выше кривые согласования получены с учетом этого эффекта.

5. ПЕРЕХОДЫ С ПОВОРОТОМ ВОЛНОВОДА НА ВЕРХНЕМ СЛОЕ

Рассмотрим межслойные переходы с поворотом волновода на верхнем слое на 180° , 90° и 45° (рис. 11). Результаты расчетов частотных зависимостей коэффициента отражения таких переходов для трехрядных волноводов представлены на рис. 12, двухрядных – на рис. 13, однорядных – на рис. 14. Для сравнения на тех же рисунках штриховыми линиями показаны расчеты для соответствующих сонаправленных переходов, рассмотренных выше. В качестве параметров выбраны величины, определенные в результате параметрического анализа. Как можно было предполагать, для каждого

типа волновода согласование всех рассмотренных видов переходов с поворотом на разные углы практически одинаково. Видимое на некоторых графиках незначительное расхождение сплошных и штриховых кривых может быть обусловлено небольшой погрешностью численных расчетов, которая может немного варьироваться для разных структур в силу разной структуры генерируемой сетки в методе конечных элементов. Кроме того, небольшое расхождение может быть связано также с некоторой разницей в амплитудно-фазовом распределении в отверстиях в зависимости от взаимной ориентации осей волноводов на обоих слоях.

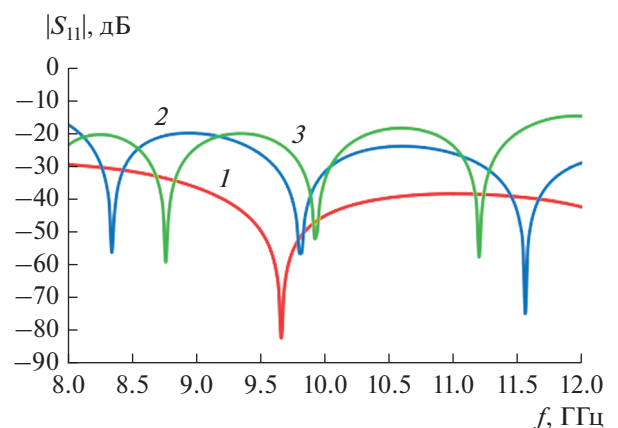


Рис. 10. Коэффициент отражения от секции ЕВГ-волновода, состыкованного с двумя прямоугольными металлическими волноводами: кривая 1 – трехрядный волновод $P = 6$, $D_1 = 2$, кривая 2 – двухрядный волновод $P = 8$, $D_1 = 4$, кривая 3 – однорядный волновод $P = 12$, $D_1 = 4$; во всех случаях $h = 10$.

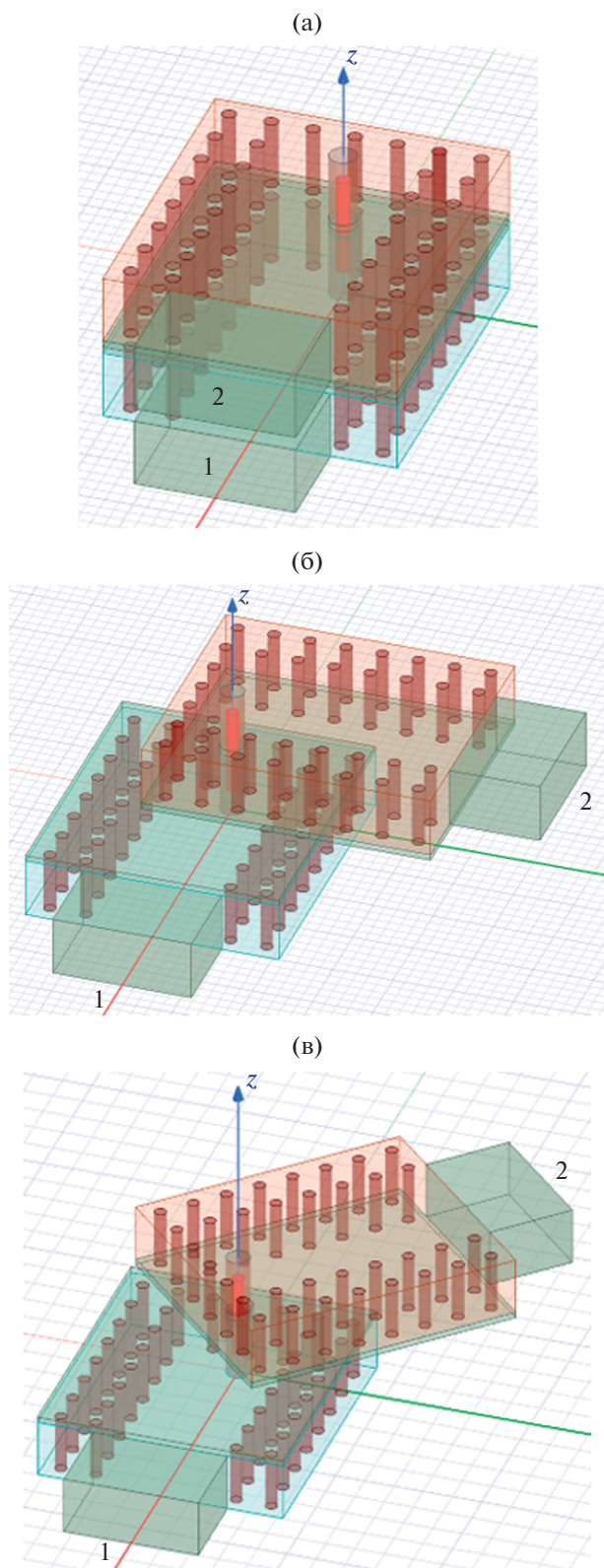


Рис. 11. Модели для межслойного перехода EBG-волновода с поворотом волновода на верхнем слое на 180° (а), 90° (б) и 45° (в).

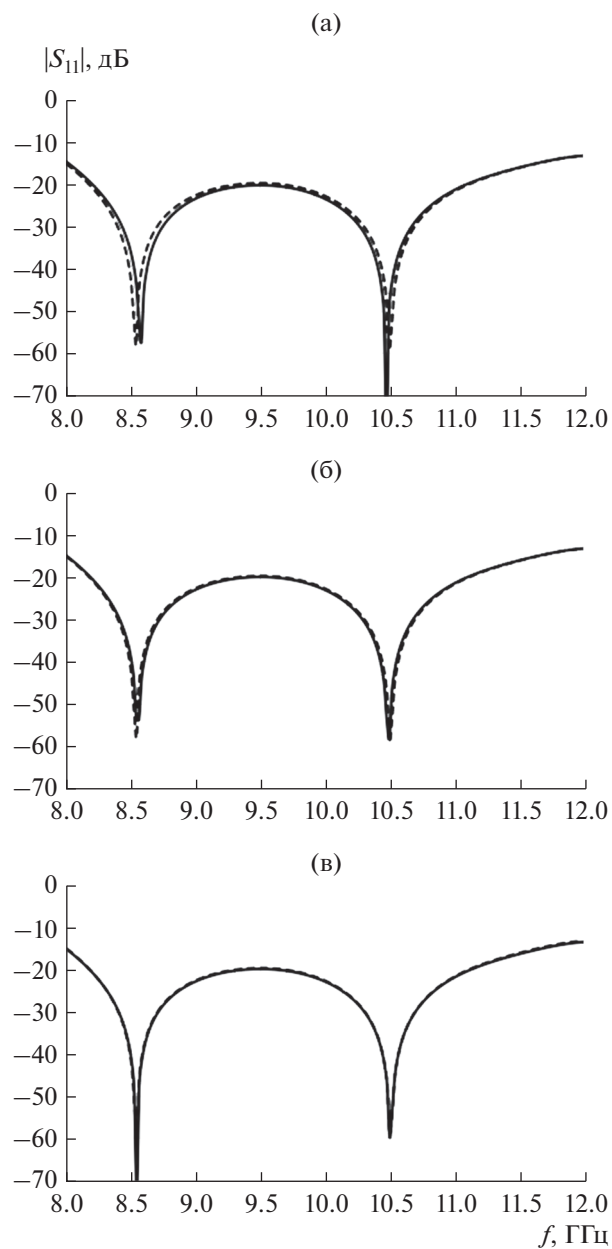


Рис. 12. Коэффициенты отражения межслойного перехода для трехрядного волновода с поворотом на верхнем слое (сплошная линия) на 180° (а), 90° (б) и 45° (в); штриховая линия – переход без поворота (со-направленный).

6. МЕЖСЛОЙНЫЙ ПЕРЕХОД ДЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Наконец, рассмотрим межслойный переход для прямоугольного металлического волновода, который используется на входе и выходе рассмотренного выше перехода для EBG-волновода. Это позволяет, в частности, определить согласование самого перехода в отсутствие дополнительного отражения от двух стыков, которое присутствует в

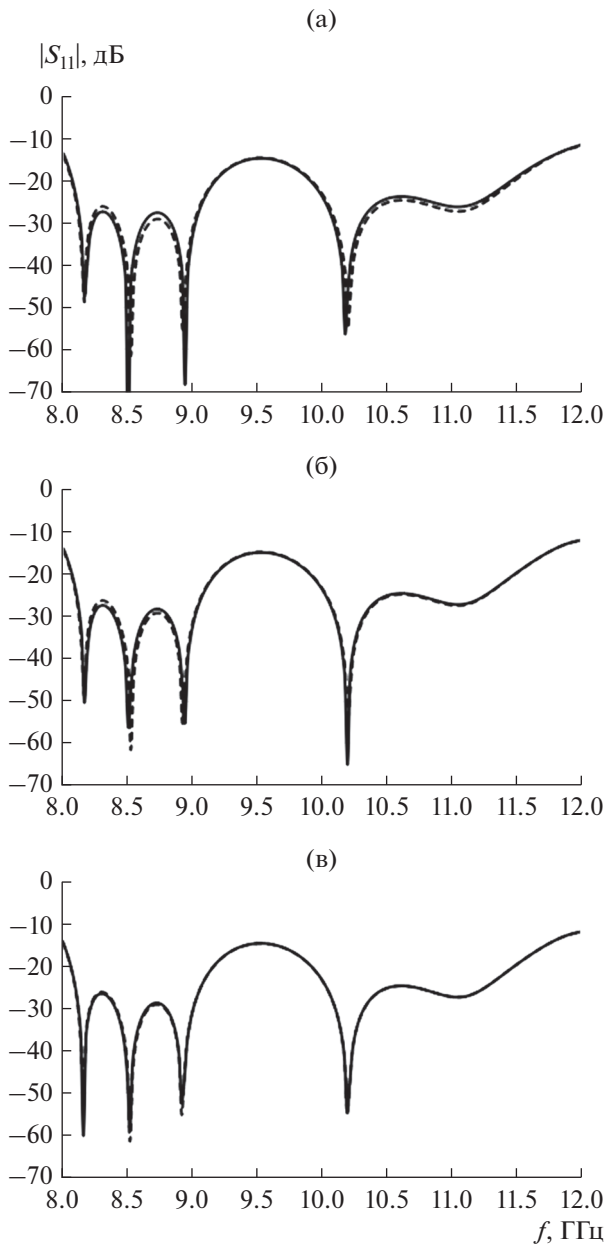


Рис. 13. Коэффициенты отражения межслойного перехода для двухрядного волновода с поворотом на верхнем слое (сплошная линия) на 180° (а), 90° (б) и 45° (в); штриховая линия – переход без поворота (со-направленный).

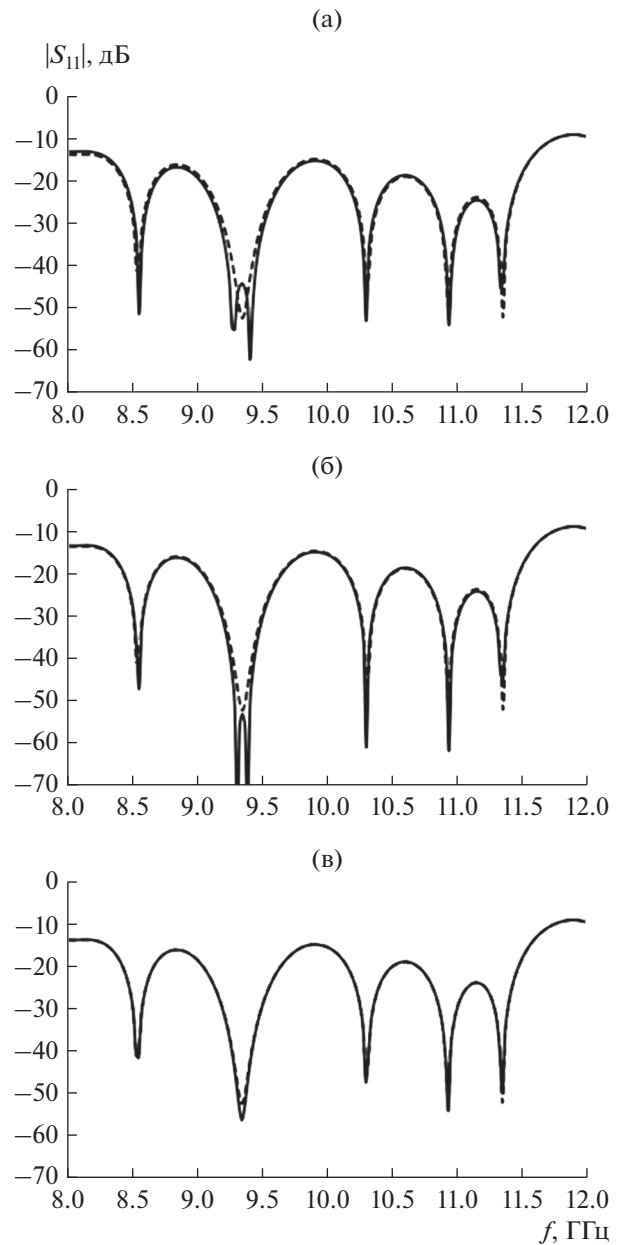


Рис. 14. Коэффициенты отражения межслойного перехода для однорядного волновода с поворотом на верхнем слое (сплошная линия) на 180° (а), 90° (б) и 45° (в); штриховая линия – переход без поворота (со-направленный).

конструкции и модели межслойного перехода для ЕВГ-волноводов.

Модель перехода для прямоугольного металлического волновода сечением 23×10 приведена на рис. 15. Параметры перехода – расстояние от оси зонда до торца волновода, обозначенное через S , и длина зонда L . Остальные параметры перехода, не показанные на рисунке, те же, что и выше: диаметр зонда D_2 , диаметр отверстия D_3 , толщина стенки t . Для расчета данного перехода

использовался тот же метод, что и в расчете перехода для ЕВГ-волноводов.

В результате параметрического анализа (здесь не приводим) были найдены оптимальные (по критерию сбалансированного согласования в полосе частот 8...12 ГГц) значения параметров $S = 4.8$ и $L = 14.4$ при тех же фиксированных значениях $D_2 = 2$, $D_3 = 4$ и $t = 1$, которые использовались выше в переходе для ЕВГ-волноводов.

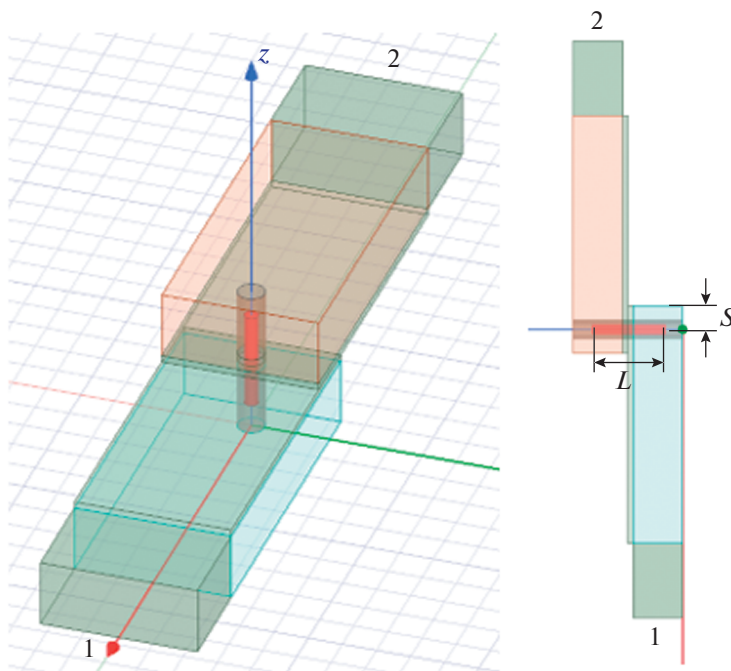


Рис. 15. Модель межслойного перехода для прямоугольного металлического волновода; 1, 2 – волноводные входы.

На рис. 16 представлена соответствующая частотная зависимость согласования перехода для металлического волновода (сплошная линия) и там же для сравнения показана частотная зависимость перехода для трехрядного ЕВГ-волновода (штриховая линия), которая соответствует значениям параметров $L = 14.5$, $S = 5.1$ и $S + S_1 = 8.1$ (см. разд. 3). Из рассмотренных выше типов волноводов для трехрядного волновода уровень отражения от стыков наименьший (см. рис. 10). Поэтому, как и

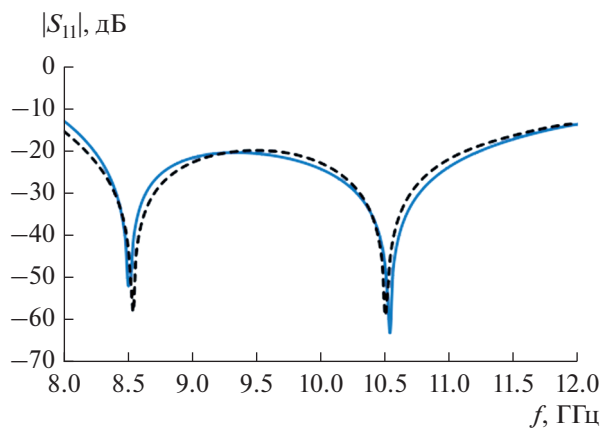


Рис. 16. Частотные зависимости согласования межслойного перехода для металлического волновода сечением 23×10 с параметрами $L = 14.4$, $S = 4.8$ (сплошная линия) и для трехрядного ЕВГ-волновода с параметрами $L = 14.5$, $S = 5.1$, $S + S_1 = 8.1$ (штриховая линия).

можно было ожидать, имеем незначительное расхождение двух кривых согласования на рис. 16. Малое отличие может быть связано с некоторым отличием в характеристиках самого перехода, обусловленным разными типами сопрягаемых волноводов, а также небольшим влиянием сравнительно слабого отражения от стыков трехрядного ЕВГ-волновода и металлического волновода.

Аналогичное сравнение в случае переходов для двухрядного и однорядного ЕВГ-волноводов здесь не приводим. Отметим только, что оно показывает более высокий, по сравнению с трехрядным волноводом, уровень отражений от стыков соответствующего ЕВГ-волновода и металлического волновода и, как следствие, более сильное влияние этого отражения на согласование перехода для двухрядного и однорядного волноводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованные в данной работе межслойные переходы ЕВГ-волноводов представляют собой двухслойную структуру, в которой волноводы на каждом слое граничат друг с другом и связаны по широкой стенке с помощью металлического зонда, проходящего через отверстие в примыкающих стенках. Каждый из волноводов коротко замкнут на одном из концов в области перехода и стыкуется со стандартным прямоугольным металлическим волноводом на другом конце. Исследования показали, что переходы этого типа достаточно хорошо согласованы в диапазоне частот 8...12 ГГц и

обладают характеристиками полосно-пропускающего фильтра. Такая характеристика обусловлена наличием в области перехода двух связанных резонансных областей, сосредоточенных между зондом и закороченными торцами волноводов на каждом слое. Параметрический анализ перехода для каждого типа волновода позволил определить зависимость положения минимумов в коэффициенте отражения от размера резонансных областей и длины связывающего их зонда, а также определить наилучшие сочетания параметров для получения сбалансированного согласования во всей рассмотренной полосе частот. Согласование перехода практически не зависит от взаимной ориентации осей волноводов на двух слоях (сонаправленные, противоположно направленные, перпендикулярные и т.д.). Оказалось также, что характеристика согласования межслойного перехода для трехрядного EBG-волновода лишь незначительно отличается от характеристики согласования межслойного перехода для стандартного прямоугольного металлического волновода, который используется на входе и выходе переходов для EBG-волноводов. Это объясняется сравнительно низким уровнем отражения от стыков волноводов обоих типов в случае трехрядного EBG-волновода. В то время как уровень отражения от стыков волноводов в случае двухрядного и однорядного EBG-волноводов и, соответственно, влияние этого отражения на согласование межслойного перехода для них значительно сильнее.

Результаты работы могут быть полезными при построении двухслойных и многослойных схем и устройств на EBG-волноводах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банков С.Е. Электромагнитные кристаллы. М.: Физматлит, 2010.
2. Банков С.Е., Пангонис Л.И., Фролова Е.В. // РЭ. 2010. Т. 55. № 11. С. 1285.
3. Bankov S.E. // PIERS Proc. Moscow. Russia. August 18–21. 2009. P. 1680.
4. Банков С.Е., Дупленкова М.Д. // Журн. радиоэлектроники. 2009. № 4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr09/4/text.html>.
5. Банков С.Е., Калошин В.А., Фролова Е.В. // Журн. радиоэлектроники. 2009. № 3. <http://jre.cplire.ru/jre/mar09/1/text.html>.
6. Банков С.Е., Калинин В.И., Фролова Е.В. // РЭ. 2020. Т. 65. № 9. С. 852.
7. Abdel-Wahab W.M., Al-Saedi H., Palizban A. et al. // IEEE Int. Symp. Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Atlanta, 7–12 Jul. 2019. N.Y.: IEEE, 2019. P. 961.
8. Vahabisani N., Daneshmand M. // IEEE Int. Symp. Antennas and Propagation (APSURSI). Spokane, 3–8 Jul. 2011. N.Y.: IEEE, 2011. P. 869.
9. Zheng P., Liu Z., Li Y. et al. // Int. Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition. London, 30 May–1 Jun. 2017. N.Y.: IEEE, 2017. P. 97.
10. Yau C.-K., Huang T.-Y., Shen T.-M. et al. // Proc. of Asia-Pacific Microwave Conf. Bangkok, 11–14 Dec. 2007. N.Y.: IEEE, 2018. P. 4554565.
11. Myers J.C., Hejase J.A., Tang J. et al. // IEEE 27th Conf. on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS). San Jose, 14–17 Oct. 2018. N.Y.: IEEE, 2018. P. 123.