РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, 2021, том 66, № 10, с. 939–950

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.396.67

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЛИТЕЛЕЙ НА EBG ВОЛНОВОДАХ

© 2021 г. С. Е. Банков[a], *, Е. В. Фролова[a], В. И. Калиничев[a]

[a] *Институт 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 15.01.2021 г.
После доработки 27.04.2021 г.
Принята к публикации 18.05.2021 г.

Рассмотрены Y- и T-делители на трехрядных EBG-волноводах на основе электромагнитного кристалла в виде двумерно-периодической решетки металлических цилиндров, размещенных внутри плоского волновода. Рассмотрены делители, имеющие входы/выходы в виде трехрядных EBG-волноводов, ориентированных вдоль главных и диагональных оптических осей кристалла. При помощи электродинамического моделирования в среде HFSS проведена оптимизация делителей для реконфигурируемых EBG-схем с двух- и трехпозиционным управлением. Показано, что в диапазоне частот 1.5 : 1 элементы с двухпозиционным управлением обеспечивают согласование на уровне не лучше –15 дБ, а элементы с трехпозиционным управлением согласованы на уровне, близком к –20 дБ. Проведено экспериментальное исследование делителей для реконфигурируемых схем с двухпозиционным управлением, результаты которого подтвердили основные выводы электродинамического моделирования.

DOI: 10.31857/S003384942110003X

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Данная работа является продолжением исследования базовых элементов, реконфигурируемых СВЧ-схем на основе электромагнитных кристаллов (ЭМК). Первые результаты исследования были изложены в [1]. Указанная работа посвящена проектированию и экспериментальному исследованию поворотов EBG-волноводов, которые являются базовыми линиями передачи отмеченных выше реконфигурируемых схем.

Как мы указывали в прежних работах, существует несколько типов EBG-волноводов, отличающихся геометрической структурой: одно-, двух- и трехрядные волноводы, а также ориентацией относительно осей кристалла: осевые и диагональные. Можно отметить еще один фактор, отличающий EBG-волноводы друг от друга, а именно, тип сетки ЭМК. В работах, посвященных исследованию волноводов данного типа (см., например, [2] и другие наши работы 2020 г.), рассматривались ЭМК с квадратной и треугольной сетками. В работе [1] исследовались повороты на EBG-волноводах определенного типа в кристаллах с квадратной сеткой. Здесь мы также ограничимся теми же типами волноводов в ЭМК с квадратной сеткой.

Кроме отмеченных выше признаков, позволяющих классифицировать волноводы по геометрической структуре, ориентации в пространстве и типу ЭМК, следует отметить еще один фактор, который относится уже не только к волноводам, но характеризует в целом схему, частью которой является волновод. Этот фактор определяет тип управления. Способы управления отличаются видами управляющих воздействий: электронное, механическое, электромеханическое, а также характером изменения указанных воздействий: непрерывный и дискретный. Основываясь на тех же принципах, что и в работе [1], мы исследуем структуры с механическим и электромеханическим дискретным управлением. При этом способы дискретного управления различаются числом состояний или позиций, в которых может находиться управляющий фактор: двух-, трех- и многопозиционное (в общем случае) управление. Объектом нашего исследования являются схемы с двух- и трехпозиционным управлением.

Одной из целей этого исследования является определение потенциально достижимых показателей качества базовых элементов реконфигурируемых схем в зависимости от типа дискретного управления. Исследованные в работе [1] повороты EBG-волноводов являлись четырехполюсными СВЧ-устройствами, функция которых состоит в полной передаче мощности с одновременным изменением направления ее распространения. Ос-

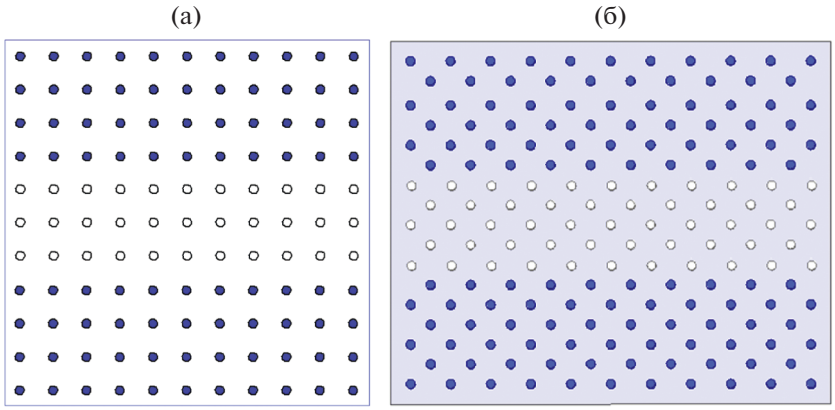

Рис. 1. Осевой (а) и диагональный (б) EBG-волноводы.

новным показателем качества такого устройства является его согласование, т.е. величина коэффициента отражения $|S_{11}|$ или обратных потерь (return loss) $RL = 20\lg|S_{11}|$. По определению, обратные потери – это коэффициент отражения, выраженный в децибелах. Другим показателем качества является полоса частот, в которой параметр $|S_{11}|$ не превышает некоторого заданного значения.

Делитель мощности представляет собой СВЧ-шестиполюсник с тремя портами. При этом выделяются центральный и боковые входы. Функциональное назначение делителя состоит в передаче мощности с центрального на боковые входы с минимальными потерями. В этом случае основным показателем качества так же, как и в работе [1], является коэффициент отражения от центрального входа, который по умолчанию имеет номер 1. Боковые входы имеют номера 2 и 3. Все рассмотренные ниже структуры имеют плоскость симметрии, которая обеспечивает равное деление мощности между боковыми входами. Поскольку исследуемые делители относятся к классу взаимных волноводных элементов с малыми тепловыми потерями, то при условии малого коэффициента отражения $|S_{11}|$ остальные элементы матрицы рассеяния имеют известные фиксированные значения [6]. По этой причине мы не рассматриваем далее их поведение. Основное внимание будет уделено исследованию частотной зависимости коэффициента отражения по центральному входу и его минимизации в полосе частот.

В работе [1] было показано, что двухпозиционные повороты могут быть согласованы на уровне –15 дБ в диапазоне частот, близком к 1.5. Под диапазоном частот мы понимаем отношение верхней частоты к нижней. Переход к трехпозиционным структурам обеспечивает уменьшение коэффициента отражения до –20 дБ в той же полосе рабочих частот. Указанные уровни согласования и диапазонов частот мы будем использовать в данной работе в качестве целевых значений для оптимизации двух- и трехпозиционных делителей мощности.

Конструктивная реализация управляемых элементов ЭМК описана в работе [1]. Она остается неизменной, и поэтому здесь ее не обсуждаем. Для нас важно, что управляющим параметром можно считать радиус металлических цилиндров, формирующих ЭМК. Отметим, что ЭМК представляет собой периодическую решетку металлических цилиндров с квадратной сеткой. Цилиндры расположены внутри плоского волновода (ПВ) в виде двух параллельных металлических экранов.

На первом этапе исследования проведена оптимизация делителей и определена их структура. Для этого используем систему электродинамического моделирования HFSS. На втором этапе будет проведено экспериментальное исследование элементов с двухпозиционным управлением. Экспериментальное исследование делителей мощности состоит в измерении достаточно малых коэффициентов отражения. Связанные с особенностями измерительной аппаратуры проблемы и способы их решения описаны в [1].

2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВЫХ Y-ДЕЛИТЕЛЕЙ НА EBG ВОЛНОВОДАХ

Осевой трехрядный и диагональный пятирядный EBG волноводы изображены на рис. 1а, 1б. Их получают путем удаления из ЭМК трех и пяти рядов цилиндров, ориентированных вдоль главных и побочных (диагональных) оптических осей кристалла. На основе результатов наших более ранних работ, 2019 и 2020 гг., были выбраны параметры ЭМК: период $P = 5.75$ и радиус цилиндра $R = 1$. Высота ЭМК $h = 10$. Все размеры здесь и далее приводятся в миллиметрах. Данные параметры

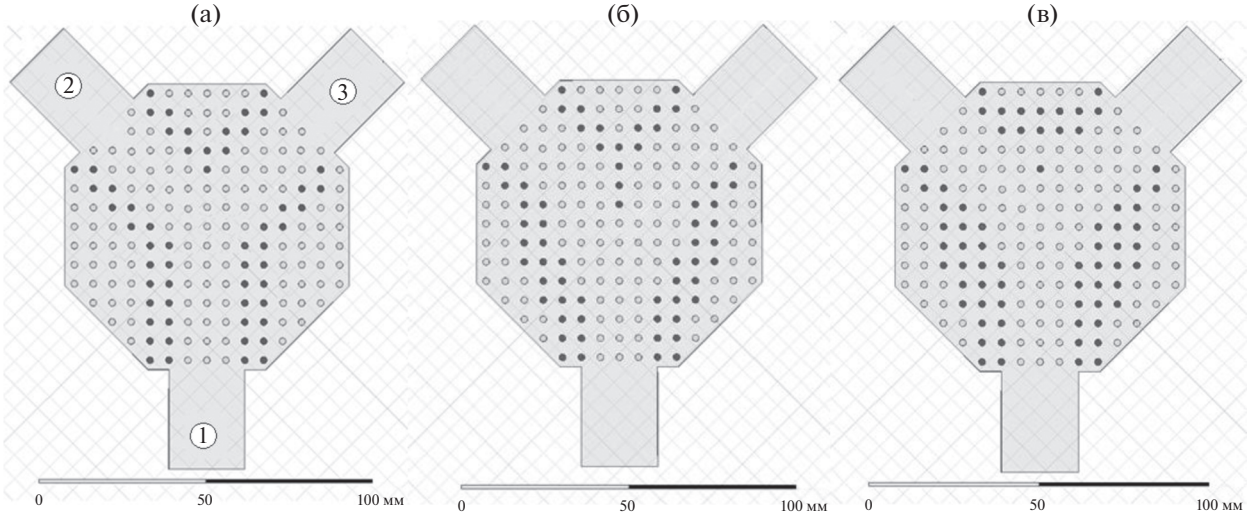

Рис. 2. Варианты двухпозиционных Y-делителей: базовый (а), с расширением центрального волновода (б), с разреженной центральной частью (в).

соответствуют рабочему диапазону частот 7...13 ГГц стандартного металлического волновода сечением 23 × 10.

На практике волноводные элементы имеют более узкий рабочий диапазон, так как на нижних частотах их характеристики ухудшаются из-за близости к критической частоте основной волны, а на верхнем краю полосы из-за появления паразитных резонансов, связанных с высшими типами волн. Поэтому при оптимизации EBG-элементов мы стремились к достижению приемлемых характеристик в диапазоне частот 8...12 ГГц.

Делители мощности на EBG-волноводах относятся к классу H-плоскостных волноводных разветвлений, которые известны в теории и технике СВЧ-устройств [9]. Для достижения хорошего согласования таких элементов используются следующие подходы. Первый состоит в создании плавного волноводного перехода. Как правило, он включает две части: плавное расширение центрального волновода и изгибы боковых плеч. Второй подход предполагает применение согласующих зеркал. Дискретная структура EBG-волновода плохо подходит для формирования плавных нерегулярностей, таких как изгиб. Поэтому основным было выбрано второе направление.

Рассмотрим далее двухпозиционный осевой Y-делитель мощности. Исходный вариант такого делителя показан на рис. 2а. Видно, что центральный вход 1 устройства выполнен на основе вертикального осевого трехрядного EBG-волновода. Темными кружками на рис. 2а–2в показаны металлические цилиндры, а светлыми отображаются цилиндры, удаленные из ЭМК. Еще раз отметим, что двухпозиционное управление подразумевает для элемента ЭМК два состояния: полное погружение в ПВ и удаление из ПВ. Если в качестве управляющего фактора рассматривать радиус цилиндра, то первое состояние эквивалентно тому, что цилиндр имеет радиус $R = 1$, а второе состояние соответствует нулевому радиусу, эквивалентному отсутствию цилиндра в решетке.

Из рис. 2а также видно, что боковые плечи 2, 3 устройства выполнены в виде двух диагональных пятирядных EBG-волноводов. Базовый вариант такого делителя представляет собой простое сочленение трех волноводов. Оптимизация двухпозиционного делителя состоит во введении и удалении из структуры цилиндров стандартного радиуса.

Отметим, что модель, использованная для электродинамического моделирования, содержит выходы в виде отрезков стандартных металлических волноводов указанного выше сечения. По этой причине на расчетные характеристики оказывают влияние также переходы со стандартного волновода на EBG-волновод. Однако, как отмечалось нами ранее (а также в работах 2019–2020 гг.), коэффициент отражения от таких переходов весьма мал. Он находится в диапазоне –(20...30) дБ. Поэтому далее мы не предпринимали специальных мер для выделения коэффициента отражения собственно EBG-элемента в результирующий коэффициент отражения, полагая, что они отличаются незначительно.

Первым вариантом модификации базового варианта было создание ступенчатого расширения центрального волновода, т.е. перехода от волновода стандартной ширины к волноводу удвоенной ширины. Далее в плоскости симметрии размещали продольную стенку в виде нескольких цилиндров, разделяющих волновод удвоенной ширины на два отдельных волновода, которые затем поворачи-

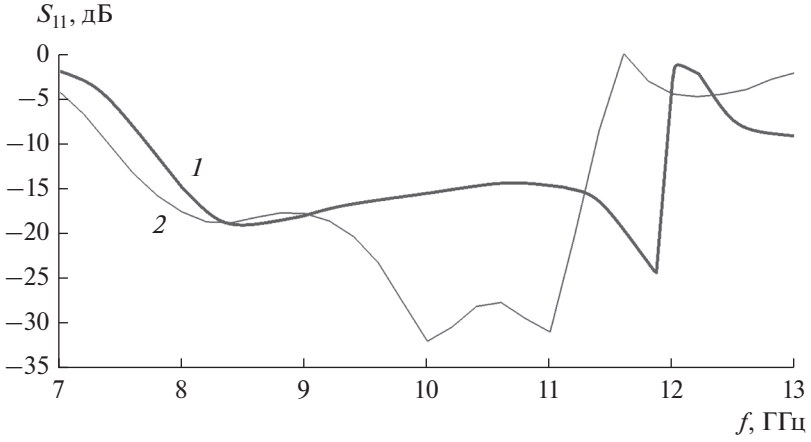

Рис. 3. Частотные характеристики осевых двухпозиционных Y-делителей: *1* – с расширением центрального волновода, *2* – с разреженной центральной частью.

вались на угол 45°. При использовании стандартных волноводных элементов имеется возможность тщательной оптимизации каждой составляющей части делителя, геометрические параметры которого допускают плавное изменение. В случае EBG-волноводов такие возможности крайне ограничены дискретной структурой устройства.

На рис. 2б представлена оптимизированная конструкция Y-делителя, построенного по описанной выше схеме. Частотная зависимость модуля его коэффициента отражения показана на рис. 3 (кривая *1*). Видно, что коэффициент отражения с трудом удалось снизить до уровня −15 дБ в полосе частот 8...11.9 ГГц. Дальнейшее улучшение параметров данного варианта делителя за счет оптимизации маловероятно.

Анализируя частотную характеристику делителя, изображенную на рис. 3, можно отметить ее характерные черты, наблюдаемые в большинстве исследованных структур. В первую очередь можно отметить наличие резких изломов кривой в верхней части диапазона на частотах $f > 12$ ГГц. Они связаны с возбуждением собственного колебания, возникающего в полости сочленения волноводов. В принципе, имеется возможность уменьшения размеров полости введением в нее дополнительных элементов ЭМК. Однако их появление неизбежно ухудшает характеристики устройства в области низких частот за счет возникновения областей с размерами, близкими к критическим размерам волновода. Как показали многочисленные численные эксперименты, два отмеченных выше фактора ограничивают потенциально достижимый диапазон рабочих частот, который крайне трудно получить шире чем 1.5.

В целом следует отметить, что попытки создания ступенчатых, а тем более, плавных переходов в схемах с дискретным управлением оказались малоперспективными. Другим направлением оптимизации является выявление локальных центров рассеяния и их настройка имеющимися средствами. Пример конструкции, полученной этим путем, показан на рис. 2в. Центрами рассеяния являются угловые точки, расположенные в местах сочленения волноводов базовой конструкции (см. рис. 2а). Как можно заметить, наибольшие изменения в сравнении с базовым вариантом требуются в центральной части делителя, из которой удалены три элемента, что позволяет назвать данную структуру делителем с разреженной центральной частью.

На рис. 3 кривая *2* соответствует частотной характеристика такого делителя. По уровню −15 дБ он согласован в полосе 7.7...11.3 ГГц. Может показаться, что не удается получить выигрыш по сравнению с делителем, рассмотренным выше. Однако следует отметить, что в пределах указанной полосы уровень коэффициента отражения существенно снижен. В большей части рабочего диапазона он ниже или незначительно превышает −20 дБ.

Переход к трехпозиционному управлению расширяет набор возможных радиусов цилиндров, которые в нашем случае были равны 0, 0.5 и 1.0. Исследованные трехпозиционные структуры были развитием двухпозиционного варианта, изображенного на рис. 2в. В результате замены части цилиндров с $R = 1.0$ на цилиндры меньшего радиуса были получены конкурирующие конструкции (рис. 4а, 4б), которые имеют близкие частотные характеристики, представленные на рис. 5 (кривые *1*, *2* соответственно). Видно, что применение трехпозиционного управления существенно улучшает достигнутый уровень согласования и, что немаловажно, форму частотной характеристики. В исследованных делителях коэффициент отражения не превышает −20 дБ в полосе частот 7.6...11.2 ГГц.

Для измерений характеристик двухпозиционных элементов был изготовлен образец, показан-

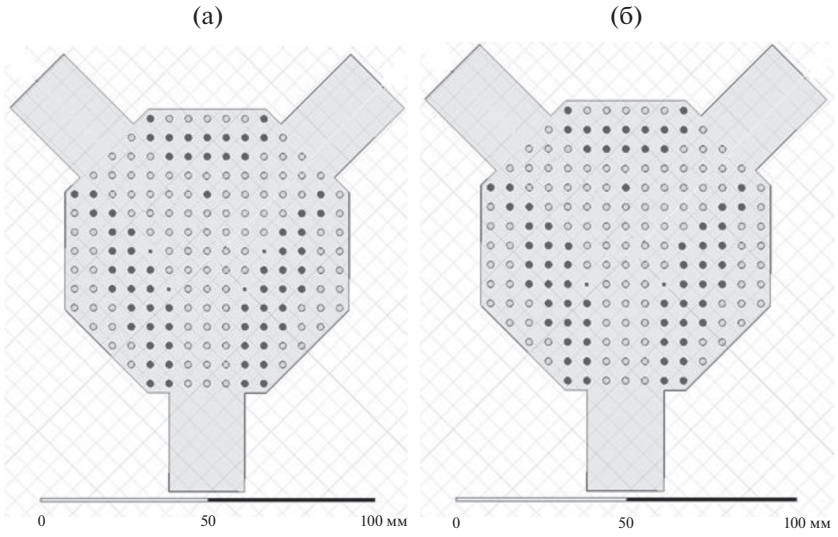

Рис. 4. Варианты осевых трехпозиционных Y-делителей с разреженной центральной частью.

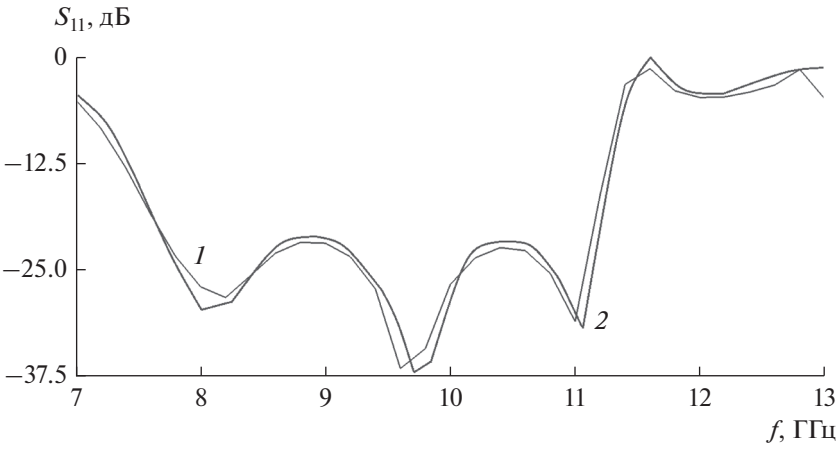

Рис. 5. Частотные характеристики осевых трехпозиционных Y-делителей для двух вариантов на рис. 4а и 4б – кривые *1* и *2* соответственно.

ный на рис. 6. Он состоит из двух металлических пластин восьмиугольной формы, которые выполняют функцию экранов ПВ. Толщина пластин равна 3. В экранах ПВ имеется система круглых отверстий с диаметром 2. В эти отверстия погружаются металлические цилиндры длиной 16. Цилиндры имеют расширения (см. рис. 6), которые используются для их фиксации в отверстиях. Расстояние между экранами равно 10, что совпадает с высотой стандартного металлического волновода сечением 23 × 10. Отверстия формируют квадратную сетку ЭМК с периодом 5.75. Механически экраны ПВ закрепляются при помощи цилиндрических стоек диаметром 5 и высотой 10. Стойки крепятся к экранам при помощи винтов М3.

По краям металлических пластин имеется выборка шириной 15 и глубиной 1, предназначенная для размещения между экранами металлического волновода, имеющего стенки толщиной 1. Металлические волноводы используются для возбуждения EBG-структур. Восьмиугольная форма образца позволяет исследовать элементы, имеющие выходы в виде как осевых, так и диагональных волноводов.

Процедура обработки измеренных данных описана в работе [1]. Отметим только, что использованная рефлектометрическая методика позволяет существенно ослабить влияние на окончательный результат таких факторов как неидеальные характеристики коаксиально-волноводных переходов и переходов волновод–EBG волновод. Для этого используется частотная фильтрация измеренного сигнала. Данный метод основан на том, что полезный сигнал, порожденный волнами, отра-

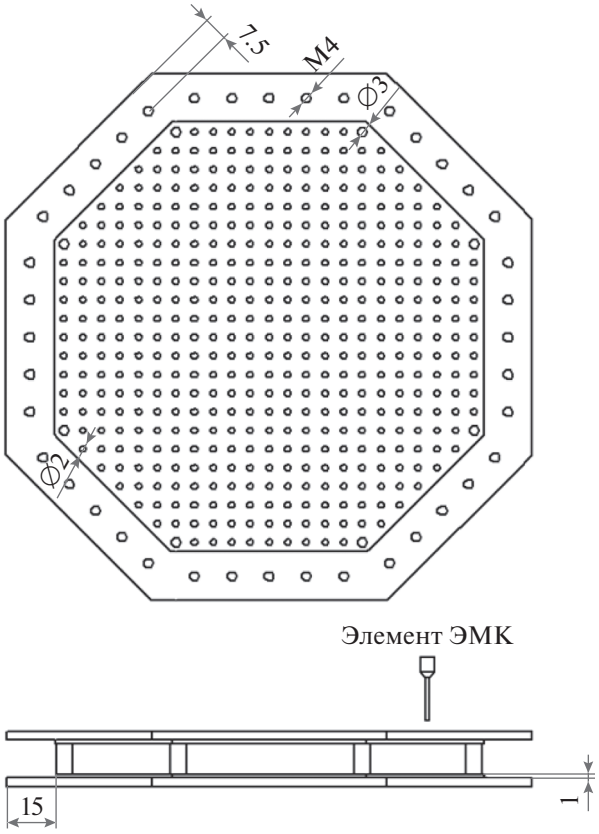

Рис. 6. Образец для экспериментального исследования.

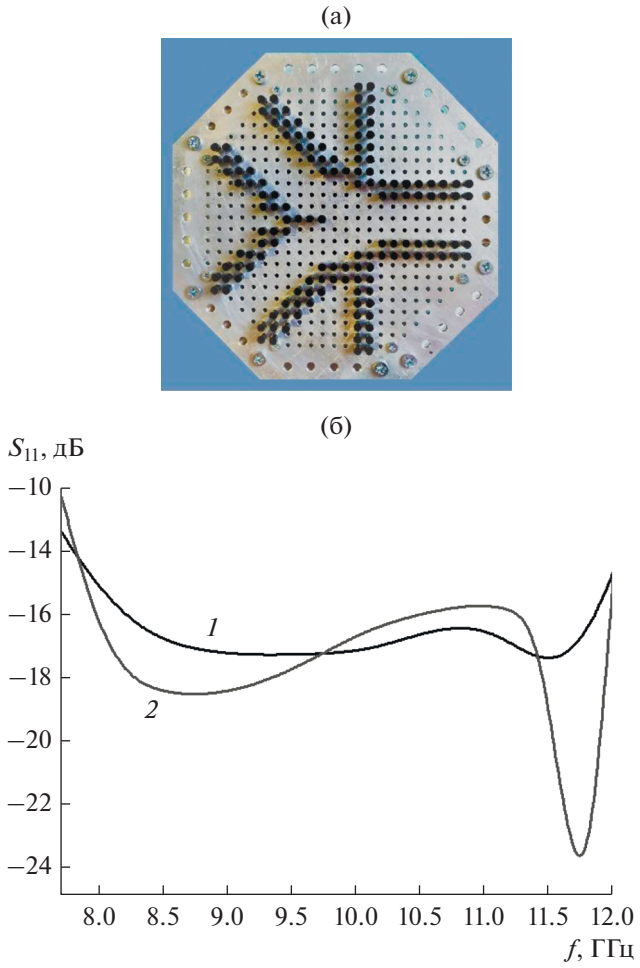

Рис. 7. Фотография экспериментально исследованного осевого двухпозиционного Y-делителя с расширением центрального волновода (а) и его измеренная (*1*) и рассчитанная (*2*) частотные характеристики (б).

женными от исследуемого устройства, меняется значительно медленнее сигналов, порожденных паразитными волнами. Такое допущение было полностью оправдано применительно к поворотам EBG-волноводов, исследованных в [1]. В случае делителей мощности оно выполняется не всегда. Наличие резонансов в делителях порождает участки с резким изменением частотной характеристики. Скорость ее изменения в этих областях может быть сравнима со скоростью изменения паразитных сигналов. По этой причине процедура, описанная в работе [1], приводит к сглаживанию экспериментально полученной кривой и искажает результаты в области существования резонансов. Подобные искажения характерны для верхней части диапазона. Поскольку они, как правило, располагаются вне рабочей полосы, то отмеченные искажения не мешают корректной оценке поведения измеряемого устройства в наиболее интересной части диапазона.

На рис. 7а, 7б представлены фотография экспериментально исследованного осевого Y-делителя с расширением центрального волновода (см. рис. 2в), а также измеренная и рассчитанная частотные зависимости его коэффициента отражения. Можно отметить достаточно хорошее совпадение двух кривых. Они дают близкие значения рабочего диапазона частот, определенного по уровню −15 дБ, принятому для двухпозиционных элементов. Экспериментальная кривая *1* не имеет резкого провала на частоте, близкой к 12 ГГц, который наблюдается у расчетной кривой *2*. Этот провал – результат воздействия резонансных эффектов. Можно предположить, что его отсутствие в экспериментальной кривой обусловлено отмеченным выше эффектом сглаживания.

3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГОНАЛЬНЫХ Y-ДЕЛИТЕЛЕЙ НА EBG-ВОЛНОВОДАХ

Рассмотрим диагональные Y-делители на EBG-волноводах. Базовая конструкция такого делителя показана на рис. 8а. Она представляет собой простое сочленение трех волноводов, как и на

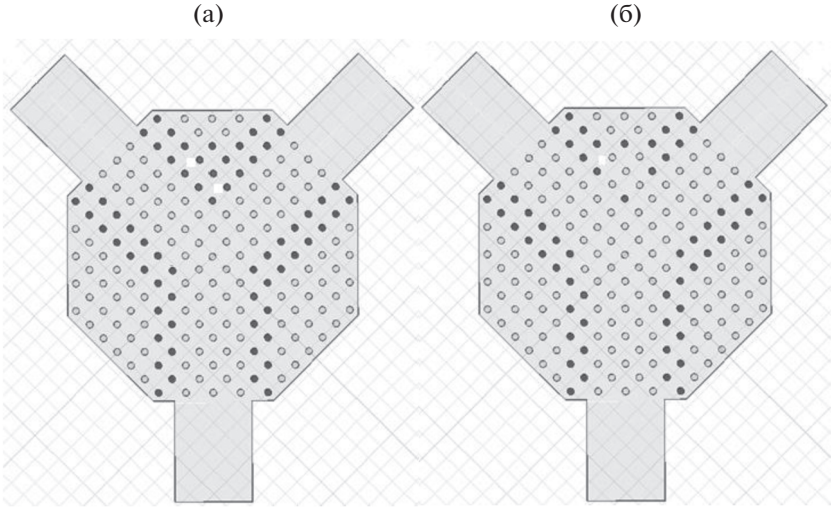

Рис. 8. Базовая (а) и оптимизированная (б) конструкции диагональных двухпозиционных Y-делителей.

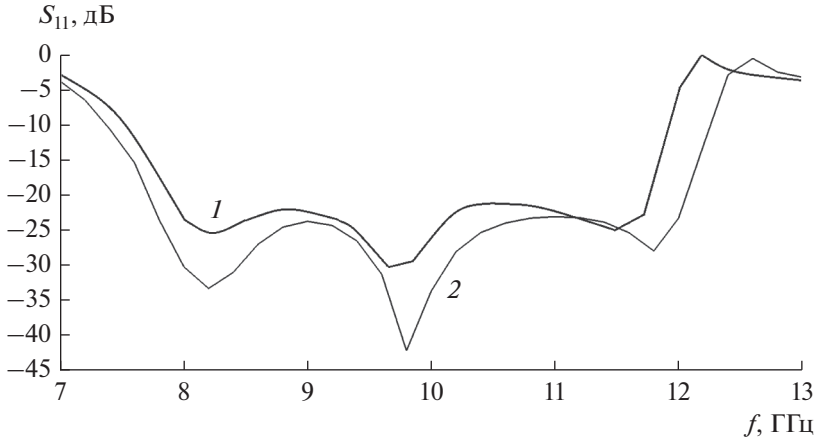

Рис. 9. Частотные характеристики двухпозиционного (*1*) и трехпозиционного (*2*) диагональных Y-делителей.

рис. 2б, за исключением того, что теперь центральным является диагональный волновод, а боковыми – осевые волноводы.

Оптимизация устройства проводилась по принципу выделения центров рассеяния. Базовая и оптимизированная конструкции двухпозиционных делителей показаны на рис. 8а, 8б. Оптимизированный делитель близок к осевому делителю с разреженной центральной частью (см. рис. 4б). Его частотная характеристика показана на рис. 9. Ей соответствует кривая *1*. Обращает на себя внимание достигнутый весьма низкий уровень коэффициента отражения. В полосе частот 7.9...11.6 ГГц он не превышает значения −20 дБ, а по уровню −15 дБ получена полоса 7.7...11.8 ГГц. Отметим, что из всех исследованных элементов диагональный делитель продемонстрировал наилучшие характеристики.

Переход к трехпозиционному управлению позволил дополнительно улучшить характеристики диагонального Y-делителя. Его конструкция показана на рис. 10. Введение цилиндров с радиусом 0.5 в центральную часть волноводного сочленения позволило сдвинуть высокочастотный резонанс в сторону более высоких частот и за счет этого добиться расширения полосы рабочих частот, которая по уровню −20 дБ равна 7.7...12.1 ГГц (см. рис. 9, кривая *2*). При этом отметим, что в большей части этой полосы коэффициент отражения не превышает значение −24 дБ.

На рис. 11а, 11б представлены фотография экспериментально исследованного диагонального Y-делителя, а также его измеренная и рассчитанная частотные характеристики. В целом результаты измерений подтверждают существенное улучшение согласования в данном типе делителя, хотя на низких частотах отмечается расхождение кри-

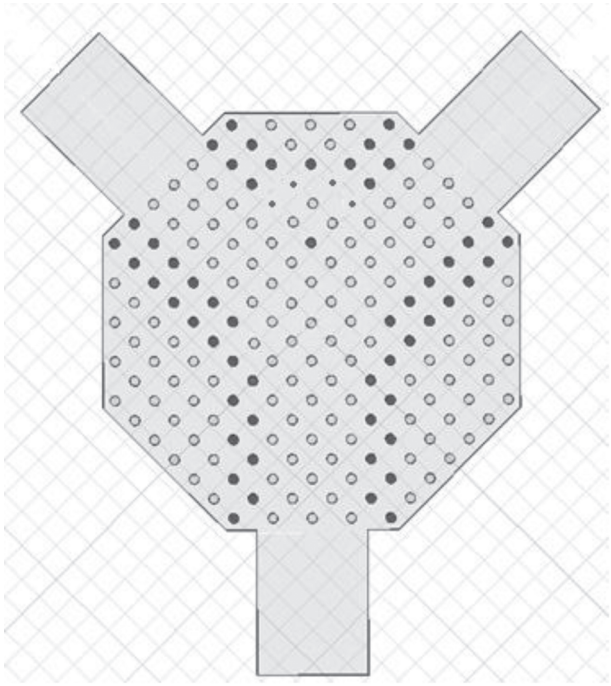

Рис. 10. Оптимизированная конструкция трехпозиционного диагонального Y-делителя.

вых *1* и *2*, в результате которого измеренная нижняя граница рабочей полосы частот по уровню –15 дБ равна 7.9 ГГц, тогда как расчеты дают значение 7.6 ГГц. Наличие указанных расхождений в значении нижней границы не должно удивлять с учетом большого числа факторов, снижающих точность измерительной установки (см. [1]).

4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВЫХ Т-ДЕЛИТЕЛЕЙ НА EBG-ВОЛНОВОДАХ

Следующими элементами, исследованными в работе, были Т-образные делители, или Т-делители. Так же как и Y-делители, они могут быть осевыми и диагональными. Базовая конструкция осевого делителя показана на рис. 12а. Она представляет собой сочленение трех осевых волноводов. При этом основной волновод ориентирован вертикально, а два боковых горизонтально.

Следует отметить, что оптимизация данного элемента вызвала наибольшие проблемы. Особенно это касается так называемого компактного двухпозиционного Т-делителя, о котором более подробно скажем ниже. Как и в случае Y-делителей, мы рассматривали два направления оптимизации. Первое связано с декомпозицией устройства на составные части: расширение волновода и поворот на 90°, второе – с выделением центров

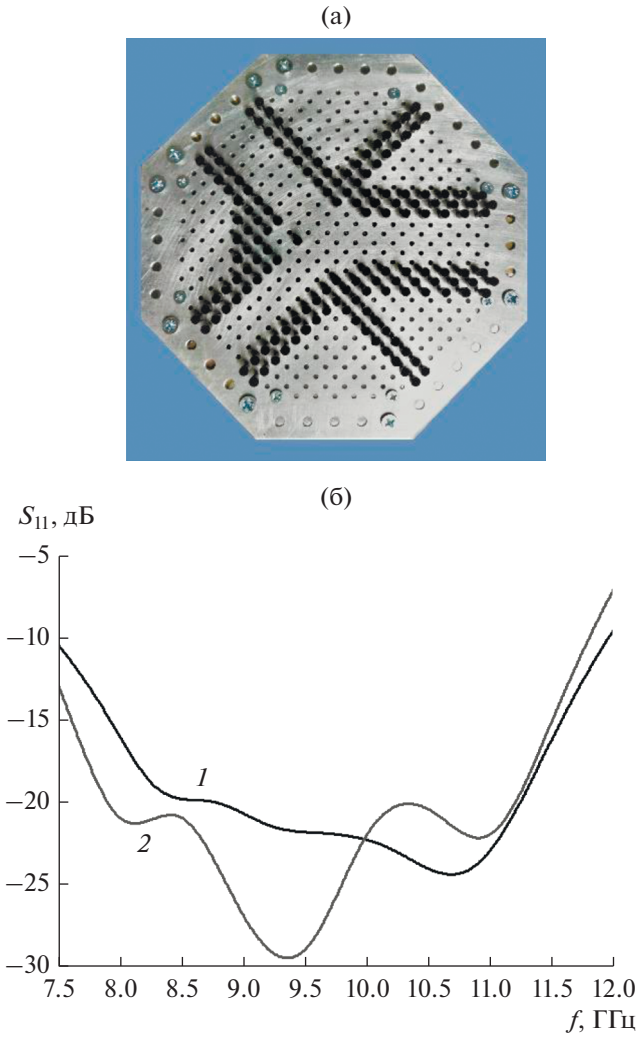

Рис. 11. Фотография экспериментально исследованного диагонального двухпозиционного Y-делителя (а) и его измеренная (*1*) и рассчитанная (*2*) частотные характеристики (б).

рассеяния с последующей их оптимизацией. В рамках первого варианта получаются Т-делители с расширением центрального волновода, во втором варианте приходим к структурам, имеющим существенно меньшие размеры. Поэтому мы назвали их компактными Т-делителями.

Отметим, что в рамках двухпозиционного управления добиться приемлемых характеристик компактного осевого Т-делителя не удалось. Поэтому его будем рассматривать только в трехпозиционном варианте. Получить удовлетворительные характеристики удалось при оптимизации двухпозиционных Т-делителей с расширением центрального волновода.

Варианты конструкций таких делителей показаны на рис. 12б, 12в. Их частотные характеристики представлены на рис. 13, кривые *1*, *2* соответ-

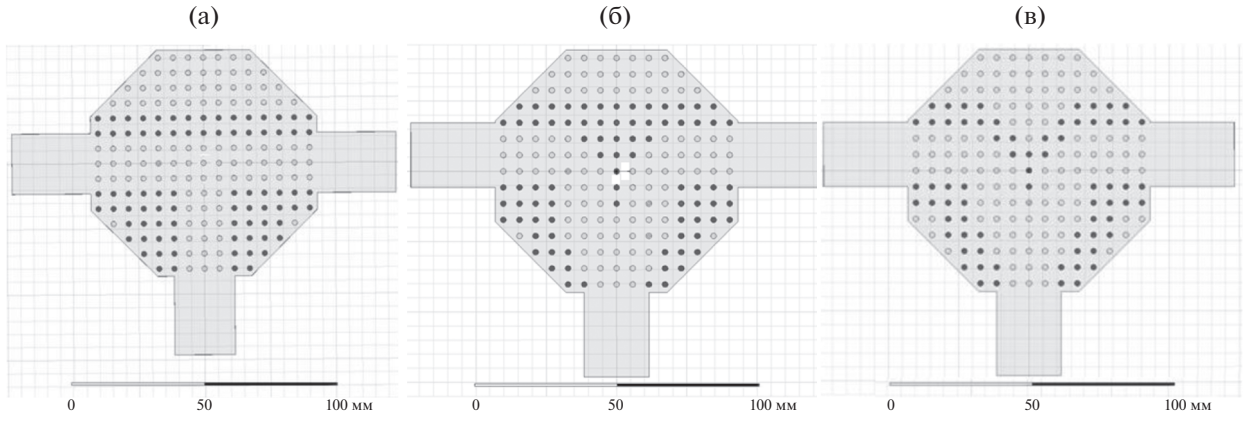

Рис. 12. Варианты осевых двухпозиционных Т-делителей: базовый (а) и с расширением центрального волновода (б, в).

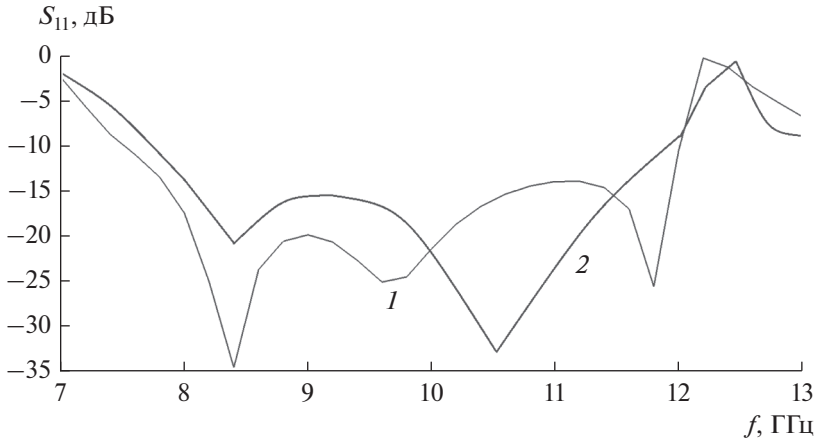

Рис. 13. Частотные характеристики осевых двухпозиционных Т-делителей с расширением центрального волновода, соответствующие вариантам на рис. 12б и 12в – кривые *1* и *2* соответственно.

ственно. Коэффициент отражения варианта на рис. 12б незначительно превышает уровень −15 дБ в районе частоты 11 ГГц. Если предположить допустимым это небольшое нарушение требований к делителю, то можно сделать вывод, что он имеет весьма широкую полосу рабочих частот 7.8...12 ГГц. Полоса частот варианта рис. 12в формально у́же 8...11.5 ГГц, но внутри полосы коэффициент отражения меньше, чем в варианте рис. 12б.

Переход к трехпозиционному управлению позволил отказаться от громоздких делителей с расширением центрального волновода и перейти к более привлекательному компактному делителю. Его оптимизированная конструкция показана на рис. 14, а частотная характеристика на рис. 15. Видно, что понизить коэффициент отражения в достаточно широкой полосе частот ниже контрольного уровня −20 дБ не удалось. Однако по уровню −17.5 дБ устройство имеет весьма широкую полосу 7.5...11.9 ГГц.

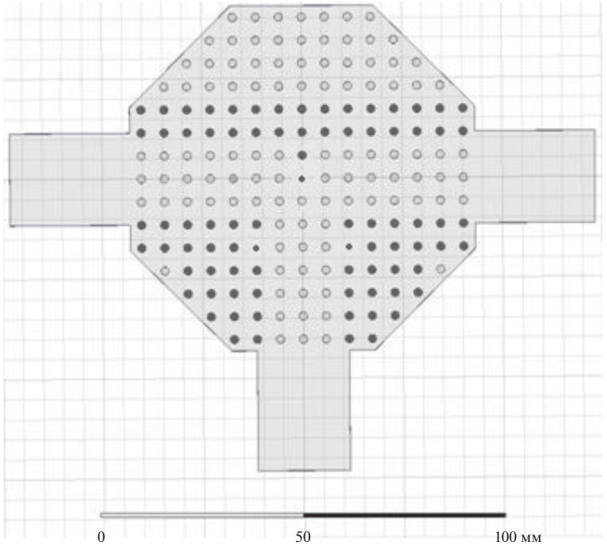

Рис. 14. Конструкция осевого трехпозиционного компактного Т-делителя.

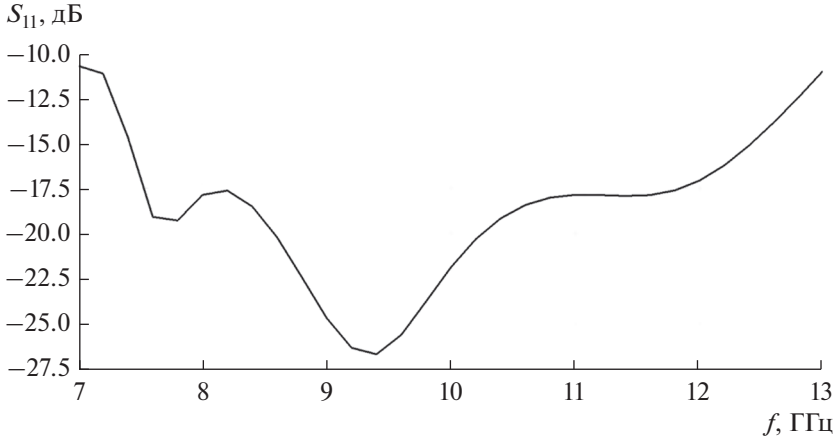

Рис. 15. Частотная характеристика трехпозиционного осевого компактного Т-делителя.

Экспериментально был исследован Т-делитель с расширением центрального волновода, изображенный на рис. 12б. Измеренная и расчетная частотные характеристики представлены на рис. 16. Следует отметить хорошее качественное и количественное совпадение результатов эксперимента и электродинамического моделирования.

5. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГОНАЛЬНЫХ Т-ДЕЛИТЕЛЕЙ НА EBG-ВОЛНОВОДАХ

Еще один вид исследованных в работе делителей — это диагональные Т-делители. Базовая конструкция устройства в виде простого сочленения трех диагональных волноводов показана на рис. 17а. Оптимизация делителя проводилась по принципу создания разреженной центральной части. Варианты с расширением центрального волновода не рассматривались.

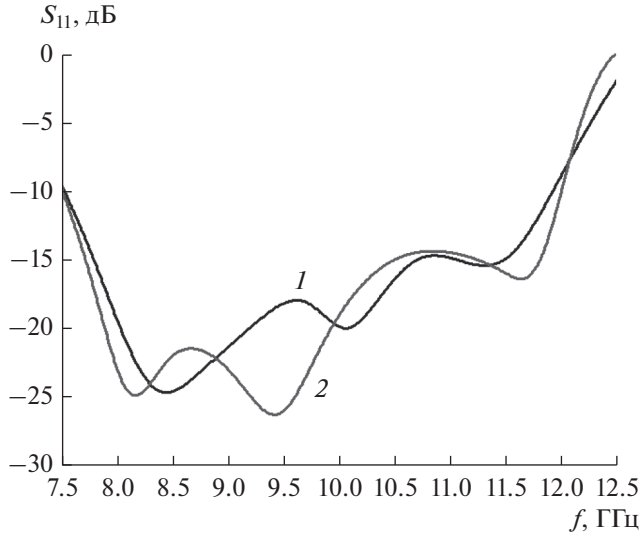

Рис. 16. Измеренная (*1*) и рассчитанная (*2*) частотные характеристики осевого двухпозиционного Т-делителя с расширением центрального волновода.

Оптимизированная конструкция двухпозиционного диагонального Т-делителя показана на рис. 17б, а ее частотная характеристика представлена на рис. 18, кривая *1*. Видно, что коэффициент отражения не превышает значения −15 дБ в полосе 8.2...12.3 ГГц, что можно рассматривать как типичный для двухпозиционных элементов результат.

Трехпозиционный вариант делителя приведен на рис. 19, а его частотная характеристика – на рис. 18, кривая *2*. Переход к трехпозиционной конструкции позволяет снизить коэффициент отражения до уровня −20 дБ в полосе 8.2...11.7 ГГц.

Экспериментально был исследован двухпозиционный Т-делитель с разреженной центральной частью, изображенный на рис. 17б. Его измеренная и расчетная частотные характеристики представлены на рис. 20. Полученные экспериментальные данные являются типичными для данного класса устройств.

6. СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ С АНАЛОГАМИ НА EBG- И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

Интересно сравнить представленные выше технические характеристики делителей мощности для реконфигурируемых схем с известными результатами, полученными при исследовании делителей на EBG-волноводах, а также с делителями на основе традиционных прямоугольных металлических волноводов. Наиболее близкими к исследованным в работе устройствам являются

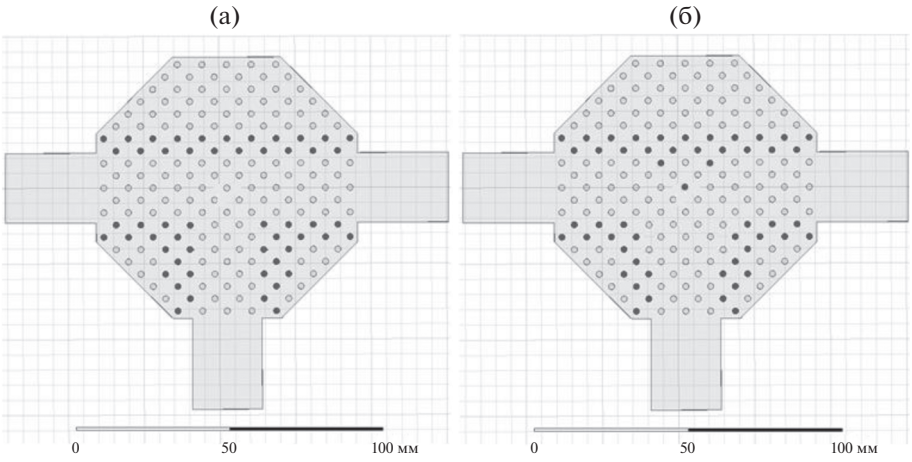

Рис. 17. Базовая (а) и оптимизированная (б) конструкции двухпозиционных диагональных Т-делителей.

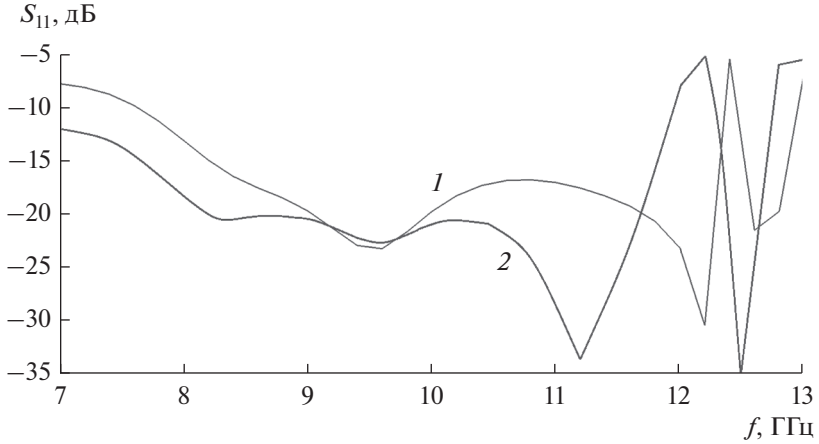

Рис. 18. Частотные характеристики двухпозиционного (*1*) и трехпозиционного (*2*) диагональных Т-делителей.

делители на EBG-волноводах, отличающиеся от рассмотренных выше более гибкой структурой, в которой отсутствуют ограничения, связанные с реконфигурацией схемы.

Такие делители исследовались многими авторами. Для целей сравнения наибольший интерес представляют работы, в которых рассматривались устройства СВЧ-диапазона на основе решеток металлических цилиндров. Можем отметить работы [10, 11], при этом следует упомянуть большое число публикаций, связанных с исследованием и разработкой структур оптического диапазона (см., например, [12–14]). По принципам функционирования они близки к представленным выше. Однако отличия в конструкции, технологии изготовления и в частотном диапазоне исключают возможность их использования для сравнения с СВЧ-делителями мощности.

В работе [10] представлен Т-делитель на однорядных волноводах, близкий по конструкции к делителю с разреженной центральной частью (см.

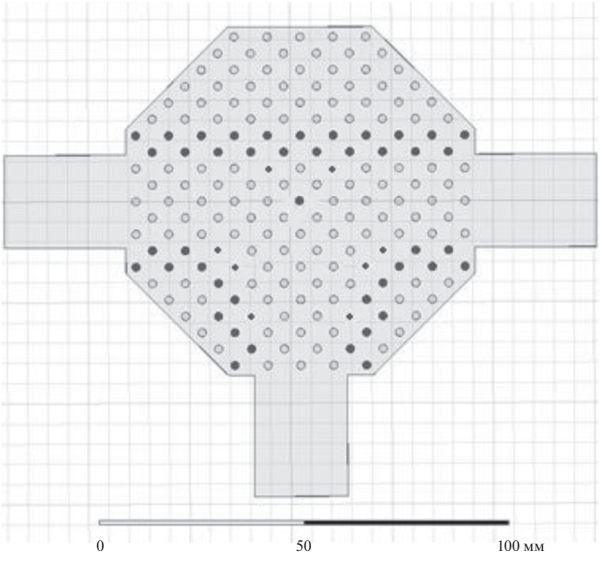

Рис. 19. Оптимизированная конструкция трехпозиционного диагонального Т-делителя.

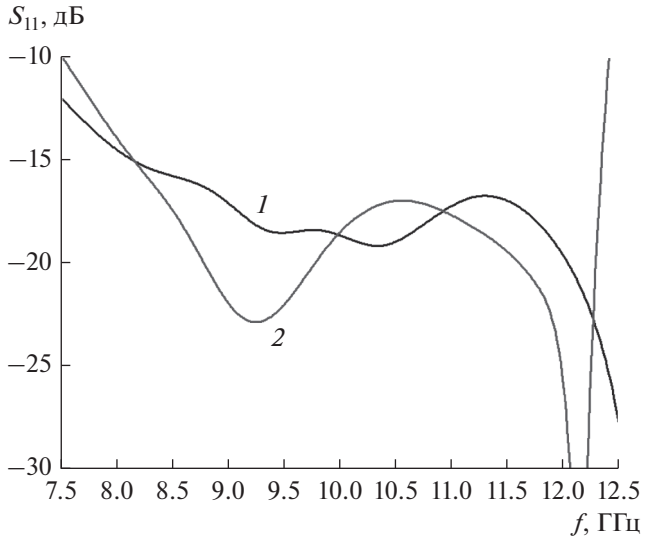

Рис. 20. Измеренная (*1*) и рассчитанная (*2*) частотные характеристики диагонального двухпозиционного Т-делителя.

рис. 2а–2в). Для него была получена полоса согласования по уровню –20 дБ 7.5...11 ГГц. Следует сказать, что в структуре, представленной в работе [10], имеются три степени свободы в виде цилиндров с переменными радиусами, и все они расположены в узлах решетки ЭМК.

Конструкция Т-делителя, близкая к компактному варианту (см. рис. 17), была исследована в работе [11]. Для нее была достигнута полоса частот 9...12 ГГц по уровню –20 дБ. В данном делителе используется один настроечный цилиндр переменного радиуса, но расположенный в произвольной точке.

Как развитие работы [11] можно рассматривать вариант устройства, описанный в [15]. В нем с помощью двух настроечных цилиндров с фиксированным положением удалось получить полосу рабочих частот 8...12 ГГц по уровню –25 дБ. Этот результат, видимо, наилучший в данном классе устройств.

Как следует из представленных выше результатов, трехпозиционные делители имеют характеристики, которые близки, а в некоторых случаях лучше характеристик устройств из работ [10, 11]. Полученные параметры двухпозиционных делителей уступают им и, тем более, они уступают делителю из работы [12]. Такое положение можно оценить как ожидаемое, поскольку возможности по улучшению характеристик двухпозиционных элементов весьма ограничены в связи с отсутствием нужного числа степеней свободы.

Сравнение с делителями на металлических волноводах было сильно затруднено отсутствием в доступной литературе количественных данных по полосе их согласования. Такое положение, очевидно, связано с тем, что элементы на металлических волноводах интенсивно исследовали в середине XX в. Поэтому в настоящее время они не представляют интереса с научной точки зрения. Одним из немногих источников, содержащих сведения о параметрах Н-плоскостных волноводных делителей мощности, является работа [16]. В ней приводится конструкция Т-образного делителя с согласующим металлическим цилиндром, которая имеет полосу согласования 8...11.6 ГГц по уровню –15 дБ. Нетрудно заметить, что исследованные в работе устройства имеют вполне конкурентоспособные характеристики.

* * *

Выводы из представленных выше результатов во многом аналогичны выводам из исследования поворотов EBG-волноводов в работе [1]. Переход от двух- к трехпозиционным элементам позволил снизить коэффициент отражения на 5 дБ при сохранении полосы частот в диапазоне, близком к 1.5. Расчетные результаты, полученные с помощью программы электродинамического моделирования, во всех рассмотренных случаях хорошо согласуются с экспериментальными данными.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Банков С.Е., Калиничев В.И., Фролова Е.В.* // РЭ. 2021. Т. 66. № 7. С. 627.
2. *Банков С.Е., Калиничев В.И., Фролова Е.В.* // РЭ. 2020. Т. 65. № 9. С. 852.
3. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1988.
4. *Левин Л.* Теория волноводов. М.: Радио и связь, 1981.
5. *Bankov S.E., Duplenkova M.D.* // Журн. радиоэлектроники. 2006. № 6. http://jre.cplire.ru/jre/dec06/2/text.html.
6. *Калошин В.А., Пангонис Л.И., Скородумова Е.А.* // Журн. радиоэлектроники. 2009. № 4. http://jre.cplire.ru/jre/apr09/3/text.pdf.
7. *Mosallaei H., Rahmat-Samii Y.* // IEEE Trans. 2003. V. AP-51. № 3. P. 549.
8. *Painter O., Lee R.K., Scherer A. et al.* // Science. 1999. V. 284. № 6. P. 1819.
9. *Mekis A., Chen J.C., Kurland I. et al.* // Phys. Rev. Lett. V. 77. № 18. P. 3787.
10. *Банков С.Е.* Электромагнитные кристаллы. М.: Физматлит, 2010.
11. *Шаров Г.А.* Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. М.: Горячая Линия-Телеком, 2016.