

УДК 621.372.8

В.В. Земляков, Г.Ф. Заргано**ОДНО- И МНОГОМОДОВЫЕ СЕЛЕКТИВНЫЕ СВЧ-УСТРОЙСТВА
НА ВОЛНОВОДАХ СЛОЖНОГО СЕЧЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ
ИХ РАЗВИТИЯ В СТРУКТУРАХ МНОГОСЛОЙНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
МИКРОСХЕМ***

Изложены результаты расчета частотно-селективных и модо-селективных СВЧ-устройств на волноводах сложного сечения в одно- и многомодовом режимах работы и их развитие в составе многослойных интегральных микросхем – SIW-структур. Расчет электромагнитных полей волноводов сложного сечения проводился методом частичных областей с учетом особенности поля на ребре. В качестве электродинамического метода анализа частотно-селективных устройств использовалась совокупность методов: вариационного, интегральных уравнений, многоволновой матрицы рассеяния и каскадного соединения многополюсников. Методика синтеза включала радиотехнический синтез и программу оптимизации многопараметрической функции состояния. Представлены структуры и характеристики рассчитанных полосно-пропускающих фильтров: на плоско-поперечных сдвигах Н-волновода; многоуровневого на П-волноводе; на прямоугольном волноводе с L-ребрами; на резонансных диафрагмах с L-ребрами и емкостных диафрагмах. Полосно-запирающих фильтров; на круглых резонансных штырях в П-волноводе; на резонансных диафрагмах с L-ребрами. Представлена структура и параметры компактного направленного ответвителя на Н-волноводе с прямоугольными повернутыми отверстиями связи. При расчете направленного ответвителя использовалась квазистатическая теория Бете, адаптированная для волноводов сложного сечения и многомодового режима работы. Изложены результаты расчета модовых волноводных трансформаторов (конвертеров) на волноводах сложного сечения. Приведена реализация конвертеров на вариациях размеров гребней волноводов сложного сечения с помощью изгибов и плоско-поперечных стыков. Изложены ход процесса и возможности внедрения волноводных структур в интегральные микросхемы с применением уже существующей технологии производства. В качестве примера представлена спроектированная конструкция полосно-пропускающего фильтра, реализованного по SIW технологии на базе прямоугольного волновода с двумя L-ребрами. Показана перспективность изложенных подходов и актуальность рассмотренных задач для разработчиков аппаратуры СВЧ и КВЧ диапазонов.

Волноводы сложных сечений; фильтры; диафрагмы; направленные ответвители; модовые волноводные трансформаторы; SIW технология.

V.V. Zemlyakov, G.F. Zargano**SINGLE- AND MULTIMODE SELECTIVE MICROWAVE DEVICES
ON WAVEGUIDES OF COMPLEX CROSS-SECTION AND PERSPECTIVES
OF THEIR DEVELOPMENT IN STRUCTURES OF MULTILAYERED
INTEGRATED CIRCUITS**

The calculation results of frequency-selective and mode-selective microwave devices on single- and multimode waveguides of complex cross-section are provided with the perspective to microwave IC integration by SIW technology. The calculation of electromagnetic waves of waveguides of complex cross-section is provided by the method of partial regions including field singularity at the metal edge. Electrodynamic analysis of frequency-selective devices is provided by the combination of methods: variational, integral equation, multimode scattering matrix and cascade multiport connection. The synthesis includes radiotechnical synthesis and multiparametric optimization. The structures and characteristics of band-pass filters are presented: on transverse shifts of double-ridged waveguides, on multilevel single-ridged waveguide, on L-ridged waveguides, on resonant diaphragms with com-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-00410_a.

plex aperture. The structures and characteristics of band-stop filters are presented: on circular resonant metal rods, on resonant diaphragms with complex aperture. The structures and characteristics of multiaperture directional coupler on double-ridged waveguide with rectangular coupling apertures. The calculations of directional couplers are provided by the Bete's theory adapted to waveguides of complex cross-section and multimode operation. The calculation results of mode converters on waveguides of complex cross-section are presented. The converters are realized on smooth deformations of waveguides cross-section and transverse junctions. The possibilities of realization of selective microwave devices on waveguides of complex cross-section in microwave multilayer integrated circuits are discussed. As an example the band-pass filter on L-ridged rectangular waveguide realized by SIW technology is presented. The perspectives of presented approaches and algorithms for modern microwave devices development are shown.

Waveguides of complex cross-section; filter; diaphragm; directional couple; mode converter; SIW.

Введение. Волноводные устройства играют важную роль в радиотехнике сантиметровых и миллиметровых длин волн. Их отличают малые потери, большие передаваемые мощности и высокая добротность резонаторов [1–20]. К основным недостаткам волноводных элементов и устройств можно отнести большие габаритные размеры и достаточно узкий рабочий диапазон частот, ограниченный одномодовым режимом волноводов. Развитие волноводной техники неразрывно связано с устранением данных недостатков. Одним из известных подходов к решению проблемы компактности и широкополосности является переход от волноводов простого прямоугольного и круглого сечения к волноводам с поперечным сечением сложной формы. Однако, в отличие от волноводов простого сечения, для волноводов сложного сечения (ВСС) задача на собственные значения не имеет точного решения и существующие на сегодняшний момент численные и численно-аналитические методы и алгоритмы позволяют проводить вычисления критических частот и компонент электромагнитных полей лишь с определенной точностью, что существенно осложняет как задачу электродинамического анализа самих ВСС, так и анализа и синтеза различных устройств на их основе. Так, например, для ВСС, поперечное сечение которых может быть разделено на простые частичные прямоугольные области, наиболее эффективно, как с точки зрения скорости расчетов и требуемых вычислительных ресурсов, так и точности получаемых результатов, применять метод частичных областей с учетом особенности электромагнитного поля на острых металлических ребрах.

Постановка задачи. Волноводы сложного сечения приобретают новые свойства за счет изменения структуры электромагнитного поля в зависимости от формы поперечного сечения. Так, например, отдельный класс ВСС составляют волноводы с регулярными металлическими гребнями, наиболее популярными из которых являются П- и Н-волноводы, т.е. волноводы с одним и двумя прямоугольными гребнями. П- и Н-волноводы позволяют до двух раз уменьшить критическую частоту основной волны по сравнению с прямоугольным волноводом того же поперечного сечения и расширить одномодовый диапазон до соотношений 3:1 и более.

Появление в элементной базе ВСС волноводов со сложными гребнями, например с Т- и L-образными, позволило не только дополнительно уменьшить габаритные размеры и увеличить диапазон одномодового режима по сравнению с П- и Н-волноводами, но и получить ряд новых свойств для устройств, проектируемых на их основе, в частности для частотно-селективных устройств [1–3]. К таким свойствам можно отнести заметное увеличение добротностей резонаторов, расширение полосы запираания и уровня затухания в ней. Более того, дополнительное повышение компактности устройств может быть достигнуто за счет изгибов и разворотов волноводного тракта, например, путем построения многоуровневых конструкций. Базовым элементом волноводных частотно селективных устройств чаще

всего являются плоско-поперечные неоднородности, такие как сдвиги и стыки волноводов различного поперечного сечения, а также тонкие металлические диафрагмы. Расчет электродинамических свойств таких одиночных и связанных плоско-поперечных неоднородностей в ВСС, особенно с учетом взаимодействия по высшим типам волн, является достаточно сложной задачей и может быть реализован путем комбинаций различных численно-аналитических методов, таких как вариационные методы, методы интегральных уравнений и метод многоволновой матрицы рассеяния и каскадного соединения многополюсников.

На рис. 1–4 представлены конструкции и зависимости модулей S-параметров (здесь и далее S_{11} – сплошная линия, S_{21} – пунктирная линия) от нормированного волнового числа (здесь и далее нормировка для гребневых волноводов осуществляется на половину широкой стенки – l , а для прямоугольных на широкую стенку – a) для полосно-пропускающих фильтров на ВСС: 1 – фильтра на плоско-поперечных сдвигах Н-волновода; 2 – компактного фильтра на П-волноводе с коаксиальными выходами, выполненного на многоуровневой основе; 3 – фильтра на прямоугольных волноводах с двумя L-образными металлическими гребнями [2]; 4 – компактного фильтра на резонансных диафрагмах с апертурой в виде прямоугольного окна с двумя L-образными металлическими гребнями (за счет введения емкостных диафрагм, четвертьволновые связи между резонаторами удалось сократить в три раза при сохранении исходной АЧХ фильтра в полосе пропускания – маркеры на графике) [3].

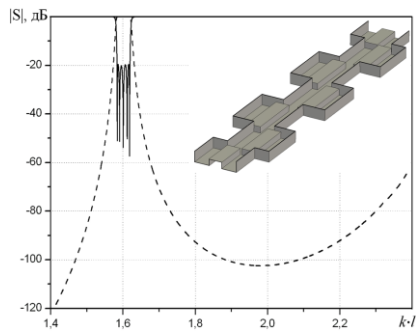


Рис. 1. Полосно-пропускающий фильтр на плоско-поперечных сдвигах Н-волновода

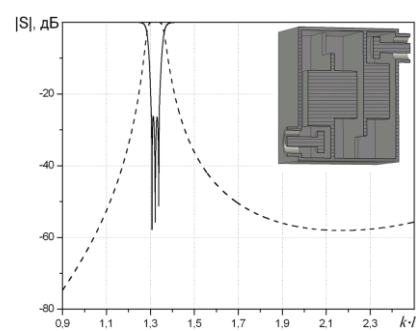


Рис. 2. Полосно-пропускающий фильтр на П-волноводе с коаксиальными выходами

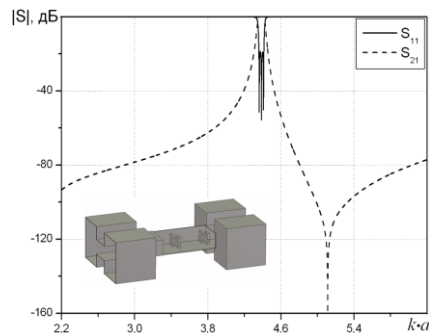


Рис. 3. Полосно-пропускающий фильтр на прямоугольных волноводах с двумя L-образными металлическими гребнями

На рис. 5–6 представлены конструкции и зависимости модулей S-параметров от нормированного волнового числа для полосно-запирающих фильтров на ВСС: 1 – фильтра на круглых резонансных штырях в П-волноводе; 2 – фильтра на резонансных диафрагмах с апертурой в виде прямоугольного окна с двумя L-образными металлическими гребнями (благодаря особенностям данной диафрагмы ее можно использовать как в качестве последовательного, так и в качестве параллельного колебательного контура).

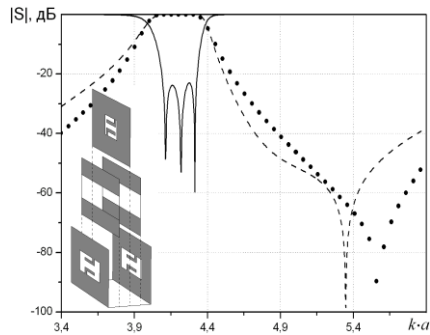


Рис. 4. Полосно-пропускающий фильтр на резонансных диафрагмах в прямоугольном волноводе

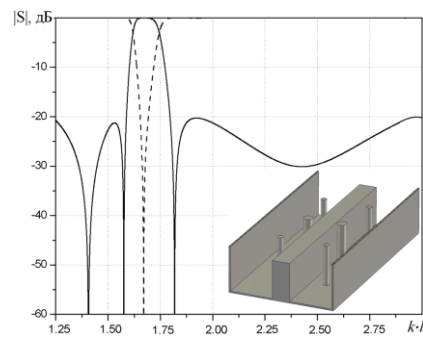


Рис. 5. Полосно-заграждающий фильтр на круглых резонансных штырях в П-волноводе

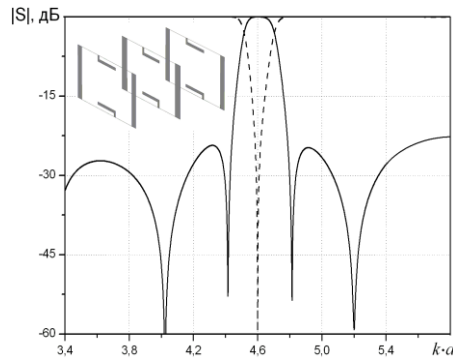


Рис. 6. Полосно-заграждающий фильтр на резонансных диафрагмах в прямоугольном волноводе

Расширение благодаря ВСС рабочего диапазона частот активно используется не только в частотно-селективных устройствах, но и в волноводных направленных ответвителях (НО). Так, используя малые отверстия связи круглой, прямоугольной и крестообразной формы, удается построить достаточно компактные НО с переходным ослаблением до -10дБ и неравномерностью, не превышающей 0.5 дБ в двукратной, а при реализации многомодового режима – в трехкратной полосе частот [4]. Для электродинамического анализа и синтеза НО с малыми отверстиями связи наиболее эффективно использовать квазистатическую теорию Бете, адаптированную для ВСС и развитую на случай многомодового режима работы. На рис. 7 представлена конструкция и зависимость переходного ослабления S и направленности N от нормированного волнового числа для НО на Н-волноводе с прямоугольными повернутыми отверстиями связи.

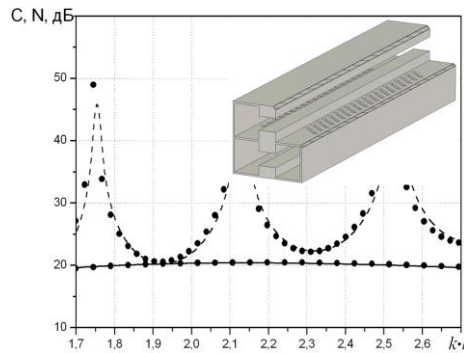


Рис. 7. Направленный ответвитель на H -волноводе с прямоугольными повернутыми отверстиями связи

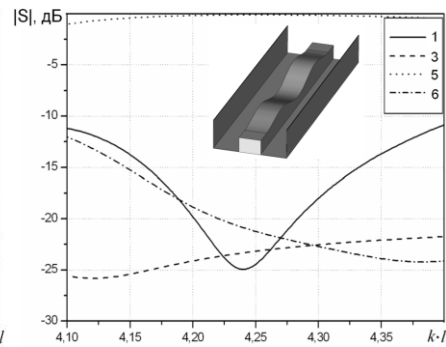


Рис. 8. Модовый волноводный трансформатор на плавных изгибах гребня H -волновода

Использование многомодового режима работы позволяет также расширить возможности волноводной техники. Многомодовые волноводы, т.е. волноводы, поперечные размеры которых позволяют распространение не только основной, но и высших типов волн, дают возможность передавать большую мощность, чем одномодовые, а также создавать такие устройства, как многомодовые фильтры и волноводные антенны со сложными диаграммами направленности. При работе с многомодовыми волноводами важную роль играют такие устройства, как модовые волноводные трансформаторы (конверторы) – это устройства обеспечивающие преобразование одних распространяющихся мод волновода в другие. Существует несколько основных подходов к проектированию модовых волноводных трансформаторов (МВТ): плавный изгиб волновода вдоль продольной оси, плоско-поперечные стыки волноводов с резким изменением поперечного сечения, а также тонкие продольные металлические диафрагмы. Каждый из этих подходов обладает своими преимуществами и недостатками, так, например, плавные изгибы позволяют получить наилучшую степень модового преобразования в широкой полосе частот и минимальные отражения, но при этом имеют наибольший продольный размер до нескольких рабочих длин волн; трансформаторы на плоско-поперечных стыках, наоборот обеспечивают наибольшую компактность и простоту производства, однако обладают наименьшей рабочей полосой трансформации и достаточно большим уровнем отражения. Реализация МВТ на волноводах сложного сечения позволит достичь ряда новых свойств, таких как, например, обеспечение регулярности внешнего профиля волновода при изгибах (рис. 8), и плоско-поперечных стыках (рис. 9), путем вариации только размеров гребней ВСС [5]. На рис. 8 и 9 номера соответствуют порядковым номерам мод в спектре волновода (трансформация происходит между модами 1 – 5, на рис. 9 пунктирными линиями отмечены уровни отраженных волн), при этом часть мод не возбуждается в процессе трансформации. Как и в случае с другими устройствами на волноводах сложного сечения, требуется разработка новых высокоточных численно аналитических методов, обеспечивающих учет взаимодействия по высшим типам, как распространяющихся, так и не распространяющихся волн.

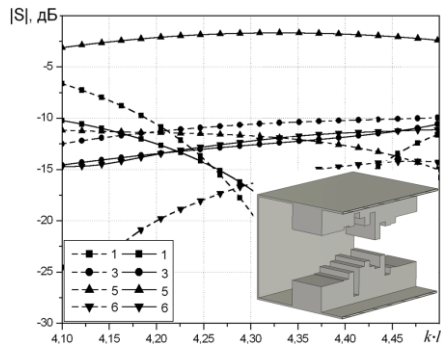


Рис. 9. Модовый волноводный трансформатор на плоско-поперечных стыках П-волноводов

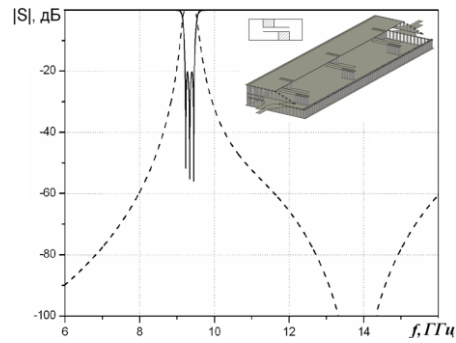


Рис. 10. Полосно-пропускающий фильтр на прямоугольном волноводе с двумя L-образными гребнями, реализованный по SIW технологии

Развитие современной микросистемной техники привело к появлению новых трехмерных структур в составе многослойных интегральных микросхем – SIW-структур (Substrate Integrated Waveguide – интегрированный в подложку волновод), которые представляет собой волноводоподобные элементы, созданные двумя рядами металлических цилиндров в диэлектрической подложке, соединяющих два параллельных слоя металлизации [6]. В результате, не планарный прямоугольный волновод может быть изготовлен в планарной форме с применением существующих технологий производства, например керамики с низкой температурой обжига (LTCC). Основным свойством SIW структуры является то, что она демонстрирует практически те же электродинамические характеристики распространения, что и классический прямоугольный волновод, включая распределения поля и дисперсионные характеристики. Таким образом, сохраняя большинство преимуществ классических волноводов (большая передаваемая мощность, малые потери, полностью экранированная структура, высокая добротность резонаторов), SIW приобретает особенности планарных структур – малые размеры и вес, низкая стоимость производства. Можно показать, что реализация ВСС и узлов на их основе в интегральных микросхемах с помощью SIW-технологии, способна с таким же успехом, как и в классических структурах, заменить прямоугольные волноводы и вывести реализуемые устройства на новый, современный, высокотехнологичный уровень. На сегодняшний момент существует лишь несколько работ, затрагивающих возможность реализации устройств на гребневых волноводах в структуре LTCC. При этом во всех публикациях отмечается значительное усложнение решаемой электродинамической задачи, за счет необходимости точного определения характеристик ВСС. В качестве одного из подходов к электродинамическому анализу и синтезу SIW-устройств на гребневых волноводах, можно предложить использовать в качестве прототипа соответствующие устройства, реализованные на цельнометаллических волноводах, с последующим пересчетом геометрических размеров с учетом особенностей SIW-конструкций. В качестве примера на рис. 10 представлена конструкция и зависимость модулей S-параметров от частоты для полосно-пропускающего фильтра, реализованного по SIW технологии на базе прямоугольного волновода с двумя L-образными гребнями [7].

Выводы. Необходимо отметить, что бурное развитие за последние два десятилетия специализированных программных пакетов компьютерного моделирования различных высокочастотных радиотехнических задач прямыми численными методами, позволяет на сегодняшний момент решить в строго постановке практически любую задачу анализа многих волноводных элементов и устройств, в том числе и на волноводах со сложным поперечным сечением. Однако, как показыва-

ют многочисленные исследования, решение задач синтеза, особенно в случае наличия большого числа свободных параметров геометрии, оказывается практически невыполнимо в отсутствии хорошего начального приближения, поскольку либо требует огромного времени счета, либо вообще не приводит к конечному результату. Поэтому, развитие базы численно-аналитических методов и поиск новых прототипов, позволяющих с достаточно высокой скоростью и точностью решать широкий круг задач, связанных с электродинамическим анализом и синтезом ряда ключевых радиотехнических устройств на волноводах сложного сечения является важной и востребованной задачей для разработчиков аппаратуры сантиметрового и миллиметрового диапазонов.

В результате проведенных в работе исследований спроектированы частотно-селективные и модо-селективные СВЧ устройства на волноводах со сложной формой поперечного сечения, имеющие новые технические решения, работающие не только в одномодовом, но и в многомодовом режимах и имеющие лучшие электродинамические и массогабаритные показатели, чем существующие их аналоги на прямоугольных волноводах. По разработанным методикам проведено развитие таких структур в составе многослойных интегральных микросхем, выполненных по SIW технологии. Показана перспективность предложенных методик расчета, конструктивных особенностей и технических решений для разработчиков СВЧ аппаратуры различного назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Заргано Г.Ф., Земляков В.В.* Электродинамический анализ и синтез селективных устройств на волноводах сложного сечения для современных антенно-фидерных систем // Антенны. – 2011. – Вып. 7 (170). – С. 64-73.
2. *Заргано Г.Ф., Земляков В.В., Гадзиева А.А., Крутиев С.В.* Электродинамический анализ и синтез компактных фильтров на L-гребневых волноводах // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/3. – С. 48-50.
3. *Земляков В.В., Заргано Г.Ф., Крутиев С.В.* Компактные селективные устройства на сложных L-гребневых диафрагмах в прямоугольном волноводе // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2014. – Т. 19, № 9. – С. 37-41.
4. *Заргано Г.Ф., Земляков В.В., Пелецкий Р.В.* Синтез направленных ответвителей на П-волноводах, связанных системой круглых отверстий // Радиотехника и электроника. – 2011. – № 7. – С. 789-795.
5. Модовый волноводный трансформатор: пат. 127523 РФ: МПК H01P1/16 / Земляков В.В., Заргано Г.Ф. опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12.
6. *Гадзиева А.А., Заргано Г.Ф., Земляков В.В., Крутиев С.В.* SIW-технологии, история создания, современное состояние и перспективы развития // Физические основы приборостроения. – 2012. – Т. 1, № 4. – С. 4-13.
7. *Zemlyakov V.V.* The Band-pass SIW-filter Based on L-ridged Rectangular Waveguide // Proc. of «Progress in Electromagnetics Research Symposium» (PIERS-2013), Stockholm, Sweden, August 12-15, 2013. – P. 605-609.
8. *Заргано Г.Ф., Ляпин В.П., Михалевский В.С. и др.* Волноводы сложных сечений. – М.: Радио и связь, 1986. – 124 с.
9. *Zargano, G.F., Zemlyakov, V.V., Peletskii, R.V.* Synthesis of directional couplers based on ridged waveguides coupled by a system of circular apertures // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2011. – Vol. 56, No. 7. – P. 805-811.
10. *Земляков В.В., Заргано Г.Ф., Крутиев С.В., Гадзиева А.А.* Волноводный полосно-пропускающий фильтр. Патент на полезную модель. RU 146668 U1, H01P1/219 (2006/01), опубл. 20.10.2014 г.
11. *Zemlyakov V.V., Zargano G.F., Krutiev S.V.* Waveguide bandpass filter on complex resonance diaphragms // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2015. – Vol. 60, No. 12. – P. 1305-1310.
12. *Zemlyakov, V.V., Zargano, G.F.* Bandpass Filters Based on L-ridged Rectangular Waveguides // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2014. – Vol. 57, No. 3. – P. 187-197.

13. Заргано Г.Ф., Земляков В.В., Пелецкий П.В. Электродинамический анализ направленных ответвителей на волноводах сложного сечения, связанных системой малых отверстий // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2010. – № 2. – С. 48-57.
14. Заргано Г.Ф., Земляков В.В., Пелецкий П.В. Анализ и синтез направленных ответвителей на гребневых волноводах с прямоугольными отверстиями связи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13, № 4. – С. 19-24.
15. Ando M., Hirokawa J., Yamamoto T., Akiyama A., et al. Novel single-layer waveguides for high-efficiency millimeter-wave arrays // IEEE Trans. MTT. – 1998. – Vol. 46, No. 6. – P. 792-799.
16. Заргано Г.Ф., Земляков В.В., Крутиев С.В. Полосно-пропускающие фильтры на плоско-поперечных сдвигах Н-волноводов, выполненные по SIW-технологии // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2013. – Т. 16, № 2. – С. 87-93.
17. Земляков В.В., Заргано Г.Ф., Гадзиева А.А., Крутиев С.В. Компьютерное моделирование полосно-пропускающих фильтров на волноводах сложного сечения, реализованных по SIW-технологии // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2013. – № 9. – С. 36-41.
18. Заргано Г.Ф., Земляков В.В., Крутиев С.В. Полосно-пропускающие фильтры на индуктивных диафрагмах в гребневых волноводах, реализованных по SIW-технологии // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2015. – № 6. – С. 33-37.
19. Земляков В.В., Заргано Г.Ф., Бородин С.С. Компьютерное моделирование волноводно-целевых антенн, реализованных по SIW-технологии на асимметричных П-волноводах // Антенны. – 2015. – № 1. – С. 50-54.
20. Zemlyakov V.V., Zargano G.F., Sinyavskii G.P. Mode transformation in bends and diameter variations of circular waveguides // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2005. – Vol. 50, No. 2. – P. 164-171.

REFERENCES

1. Zargano G.F., Zemlyakov V.V. Elektrodinamicheskiy analiz i sintez selektivnykh ust-roystv na volnovodakh slozhnogo secheniya dlya sovremennykh antenno-fidernykh sistem [Electrodynamic analysis and synthesis of a selective set of devices on waveguides of complex cross-section for modern, antenna-feeder systems], *Antenny* [Antennas], 2011, Issue 7 (170), pp. 64-73.
2. Zargano G.F., Zemlyakov V.V., Gadzieva A.A., Krutiev S.V. Elektrodinamicheskiy analiz i sintez kompaktnykh fil'trov na L-grebnevykh volnovodakh [Electrodynamic analysis and synthesis of compact filters on L-ridge waveguides], *Izvestiya vuzov. Fizika* [Proceedings of the universities. Physics], 2013, Vol. 56, № 8/3, pp. 48-50.
3. Zemlyakov V.V., Zargano G.F., Krutiev S.V. Kompaktnye selektivnye ustroystva na slozhnykh L-grebnevykh diafragmakh v pryamougol'nom volnovode [Compact selective devices on a complex L-ridge apertures in a rectangular waveguide], *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2014, Vol. 19, No. 9, pp. 37-41.
4. Zargano G.F., Zemlyakov V.V., Peletskiy R.V. Sintez napravlennykh otvetviteley na P-volnovodakh, svyazannykh sistemoy kruglykh otverstiy [Synthesis of directional couplers for the P-waveguides associated system of round holes], *Radiotekhnika i elektronika* [Communications Technology and Electronics], 2011, No. 7, pp. 789-795.
5. Patent 127523 RF: MPK H01P1/16. Modovyy volnovodnyy transformator [Modal waveguide transformer], Zemlyakov V.V., Zargano G.F. publ. 27.04.2013, Byul. No. 12.
6. Gadzieva A.A., Zargano G.F., Zemlyakov V.V., Krutiev S.V. SIW-tekhnologii, istoriya sozdaniya, sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [SIW technology, history, modern state and prospects of development], *Fizicheskie osnovy priborostroeniya* [Physical bases of instrumentation], 2012, Vol. 1, No. 4, pp. 4-13.
7. Zemlyakov V.V. The Band-pass SIW-filter Based on L-ridged Rectangular Waveguide, *Proc. of «Progress in Electromagnetics Research Symposium» (PIERS-2013), Stockholm, Sweden, August 12-15, 2013*, pp. 605-609.
8. Zargano G.F., Lyapin V.P., Mikhalevskiy V.S. i dr. Volnovody slozhnykh secheniy [The waveguides of complex cross-sections]. Moscow: Radio i svyaz', 1986, 124 p.
9. Zargano, G.F., Zemlyakov, V.V., Peletskii, R.V. Synthesis of directional couplers based on ridged waveguides coupled by a system of circular apertures, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2011, Vol. 56, No. 7, pp. 805-811.
10. Patent na poleznuyu model'. RU 146668 U1, H01P1/219 (2006/01). Volnovodnyy polosno-propuskayushchiy fil'tr [Waveguide band-pass filter]. Zemlyakov V.V., Zargano G.F., Krutiev S.V., Gadzieva A.A. publ. 20.10.2014.

11. *Zemlyakov V.V., Zargano G.F., Krutiev S.V.* Waveguide bandpass filter on complex resonance diaphragms, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2015, Vol. 60, No. 12, pp. 1305-1310.
12. *Zemlyakov, V.V., Zargano, G.F.* Bandpass Filters Based on L-ridged Rectangular Waveguides, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2014, Vol. 57, No. 3, pp. 187-197.
13. *Zargano G.F., Zemlyakov V.V., Peletskiy R.V.* Elektrodinamicheskiy analiz napravlennykh otvetviteley na volnovodakh slozhnogo secheniya, svyazannykh sistemoy malyykh otverstiy [Electrodynamics analysis of directional couplers for waveguides of complicated cross-section, connected by system of small holes], *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems], 2010, No. 2, pp. 48-57.
14. *Zargano G.F., Zemlyakov V.V., Peletskiy R.V.* Analiz i sintez napravlennykh otvetviteley na grebnevyykh volnovodakh s pryamougol'nymi otverstiyami svyazi [Analysis and synthesis of directional couplers on ridge waveguides with rectangular holes of links], *Fizika volnovyykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and Radiotechnical systems], 2010, Vol. 13, No. 4, pp. 19-24.
15. *Ando M., Hirokawa J., Yamamoto T., Akiyama A., et al.* Novel single-layer waveguides for high-efficiency millimeter-wave arrays, *IEEE Trans. MTT*, 1998, Vol. 46, No. 6, pp. 792-799.
16. *Zargano G.F., Zemlyakov V.V., Krutiev S.V.* Polosno-propuskayushchie fil'try na ploskopoperechnyykh sdvigakh N-volnovodov, vpolnennyye po SIW-tekhnologii [Band-pass filters on the flat transverse shifts of N-waveguides made according to the SIW technology], *Fizika volnovyykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and Radiotechnical systems], 2013, Vol. 16, No. 2, pp. 87-93.
17. *Zemlyakov V.V., Zargano G.F., Gadzieva A.A., Krutiev S.V.* Komp'yuternoe modelirovaniye polosno-propuskayushchikh fil'trov na volnovodakh slozhnogo secheniya, realizovannykh po SIW-tekhnologii [Computer modeling of bandpass filters in waveguides of complex cross-section, implemented by SIW technology], *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems], 2013, No. 9, pp. 36-41.
18. *Zargano G.F., Zemlyakov V.V., Krutiev S.V.* Polosno-propuskayushchie fil'try na induktivnykh diafragmakh v grebnevyykh volnovodakh, realizovannykh po SIW-tekhnologii [Band-pass filters at scale alternative diaphragms in ridge waveguides realized in SIW technology], *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems], 2015, No. 6, pp. 33-37.
19. *Zemlyakov V.V., Zargano G.F., Borodenko S.S.* Komp'yuternoe modelirovaniye volnovodno-shchelevyykh antenn, realizovannykh po SIW-tekhnologii na assimetrichnykh P-volnovodakh [Computer modeling of waveguide-slot antenna implemented in SIW technology on asymmetric P-waveguides], *Antenny* [Antennas], 2015, No. 1, pp. 50-54.
20. *Zemlyakov V.V., Zargano G.F., Sinyavskii G.P.* Mode transformation in bends and diameter variations of circular waveguides, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2005, Vol. 50, No. 2, pp. 164-171.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.А. Безуглов.

Земляков Вячеслав Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: vvezemlyakov@sfned.ru; 344058, г. Ростов-на-Дону, ул. 2-я Краснодарская, 131, кв. 55; тел.: +79034705743, +78632711040; и.о. декана физического факультета ФГАОУ ВО; д.ф.-м.н.; доцент.

Заргано Геннадий Филиппович – e-mail: zargano@yandex.ru; 344004, г. Ростов-на-Дону, Рабочая площадь, 26, кв. 29; тел.: +79034705848, +78632449088; член-корреспондент РАЕН; д.ф.-м.н.; профессор; зав. кафедрой радиофизики.

Zemlyakov Viacheslav Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: vvezemlyakov@sfned.ru; 131, 2-nd Krasnodarskaya street, ap. 55, Rostov-on-Don, 344058, Russia; phone: +79034705743, +78632711040; acting dean faculty of physics; dr. of phys.-math. sc.

Zargano Gennady Philippovich – e-mail: zargano@yandex.ru; 26, Working area, ap. 29, Rostov-on-Don, 344004, Russia; phone: +79034705848, +78632449088; dr. of phys.-math. sc.; professor; head. the department of physics.