

С.А. Ходенков¹, Б.А. Беляев^{1,2}, Д.В. Борисенков^{1,2}

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск

²Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск
e-mail: belyaev@iph.krasn.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФИЛЬТРОВ
НА МНОГОМОДОВОМ РЕЗОНАТОРЕ С ПРОВОДНИКОМ
В ФОРМЕ КОЛЬЦА**

S. A. Khodenkov¹, B.A.Belyaev^{1,2}, D.V. Borisenkov^{1,2}

¹Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk

²Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of RAS, Krasnoyarsk

**INVESTIGATION OF MICROSTRIP FILTERS BASED ON THE MULTIMODE
RESONATOR HAVING STRIP CONDUCTOR IN THE SHAPE OF A RING**

Microstrip band-pass filters based on the multimode resonator, having conductors in the shape of a rectangular ring are investigated. Such devices because of the high steepness of slopes of a passband and an extended high-frequency stopband can have high frequency selective properties.

Разработчиков частотно-селективных устройств сверхвысоких частот (СВЧ), в том числе и полосно-пропускающих фильтров, в последнее время привлекают многомодовые микрополосковые резонаторы и полосковые резонаторы на подвешенной подложке [1-4]. Прежде всего, это связано с возможностью существенного уменьшения габаритов устройств за счет снижения количества резонаторов в них, причем без ухудшения их частотно-селективных свойств. Так, использование многомодовых микрополосковых резонаторов в конструкциях фильтров позволяет формировать их полосы пропускания, используя резонансы сразу нескольких мод колебаний от каждого резонатора, частоты которых удается сблизить. В результате, при неизменном порядке фильтра, которым и определяются его частотно-селективные свойства, количество резонаторов в нем уменьшается во столько раз, сколько мод колебаний от каждого резонатора участвуют в формировании полосы пропускания.

При проектировании СВЧ-фильтров на резонаторе с регулярным полосковым проводником в форме кольца его полосу пропускания формируют всего два резонанса. Поэтому поиск решений, направленных на увеличение числа рабочих мод колебаний, участвующих в формировании полосы пропускания и отвечающих за повышение частотно-селективных свойств конструкций на таком резонаторе - важная и актуальная задача.

Теоретические исследования полосно-пропускающих фильтров с рисунком полосковых проводников, обладающим осевой симметрией, были проведены с помощью электродинамического численного анализа 3D моделей. В расчетах использовались диэлектрические подложки из традиционного СВЧ-материала – керамики ТБНС с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$ и толщиной $h = 1$ мм.

На рис. 1 приведены топологии проводников микрополосковых фильтров четвертого порядка. Регулярные отрезки 1-5 полосковых проводников на верхней стороне диэлектрической подложки показаны более темным цветом. В обеих конструкциях использовался центральный многомодовый резонатор с проводником в форме прямоугольного кольца (рамки). Его многомодовый режим работы (сближение частот первых четырех мод колебаний) обеспечивается скачками ширины полосковых проводников 3-5.

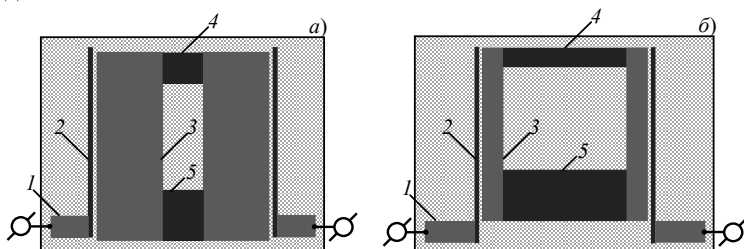


Рис. 1. Топологии проводников фильтров на многомодовом резонаторе, с длинной стороной рамки вдоль проводников связи (а) и перпендикулярно проводникам связи (б)

При этом для моды, отвечающей за самый низкочастотный резонанс, широкие проводники на противоположных краях рамки (см. рис. 2) являются емкостными участками, а узкие – индуктивными. Для моды, отвечающей за самый высокочастотный резонанс – наоборот. Еще два резонанса являются резонансами бегущей волны, они образуются на тех частотах, когда суммарная электрическая длина (набег фазы) на всей длине полосковых проводников кольца равна 360° . В этом случае две электромагнитные волны циркулируют по замкнутой траектории либо по часовой стрелке, либо против.

Существенному увеличению подавления мощности на частотах полос заграждения способствуют смежное расположение портов СВЧ-тракта и их подключение к отрезкам 1 входного и выходного проводников. Это позволяет организовать необходимую частотную дисперсию емкостной и индуктивной связей нерегулярных проводников связи 1-2 с центральным многомодовым резонатором 3-5. Проводники

связи на частотах полосы пропускания являются нерезонансными, однако их резонансы на высоких частотах позволяют улучшить характеристики высокочастотной полосы заграждения.

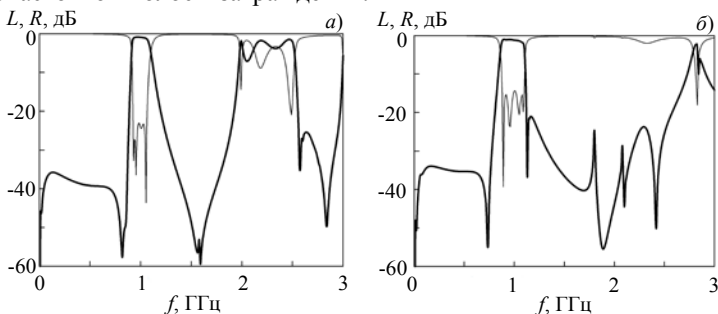


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтров на многомодовом резонаторе, с длинной стороной рамки вдоль проводников связи (а) и перпендикулярно проводникам связи (б)

Настроить полосно-пропускающий фильтр четвертого порядка удастся при прямоугольной форме рамки, причем с длинной стороной либо вдоль проводников связи (см. рис. 1,а), либо перпендикулярно им (см. рис. 1,б). При этом АЧХ фильтров (см. рис. 2) различаются. Сравнивая фильтры, настроенные на центральную частоту полосы пропускания $f_0=1$ ГГц, у которых проводники связи имеют одинаковые зазоры с многомодовыми резонаторами $S=0,1$ мм, видно, что относительная ширина полосы пропускания первого – $\Delta f/f_0 \approx 19\%$ (см. рис. 2,а), а второго – $\Delta f/f_0 \approx 25\%$ (см. рис. 2,б). При этом высокочастотная полоса заграждения второго фильтра значительно шире, за счет того, что размеры крайних проводников, являющихся четвертьволновыми резонаторами, можно подобрать так, чтобы их нижайшие резонансы попали на частоты второй – паразитной полосы пропускания и значительно подавляли ее. Также существенно улучшают частотно-селективные свойства второй конструкции два полюса затухания, расположенные рядом с правым и левым склонами полосы пропускания, что приводит к существенному росту крутизны обоих склонов, в то время как у первой конструкции только низкочастотный склон имеет высокую крутизну.

Для проверки точности электродинамического численного анализа 3D моделей на подложке из традиционного материала СВЧ-техники (ФЛАН-2.8) толщиной $h=2$ мм с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=2,8$ был синтезирован (рис. 3,а) и экспериментально изготовлен опытный макет полосно-пропускающего фильтра (рис. 3,б). При этом для

сближения частот рабочих мод колебаний рамку необходимо значительно растянуть.

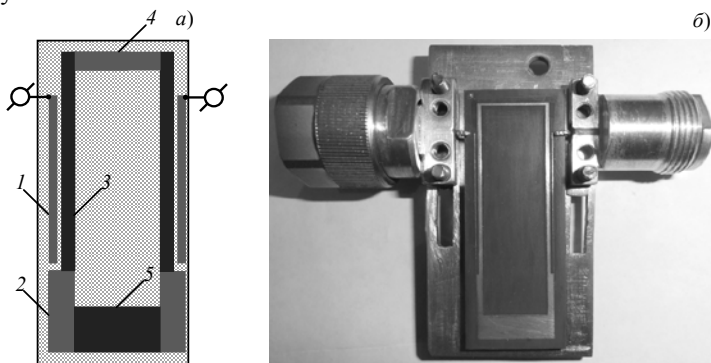


Рис. 3. Топология проводников (а) и фотография (б) экспериментального образца фильтра

Амплитудно-частотные характеристики, снятые на экспериментальном образце фильтра в широкой и узкой полосе частот, показаны на рис. 4.

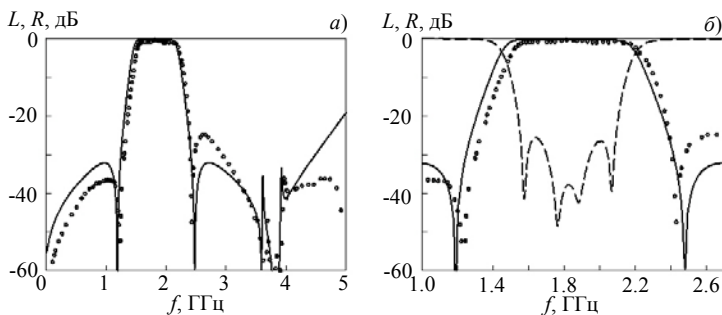


Рис. 4. АЧХ (а) и фрагмент АЧХ (б) экспериментального фильтра. Линии – расчет, точки - эксперимент

Фильтр имеет относительную ширину полосы пропускания $\Delta f/f_0 \approx 36\%$, измеренную также по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь, которые составляли величину $L_{min} \approx 0,3$ дБ на центральной частоте полосы пропускания $f_0 \approx 1,88$ ГГц. Важно заметить, что измеренная АЧХ повторяет все особенности синтезированного фильтра.

Конструктивные размеры отрезков проводников всех исследованных полосно-пропускающих фильтров приведены в табл. 1.

Таблица 1

Позиция на рис. 1, 3	Площадь отрезка проводника фильтра (рис. 1,а), мм ²	Площадь отрезка проводника фильтра (рис. 1,б), мм ²	Площадь отрезка проводника экспериментального фильтра (рис. 3,а), мм ²
1	1,90×3,35	1,70×4,15	0,20×27,50
2	0,35×16,30	0,15×15,10	1,50×12,00
3	5,55×16,30	1,60×13,30	0,80×33,70
4	2,70×3,35	1,50×9,35	0,40×12,80
5	3,35×4,60	3,80×9,35	4,60×12,80

Зазоры между проводниками 1 и 3 экспериментального образца фильтра – 0,50 мм, между 1 и 2 – 0,20 мм.

Таким образом, теоретически и экспериментально показаны возможности реализации микрополосковых полосно-пропускающих фильтров на многомодовом резонаторе с нерегулярным проводником в форме прямоугольного кольца. При этом высокие частотно-селективные свойства устройств обусловлены сильной крутизной склонов полосы пропускания и протяженной высокочастотной полосой заграждения.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук, МК-5942.2014.8.

Библиографический список

1. Highly selective suspended stripline dual-mode filter / B.A. Belyaev, A.A. Leksikov, A.M. Serzhantov, V.V. Tyurnev // Progress in Electromagnetics Research Letters. 2011. Vol. 25. P. 57–66.
2. Бальва Я.Ф. Исследование микрополосковых многомодовых резонаторов и конструирование полосно-пропускающих фильтров на их основе / Я.Ф. Бальва, Б.А. Беляев, С.А. Ходенков // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 8/3. С. 153-156.
3. Александровский А.А. Синтез и селективные свойства микрополосковых фильтров на шпильковых резонаторах со шлейфными элементами / А.А. Александровский, Б.А. Беляев, А.А. Лексиков // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. №4. С. 398-405.
4. Тюрнев В. В. Резонансные свойства двухпроводникового полоскового резонатора на подвешенной подложке / В. В. Тюрнев, И. А. Довбыш // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Украина, Севастополь, 2005. Т. 2. С. 487-489.