

УДК 621.3.029.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

© 2015 г. Б. А. Беляев, С. А. Ходенков, Р. Г. Галеев,  
академик РАН В. Ф. Шабанов

Поступило 22.09.2014 г.

DOI: 10.7868/S0869565215070105

При создании новых конструкций частотно-селективных сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств, в частности фильтров, разработчики традиционно стараются увеличить их избирательность, повысить технологичность изготовления, уменьшить габариты, а также снизить себестоимость. Всем этим требованиям отвечают различные микрополосковые конструкции, поэтому они находят достаточно широкое применение в СВЧ технике [1, 2]. Однако особо следует выделить конструкции полосно-пропускающих фильтров на двухмодовых резонаторах. В формировании полосы пропускания таких устройств в отличие от обычных микрополосковых фильтров задействованы резонансы не одной, а двух мод колебаний от каждого резонатора. В результате вдвое увеличивается порядок фильтра, которым, как известно, определяется его избирательность. Важно отметить, что благодаря малому числу звеньев в таких фильтрах не только существенно уменьшаются габариты по сравнению с традиционными конструкциями, но и одновременно снижаются потери в полосе пропускания. Перечисленными выше достоинствами обладают также фильтры и на трехмодовых резонаторах [3].

Полосковые проводники двухмодовых резонаторов в микрополосковом фильтре обычно имеют форму квадрата, квадратной или прямоугольной рамки, иногда их выполняют в виде замкнутой меандровой линии, также обладающей осью симметрии четвертого порядка [1, 4]. Собственные частоты первых двух мод колебаний у таких резонаторов вырождены, а пространственные распределения амплитуд высокочастотных полей орто-

гональны. При этом в полосно-пропускающем фильтре необходимая величина связи между резонансами двух мод колебаний обеспечивается либо травлением одного из уголков проводника, имеющего форму квадрата или квадратной рамки, либо добавлением отрезка щелевой линии или полоскового элемента связи, которые, как правило, располагаются под углом  $45^\circ$  к осям резонатора.

Более миниатюрными являются двухмодовые резонаторы, у которых регулярный полосковый проводник частично расщеплен с одного конца узкой щелью [5]. В этом случае величина связи двух первых мод колебаний резонатора мала, и она осуществляется небольшим различием длины проводников на его расщепленном участке. Это обстоятельство не позволяет создавать “широкополосные” фильтры на таких резонаторах, однако фильтры с “узкой” полосой пропускания на них обладают достаточно высокими частотно-селективными свойствами даже в конструкциях, состоящих всего из двух или из трех резонаторов [6, 7]. Оригинальная конструкция широкополосного микрополоскового фильтра на асимметричных двухмодовых резонаторах описана в патенте [8], систематические исследования которой показали возможность реализации устройств с относительной шириной полосы пропускания свыше 50%, но только на подложках с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon \geq 10$  [9].

В настоящей работе исследованы микрополосковые конструкции фильтров на новых многомодовых резонаторах, имеющих определенную форму полосковых проводников. Впервые показана возможность сближения собственных частот от двух до шести нижайших мод колебаний. При этом фильтры на таких многомодовых резонаторах реализуются не только на подложках с высокой диэлектрической проницаемостью, но и с низкой. Рассмотрены микрополосковые структуры, состоящие из одного многомодового резонатора, имеющего электромагнитную связь с одномодовыми полуволновыми или четвертьволновыми резонатора-

*Институт физики им. Л.В. Киренского  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Красноярск  
E-mail: belyaev@iph.krasn.ru  
Сибирский государственный аэрокосмический  
университет им. М.Ф. Решетнева, Красноярск  
Сибирский федеральный университет, Красноярск  
ОАО НПП “Радиосвязь”, Красноярск*

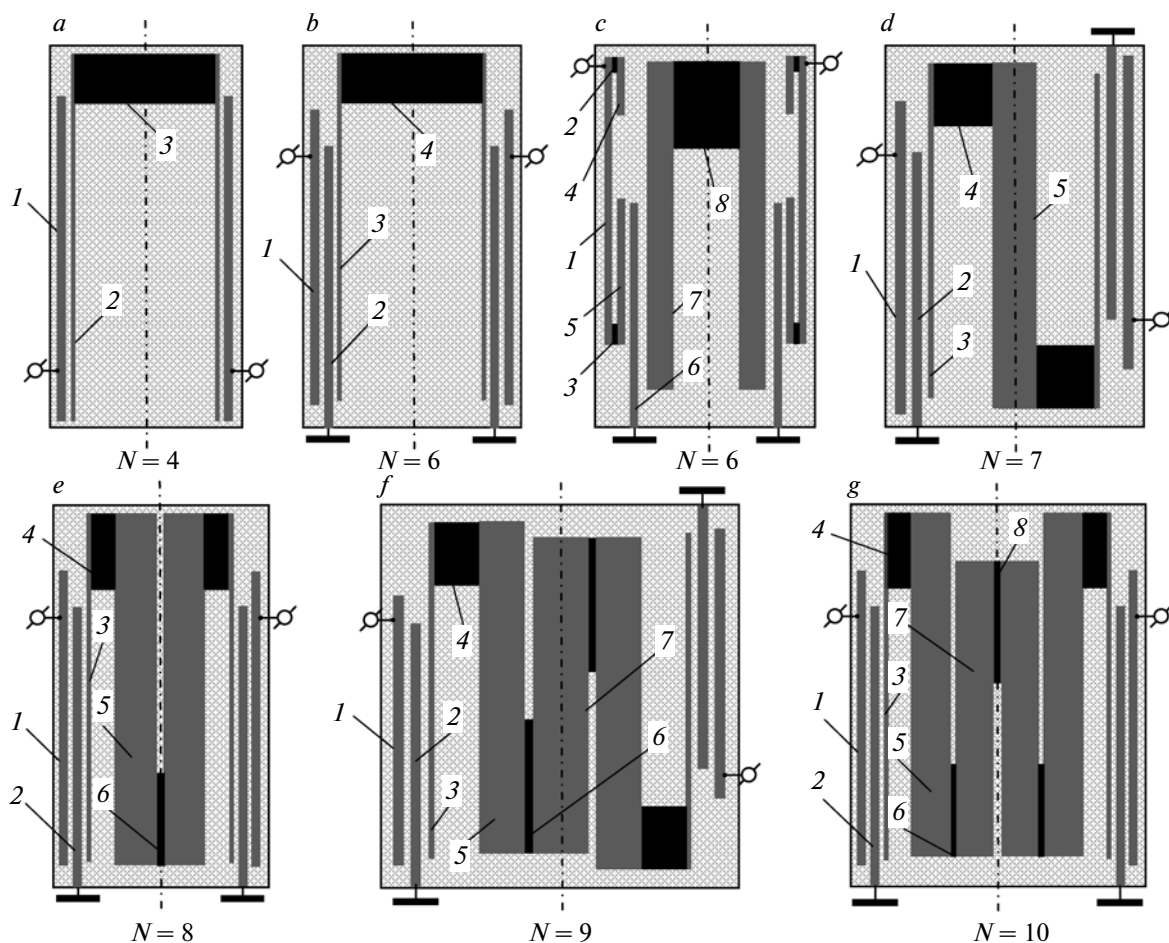


Рис. 1. Топологии проводников исследуемых фильтров четвертого–десятого порядков. Регулярные участки проводников обозначены цифрами и показаны либо черным, либо серым цветом.

ми [10], к которым подключаются порты устройства. Такие конструкции благодаря полюсам затухания, существующим вблизи полосы пропускания, отличаются увеличенной крутизной склонов амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), широкими полосами заграждения и высоким уровнем подавления СВЧ мощности в них.

#### АНАЛИЗ МИКРОПОЛОСКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

Для определенности и объективного сравнения частотно-селективных свойств исследуемые конструкции микрополосковых фильтров (рис. 1) настраивались на одинаковую центральную частоту полосы пропускания  $f_0 = 1.4$  ГГц и одинаковую относительную ширину полосы пропускания  $\frac{\Delta f}{f_0} = 80\%$ , измеренную по уровню  $-3$  дБ от уровня минимальных потерь. При этом в качестве

подложек фильтров использовались пластины толщиной  $h = 2$  мм из широко используемого в СВЧ технике материала ФЛАН, имеющего диэлектрическую проницаемость  $\epsilon = 2.8$ . Параметрический синтез фильтров проводили с помощью численного электродинамического анализа 3D-моделей, в которых входной и выходной порты с волновым сопротивлением 50 Ом кондуктивно подключены к полосковым проводникам крайних резонаторов. При этом подбирали геометрические размеры топологии проводников, включая длину и ширину регулярных участков, а также величину зазоров между этими регулярными участками.

Первая из рассматриваемых конструкций (рис. 1, а) состоит из трех резонаторов, два из которых одномодовые четвертьволновые, расположенные на входе и выходе фильтра, электромагнитно связанные с двухмодовым резонатором, имеющим нерегулярный полосковый проводник в виде шпильки, состоящий из двух регулярных участков 2 и 3. Важно отметить, что волновое сопротивление микрополосковых линий, образу-

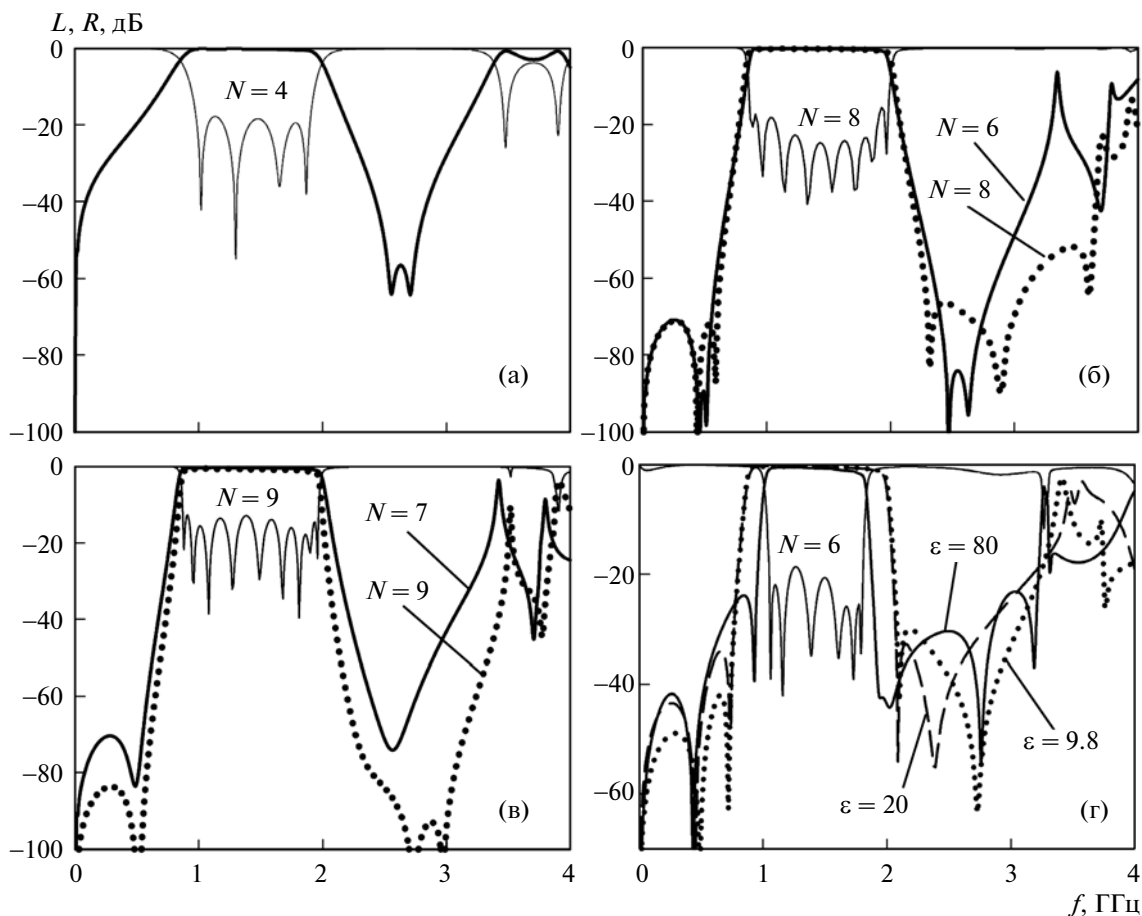


Рис. 2. АЧХ широкополосных полосно-пропускающих фильтров четвертого–девятого порядков.

щих одномодовые резонаторы исследуемой конструкции, значительно больше волнового сопротивления портов, поэтому эти резонаторы являются четвертьволновыми [4]. Заметим также, что одномодовые шпильковые резонаторы достаточно хорошо исследованы [11, 12], но их взаимодействие сравнительно мало, поэтому на них невозможно создавать широкополосные фильтры. В рассматриваемом трехрезонаторном фильтре благодаря уширению центрального участка проводника в шпильковом резонаторе, показанного на рис. 1,а черным цветом (3), удается сблизить резонансные частоты его первых двух мод колебаний. Поэтому порядок фильтра становится  $N = 4$ , что хорошо видно на его частотной зависимости потерь на отражение  $R(f)$  на рис. 2а, представленной тонкой линией, а жирной линией показана частотная зависимость прямых потерь  $L(f)$ .

Вторая конструкция фильтра (рис. 1,б) отличается от первой тем, что она имеет по два четвертьволновых резонатора на входе и выходе, при этом один конец полоскового проводника каждого из добавленных резонаторов соединен с экраном. Третья конструкция (рис. 1,с) аналогично второй, но в ней использована подложка с высокой ди-

электрической проницаемостью из керамики ТБНС ( $\epsilon = 80$ ). На такой подложке волновое сопротивление микрополосковых линий, образующих крайние одномодовые резонаторы, меньше волнового сопротивления портов, а значит, входной и выходной резонаторы становятся полуволновыми, т.е. длина их полосковых проводников увеличивается вдвое. Для уменьшения размеров фильтров полосковые проводники этих крайних резонаторов свернуты в виде буквы С. Отметим, что этот фильтр настраивался на относительную ширину полосы пропускания  $\frac{\Delta f}{f_0} = 60\%$ . Очевидно, что эти конструкции фильтров имеют одинаковый порядок  $N = 6$ , а их АЧХ приведены на рис. 2б и на рис. 2г.

Остальные конструкции фильтров отличаются от описанных выше тем, что у них двухмодовый шпильковый резонатор заменяется трехмодовым (рис. 1,д), четырех- (рис. 1,е), пяти- (рис. 1,ф) и шестимодовым (рис. 1,г) резонатором, что приводит, соответственно, к увеличению порядка фильтра с  $N = 7$  до  $N = 10$ . Полосковые проводники всех многомодовых резонаторов имеют форму не-

**Таблица 1.** Размеры топологии проводников фильтров четвертого–девятого порядков на подложках с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2.8$ 

Конструкция фильтра	Номер проводника	Размеры проводника, мм	Смещение от края подложки, мм	Зазоры между проводниками, мм
Рис. 1, <i>a</i>	1	41.60 × 0.75	2.00	1 и 2 – 0.21
	2	46.90 × 0.65	2.00	
	3	13.10 × 6.20	40.70	
Рис. 1, <i>b</i>	1	39.40 × 0.60	3.50	1 и 2 – 0.25, 2 и 3 – 0.35
	2	36.40 × 0.70	0 (заземлен)	
	3	45.50 × 0.75	3.80	
	4	19.40 × 5.70	43.60	
Рис. 1, <i>d</i>	1	43.00 × 0.85	2.60	1 и 2 – 0.15, 2 и 3 – 0.35
	2	36.70 × 0.80	0 (заземлен)	
	3	47.50 × 0.50	2.80	
	4	9.80 × 6.50	40.50	
	5	47.90 × 5.70	2.40	
Рис. 1, <i>e</i>	1	42.70 × 0.95	2.20	1 и 2 – 0.15, 2 и 3 – 0.35
	2	37.20 × 0.70	0 (заземлен)	
	3	48.20 × 0.40	3.10	
	4	10.6 × 3.45	40.70	
	5	48.10 × 5.90	3.20	
	6	12.60 × 0.20	3.20	
Рис. 1, <i>f</i>	1	37.20 × 0.60	4.40	1 и 2 – 0.25, 2 и 3 – 0.40
	2	37.00 × 0.55	0 (заземлен)	
	3	46.30 × 0.15	6.80	
	4	9.30 × 7.05	43.80	
	5	46.50 × 6.70	6.60	
	6	15.70 × 0.10	6.60	
	7	44.10 × 8.15	6.60	

регулярного меандра. Амплитудно-частотные характеристики конструкций фильтров от четвертого до девятого порядка показаны на рис. 2, а размеры всех регулярных участков топологии проводников фильтров, синтезированных на подложках с  $\varepsilon = 2.8$ , представлены в табл. 1. В табл. 2 представлены размеры регулярных участков топологии проводников фильтров только шестого порядка, выполненных на подложках с различными диэлектрическими проницаемостями.

Как и следовало ожидать, с увеличением порядка фильтра растет прямоугольность его АЧХ, однако благодаря присутствию полюсов затухания наблюдается дополнительное увеличение крутизны склонов АЧХ и величины подавления СВЧ мощности в полосах заграждения. Заметим, что на частотах полюсов затухания электромаг-

нитные волны испытывают сильное отражение от входа фильтра за счет взаимной компенсации индуктивного и емкостного взаимодействия резонаторов [13]. Увеличение диэлектрической проницаемости подложки фильтра приводит к соответствующему уменьшению размеров устройства (см. табл. 2). Важно также отметить, что рассмотренные конструкции фильтров имеют не только высокую крутизну склонов, но и почти симметричную форму АЧХ.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

Для проверки работоспособности созданных конструкций широкополосных полосно-пропускающих фильтров и оценки точности электроди-

**Таблица 2.** Размеры топологии проводников фильтров шестого порядка на подложках с различными диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon$ 

Конструкция фильтра ( $\epsilon$ подложки)	Номер проводника	Размеры проводника, мм	Смещение от края подложки, мм	Зазоры между проводниками, мм
Рис. 1, <i>b</i> (9.8)	1	23.80 × 0.20	6.60	1 и 2 – 0.10, 2 и 3 – 0.25
	2	19.10 × 0.25	0 (заземлен)	
	3	29.00 × 0.80	0.30	
	4	7.40 × 5.70	23.60	
Рис. 1, <i>b</i> (20)	1	20.60 × 0.15	0.40	1 и 2 – 0.10, 2 и 3 – 0.15
	2	13.80 × 0.20	0 (заземлен)	
	3	21.20 × 1.15	2.50	
	4	5.10 × 4.30	18.60	
Рис. 1, <i>c</i> (80)	1	9.50 × 0.15	2.70	5 и 6 – 0.10, 6 и 7 – 0.40
	2	0.50 × 0.10	11.70	
	3	0.70 × 0.10	2.70	
	4	1.90 × 0.20	10.30	
	5	4.70 × 0.15	2.70	
	6	7.30 × 0.15	0 (заземлен)	
	7	10.80 × 0.80	1.20	
	8	2.90 × 2.2	9.10	

**Таблица 3.** Размеры топологии проводников фильтров восьмого и десятого порядков, изготовленных на подложках с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2.8$  толщиной 2 мм

Конструкция фильтра	Номер проводника	Размеры проводника, мм	Смещение от края подложки, мм	Зазоры между проводниками, мм
Рис. 1, <i>e</i>	1	42.69 × 1.01	2.21	1 и 2 – 0.20, 2 и 3 – 0.39
	2	37.20 × 0.71	0 (заземлен)	
	3	48.20 × 0.32	3.94	
	4	10.58 × 7.92	41.56	
	5	48.09 × 6.72	4.05	
	6	12.67 × 0.20	4.05	
Рис. 1, <i>g</i>	1	41.24 × 0.69	2.05	1 и 2 – 0.17, 2 и 3 – 0.28
	2	36.71 × 0.46	0 (заземлен)	
	3	47.04 × 0.34	2.05	
	4	9.69 × 3.52	39.40	
	5	46.73 × 5.68	2.36	
	6	13.95 × 0.20	2.36	
	7	39.60 × 5.80	2.36	
	8	14.74 × 0.25	27.22	

намического расчета их характеристик были изготовлены экспериментальные образцы устройств восьмого и десятого порядков (см. рис. 1, *e*, 1, *g*). При этом в качестве материала подложек исполь-

зовался ФЛАН толщиной 2 мм с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2.8$ . Предварительно топологии проводников фильтров были получены параметрическим синтезом с использованием

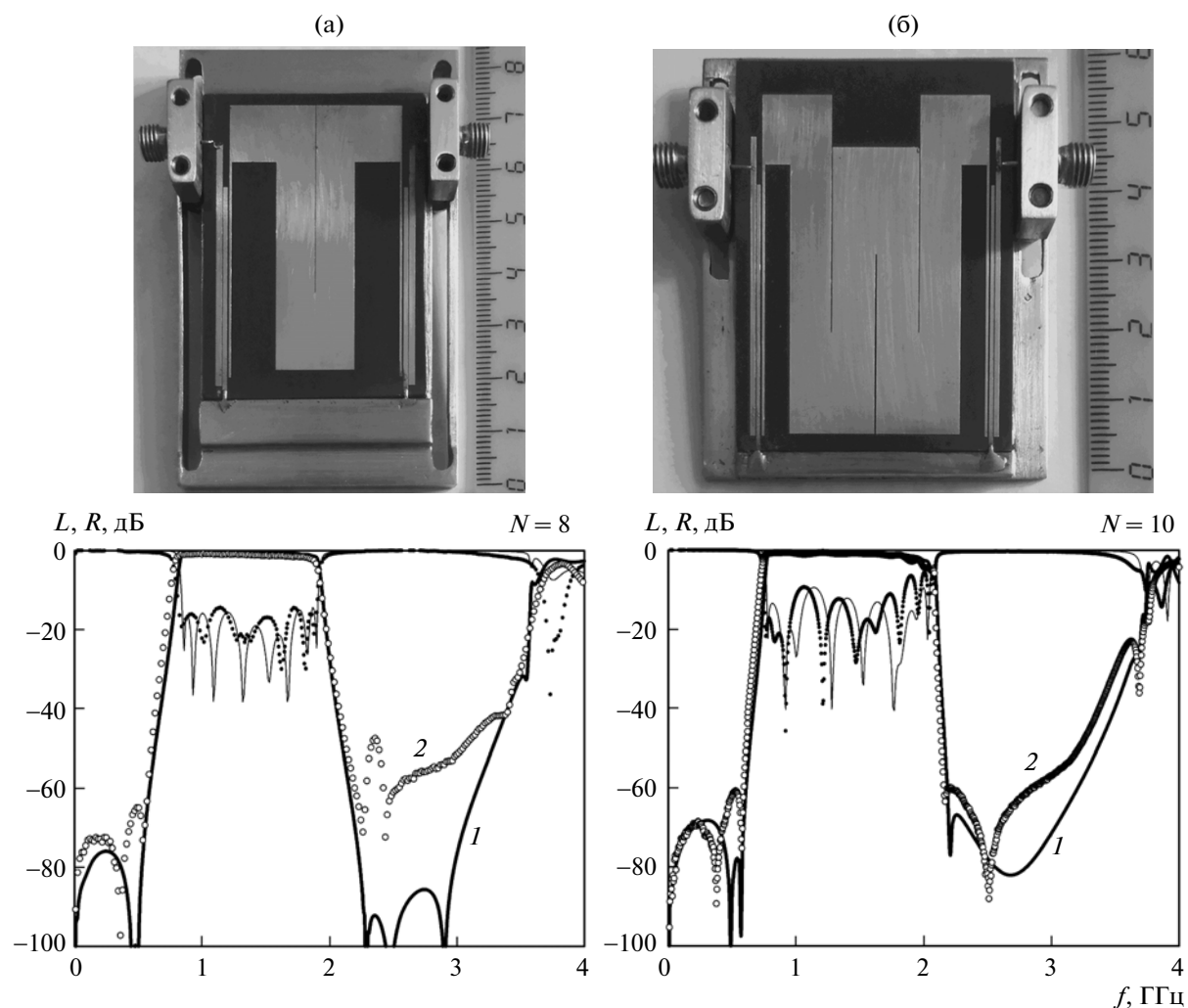


Рис. 3. АЧХ фильтров восьмого (а) и десятого (б) порядков. Линии (1) – расчет, точки (2) – измерения. Вверху фотографии изготовленных образцов.

3D-моделей. Фильтр восьмого порядка настраивался на относительную ширину полосы пропускания  $\frac{\Delta f}{f_0} = 80\%$ , а фильтр десятого порядка – на

максимальную ширину полосы пропускания  $\frac{\Delta f}{f_0} = 95\%$ , которая определялась точностью изготовления минимальных зазоров между полосковыми проводниками. Фотографии изготовленных конструкций и их АЧХ приведены на рис. 3. Линиями представлены результаты расчета, точками – результаты измерений. Важно отметить, что для объективного сравнения результатов эксперимента и расчета в 3D-модель подставляли реальные размеры топологии проводников, снятые на измерительном микроскопе с уже изготовленных фильтров, которые приведены в табл. 3.

Из рис. 3 видно, что исследованные конструкции показывают достаточно хорошее согласие

рассчитанных АЧХ фильтров с измеренными. Фильтры имеют не только широкую относительную полосу пропускания, но и обладают высокими частотно-селективными свойствами и сравнительно малыми потерями СВЧ мощности в полосе пропускания: у фильтра восьмого порядка  $\sim 0.8$  дБ, а у фильтра десятого порядка  $\sim 0.7$  дБ.

Таким образом, предложены и исследованы новые микрополосковые конструкции широкополосных полосно-пропускающих фильтров четвертого–десятого порядков. В каждом из исследованных фильтров используется один многомодовый резонатор, полосковый проводник которого имеет форму нерегулярного меандра, электромагнитно связанный с одномодовыми четвертьволновыми резонаторами на входе и выходе устройства. Впервые показана возможность совмещения в многомодовом резонаторе собственных частот до шести нижайших мод колебаний, которые участвуют в формировании полосы пропускания. Измерения

характеристик опытных образцов фильтров восьмого и десятого порядков продемонстрировали хорошее совпадение с результатами численного электродинамического анализа устройств с использованием 3D-моделей. Исследованные конструкции благодаря полюсам затухания, существующим вблизи полосы пропускания, отличаются не только увеличенной крутизной склонов АЧХ, но и достаточно широкими полосами заграждения с высоким уровнем подавления СВЧ мощности в них.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант МК-5942.2014.8 и соглашение № 14.607.21.0039.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hong J.-S., Lancaster M.J.* Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. N.Y.; Chichester; Weinheim; Brisbane; Singapore; Toronto: Wiley, 2001.
2. *Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф.* // ДАН. 2005. Т. 400. № 2. С. 181–185.
3. *Александровский А.А., Беляев Б.А., Лексиков А.А.* // РЭ. 2003. Т. 48. № 4. С. 398–405.
4. *Бальва Я.Ф., Беляев Б.А., Ходенков С.А.* // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 8/3. С. 153–156.
5. *Belyaev B.A., Serzhanov A.M., Tyurnev V.V.* // Microwave and Opt. Technol. Lett. 2013. V. 55. № 9. P. 2186–2190.
6. *Беляев Б.А., Сержантов М.А., Тюрнев В.В.* // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 9/2. С. 5–11.
7. *Ходенков С.А., Мочалов В.В., Беляев Б.А.* // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 8/3. С. 80–84.
8. *Беляев Б.А., Рачко Л.Т., Сержантов А.М.* Микрополосковый широкополосный полосно-пропускающий фильтр. Патент RU 2182738 // Бюл. Изобр. 2002. № 14.
9. *Беляев Б.А., Довбыш И.А., Лексиков А.А., Тюрнев В.В.* // РЭ. 2010. Т. 55. № 6. С. 664–669.
10. *Беляев Б.А., Ходенков С.А.* Микрополосковый полосно-пропускающий фильтр. Пат. RU 2475900 // Бюл. изобр. 2013. № 20.
11. *Беляев Б.А., Говорун И.В., Лексиков А.А., Сержантов А.М.* // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 10. С. 100–105.
12. *Беляев Б.А., Сержантов А.М.* // РЭ. 2004. Т. 49. № 1. С. 24–31.
13. *Беляев Б.А., Лалетин Н.В., Лексиков А.А., Сержантов А.М.* // РЭ. 2003. Т. 48. № 1. С. 39–46.