

11;13

## Миниатюрный полосно-пропускающий СВЧ-фильтр с подавлением уровня помех более 100 дВ в широкой полосе заграждения

© Б.А. Беляев, А.М. Сержантов, В.В. Тюрнев, А.А. Лексиков,  
Я.Ф. Бальва

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск  
Сибирский федеральный университет, Красноярск  
Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск  
E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 20 марта 2013 г.

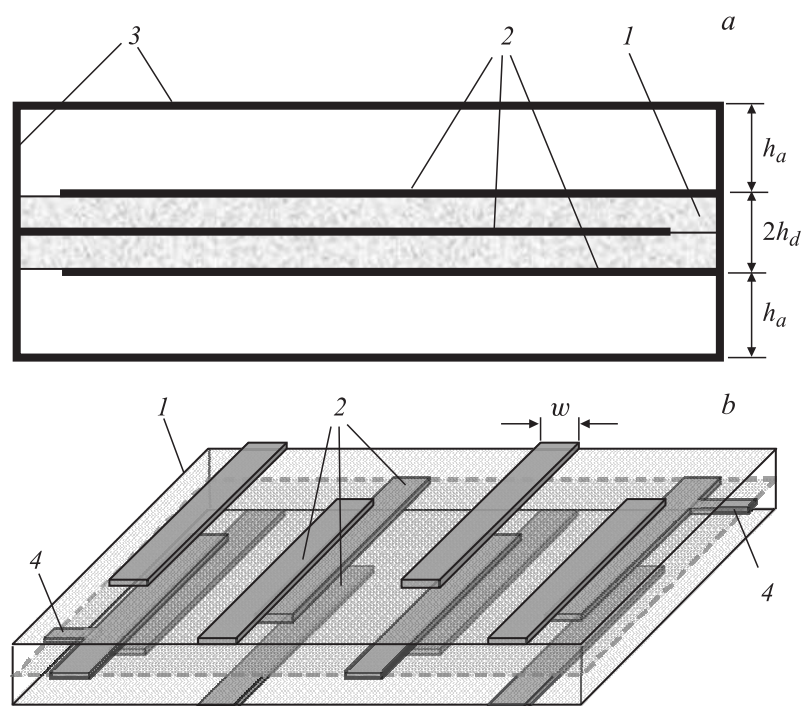
Предложена новая планарная конструкция резонатора, в которой одиночный проводник заменен тремя параллельными полосковыми проводниками, расположенными друг над другом на подвешенной двухслойной подложке. Показана возможность значительного уменьшения продольных размеров резонатора при одновременном увеличении его собственной добротности и повышении частот высших мод колебаний. Разработан и изготовлен полосно-пропускающий фильтр четвертого порядка с центральной частотой полосы пропускания 1 GHz при ее относительной ширине 5%, у которого полоса заграждения по уровню  $-100$  dB простирается до частоты более чем 10 GHz. Металлический корпус фильтра имеет внутренний размер  $38 \times 12 \times 7.5$  mm. Показано, что аналогичный фильтр, изготовленный по технологии LTCC, имеет полосу заграждения по уровню  $-40$  dB до 30 GHz, при этом его габариты уменьшаются до  $5.0 \times 4.25 \times 1.24$  mm.

Известно, что традиционные полосно-пропускающие фильтры (ППФ) СВЧ-диапазона имеют паразитные „окна прозрачности“ на резонансных частотах высших мод колебаний, поэтому у них сравнительно узкая высокочастотная полоса заграждения. Однако для современных систем связи и различной специальной радиоаппаратуры требуются миниатюрные ППФ, как правило, в планарном исполнении, обладающие не только широкой полосой заграждения (ПЗ), но и высоким уровнем

подавления в ней. Известно также, что простое наращивание числа звеньев в широко распространенных микрополосковых фильтрах с целью увеличения подавления помех в полосах заграждения приводит к неприемлемо большим потерям мощности полезного сигнала из-за сравнительно низкой собственной добротности резонаторов. Повысить добротность планарных резонаторов позволяет изготовление их проводников из высокотемпературных сверхпроводящих пленок [1], но высокая стоимость и необходимость поддержания криогенных температур ограничивает широкое применение таких устройств.

В несколько раз увеличить ширину полосы заграждения в ППФ удастся при использовании нерегулярных микрополосковых резонаторов [2–4], но эти нерегулярности, как правило, уменьшают собственную добротность резонаторов и соответственно увеличивают потери мощности в полосе пропускания. Подавить одну из паразитных полос удастся при кондуктивном подключении портов фильтра к проводникам крайних резонаторов в точках, где располагаются узлы высокочастотного напряжения соответствующих мод колебаний [5–7]. Подавление сразу нескольких ПЗ можно осуществить за счет использования резонаторов с несовпадающими резонансными частотами высших мод [8], но при этом достичь глубокого затухания СВЧ-мощности в полосе заграждения фильтра принципиально невозможно. Существенно увеличить ширину ПЗ удастся подбором длины области связи смежных резонаторов фильтра [9–10], добиваясь компенсации их индуктивного и емкостного взаимодействия на резонансных частотах высших мод колебаний, как это было показано ранее в [11]. Однако и такой подход не позволяет достичь достаточно высоких характеристик полосы заграждения фильтра, требуемых в настоящее время. Заметим, что во всех описанных выше фильтрах высокочастотный край ПЗ располагается не выше  $8f_0$  ( $f_0$  — центральная частота полосы пропускания фильтра), а уровень затухания в ней не превышает 40 дВ.

Улучшить характеристики полосы заграждения удастся построением планарных фильтров на подвешенной подложке с двухсторонним рисунком полосковых проводников [12]. Однако рекордно высокими характеристиками ПЗ отличаются фильтры на миниатюризованных коаксиальных резонаторах [13]. Например, в фильтре четвертого порядка на таких резонаторах полоса заграждения по уровню  $-90$  дВ простирается до  $47f_0$  [14–15]. Но фильтры на таких резонаторах менее технологичны по сравнению с планарными конструкциями.



**Рис. 1.** Продольное сечение полоскового резонатора (*a*) и полосковая плата фильтра (*b*): 1 — двухслойная подвешенная диэлектрическая подложка, 2 — полосковые проводники, 3 — стенки металлического корпуса, 4 — порты фильтра.

В данной работе исследован оригинальный миниатюрный полосковый резонатор на подвешенной подложке (рис. 1, *a*), позволяющий проектировать полосно-пропускающие фильтры (рис. 1, *b*) с рекордно высокими характеристиками ПЗ среди всех планарных конструкций. Резонатор выполнен на двухслойной диэлектрической подложке, подвешенной посередине металлического корпуса, имеющего форму параллелепипеда. Его проводник образован тремя полосковыми проводниками, расположенными один под другим на поверхностях слоев составной диэлектрической подложки. Два внешних проводника, расположенные на наружных поверхностях подложек, замкнуты одним концом на одну

из боковых стенок корпуса, а внутренний проводник, расположенный между слоями, замкнут также одним концом, но на противоположную боковую стенку. Другие концы полосковых проводников свободны и находятся на одинаковых расстояниях от соответствующих боковых стенок.

В рассматриваемом резонаторе три первые моды колебаний имеют максимумы высокочастотного электрического напряжения только вблизи разомкнутых концов проводников. При этом для первой (основной) моды колебаний, обладающей самой низкой частотой  $f_1$ , токи во всех трех проводниках текут в одну сторону. Для второй моды, имеющей более высокую частоту  $f_2$ , токи в верхнем и нижнем проводниках текут в противоположные стороны, а ток во внутреннем проводнике отсутствует. Для третьей моды, частота которой  $f_3 > f_2$ , токи в верхнем и нижнем проводнике текут в одном направлении, а ток во внутреннем проводнике течет в противоположном направлении. Важно отметить, что вторая мода колебаний, у которой токи в верхнем и нижнем проводнике направлены встречно, не возбуждается, если резонатор к порту подключается за центральный проводник, как это показано в конструкции фильтра на рис. 1, *b*. Поэтому ширина ПЗ фильтра будет определяться отношением частот  $f_3/f_1$ .

Как показали исследования, частота  $f_1$  понижается с уменьшением толщины слоев  $h_d$ , а отношение  $f_3/f_1$ , характеризующее относительную ширину ПЗ полосно-пропускающего фильтра на таких резонаторах, стремительно растет. Заметим, что собственная добротность первого резонанса  $Q_1$  монотонно увеличивается с уменьшением  $h_d$ , причем этот эффект тем значительнее, чем выше добротность используемого диэлектрика. Для материала RT/Duroid 5880, например, добротность увеличивается примерно на 15%. Важно отметить, что в проведенном исследовании частота первой моды колебаний резонатора при уменьшении  $h_d$  поддерживалась постоянной ( $f_1 = 1$  GHz) за счет соответствующего уменьшения длины резонатора  $l_r$ . Поэтому наблюдаемое увеличение  $Q_1$  с 364 до 417, очевидно, связано исключительно с уменьшением омических потерь в резонаторе в связи с укорочением его полосковых проводников.

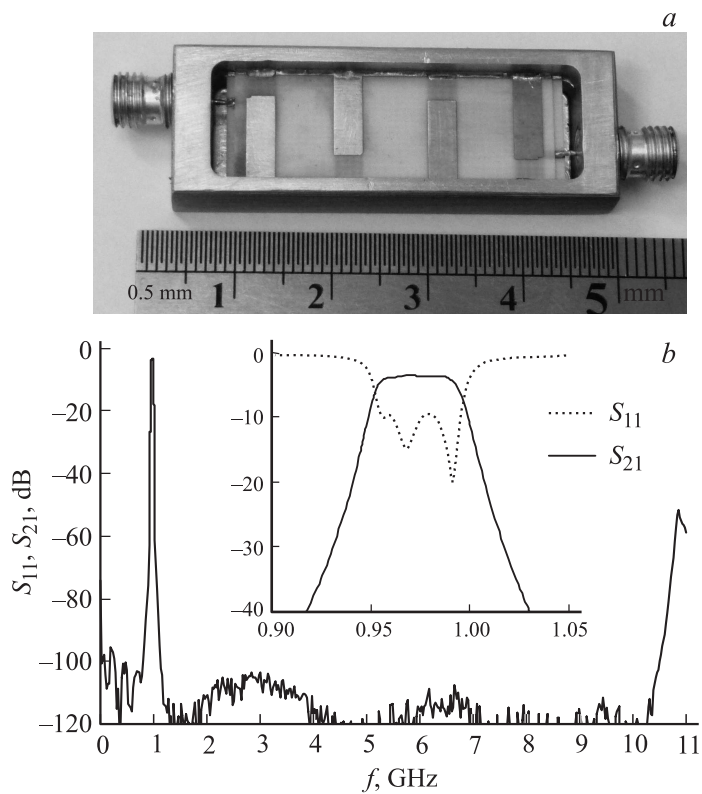
Таким образом, для увеличения относительной ширины полосы заграждения фильтра, изготовленного на основе исследованного резонатора, следует по возможности использовать более тонкие слои составной диэлектрической подложки. В результате можно повысить

верхнюю границу ПЗ до частоты, превышающей центральную частоту более чем в 40 раз. При этом одновременно будет уменьшаться длина резонатора и увеличиваться его собственная добротность. Исследования также показали, что ширина полосы заграждения растет с увеличением ширины полосковых проводников  $w$  и расстояния  $h_a$  от поверхностей составной диэлектрической подложки до верхней и нижней плоскости металлического корпуса (рис. 1), но это, очевидно, приводит и к соответствующему увеличению размеров фильтра. Повышение диэлектрической проницаемости слоев подложки несущественно увеличивает ширину ПЗ, но, естественно, уменьшает размеры фильтра.

Для экспериментальной проверки возможности создания на основе исследованного резонатора планарных полосно-пропускающих фильтров, обладающих столь высокими параметрами полосы заграждения, был синтезирован фильтр четвертого порядка с использованием электромагнитного 3D-моделирования конструкции (рис. 1, *b*). Результаты измерений и фотография изготовленного опытного образца фильтра представлены на рис. 2. Двухслойная подложка устройства имеет размеры  $12 \times 38$  mm и выполнена из материала Rogers R04003C™ толщиной  $h_d = 0.2$  mm ( $\epsilon_r = 3.4$ ,  $\text{tg } \delta \approx 0.002$ ). Все полосковые проводники резонаторов имеют ширину  $w = 3$  mm. Длина проводников внутренних резонаторов равна  $l_s = 9$  mm, а длина проводников крайних резонаторов —  $l_s = 9.25$  mm. Величина воздушных зазоров между поверхностями диэлектрической подложки и плоскостями металлического корпуса равна  $h_a = 3.5$  mm. Зазор между полосковыми проводниками для внутренней пары резонаторов составляет  $S_1 = 6.5$  mm, а для наружных пар резонаторов —  $S_2 = 5.75$  mm. Относительная ширина полосы пропускания фильтра, измеренная по уровню  $-3$  dB от уровня минимальных потерь, составляет 5%, а ее центральная частота  $f_0 \approx 1.0$  GHz. Верхняя граница полосы заграждения по уровню  $-100$  dB простирается до  $10.5f_0$ . Минимальные потери СВЧ-мощности в полосе пропускания составляют около 3 dB.

Предложенная конструкция полосно-пропускающего фильтра может быть реализована и с помощью технологии многослойных интегральных схем на основе керамики с низкой температурой отжига (Low Temperature Cofired Ceramics — LTCC) [16]. В этом случае фильтр представляет собой монолитную конструкцию, в которой проводники находятся в диэлектрической матрице без воздушных зазоров. Возможность изготовления фильтра, разработанного на подвешенной подложке

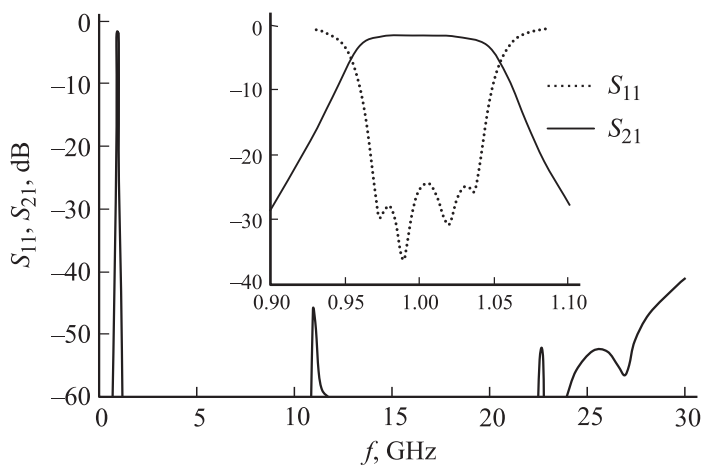
4\* Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып. 15



**Рис. 2.** Действующий макет фильтра (а); измеренные частотные зависимости потерь на отражение  $S_{11}$  и на прохождение  $S_{21}$  (b).

с двухсторонним рисунком полосковых проводников [12], в монолитном исполнении продемонстрирована в [17].

На рис. 3 представлена амплитудно-частотная характеристика синтезированного электромагнитным 3D-моделированием монолитного фильтра, состоящего также из четырех исследованных резонаторов. Фильтр выполнен на основе материалов, применяемых в LTCC-технологии [16], и имеет следующие конструктивные параметры. Материал диэлектрических слоев (керамических листов), заполняющих весь объем



**Рис. 3.** Рассчитанные частотные зависимости потерь на отражение  $S_{11}$  и на прохождение  $S_{21}$  миниатюрного монолитного фильтра, синтезированного для изготовления технологией LTCC.

фильтра — Heratope CT2000 ( $\epsilon_r = 9.1$ ,  $\text{tg } \delta = 0.002$ ), толщина слоя между полосковыми проводниками  $h_d = 20 \mu\text{m}$ , а между проводниками и экранами  $h_a = 600 \mu\text{m}$  (3 листа по  $200 \mu\text{m}$ ). Ширина полосковых проводников  $w = 0.5 \text{ mm}$ , длина проводников наружных резонаторов фильтра  $l_s = 4 \text{ mm}$ , внутренних —  $l_s = 3.95 \text{ mm}$ . При этом полная длина резонаторов  $l_r = 4.25 \text{ mm}$ . Материал проводников — воженная проводящая паста HF612 на основе Ag толщиной  $10 \mu\text{m}$  с поверхностным сопротивлением  $2 \text{ m}\Omega$ . Расстояние между проводниками внутренней пары резонаторов  $0.75 \text{ mm}$ , наружных пар  $0.625 \text{ mm}$ .

Разработанный фильтр имеет центральную частоту полосы пропускания  $f_0 = 1.0 \text{ GHz}$  при относительной ширине полосы пропускания 10%. Минимальное затухание в полосе пропускания фильтра составило 1.7 dB. Полоса заграждения по уровню  $-70 \text{ dB}$  составила  $\sim 11f_0$ , а по уровню  $-40 \text{ dB}$  составила  $\sim 30f_0$ . Габариты фильтра  $1.24 \times 4.25 \times 5 \text{ mm}$ .

Таким образом, в работе предложена и исследована миниатюрная конструкция оригинального полоскового резонатора на двухслойной подвешенной подложке, позволяющая создавать планарные микровол-

новые полосно-пропускающие фильтры с рекордно широкой и глубокой полосой заграждения. Показана возможность реализации устройств на таких резонаторах в монолитном исполнении с использованием ЛТСС-технологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 14.513.11.0010, Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009–2013“ и интеграционного проекта СО РАН № 109.

## Список литературы

- [1] Вендик И.Б., Вендик О.Г., Земляков К.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 9. С. 64–69.
- [2] Беляев Б.А., Бутаков С.В., Лалетин Н.В., Лексиков А.А., Тюрнев В.В., Чесноков О.Н. // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 11. С. 1397–1406.
- [3] Беляев Б.А., Бутаков С.В., Лалетин Н.В., Лексиков А.А., Тюрнев В.В., Чесноков О.Н. // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 1. С. 24–36.
- [4] Wei X.B., Shi Y., Wang P., Liao J.X., Xu Z.Q., Yang B.C. // J. of Electromagn. Waves and Appl. 2012. V. 26. P. 1095–1104.
- [5] Kuo J.-T., Shih E. // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques. 2003. V. 51. N 5. P. 1554–1559.
- [6] Kuo T.-N., Li W.-C., Wang C.-H., Chen C.H. // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2008. V. 18. N 6. P. 389–391.
- [7] Hung C.-Y., Weng M.-H., Lan S.-W., Huang C.-Y. // J. Elettromagn. Waves and Appl. 2012. V. 26. P. 12–23.
- [8] Lin S.-C., Deng P.-H., Lin Y.-S., Wang C.-H., Chen C.H. // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques. 2006. V. 54. N 3. P. 1011–1017.
- [9] Kuo J.-T., Chen S.P., Jiang M. // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. V. 13. N 10. 2003. P. 440–442.
- [10] Sanchez-Soriano M.A., Torregrosa-Penalva G., Bronchalo E. // IET Microw. Antennas Propag. 2012. V. 6. N 11. P. 1269–1276.
- [11] Беляев Б.А., Лалетин Н.В., Лексиков А.А., Сержантов А.М. // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 1. С. 39–46.
- [12] Беляев Б.А., Лексиков А.А., Тюрнев В.В., Казаков А.В. // Материалы 15-й Междунар. Крымской конф. „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“. 12–15 сентября 2005. Севастополь. С. 506–507.



- [13] *Belyaev V.A., Serzhantov A.M., Tjurnev V.V., Leksikov A.A.* // Microwave and Optical Technology Letters. 2012. V. 54. N 5. P. 1117–1118.
- [14] *Беляев Б.А., Сержантов А.М., Тюрнев В.В., Лексиков А.А., Лексиков Ан.А.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 1. С. 95–102.
- [15] *Беляев Б.А., Лексиков А.А., Сержантов А.М., Тюрнев В.В., Бальва Я.Ф., Лексиков Ан.А.* // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 2. С. 127–135.
- [16] *Симин А., Холодняк Д., Вендик И.* // Компоненты и технологии. 2005. № 5. С. 190–196.
- [17] *Zhang Y., Zaki K.A., Piloto A.J., Tallo J.* // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2006. V. 54. N 8. P. 3370–3379.