

13

Новая конструкция миниатюрного фильтра на микрополосковых резонаторах со встречно-штыревой структурой проводников

© Б.А. Беляев¹⁻³, А.М. Сержантов^{1,2}, Я.Ф. Бальва^{1,3},
Ан.А. Лексиков^{1,3}, Р.Г. Галеев⁴

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск

² Сибирский федеральный университет, Красноярск

³ Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск

⁴ НПП „Радиосвязь“, Красноярск

E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 16 декабря 2014 г.

Исследована новая конструкция микрополоскового полосно-пропускающего фильтра на оригинальных резонаторах со встречно-штыревой структурой проводников. Рассмотренные фильтры 3–6 порядков отличаются высокими частотно-селективными свойствами и значительно меньшими размерами по сравнению с аналогами. Показано, что широкая полоса заграждения, простирающаяся до частоты, в 6 раз превышающей центральную частоту полосы пропускания, обусловлена низкими собственными добротностями резонансов высших мод колебаний и слабыми связями резонаторов в этой полосе. Впервые показано, что с уменьшением зазоров между проводниками встречно-штыревой структуры добротность высших резонансов монотонно падает, а добротность резонанса первой, рабочей моды колебаний остается неизменно высокой. Образец фильтра четвертого порядка с центральной частотой полосы пропускания 0.9 GHz, изготовленный на подложке с диэлектрической проницаемостью 80, имеет размеры подложки $9.5 \times 4.6 \times 1.0$ mm, при этом электродинамический расчет характеристик 3D-модели фильтра хорошо согласуется с результатами измерений.

Развитие систем связи, радиолокации, радионавигации, специальной радиоаппаратуры требует повышения характеристик частотно-селективных сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств, в частности полосно-пропускающих фильтров. Основное внимание при создании

новых конструкций фильтров разработчики уделяют увеличению их избирательности, уменьшению габаритов, технологичности в изготовлении и, конечно, стоимости. В целом этим требованиям отвечают традиционные микрополосковые конструкции, поэтому они находят достаточно широкое применение в СВЧ-технике [1,2]. Однако часто на первое место по важности решения ставится проблема уменьшения размеров фильтров, причем без ухудшения их избирательности, которая сталкивается с большими трудностями в дециметровом и особенно метровом диапазонах длин волн.

Частично проблема миниатюризации микрополосковых конструкций решается сворачиванием регулярных полосковых проводников резонаторов в форму шпильки [3], в форму буквы „С“ [4] или в форму прямоугольной спирали [5], а также использованием скачков ширины полосковых проводников резонаторов [6]. При этом важно отметить, что практически все названные способы миниатюризации приводят к уменьшению собственной добротности резонаторов, образующих фильтры, а значит, и к ухудшению частотно-селективных свойств последних. Высокую добротность микрополосковые резонаторы имеют, если их проводники изготовлены из пленок высокотемпературных сверхпроводящих материалов [7], но большая стоимость и работа при криогенных температурах ограничивают их широкое применение.

В последние годы исследуются новые конструкции миниатюрных микрополосковых фильтров на двухмодовых резонаторах с расщепленным полосковым проводником [8], резонаторах на подвешенной подложке с двухсторонним рисунком полосковых проводников [9,10] и резонаторах, образованных тремя параллельными проводниками на двухслойной гибридной подвешенной подложке [11]. При этом удастся не только уменьшить размеры фильтров более чем на порядок, но и существенно повысить их избирательность, вводя перекрестные связи между несоседними резонаторами [12]. Важно отметить, что фильтры на подвешенной подложке сложнее в изготовлении, чем микрополосковые, однако конструкции на двухслойной подвешенной подложке могут изготавливаться в виде монолитной структуры [13] технологией многослойных интегральных схем на основе керамики с низкой температурой отжига (Low Temperature Cofired Ceramics — LTCC).

В представленной работе исследована новая микрополосковая конструкция, позволяющая создавать многозвенные миниатюрные полосно-пропускающие фильтры с высокими частотно-селективными свойствами. В конструкции используются оригинальные резонаторы со

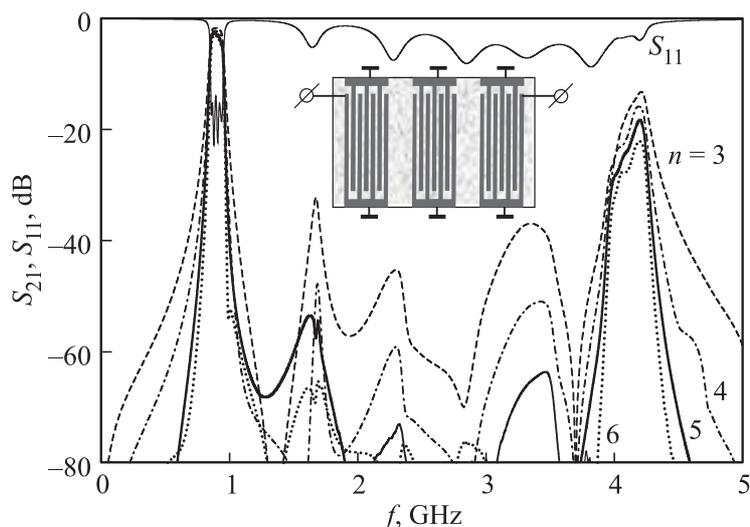


Рис. 1. АЧХ многорезонансных фильтров ($n = 3-6$) на многопроводных микрополосковых резонаторах ($N = 7$), полученные численным электродинамическим анализом 3D-моделей. На вставке конструкция фильтра третьего порядка.

встречно-штыревой структурой полосковых проводников, сформированных на верхней стороне диэлектрической подложки, отличающиеся от аналогов тем, что оба основания встречно-штыревой структуры по всей своей ширине соединены с экраном — нижней металлизированной стороной подложки [14]. На вставке рис. 1 показана топология проводников фильтра третьего порядка, у которого встречно-штыревая структура каждого из трех резонаторов имеет по семь элементов. Важно отметить, что элементы встречно-штыревой структуры сами являются резонаторами с резонансной частотой f_0 , определяемой, как известно, длиной полоскового проводника и диэлектрической проницаемостью подложки. Однако из-за сильного электромагнитного взаимодействия этих резонаторов, обусловленного малыми зазорами между полосковыми проводниками, их резонансные частоты сильно расталкиваются. В результате нижайшая первая мода колебаний такого многопроводного резонатора имеет резонансную частоту $f_1 \ll f_0$ [14]. Поэтому размеры многорезонансного фильтра, полоса пропускания которого строится на

резонансах низшей моды колебаний каждого из взаимодействующих резонаторов, значительно уменьшаются, что можно считать первым важным достоинством исследуемой конструкции.

Вторым достоинством конструкции фильтров на многопроводных резонаторах является широкая высокочастотная полоса заграждения, обусловленная тем, что связь между резонаторами на частотах высших мод колебаний значительно меньше, чем на первой рабочей моде. Это связано с тем, что на частоте первого резонанса высокочастотные токи во всех проводниках резонатора синфазны, а на высших резонансах в некоторых или во всех проводниках (в зависимости от номера моды колебаний) — противофазны. Этот факт демонстрирует рис. 1, на котором представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтров, содержащих различное число резонаторов n от трех до шести, рассчитанные численным электродинамическим анализом 3D-моделей. Подложками фильтров служит пластина из керамики ТБНС с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$, толщиной 1 мм и площадью $7.6 \times 4.6 \text{ мм}^2$ для фильтра на трех резонаторах и $17.7 \times 4.6 \text{ мм}^2$ для фильтра на шести резонаторах. Ширина полосковых проводников во встречно-штыревой структуре, состоящей из семи элементов, 120 мкм, а зазор между ними 20 мкм. Фильтры имеют центральную частоту полосы пропускания, соответствующую резонансу низшей моды колебаний резонатора $f_1 = 0.9 \text{ GHz}$, и относительную ее ширину 10%, измеренную по уровню -3 dB от уровня минимальных потерь. При этом ширина полосы заграждения фильтра превышает $3f_1$, причем для фильтра третьего порядка эта ширина по уровню -30 dB , четвертого — почти -50 dB , пятого — почти -55 dB , а шестого — более -65 dB .

Важно отметить, что на резонансах высших мод колебаний резонаторов наблюдается уменьшение потерь на отражение в фильтре, связанное с поглощением СВЧ-мощности многопроводными резонаторами. Об этом свидетельствует зависимость $S_{11}(f)$, которая приведена только для фильтра пятого порядка, чтобы не загромождать рисунок. Однако на частотах выше полосы пропускания фильтров эта зависимость остается почти неизменной для любого числа резонаторов в нем, что легко объяснить. Действительно, каждый из резонаторов в исследуемых фильтрах образован семью элементами во встречно-штыревой структуре, поэтому резонатор имеет семь низших мод колебаний, для которых на длине каждого полоскового проводника существует только одна

пучность высокочастотного тока и одна пучность высокочастотного напряжения. Резонанс первой моды участвует в формировании полосы пропускания, а резонансы остальных шести мод, попадающие в полосу заграждения, эффективно поглощают падающую СВЧ-мощность, что и доказывают минимумы потерь на отражение на этих частотах, наблюдаемые на зависимости $S_{11}(f)$. Заметим, что паразитная полоса пропускания с центральной частотой выше $4f_1$ образована резонансами, отвечающими модам колебаний, для которых по длине полосковых проводников встречно-штыревой структуры существует уже по две пучности высокочастотного тока и высокочастотного напряжения.

Хорошо известно, что одной из самых важных характеристик резонаторов является их собственная добротность, которой, в первую очередь, определяется величина потерь СВЧ-мощности в полосе пропускания устройства. Исследование собственной добротности первой моды колебаний Q_1 в зависимости от конструктивных параметров многопроводного микрополоскового резонатора проведено в [14] и, в частности, показало, что она растет пропорционально квадратному корню из количества элементов во встречно-штыревой структуре. Однако при построении фильтров на таких резонаторах важно знать влияние их конструктивных параметров на собственные добротности и высших мод колебаний, так как резонансы этих мод попадают в высокочастотную полосу заграждения и влияют на уровень подавления СВЧ-мощности в ней.

На рис. 2 представлены зависимости собственных добротностей резонансов первых трех мод колебаний от зазора между полосковыми проводниками S , построенные для резонатора на подложке толщиной 1 mm из керамики ТБНС ($\varepsilon = 80$), имеющего семь элементов во встречно-штыревой структуре. Отметим, что с уменьшением зазора S частота первой моды колебаний падает примерно на 30%, поэтому добротность Q_1 вычислялась для фиксированной резонансной частоты 1 GHz, которая поддерживалась постоянной изменением длины резонатора. Видно, что добротность резонанса первой моды колебаний практически остается неизменной при любых зазорах, а Q_2 и Q_3 с увеличением S растут, но даже при максимальном зазоре добротность Q_2 в два раза меньше Q_1 , а добротность Q_3 — в три раза. Это значит, что связь между резонаторами на частотах высших резонансов будет слабой, увеличивая тем самым ширину высокочастотной полосы заграждения и уровень затухания СВЧ-мощности в ней.

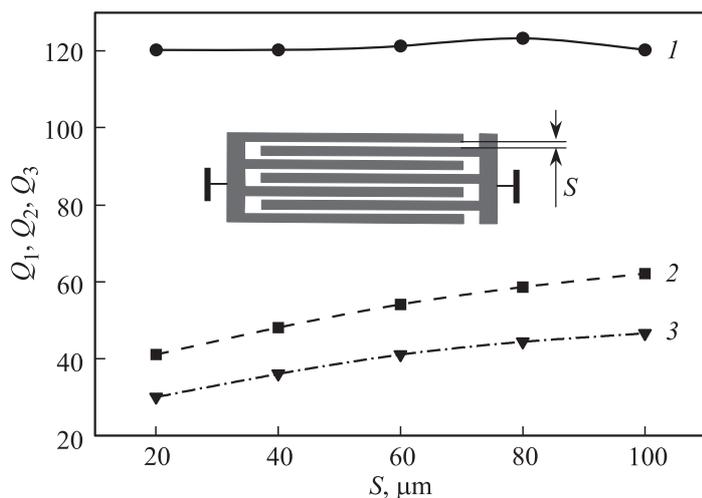


Рис. 2. Зависимости собственных добротностей первых трех мод колебаний многопроводного микрополоскового резонатора ($N = 7$) от зазора между полосковыми проводниками встречно-штыревой структуры.

Для экспериментальной проверки полученных результатов был синтезирован, а затем изготовлен фильтр четвертого порядка на встречно-штыревых микрополосковых резонаторах с числом элементов в структуре $N = 7$, АЧХ которого представлена на рис. 3. На этом же рисунке представлена фотография изготовленного образца фильтра, припаянного на латунное основание. Материал подложки резонатора — керамика ТБНС ($\epsilon = 80$) толщиной 1 mm, размерами 9.5×4.6 mm. Ширина резонаторов 0.96 mm, при этом ширина проводников в них 120 μm и зазор между ними 20 μm . Зазор между крайними парами резонаторов 1.12 mm, а между центральной парой 1.46 mm. Центральная частота полосы пропускания фильтра $f_1 = 0.9$ GHz, ее относительная ширина 20%, величина потерь в полосе пропускания не превышает 1.7 dB. Ширина высокочастотной полосы заграждения, измеренная по уровню -40 dB, простирается до частоты $6f_1$.

Таким образом, в работе предложена и исследована оригинальная конструкция микрополоскового полосно-пропускающего фильтра на резонаторах, полосковые проводники которых представляют собой

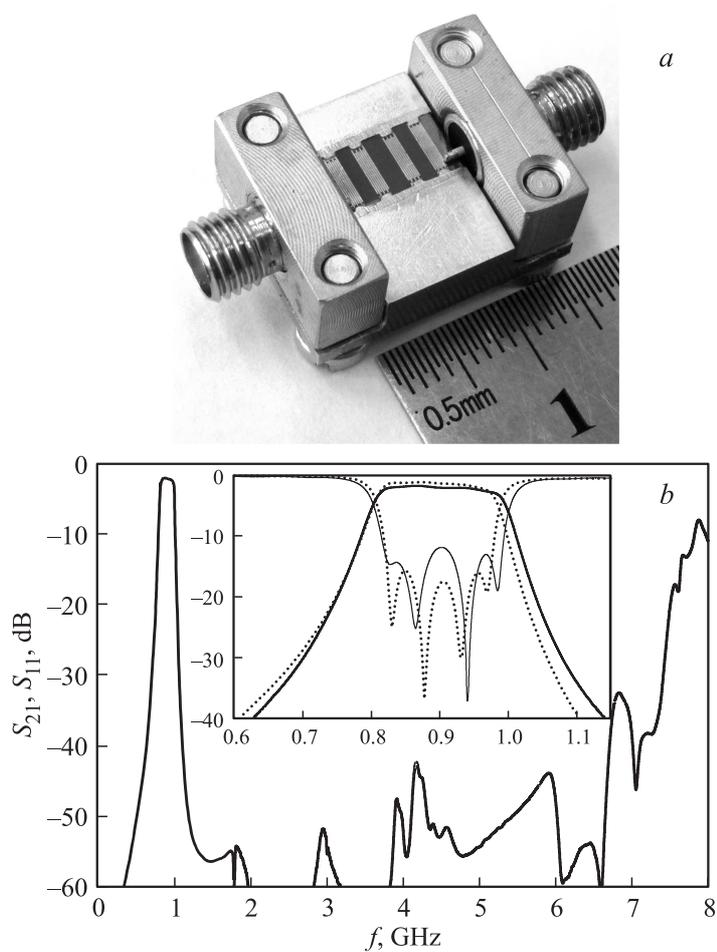


Рис. 3. Фотография опытного образца фильтра (а). АЧХ фильтра четвертого порядка, линии — результаты измерений, точки — результаты расчета (b).

встречно-штыревую структуру с замкнутыми основаниями на экран. Фильтр отличается миниатюрностью, широкой полосой заграждения и технологичностью в изготовлении. Изготовленный опытный образец фильтра четвертого порядка показал высокие частотно-селективные

свойства и хорошее согласие измеренных характеристик с расчетными, полученными электродинамическим численным анализом 3D-модели. Результаты исследований доказывают перспективность использования рассмотренных конструкций фильтров в системах связи, радиолокации, радионавигации, в специальной радиоаппаратуре.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.607.21.0039.

Список литературы

- [1] *Hunter I.C.* // IET Electromagnetic Waves Series. 2006. V. 48. 353 p. Printed in the UK by University Press, Cambridge.
- [2] *Александровский А.А., Беляев Б.А., Лексиков А.А.* // РЭ. 2003. Т. 48. № 4. С. 398–405.
- [3] *Беляев Б.А., Сержантов А.М.* // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 1. С. 24–31.
- [4] *Hung C.-Y., Weng M.-H., Lan S.-W., Huang C.-Y.* // J. Electromagnetic Waves and Applications. 2012. V. 26. P. 12–23.
- [5] *Lee Y.-T., Lim J.-S., Kim Ch.-S., Ahn D., Nam S.A.* // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2002. V. 12. N 10. P. 375–377.
- [6] *Беляев Б.А., Лексиков А.А., Никитина М.И., Тюрнев В.В., Алексеева Н.В.* // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45. № 8. С. 910–917.
- [7] *Вендик И.Б., Вендик О.Г., Земляков К.Н., Колмакова И.В., Ситникова М.Ф., Туральчук П.А., Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 9. С. 64–69.
- [8] *Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Tyurnev V.V.* // Microwave and Optical Technology Letters. 2013. V. 55. N 9. P. 2186–2190.
- [9] *Belyaev B.A., Leksikov A.A., Serzhantov A.M., Tyurnev V.V.* // Progress in Electromagnetics Research C. 2010. V. 15. P. 219–231.
- [10] *Belyaev B.A., Leksikov A.A., Serzhantov A.M., Tyurnev V.V.* // Progress in Electromagnetics Research Letters. 2011. V. 25. P. 57–66.
- [11] *Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Tyurnev V.V., Bal'va Y.F., Leksikov A.A.* // Progress in Electromagnetics Research C. 2014. V. 48. P. 37–44.
- [12] *Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Bal'va Y.F., Tyurnev V.V., Leksikov A.A., Galeev R.G.* // Microwave and Optical Technology Letters. 2014. V. 56. N 9. P. 2021–2025.
- [13] *Беляев Б.А., Сержантов А.М., Тюрнев В.В., Лексиков А.А., Бальва Я.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 15. С. 47–55.
- [14] *Беляев Б.А., Сержантов А.М., Бальва Я.Ф., Лексиков А.А., Галеев Р.Г.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 22. С. 52–60.