

УДК 621.3.029.6

МОНОЛИТНЫЙ ФИЛЬТР С ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТОТОЙ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ 10 ГГц НА ПОЛОСКОВЫХ РЕЗОНАТОРАХ С РАСЩЕПЛЕННЫМ ПРОВОДНИКОМ

© 2023 г. И. В. Говорун^{1,2}, Б. А. Беляев^{2,3,*}, Я. Б. Завьялов³, Т. Ю. Шумилов³,
А. О. Афонин¹, А. В. Угрюмов¹, Р. Г. Галеев²

Представлено академиком РАН В.Ф. Шабановым 21.04.2023 г.

Поступило 21.04.2023 г.

После доработки 21.04.2023 г.

Принято к публикации 26.07.2023 г.

Монолитная конструкция миниатюрного полосно-пропускающего фильтра, разработанная для сантиметрового диапазона длин волн, изготовлена по технологии многослойных печатных плат. Четвертьволновые полосковые резонаторы фильтра имеют по два проводника, разделенных склеивающим конструкцией слоем препрега, что нивелирует влияние его низких параметров на характеристики устройств, обеспечивая тем самым хорошую повторяемость фильтров в серийном производстве. Для увеличения ширины высокочастотной полосы заграждения один из проводников каждого резонатора разрезан пополам поперечной щелью. Измеренные характеристики опытного образца фильтра пятого порядка, конструктивные размеры которого получены параметрическим синтезом с использованием электродинамического анализа его 3D-модели, хорошо согласуются с расчетом. Центральная частота полосы пропускания устройства $f_0 \approx 10$ ГГц, ее относительная ширина $\Delta f/f_0 = 5.7\%$, габариты $18.0 \times 5.4 \times 2.1$ мм, а масса всего лишь 0.5 г. Важным достоинством разработанной конструкции является возможность ее установки на СВЧ-плате методом поверхностного монтажа.

Ключевые слова: полосно-пропускающий фильтр, амплитудно-частотная характеристика, потери на отражение, прямые потери, волновое сопротивление, слоистая структура

DOI: 10.31857/S268674002306007X, EDN: GLQEEN

Хорошо известно, что важнейшими устройствами современных радиотехнических систем передачи, приема и обработки сигналов являются полосно-пропускающие фильтры, от которых зависит не только качество радиоаппаратуры, но и ее габариты и даже цена. Поэтому разработка новых миниатюрных конструкций фильтров, обладающих высокими частотно-селективными свойствами, технологичностью и низкой стоимостью при массовом производстве, является важной и актуальной задачей. Для ее решения в настоящее время активно исследуются конструкции на полосковых многопроводниковых резонансных

структурах [1, 2], которые обладают не только рекордной миниатюрностью среди электродинамических резонаторов, но и сравнительно высокой собственной добротностью. Широкое распространение в настоящее время получило перспективное направление, связанное с применением гибридной технологии создания многослойных интегральных схем СВЧ на основе керамики с низкой температурой отжига (Low Temperature Cofired Ceramics – LTCC) [3–6], а также оригинальная технология интегрирования в подложку волноводов (Substrate Integrated Waveguide – SIW) [7–9]. При этом среди всех известных подходов, используемых для изготовления планарных СВЧ-фильтров, особо выделяется технология многослойных печатных плат (Printed Circuit Board – PCB) [10–13], обладающая возможностью организации массового производства монолитных конструкций [14].

В технологии PCB для соединения прессованным диэлектрических пластин с рисунками полосковых проводников на поверхностях используется специальный материал – препрег, диэлектриче-

¹Институт физики им. Л.В. Киренского
Сибирского отделения Российской академии наук,
Красноярск, Россия

²Сибирский государственный университет науки
и технологий им. академика М.Ф. Решетнева,
Красноярск, Россия

³Сибирский федеральный университет,
Красноярск, Россия

*E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

ские потери которого выше диэлектрических потерь основных слоев. Это является недостатком технологии, так как снижает собственную добротность резонаторов, ухудшая тем самым характеристики фильтров. Вторым недостатком связан с тем, что в процессе прессования слоистой структуры толщина препрега неконтролируемо изменяется по площади в соответствии с рисунком и толщиной полосковых проводников, приводя к изменению не только резонансных частот, но и величины связей между резонаторами. В дециметровом и метровом диапазонах изменение толщины препрега практически не отражается на характеристиках фильтров [14, 15], однако на частотах выше 4 ГГц проводники резонаторов сильно укорачиваются, и влияние препрега становится критическим, недопустимо снижая повторяемость устройств в серии. В работе рассматривается новый подход конструирования монолитных полосковых фильтров, позволяющий в значительной степени нивелировать влияние препрега, даже в сантиметровом диапазоне длин волн.

КОНСТРУКЦИИ МОНОЛИТНЫХ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫХ ПОЛОСКОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Рассмотрим регулярный полосковый четвертьволновый резонатор **I** (рис. 1а), выполненный по технологии РСВ посредством прессования двух диэлектрических пластин (1 и 2), между которыми находится связующий слой препрега (3). Медный проводник резонатора (4) располагается между верхней пластиной (2) и слоем препрега (3). Роль корпуса-экрана выполняет наружная металлизация поверхностей диэлектрических пластин (5). Очевидно, что в такой конструкции параметры препрега (его толщина h_p и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_p$) будут оказывать непосредственное влияние на характеристики резонатора, в частности, на его собственную добротность и резонансную частоту. Однако, как известно [16], влияние препрега существенно ослабляется, если проводник резонатора расщепить, разместив препрег между металлическими слоями 4 и 6 (конструкция **II** рис. 1а), соединенными с экраном смежными концами только с одной стороны.

В такой конструкции на частоте четвертьволнового резонанса разность потенциалов между противоположными точками на верхнем и нижнем проводнике равна нулю, поэтому влияние параметров препрега на характеристики резонатора сильно ослабляется. Но важно отметить, что вблизи основного резонанса конструкции **II** (рис. 1а), наблюдаемого на частоте f_1 , существует паразитный резонанс на более высокой частоте f_2 , соответствующий колебаниям в четвертьволновом резонаторе, образованном слоем препрега и двумя со-

направленными проводниками 4 и 6 на его поверхностях. Свободные концы этих проводников на частоте f_2 имеют противоположные потенциалы, а СВЧ-токи направлены навстречу друг другу [17]. В результате высокочастотная полоса заграждения фильтра, построенного на таких резонаторах, сужается, а для ее расширения, очевидно, необходимо значительно увеличить частоту f_2 без изменения частоты f_1 . Это удастся осуществить, сделав поперечную щель на верхнем проводнике двухпроводникового резонатора на расстоянии l_s от свободного конца (см. конструкцию **III** на рис. 1а).

Вышесказанное подтверждают результаты исследований (рис. 1б, в), проведенных с использованием электродинамического анализа 3D-моделей резонаторов в пакете программ CST Studio Suite. Для объективного сравнения, конструктивные параметры моделей резонаторов были одинаковыми, в частности, ширина полосковых проводников резонаторов $w = 2$ мм. При этом использовались характеристики реальных металлизированных диэлектрических пластин и препрега. Пластины резонаторов из материала RO4350B с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_R = 3.66$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_R = 0.0037$ имели толщину 0.762 мм и 1.44 мм. Препрег из материала RO4450F с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_p = 3.52$ и $\text{tg}\delta_p = 0.0041$ имел толщину слоя $h_p = 0.122$ мм. Длинной полоскового проводника l_R резонаторы настраивались на одинаковую частоту первой (четвертьволновой) моды колебаний $f_1 = 10$ ГГц.

Как и следовало ожидать, при фиксированной толщине препрега $h_p = 0.122$ мм собственная добротность всех резонаторов с увеличением $\text{tg}\delta_p$ в интервале 0.004–0.050 монотонно уменьшается (рис. 1б). Причем для первой конструкции наблюдается уменьшение в 2.4 раза, для второй в 1.7, а для третьей ровно в 2 раза в случае, когда щель величиной 0.1 мм делит верхний проводник пополам. На рис. 1в представлены зависимости поведения резонансной частоты исследуемых трех конструкций, построенные при изменении исходной толщины препрега $h_p = 0.122$ мм в пределах 0.01–0.24 мм, но при фиксированной величине $\text{tg}\delta_p = 0.0041$. При этом самые большие изменения резонансной частоты наблюдаются только у первой конструкции: с уменьшением h_p вверх по частоте на $\sim 1.3\%$, а с увеличением h_p на $\sim 0.9\%$ вниз по частоте. Отметим, что собственная добротность Q_1 резонанса конструкции **II** (см. рис. 1а) во всем интервале изменения h_p остается практически постоянной, а у **I** и **III** конструкций с уменьшением h_p она увеличивается на $\sim 3\%$, а с увеличением h_p уменьшается на $\sim 0.5\%$.

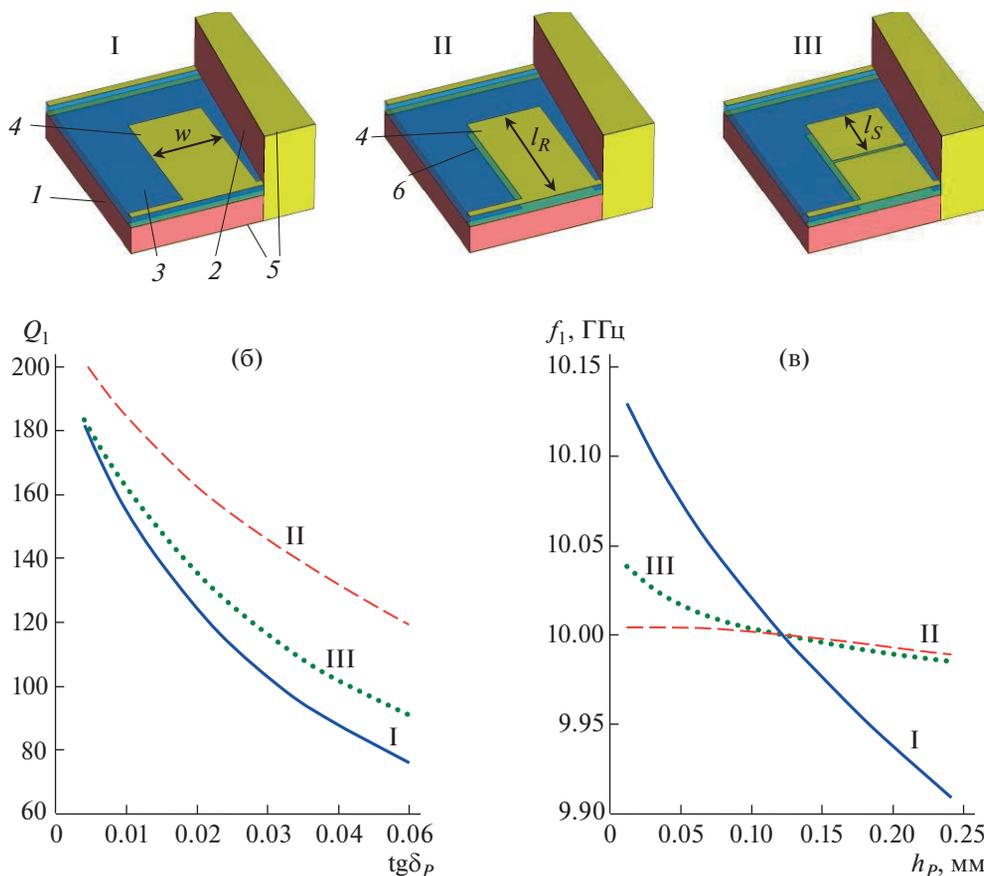


Рис. 1. Три конструкции монолитных четвертьволновых полосковых резонаторов (а), зависимости собственной добротности их резонансов от тангенса угла диэлектрических потерь препрега (б) и зависимости резонансных частот от толщины препрега (в).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХЗВЕННЫХ ФИЛЬТРОВ НА МОНОЛИТНЫХ РЕЗОНАТОРАХ

Для сравнения характеристик полос заграждения фильтров, построенных на исследованных резонаторах, были сконструированы устройства второго порядка параметрическим синтезом 3D-моделей простейших двухзвенных структур в пакете программ CST Studio Suite. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтров, демонстрирующие частотные зависимости потерь на прохождении $S_{21}(f)$, представлены на рис. 2а. Синтезированные фильтры имеют одинаковую центральную частоту полосы пропускания $f_1 = 10$ ГГц и ее относительную ширину $\Delta f/f_1 = 5\%$, измеренную по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь. Вход и выход каждого устройства подключены кондуктивно к портам с волновым сопротивлением 50Ω . Настройка фильтров осуществлялась подбором длины полосковых проводников, зазоров между ними и величины кондуктивной связи резонаторов с портами так, чтобы максимум отра-

женной СВЧ-мощности в полосе пропускания находился на уровне -14 дБ.

На рис. 2а хорошо видно, что лучшими характеристиками в полосах заграждения обладает фильтр на резонаторах конструкции III (см. рис. 1а), в которых щель делит верхние полосковые проводники пополам, а худшими — на резонаторах конструкции II, из-за паразитного резонанса, расположенного вблизи полосы пропускания на частоте f_2 , природа которого была объяснена выше. На рис. 2б сплошной линией показана зависимость отношения частот паразитного f_2 и основного f_1 резонансов от относительного положения щели l_S/l_R на верхнем проводнике резонатора конструкции III (см. рис. 1а). Перемещение щели от свободного конца полоскового проводника к замкнутому на экран концу приводит к стремительному увеличению частоты паразитного резонанса f_2 , а частота основного резонанса f_1 при этом остается практически неизменной. В результате происходит значительное расширение высокочастотной полосы заграждения фильтра.

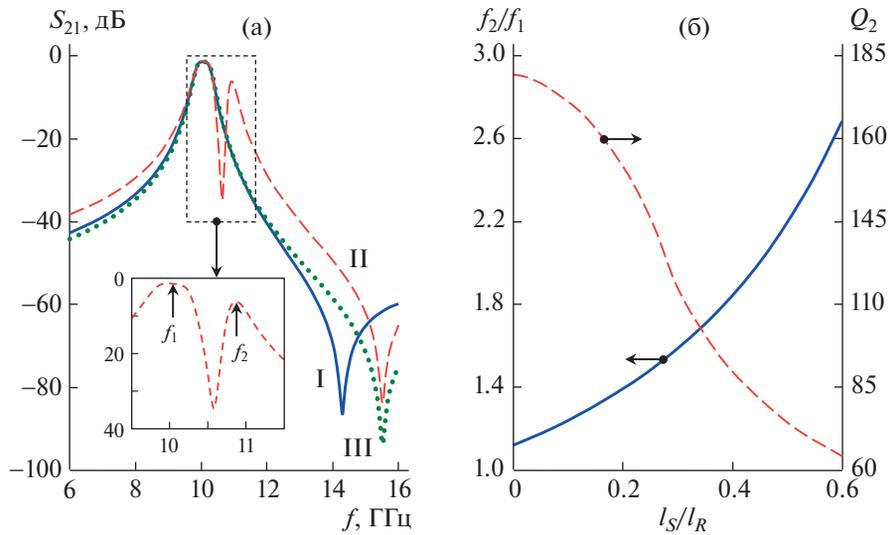


Рис. 2. АЧХ фильтров второго порядка, синтезированных на резонаторах различных конструкций (а). Зависимости добротности паразитного резонанса Q_2 и отношения частот паразитного f_2 и основного f_1 резонансов от относительного положения щели l_s/l_R на верхнем проводнике резонатора конструкции **III** (см. рис. 1а) (б).

Отметим, что с увеличением l_s/l_R наблюдается сильное падение собственной добротности паразитного резонанса Q_2 (штриховая линия на рис. 2б), что также улучшает характеристики полосы заграждения. В исследуемом интервале изменения l_s/l_R добротность Q_2 уменьшается в три раза, однако добротность Q_1 при этом почти не изменяется.

Факт уменьшения добротности Q_2 можно объяснить эффектом демпфирования колебаний в резонаторе при подключении к нему отрезка линии с потерями. Этот эффект подробно исследован в [18] на микрополосковых резонаторах, в которых демпфирующий отрезок линии создавался оголением тонкого адгезионного подслоя хрома путем удаления меди на небольшом участке по длине полоскового проводника, расположенного вблизи пучности электрического поля. Было показано, что с увеличением длины этого участка добротность резонанса уменьшается в несколько раз, причем установленный в [18] характер изменения добротности от длины демпфирующего отрезка линии хорошо согласуется с зависимостью $Q_2(l_s/l_R)$ (см. рис. 2б). В нашем исследовании отрезок демпфирующей линии в резонаторе конструкции **III** (см. рис. 1а), ограниченный полосковым проводником длиной l_s и его шириной w , связан с четвертьволновым резонатором емкостью поперечной щели, величина которой в рассматриваемой модели ~ 1.6 пФ. Очевидно, что с увеличением l_s пропорционально увеличивается длина демпфирующего отрезка и одновременно повышается его емкостная связь с резонатором, из-за быстрого роста резонансной частоты f_2 (см.

рис. 2б). В результате растет демпфирование колебаний в резонаторе, поэтому снижается его добротность.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ФИЛЬТРА ПЯТОГО ПОРЯДКА

Для экспериментальной проверки работоспособности монолитного устройства выбрана конструкция фильтра пятого порядка, построенного на исследованном резонаторе **III**, электродинамическая 3D-модель которого представлена на рис. 3а. В качестве диэлектрических пластин и препрега в модели фильтра использовались те же материалы, характеристики которых и значения толщин слоев были приведены выше. Ширина проводников резонаторов одинакова $w = 2$ мм, как и ширина щелей 0.1 мм, а также их относительное расположение $l_s/l_R = 0.24$.

Параметрическим синтезом в пакете программ CST Studio Suite были определены конструктивные параметры модели, подключенной к портам с волновым сопротивлением 50Ω , по заданной центральной частоте полосы пропускания $f_0 = 10$ ГГц и ее ширине $\Delta f = 570$ МГц, измеренной по уровню -3 дБ. При этом максимумы отраженной СВЧ-мощности в полосе пропускания не должны были превышать уровень -20 дБ. В результате синтеза длина полосковых проводников наружных резонаторов составила 3.46 мм, следующих за ними 3.31 мм, а проводника центрального резонатора 3.29 мм. Величина зазора между проводниками наружных пар резонаторов получилась 0.85 мм, а между проводниками остальных внутренних резонаторов 1.25 мм. По-

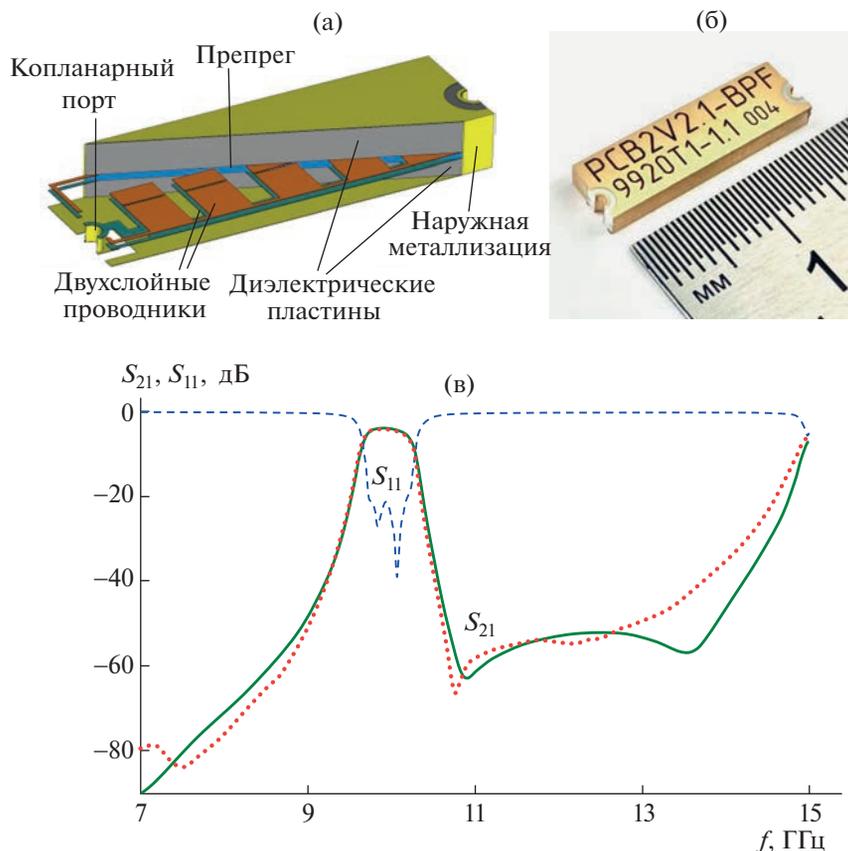


Рис. 3. 3D-модель монолитного фильтра пятого порядка (а), фотография опытного образца (б) и АЧХ устройства (в), линии – расчет, точки – эксперимент.

лученные конструктивные параметры использовались для изготовления серии опытных образцов монолитных фильтров по технологии многослойных печатных плат, фотография одного из них показана на рис. 3б. Размеры фильтра $18.0 \times 5.4 \times 2.1$ мм или $0.6\lambda_0 \times 0.18\lambda_0 \times 0.07\lambda_0$ (λ_0 – длина волны в вакууме на центральной частоте полосы пропускания), а масса устройства всего 0.5 г.

На рис. 3в приведены рассчитанные частотные зависимости прямых потерь $S_{21}(f)$ (сплошная линия) и потерь на отражение $S_{11}(f)$ (штриховая линия) исследуемого фильтра, точками показаны результаты измерений изготовленного опытного образца. Видно хорошее совпадение рассчитанных и измеренных характеристик. Измеренная центральная частота полосы пропускания составила $f_0 = 9.98$ ГГц, а относительная ширина полосы пропускания, измеренная по уровню -3 дБ, $\Delta f/f_0 = 5.7\%$. Ширина высокочастотной полосы заграждения по уровню -40 дБ простирается почти до 14 ГГц. Минимальное затухание СВЧ-мощности в полосе пропускания фильтра составило 4.2 дБ, а уровень отражений в полосе пропускания не превышает -20 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана монолитная конструкция миниатюрного полоскового полосно-пропускающего фильтра сантиметрового диапазона длин волн, предназначенная для серийного производства по технологии многослойных печатных плат. Особенностью конструкции являются четвертьволновые резонаторы с расщепленными препрегом двухслойными полосковыми проводниками, в которых один из проводников разрезан поперечной щелью. Показано, что собственная добротность четвертьволнового полоскового резонатора с двухслойным проводником существенно выше традиционного резонатора с однослойным проводником, а поперечная щель в одном из проводников значительно расширяет высокочастотную полосу заграждения устройства. На многослойной печатной плате площадью 460×610 мм разместилось 480 штук фильтров, из которых у 390 штук отклонение центральной частоты от 10 ГГц не превышало ± 25 МГц, ширина полосы пропускания не выходила из интервала 570 ± 5 МГц, а минимальные потери в полосе пропускания изменялись в пределах 4.2 ± 0.2 дБ. У остальных фильтров, расположенных преиму-

шественно по краям печатной платы, отклонения были примерно в два раза больше.

Низкая стоимость исследованных фильтров при массовом производстве, а также высокая повторяемость характеристик даже в сантиметровом диапазоне длин волн, подтвержденная хорошим совпадением теоретических и измеренных АЧХ, доказывают перспективность использования разработанной конструкции в радиотехнических системах.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Соглашения № 470 от 30.08.2022 г. между ИФ СО РАН, Краевым фондом науки и “АО” НПП “Радиосвязь”, по конкурсу научно-технических и инновационных проектов в интересах первого климатического Научно-образовательного центра “Енисейская Сибирь”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Leksikov A.A., Bal'va Y.F., Leksikov An.A.* Novel High-Quality Compact Microstrip Resonator and its Application to Bandpass Filter // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2015. № 9. P. 579–581.
2. *Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Leksikov A.A., Bal'va Y.F., Leksikov An.A.* Multilayered multiconductor stripline resonator and its application to bandpass filter with wide stopband // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2017. V. 59. P. 2212–2216.
3. *Вендик И.Б., Холодняк Д.В., Симин А.В.* Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига // *Компоненты и технологии*. 2005. № 5. С. 190–196.
4. *Kholodnyak D., Kolmakov Ya., Vendik I., Trabert J.F., Mueller J., Druee K.-H., Hein M.A.* Bandpass Filters for Ka-Band Satellite Communication Applications Based on LTCC // *Proc. 38th European Microwave Conf. (Amsterdam)*. 2008. P. 211–214.
5. *Imanaka Y.* Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology. Springer Science+Business Media, Inc., 2005.
6. *Wu C.-H., Lin Y.-S., Wang C.-H., Chen C.-H.* A compact LTCC ultra-wideband bandpass filter using semi-lumped parallel-resonance circuits for spurious suppression // *European Microwave Conference, Munich*, 2007. P. 532–536.
7. *Hao Z.-C., Ding W., Hong W.* Developing Low-Cost W-Band SIW Bandpass Filters Using the Commercially Available Printed-Circuit-Board Technology // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2016. V. 64. № 6. P. 1775–1786.
8. *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.
9. *Bozzi M., Georgiadis A., Wu K.* Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas // *IET Microwave Antennas and Propagation*. 2011. V. 5. № 8. P. 909–920.
10. *Du C., Ma K., Feng T., Mou S.* A self-packaged bandpass filter with controllable transmission zeros using Substrate Integrated Suspended Lines // *IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*. 2016. P. 317–319.
11. *Aliqab K., Hong J.* UWB Balanced BPF Using a Low-Cost LCP Bonded Multilayer PCB Technology // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2019. V. 67. № 3. P. 1023–1029.
12. *Cariou M., Potelon B., Quendo C., Cadiou S., Schlaffer E., Pessl W., Fevre A.L.* // *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* 2017. V. 65. № 2. P. 496–503.
13. *Chu Y., Ma K., Wang Y., Meng F.* A Self-Packaged Low-Loss and Compact SISL DBBPF with Multiple TZs // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2019. V. 29. № 3. P. 192–194.
14. *Беляев Б.А., Сержантов А.М., Лексиков Ан.А., Бальва Я.Ф., Галеев Р.Г.* Монолитный миниатюрный полосно-пропускающий фильтр на многопроводниковых полосковых резонаторах. // *Письма в ЖТФ*. 2021. Т. 47. Вып. 13. С. 16–20.
15. *Беляев Б.А., Сержантов А.М., Лексиков Ан.А., Бальва Я.Ф., Галеев Р.Г.* Миниатюрный полосно-пропускающий фильтр на двойных спиральных полосковых резонаторах. // *Ural Radio Engineering Journal*. 2021. Т. 5. № 1. С. 21–31.
16. *Лексиков А.А.* Многослойные многопроводниковые полосковые резонаторы и устройства частотной селекции сигналов на их основе. Автореф. докт. дис. Ин-т физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, 2022.
17. *Беляев Б.А., Сержантов А.М., Бальва Я.Ф.* Исследование коэффициентов связи сонаправленных резонаторов в полосковых фильтрах на подвешенной подложке // *Радиотехника и электроника*. 2008. Т. 53. № 4. С. 432–440.
18. *Беляев Б.А., Матвеев С.В., Тюрнев В.В., Шихов Ю.Г.* Подавление добротности высших резонансов микрополоскового резонатора адгезионным подслоем // *Электронная техника. Сер. СВЧ-Техника*. 1994. Вып. 4. (464). С. 20–25.

10 GHz MONOLITHIC FILTER BASED ON STRIPLINE RESONATORS WITH SPLIT CONDUCTOR

I. V. Govorun^{a,b}, B. A. Belyaev^{b,c}, Ya. B. Zav'yalov^c, T. Y. Shumilov^c, A. O. Afonin^a,
A. V. Ugryumov^a, and R. G. Galeev^b

^a*Kirenskii Institute of Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia*

^b*Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia*

^c*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

Presented by Academician of the RAS V.F. Shabanov

The monolithic design of the compact bandpass filter X-band is made on technology of multilayered printed circuit boards. A quarter-wave stripline resonators of the filter have two conductors divided by the layer prepreg having low parameters which is bonding together a design. This eliminates influence of prepreg on the characteristics of the devices, ensuring good repeatability of filters in mass production. For increase the high-frequency stopband of filter, one of the conductors of each resonator is cut in half by a transverse slit. The constructive sizes of the device were obtained by parametric synthesis using the electrodynamic analysis of its 3D model. The experimental data of five-order filter are in good agreement with the electromagnetic simulation of filters 3D model. An experimental device has a central frequency of the passband of 10 GHz and fractional bandwidth of 5.7%, its dimensions and weight are $18.0 \times 5.4 \times 2.1$ mm and 0.5 g. The important advantage of the developed design is the possibility of its installation on the board using the surface mounting method.

Keywords: bandpass filter, frequency response, return loss, insertion loss, impedance, layered structure