

УДК 621.3.029.6

ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ НА ДВУМЕРНОМ МИКРОПОЛОСКОВОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ КРИСТАЛЛЕ

Б. А. Беляев^{1,2,*}, С. А. Ходенков³, Р. Г. Галеев³,
академик РАН В. Ф. Шабанов^{1,3}

Поступило 19.10.2018 г.

На основе двумерного электромагнитного микрополоскового кристалла разработана новая конструкция фильтра нижних частот, которая обладает более высокой крутизной склона амплитудно-частотной характеристики по сравнению с фильтром на одномерном электромагнитном микрополосковом кристалле. Исследованная конструкция фильтра нижних частот отличается высокой технологичностью и простотой в изготовлении. Численный электродинамический расчёт 3D-модели рассмотренной микрополосковой структуры хорошо согласуется с экспериментом, что позволяет проводить параметрический синтез устройств с заданными характеристиками на персональном компьютере.

Ключевые слова: фильтр нижних частот, электромагнитный кристалл, микрополосковое устройство.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485127-32>

Как известно, частотно-селективные устройства сверхвысоких частот (СВЧ) и, в частности, фильтры являются важнейшими элементами в системах связи, радиолокации, радионавигации, а также в различной измерительной и специальной радиоаппаратуре [1, 2]. К самым востребованным типам фильтров относятся полосно-пропускающие, однако во многих случаях для оптимального решения радиотехнических задач требуются фильтры нижних частот (ФНЧ), которые почти без потерь пропускают электромагнитные волны в полосе частот от нуля до заданной частоты среза, обеспечивая заграждение от помех в высоко-частотной области. Хорошо также известно, что характеристики фильтров и их размеры зачастую определяют качество и габариты СВЧ-устройств. Поэтому разработка новых миниатюрных конструкций ФНЧ, обладающих высокой избирательностью, малыми потерями в полосе пропускания, технологичностью в изготовлении и низкой стоимостью в производстве, — важная и актуальная задача.

В настоящее время в технике СВЧ широко используются миниатюрные конструкции ФНЧ, изготовленные в виде монолитной структуры по технологии многослойных интегральных схем на основе керамик с низкой температурой отжига LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) [3]. В таких фильтрах

основой являются резонансные структуры, состоящие из квазисосредоточенных ёмкостных и индуктивных элементов [4], имеющих сравнительно низкую собственную добротность, что отражается на невысоких параметрах амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) таких устройств.

Конструкции ФНЧ на микрополосковых резонаторах больше по размерам, но они проще в изготовлении, а главное, они могут иметь значительно лучшие характеристики. Именно поэтому в последние годы активно разрабатываются и исследуются новые конструкции ФНЧ в микрополосковом исполнении [5–8]. Для улучшения характеристик в них, как правило, используется большой набор различных резонаторов, часть из которых формирует полосу пропускания, а другая часть формирует полюса затухания, позволяющие увеличить крутизну склона АЧХ и расширить полосу заграждения. С этой же целью исследователи изготавливают щелевые резонаторы в экране микрополосковых конструкций [9].

В настоящей работе приведены результаты исследования новой конструкции ФНЧ, разработанной на основе двумерного микрополоскового электромагнитного кристалла, которая отличается от известных конструкций высокой крутизной склона АЧХ.

КОНСТРУКЦИЯ ДВУМЕРНОГО МИКРОПОЛОСКОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КРИСТАЛЛА

Как известно, одномерные микрополосковые электромагнитные кристаллы, которые нередко на-

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

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

³Сибирский государственный университет
науки и технологий им. М. Ф. Решетнева, Красноярск

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

зывают аналогами фотонных кристаллов, представляют собой цепочку чередующихся резонаторов, образованных отрезками линий передачи с низким и высоким волновым сопротивлением. Как правило, отрезки микрополосковых линий, изготовленные на монолитной диэлектрической подложке, различаются шириной полосковых проводников, образуя нерегулярную периодическую структуру. На таких микрополосковых структурах разрабатывают полотно-пропускающие фильтры [10, 11], а также ФНЧ [12]. Однако частотно-селективные свойства устройств на одномерных электромагнитных кристаллах сравнительно невысоки из-за малой крутизны склонов АЧХ, которую можно увеличить только наращиванием числа резонаторов в структуре. Очевидно, при этом увеличиваются размеры конструкции. Названная проблема успешно решается при построении ФНЧ с использованием двумерного микрополоскового электромагнитного кристалла (рис. 1), в котором реализуется дополнительная электромагнитная связь между несмежными резонаторами. Такая перекрёстная связь, как известно, позволяет существенно увеличивать крутизну склонов АЧХ [13].

Конструкция фильтра представляет собой свёрнутую в три ряда цепочку микрополосковых резонаторов с непосредственной (гальванической) связью, отличающихся шириной w_i и длиной l_i полосковых проводников резонаторов (i — номер резонатора). Концы полосковых проводников крайних резонаторов такой конструкции подключены к входному и выходному портам со стандартным волновым сопротивлением 50 Ом, что определяет симметрию конструкции. Подложка микрополосковой структуры имеет относительную диэлектрическую проницаемость ϵ и толщину d . Важно отметить, что материал диэлектрической подложки должен обладать достаточно высокой добротностью, чтобы не вносить дополнительных потерь СВЧ-мощности в полосу пропускания фильтра, которые в микрополосковых конструкциях обусловлены главным образом омическими потерями в проводниках.

Параметрический синтез конструкции ФНЧ проводили численным электродинамическим анализом 3D-модели рассматриваемой структуры с помощью программы AWR Microwave-Office путём подбора конструктивных параметров w_i и l_i . Как видно на рис. 1, длина резонатора под номером 9 задаёт расстояние между параллельными цепочками резонаторов. Для определённости в качестве материала подложки микрополосковой структуры, имеющей толщину 1 мм, выбран традиционный в СВЧ-тех-

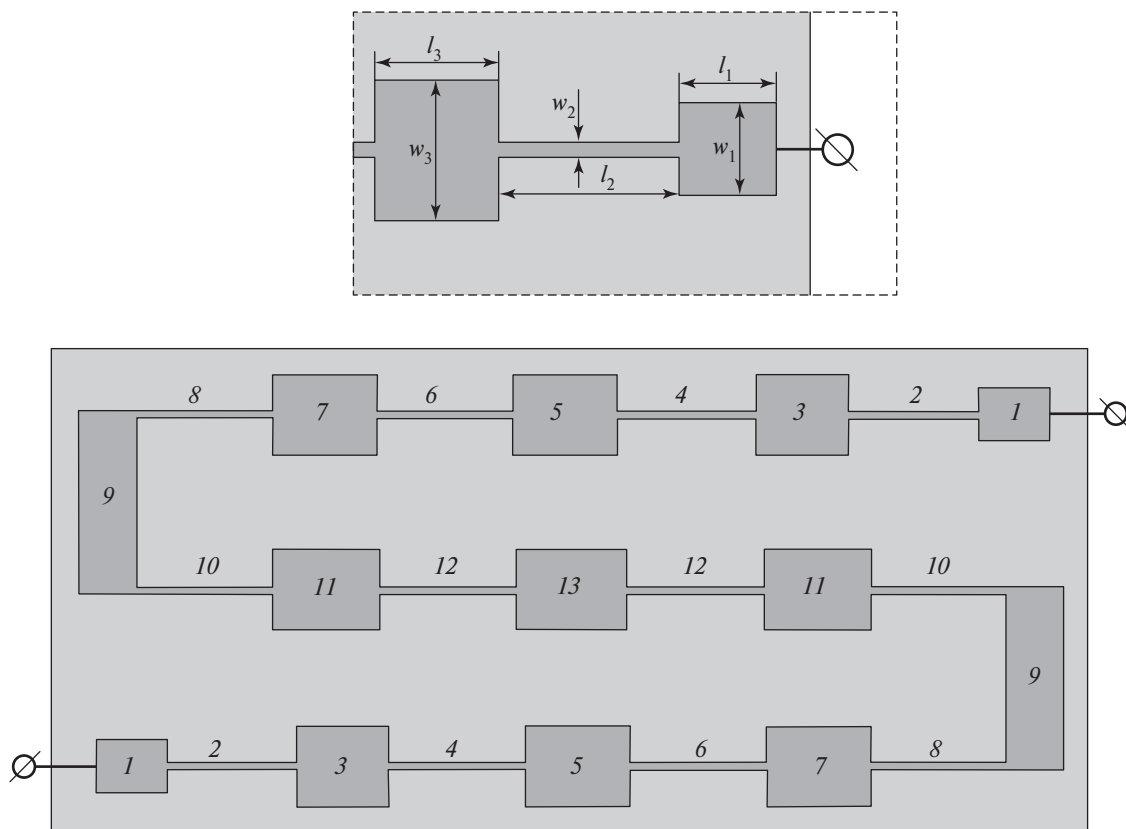


Рис. 1. Конструкция фильтра нижних частот на микрополосковом двумерном электромагнитном кристалле.

Таблица 1. Размеры топологии полосковых проводников фильтра нижних частот на двумерном микрополосковом электромагнитном кристалле

Номер резонатора i	Длина проводника l_i , мм	Ширина проводника w_i , мм
1	4,20	3,21
2	8,01	0,40
3	5,40	4,39
4	8,60	0,40
5	6,01	4,41
6	9,10	0,39
7	6,10	4,41
8	6,40	0,20
9	9,21	3,00
10	6,40	0,20
11	6,19	4,40
12	9,15	0,40
13	6,09	4,40

нике керамический материал — поликор ($\epsilon = 9,8$). Отметим, что единственное ограничение при синтезе исследуемой конструкции накладывалось на длину микрополосковой структуры, что обусловлено максимальным стандартным размером поликоровых подложек — 60 мм. Поэтому с учётом необходимых отступов наружных границ рисунка проводников от краёв подложки, которые должны быть не менее её толщины, длина микрополосковой структуры не может превышать 58 мм.

По конструктивным параметрам, полученным в результате параметрического синтеза устройства, был изготовлен опытный образец ФНЧ, представленный на фотографии (рис. 2). Размеры подложки фильтра $60,0 \times 24,4$ мм, а размеры отрезков полосковых линий, образующих резонаторы в его нерегулярной микрополосковой структуре, приведены в табл. 1 в соответствии с обозначениями на рис. 1. Точками на рис. 2 представлены измеренные АЧХ

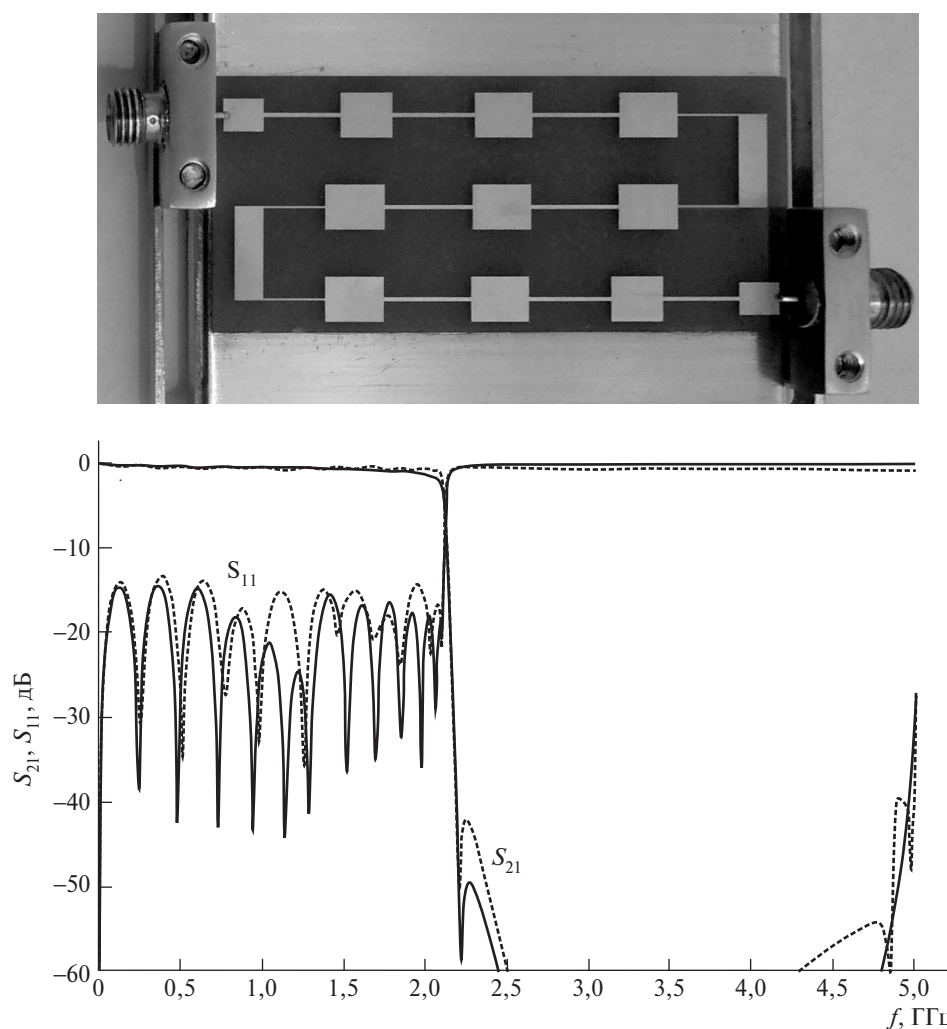


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики фильтра нижних частот на двумерном микрополосковом электромагнитном кристалле. Точки — измерения, линии — расчёт. Вверху фотография опытного образца фильтра.

прямых потерь S_{21} и потерь на отражение S_{11} , а сплошными линиями показаны АЧХ, полученные численным анализом 3D-модели разработанной конструкции ФНЧ. Заметим, что для объективности сравнения при электродинамическом расчёте представленной на рисунке АЧХ в 3D-модель подставлялись реальные размеры конструкции фильтра, измеренные после его изготовления.

Зависимости на рис. 2 показывают, во-первых, достаточно хорошее согласие измеренных характеристик ФНЧ с рассчитанными, а во-вторых, очень высокую крутизну склона АЧХ, обусловленную полюсом затухания, расположенным вблизи полосы пропускания. Отметим, что частота среза фильтра $f_3 = 2,11$ ГГц, измеренная по уровню 3 дБ от уровня минимальных потерь, составляющих величину всего лишь 0,2 дБ. При этом уже на частоте 2,18 ГГц, т.е. при отстройке от частоты среза всего на 0,07 ГГц, фильтр обеспечивает загораживание более 40 дБ. Важно отметить, что фильтр на одномерном микрополосковом электромагнитном кристалле, имеющий такое же количество резонаторов и ту же частоту среза, обеспечивает загораживание на частоте 2,18 ГГц примерно на 10 дБ меньше, что обусловлено отсутствием полюсов затухания на АЧХ такого фильтра.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРА НИЗКИХ ЧАСТОТ

Отметим, что высокие частотно-селективные свойства ФНЧ, разработанного на основе двумерного электромагнитного микрополоскового кристалла, а также технологичность и простота его изготовления доказывают перспективность применения фильтра в радиотехнических системах. В связи с этим представляет большой интерес исследовать возможность повышения частоты среза предлагаемой конструкции ФНЧ, а также возможность её реализации на подложках с более высокой относительной диэлектрической проницаемостью, что, очевидно, позволит уменьшать габариты устройства. Учитывая достаточно хорошее согласие электродинамического расчёта ФНЧ с экспериментом, исследование разработанной конструкции проведём численным анализом её 3D-модели.

Результаты проведённых таким образом исследований представлены на рис. 3, где показаны АЧХ синтезированных фильтров с частотой среза (ГГц): 2 (а); 3 (б); 4 (в). Эти фильтры выполнены на подложке из поликора толщиной 1 мм и имеют размеры подложек $57,7 \times 32,6$; $38,7 \times 25,8$ и $29,85 \times 19,4$ мм² соответственно. Сравнить частотно-селективные

свойства этих устройств удобно по крутизне склона АЧХ [14], которая вычисляется по формуле

$$k = \frac{\Delta f_3}{\Delta f_{30} - \Delta f_3}, \quad (1)$$

где Δf_3 — ширина полосы пропускания фильтра по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь; Δf_{30} — ширина полосы пропускания по уровню -30 дБ, измеренная также от уровня минимальных потерь.

Для исследованных фильтров с частотами среза 2, 3 и 4 ГГц коэффициенты k равны соответственно 24; 26 и 28, т.е. с увеличением частоты среза разработанного ФНЧ крутизна склона его АЧХ монотонно растёт. На рис. 3г представлена АЧХ фильтра на подложке с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 20$, имеющей толщину $d = 1$ мм. Фильтр имеет частоту среза 2 ГГц, а крутизна склона его АЧХ $k = 22$. При этом размеры подложки такого ФНЧ $54,1 \times 22,9$ мм, т.е. её площадь примерно в 1,5 раза меньше аналогичного фильтра на подложке из поликора ($\epsilon = 9,8$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанная на основе двумерного электромагнитного микрополоскового кристалла конструкция ФНЧ обладает более высокой крутизной склона АЧХ по сравнению с ФНЧ на одномерном электромагнитном микрополосковом кристалле, что обусловлено полюсом затухания, существующим на краю полосы пропускания в двумерном кристалле. На частоте полюса затухания происходит взаимная компенсация двух электромагнитных волн, одна из которых проходит со входа на выход устройства по всей последовательной цепочке трёх рядов резонаторов, а вторая проходит со входа на выход благодаря существующей электромагнитной связи между рядами резонаторов. Очевидно, что эти волны на частоте полюса затухания имеют одинаковые амплитуды, но противоположные фазы. Важно отметить, что при уменьшении зазора между рядами резонаторов полюс затухания приближается к полосе пропускания, а при увеличении зазора — наоборот.

Исследованная конструкция ФНЧ отличается высокой технологичностью и простотой в изготовлении. При этом численный электродинамический расчёт 3D-модели рассмотренной микрополосковой структуры достаточно хорошо согласуется с экспериментом, что позволяет на персональном компьютере проводить параметрический синтез устройств с заданными характеристиками. Результаты дока-

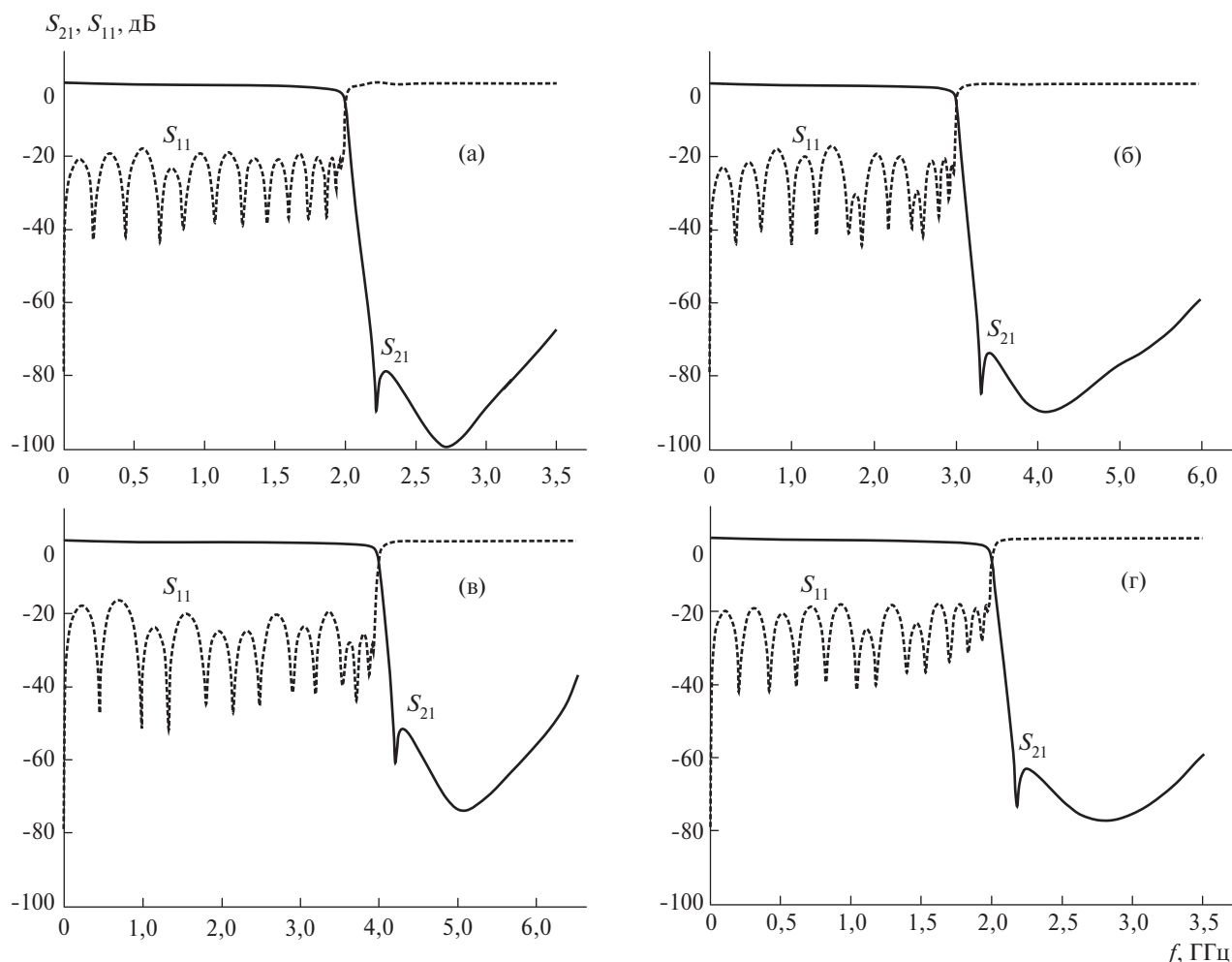


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики ФНЧ на двумерном микрополосковом электромагнитном кристалле. Фильтры на подложках из поликора ($\epsilon = 9,8$) с частотой отсечки 2 (а), 3 (б), 4 ГГц (в) и фильтр на подложке В-20 ($\epsilon = 20$) с частотой отсечки 2 ГГц (г).

зывают перспективность использования разработанной конструкции ФНЧ в системах связи, радиолокации, в измерительной и специальной радиотехнической аппаратуре.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект № RFMEFI60417X0179.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morgan M.A.* Reflectionless Filters. In: Artech House Microwave Library. Boston; L., 2017. 258 p.
2. *Hunter I.C.* Theory and Design of Microwave Filters. IET Electromagnetic Waves Series. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006. V. 48. 353 p.
3. *Кондратюк Р.* LTCC — низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // Наноиндустрия. 2011. № 2. С. 26–30.
4. *Hong J.-S.* Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. Hoboken: Wiley, 2011.

5. *Li K., Zhao M., Fan Yo., Zhu Z., Cui W.* With Parallel Open-Ended Stubusing Novel Double-Folded SCMRC Structurecompact Lowpass Filter with Wide Stopband // Progress in Electromagn. Res. Lett. 2013. V. 36. P. 77–86.
6. *Hayati M., Shama F.* A Compact Lowpass Filter with Ultra Wide Stopband Using Stepped Impedance Resonator // Radioengineering. 2017. V. 26. № 1. P. 269–274.
7. *Kumarand D., De A.* Compact Ultra Wide Band Filter Using Triangular Patch Resonators // Radioelectronics and Communs Syst. 2015. V. 58. № 4. P. 151–156.
8. *Hayati M., Asadbeigi H., Sheikhi A.* Microstrip Lowpass Fiter with High and Wide Rejection Band // Electronics Lett. 2012. V. 48. № 19. P. 1217–1219.
9. *Jiang S., Xu J.* Compact Microstrip Lowpass Filter with Ultra-Wide Stopband Based on Dual-Plane Structure // Electronics Lett. 2017. V. 53. № 9. P. 607–609.
10. *Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф.* Исследование микрополосковых моделей полосно-про-

- пускающих фильтров на сверхрешётках // ДАН. 2004. Т. 395. № 6. С. 756–760.
11. *Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф.* Исследование микрополосковых аналогов полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах // РЭ. 2006. Т. 51. № 6. С. 694–701.
 12. *Hashim M.N.B., Razalli M.S., Ibrahim S.Z., Farid F.* Compact Ultra-Wideband Stepped-Impedance Low Pass Filter Utilizing Open Circuit Stub Resonator // ARPN J. Eng. and Appl. Sci. 2015. V. 10. № 19. P. 9120–9126.
 13. *Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Bal'va Y.F., Tyurnev V.V., Leksikov A.A., Galeev R.G.* Implementations of Cross Couplings in Microwave Bandpass Filters // Microwave and Optical Technol. Lett. 2014. V. 56. № 9. P. 2021–2025.
 14. *Беляев Б.А., Лексиков А.А., Тюрнев В.В.* Частотно-селективные свойства многозвенных фильтров на регулярных микрополосковых резонаторах // РЭ. 2004. Т. 49. № 11. С. 1315–1324.

A LOWPASS FILTER BASED ON A 2D MICROSTRIP ELECTROMAGNETIC CRYSTAL

**B. A. Belyaev, S. A. Khodenkov, R. G. Galeev,
Academician of the RAS V. F. Shabanov**

Received October 19, 2018

A new construction of a lowpass filter was developed based on a two-dimensional microstrip electromagnetic crystal, which had a steeper slope of the frequency response as compared to a filter consisting of a one-dimensional microstrip electromagnetic crystal. The investigated lowpass filter construction is characterized by a high workability and ease of manufacturing. Electrodynamical numerical simulation of the 3D model of the considered microstrip structure agrees well with the experiment, which allows conducting parametric synthesis of devices with the required properties using a personal computer.

Keywords: lowpass filter, electromagnetic crystal, microstrip device.