

**S.A. Khodenkov<sup>1</sup>, B.A. Belyaev<sup>1,2</sup>, V.V. Ivanin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk

<sup>2</sup>Institute of Physics, Krasnoyarsk

## **THE MICROSTRIP DIPLEXERS WITH ADJACENT BANDWIDTHS, BASED ON 2D ELECTROMAGNETIC CRYSTAL**

The diplexers based on 2D electromagnetic crystal are investigated with the help of the numerical electrodynamic analysis of 3D models. The input half-wave resonator has rolled up strip conductor in the claimed microstrip designs tuned with nearly adjacent bandwidths. It allows to coordinate channels rather easily. Such resonator in the first two-channel device at the same time interacts with pair of quarter-wave resonators having strip conductors in the form of the Russian letter «П». In the second two-channel device it interacts similarly, with pair of resonators with strip conductors in the form of a letter «Ш». Build-up of number of periodically located rectangular portions of strip conductors in adjacent resonators allows to increase in proportion number of the resonances participating in formation of both low-frequency, and high-frequency bandwidths. At the same time in amplitude-frequency characteristics of diplexers growth of the steepness of slopes of adjacent bandwidths and gain suppression of power at frequencies of stop bands are observed.

**С.А. Ходенков<sup>1</sup>, Б.А. Беляев<sup>1,2</sup>, В.В. Иванин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет  
имени академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск

<sup>2</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск,  
e-mail: hsa-sibsau@mail.ru

## **МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ДИПЛЕКСЕРЫ СО СМЕЖНЫМИ ПОЛОСАМИ ПРОПУСКАНИЯ НА ОСНОВЕ 2D ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КРИСТАЛЛА**

Как известно [1], электромагнитными кристаллами (ЭМК) называют периодические структуры, обладающие в определенных частотных диапазонах окнами прозрачности, между которыми расположены полосы заграждения (запрещенные зоны), на частотах которых наблюдается подавление электромагнитных волн. В настоящее время на основе ЭМК различных размерностей разрабатываются и исследуются перспективные частотно-селективные устройства [2], в том числе и сверхвысокочастотные (СВЧ). Традиционно к ним предъявляются следующие требования: высокие частотно-селективные свойства (ЧСС), технологичность изготовления, миниатюрность, а также низкая себестоимость готовых изделий [3].

В частотно-избирательных микрополосковых устройствах на основе двумерных (2D) ЭМК, таких как полосно-пропускающие фильтры, фильтры с двумя полосами пропускания (ПП), диплексеры и т.д., разработчики используют при построении кристалла как одномодовые резонаторы [4], так и двумодовые [5]. При этом применение на входе двухканальных конструкций нерегулярного резонатора позволяет достаточно легко согласовать каналы [3-5].

Очевидно, что наращивание числа резонаторов в ЭМК и, соответственно, повышение его размерности до определенного значения, улучшают частотно-селективные свойства диплексеров, построенных на основе такого кристалла. Также повысить ЧСС двухканальных устройств можно, увеличивая от каждого резонатора кристалла число мод колебаний, участвующих в формировании двух ПП. Поэтому результаты таких исследований являются актуальными. При построении диплексеров можно использовать ЭМК низкой размерности, например,  $1 \times 2$ , что не принципиально, так как полученные данные справедливы и при большем числе многомодовых резонаторов в двух рядах.

На рис. 1 представлены топологии полосковых проводников двух исследованных микрополосковых диплексеров.

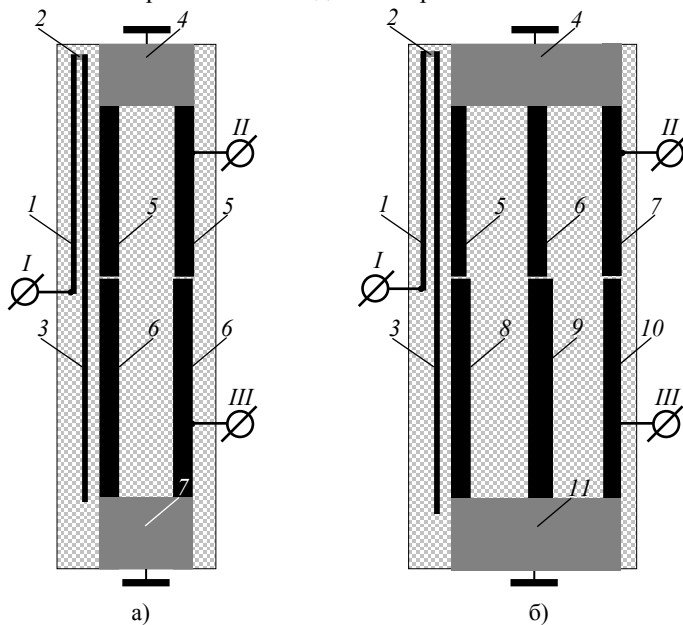


Рис. 1. Топология полосковых проводников микрополосковых диплексеров: а – с использованием при построении кристалла двухмодовых резонаторов; б – трехмодовых резонаторов

Параметрический синтез двухканальных устройств проводился с помощью численного электродинамического анализа 3D моделей, в которых один входной и пара выходных портов имели волновое сопротивление  $50 \Omega$  и кондуктивно подключались к проводникам связи. Для объективного сравнения их характеристик использовались одинаковые подложки с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 80$  и толщиной  $h = 1$  мм (материал – керамика «ТБНС»).

В предложенных СВЧ-конструкциях сигнал поступает на свернутый полосковый проводник  $I-3$  входного нерегулярного резонатора. Такой полуволновый резонатор одновременно взаимодействует с парой многомодовых четвертьволновых резонаторов. В обоих резонаторах широкие отрезки полосковых проводников заземлены на основание по всей длине. При этом резонансы многомодового резонатора с укороченными отрезками параллельных полосковых проводников формируют высокочастотную полосу пропускания. Прошедший сигнал снимается с выхода устройства  $II$ . Резонансы многомодового резонатора с удлиненными отрезками параллельных полосковых проводников, аналогично, формируют низкочастотную полосу пропускания. Прошедший сигнал снимается с выхода устройства  $III$ .

От входного резонатора при формировании полос пропускания можно использовать дополнительно до двух резонансов.

На рис. 2 приведена синтезирующая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) первого диплексера на многомодовых резонаторах с полосковыми проводниками в форме буквы «П».

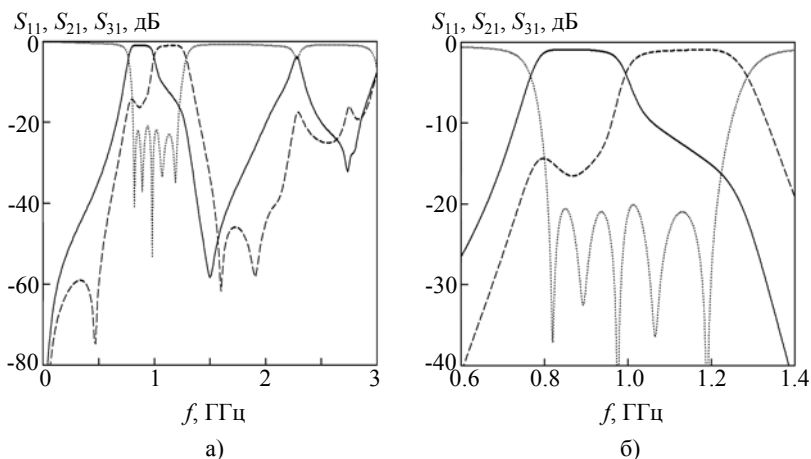


Рис. 2. АЧХ диплексера на многомодовых резонаторах с П-образными проводниками: а – в широком диапазоне частот; б – в узком диапазоне частот

Две смежных полосы пропускания диплексера, низкочастотную с центральной частотой ПП  $f_{10} \approx 0,88$  ГГц и относительной шириной  $\Delta f/f_{10} \approx 23$  %, измеренную по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь  $L_1 = 0,88$  дБ, а также высокочастотную с центральной частотой ПП  $f_{20} \approx 1,14$  ГГц и относительной шириной  $\Delta f/f_{20} \approx 25$  %, также измеренную по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь  $L_2 = 0,89$  дБ, формируют пять резонансов: пара резонансов от каждого четвертьволнового резонатора и один вырожденный резонанс от входного двумодового резонатора. Для первой конструкции высокочастотная ПП на 2 % шире низкочастотной. При этом на частоте 1 ГГц почти половина прошедшей мощности попадает в низкочастотную полосу пропускания, а другая половина – в высокочастотную ПП.

Отметим, что на АЧХ исследованного диплексера наблюдаются полюса затухания мощности, это дополнительно повышает его ЧСС.

Как уже было заявлено выше, улучшить частотно-селективные свойства таких диплексеров можно, не только увеличивая число резонаторов в двух рядах, но и наращивая количество периодически расположенных отрезков прямоугольных полосковых проводников в четвертьволновых резонаторах (см. рис. 1,б) и тем самым пропорционально увеличивая число мод колебаний, участвующих в формировании как низкочастотной, так и высокочастотной ПП.

Рассчитанная амплитудно-частотная характеристика второго диплексера с использованием в конструкции уже трехмодовых резонаторов с полосковыми проводниками в форме буквы «Ш» показана на рис. 3.

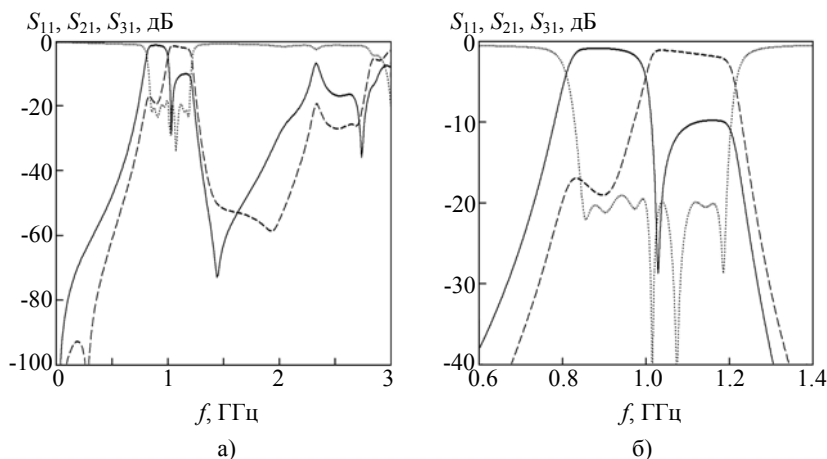


Рис. 3. АЧХ диплексера на многомодовых резонаторах с Ш-образными проводниками: а – в широком диапазоне частот; б – в узком диапазоне частот

Как и следовало ожидать, на АЧХ наблюдается рост крутизны склонов ПП и усиление подавления мощности на частотах полос заграждения. Видно (см. рис. 3), что смежные полосы пропускания диплексера формируют семь резонансов: по три резонанса от каждого четвертьволнового резонатора, а также один вырожденный резонанс от входного полуволнового резонатора.

Отметим, что расположение и геометрические размеры полосковых проводников трех резонаторов подобраны таким образом, чтобы низкочастотная ПП была на 2 % шире высокочастотной.

При этом центральная частота низкочастотной (высокочастотной) полосы пропускания  $f_{10} \approx 0,90$  ГГц ( $f_{20} \approx 1,11$  ГГц), а ее относительная ширина, измеренная по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь  $L_1 = 0,97$  дБ ( $L_2 = 1,19$  дБ) равна величине  $\Delta f/f_{10} \approx 21$  % ( $\Delta f/f_{20} \approx 19$  %).

Конструктивные параметры исследованных диплексеров приведены в табл. 1.

Таблица 1

Конструкция диплексера	Номер отрезка проводника	Размеры отрезка проводника, мм	Зазоры между отрезками проводников, мм
Рис. 1,а	1	10,65×0,15	между 3 и 5 – 0,55, между 5 и 6 – 0,15
	2	0,20×0,15	
	3	19,95×0,30	
	4	4,15×2,80	
	5	7,55×0,80	
	6	9,70×0,85	
	7	4,15×3,20	
Рис. 1,б	1	12,40×0,10	между 3 и 5 – 0,60, между 5 и 6 – 2,90, между 8 и 9 – 2,80, между 5 и 8 – 0,05, между 6 и 9 – 0,05, между 7 и 10 – 0,05
	2	0,45×0,15	
	3	19,90×0,30	
	4	7,60×2,05	
	5	8,05×0,60	
	6	8,05×0,90	
	7	8,05×0,80	
	8	9,45×0,75	
	9	9,45×1,05	
	10	9,45×0,70	
	11	7,55×2,85	

Для первой конструкции смещение отрезков проводников 1-3 входного резонатора от верхнего края подложки – 0,45 мм. Для второй конструкции смещение аналогичных полосковых отрезков – 0,25 мм.

Таким образом, улучшение частотно-селективных свойств микрополосковых диплексоров на 2D электромагнитном кристалле наблюдается не только при увеличении размерности кристалла, но и при повышении числа мод колебаний многомодовых резонаторов, участвующих в формировании смежных полос пропускания. Это позволяет реализовать двухполосные конструкции даже на кристалле низкой размерности  $1 \times 2$  с высокими частотно-селективными свойствами, которые обусловлены малыми потерями мощности, как в низкочастотной, так и высокочастотной полосах пропускания, а также значительным подавлением мощности на частотах полос заграждения.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук, МК-9119.2016.8.

#### Библиографический список

1. Ветлужский А.Ю. Эффективные электрофизические свойства металлических электромагнитных кристаллов / А.Ю. Ветлужский // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 1. С. 18-19.
2. Басанов Б. В. Исследование волноводных структур на основе двумерных фотонных кристаллов / Б. В. Басанов, А. Ю. Ветлужский // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 13. С. 1-7.
3. Беляев Б.А. Микрополосковый диплексер на двухмодовых резонаторах / Б.А. Беляев, А.М. Сержантов, В.В. Тюрнев // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 16. С. 25-33.
4. Беляев Б.А. Исследование частотно-селективных устройств, построенных на основе микрополоскового двумерного фотонного кристалла / Б.А. Беляев, С.А. Ходенков, В.Ф. Шабанов // ДАН. 2016. Т. 467. №4. С. 400-404.
5. СВЧ-фильтры и диплексеры на двухмодовых кольцевых резонаторах / А.Э. Баскакова, В.М. Тургалиев, Д.В. Холодняк [и др.]// Электроника и микроэлектроника СВЧ: тез. докл. V Всерос. науч.-техн. конф. СПб.: СПбГЭТУ, 2016. С. 142-146.