

УДК 621.3.029.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ, ПОСТРОЕННЫХ НА ОСНОВЕ МИКРОПОЛОСКОВОГО ДВУМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

© 2016 г. Б. А. Беляев^{1,2,3}, С. А. Ходенков², академик РАН В. Ф. Шабанов¹

Поступило 25.09.2015 г.

Теоретически и экспериментально исследованы частотно-селективные свойства конструкций на основе двумерного микрополоскового фотонного кристалла. Показана возможность создания на основе таких конструкций различных СВЧ-устройств, в частности, диплексеров, полосно-пропускающих фильтров и фильтров с двумя полосами пропускания.

DOI: 10.7868/S086956521610008X

Хорошо известно, что полосно-пропускающие фильтры сверхвысоких частот (СВЧ) являются важнейшими элементами систем связи, радиолокации, радионавигации, различной измерительной и специальной радиоаппаратуры [1]. Однако наряду с обычными фильтрами, имеющими лишь одну рабочую полосу пропускания, часто требуются устройства, обладающие двумя рабочими полосами, каждая из которых имеет свою заданную ширину и центральную частоту [2]. Кроме того, востребованы двухканальные частотно-разделительные устройства – диплексеры, в которых сигнал, поступающий на один общий вход, разделяется по частоте на два независимых канала [3]. При разработке частотно-селективных устройств особое внимание уделяется микрополосковым конструкциям, которые отличаются высокой миниатюрностью и технологичностью в производстве [4].

В работах [5, 6] продемонстрирована возможность создания полосно-пропускающих фильтров на одномерных микрополосковых фотонных кристаллах (ФК), представляющих собой периодическую структуру с чередующейся шириной полосковых проводников. На таких микрополосковых ФК-структурах можно создавать высокодобротные резонаторы [7], которые применяются, в частности, для измерения диэлектрических

характеристик жидкостей [8]. В настоящей работе предложены конструкции частотно-селективных устройств на основе двумерного микрополоскового ФК, состоящего из 6 регулярных четвертьволновых или полуволновых резонаторов, электромагнитно связанных между собой, образующих решетку размерностью 3×2 на плоскости подложки. В качестве подложки используется пластина из высокочастотной керамики ТБНС толщиной $h = 1$ мм, имеющей величину относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 80$.

ЧАСТОТНО-РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДИПЛЕКСЕР

Первое из разработанных устройств – диплексер, топология проводников которого представлена на рис. 1, – имеет входной порт, подключенный к нерегулярному полуволновому резонатору, электромагнитно связанному с резонаторами микрополоскового ФК. Два выходных порта кондуктивно подключены к полосковым проводникам крайних резонаторов микрополосковой структуры. Сигнал, поступающий на вход диплексера, разделяется между каналами, каждый из которых образован тремя параллельными микрополосковыми резонаторами. Очевидно, что резонаторы с большей длиной полосковых проводников формируют первую (низкочастотную) полосу пропускания, а резонаторы с меньшей длиной проводников – вторую (высокочастотную) полосу пропускания.

Сплошной и штриховой линиями на рис. 1 показаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) прямых потерь соответственно первого S_{21} и второго S_{31} каналов диплексера, а пунктиром представлена частотная зависимость потерь на

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

² Сибирский государственный аэрокосмический
университет им. М.Ф. Решетнёва, Красноярск

³ Сибирский федеральный университет, Красноярск
E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

отражение от его входа S_{11} . Размеры топологии полосковых проводников диплексера получены параметрическим синтезом конструкции с использованием численного электродинамического анализа ее 3D-модели в пакете программ “Microwave Office”. Для определенности при синтезе диплексера были заданы центральные частоты его каналов $f_1 = 0.94$ ГГц и $f_2 = 1.44$ ГГц, одинаковая относительная ширина обоих каналов $\frac{\Delta f_{1,2}}{f_{1,2}} = 9\%$, ко-

торая определялась по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь в полосе пропускания. Задавался также максимально допустимый уровень потерь на отражение в обеих полосах пропускания $S_{11} \leq -14$ дБ. Полученные геометрические размеры полосковых проводников диплексера, обозначенных цифрами на рис. 1, представлены в табл. 1.

На АЧХ (рис. 1) видно, что разработанная конструкция на двумерном микрополосковом ФК обладает достаточно высокими характеристиками для диплексера, имеющего почти смежные полосы пропускания, каналы которого образуют фильтры всего лишь третьего порядка. Это объясняется наличием полюсов затухания, которые хорошо просматриваются на АЧХ, в том числе вблизи полос пропускания диплексера. Природа этих полюсов обусловлена взаимодействием двух входных четвертьволновых резонаторов диплексера друг с другом через входной полуволновой резонатор. Именно такая дополнительная связь между резонаторами и является причиной возникновения полюсов [9].

Отметим, что минимальный уровень потерь СВЧ-мощности в первом канале составил 0.8 дБ, а во втором 1.2 дБ. Очевидно, что при необходимости повышения частотно-селективных свойств устройства достаточно лишь увеличить количество резонаторов в его каналах. Важно также отметить, что в конструкции диплексера на двумерном микрополосковом ФК несложно увеличивать раздвижку между каналами практически до октавы, изменяя лишь соотношение длин полосковых проводников резонаторов. Изменением величины зазоров между полосковыми проводниками можно варьировать независимо друг от друга ширину полос пропускания каналов, причем в широких пределах.

ФИЛЬТР С ДВУМЯ ПОЛОСАМИ ПРОПУСКАНИЯ

Конструкция рассмотренного двумерного микрополоскового ФК позволяет реализовать фильтр с двумя разнесенными полосами пропускания, однако для этого в ней будем использовать не четвертьволновые, а полуволновые резонаторы (рис. 2), хотя это не принципиально. Сигнал,

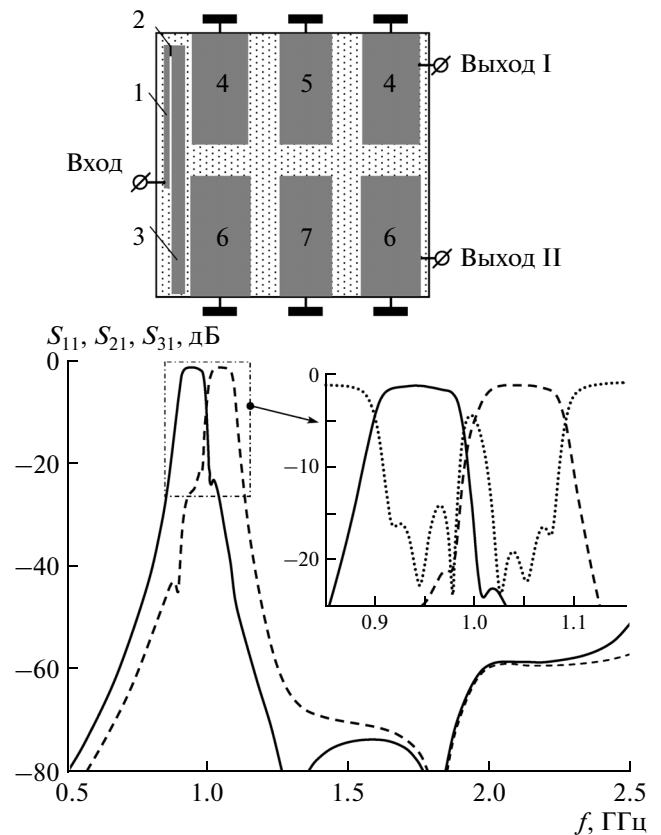


Рис. 1. Топология проводников микрополоскового диплексера и его амплитудно-частотные характеристики. Цифрами обозначены регулярные участки проводников, показанные либо черным, либо серым цветом.

поступающий на вход такого фильтра, как и в диплексере, разделяется между каналами, при этом на выходе устройства сигналы, прошедшие по двум каналам, суммируются. Здесь, как и в диплексере, резонаторы с большей длиной полосковых проводников формируют первую полосу

Таблица 1. Размеры топологии полосковых проводников СВЧ-диплексера на двумерном микрополосковом ФК

Номер проводника	Размеры проводника, мм ²	Зазоры между проводниками, мм
1	11.50 × 0.20	1 и 4 – 0.65
2	0.50 × 0.10	1 и 6 – 0.65
3	20.10 × 0.95	4 и 5 – 2.55
4	8.80 × 4.55	6 и 7 – 2.35
5	8.80 × 4.20	4 и 6 – 2.90
6	9.80 × 4.75	5 и 7 – 2.90
7	9.80 × 4.20	

Примечание. Смещение от края подложки проводника № 1 0.2 мм.

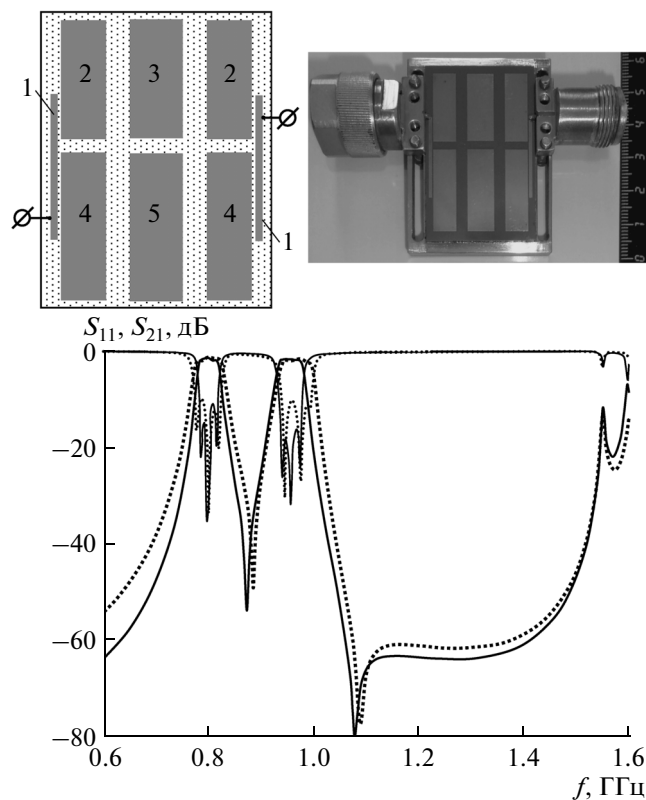


Рис. 2. Топология проводников микрополоскового двухполосного фильтра и его амплитудно-частотные характеристики. Линии – расчет, точки – эксперимент. Вверху – фотография опытного образца фильтра.

пропускания, а резонаторы с меньшей длиной проводников – вторую.

Сплошными линиями на рис. 2 показаны АЧХ прямых потерь S_{21} и потерь на отражение S_{11} разработанного двухполосного фильтра. Размеры топологии его полосковых проводников были получены параметрическим синтезом конструкции с использованием численного электродинамического анализа ее 3D-модели. Для определенности

Таблица 2. Размеры топологии полосковых проводников двухполосного СВЧ-фильтра на двумерном микрополосковом ФК

Номер проводника	Размеры проводника, мм ²	Зазоры между проводниками, мм
1	22.1 × 0.9	1 и 2 – 0.2
2	18.7 × 6.3	1 и 4 – 0.2
3	18.4 × 7.3	2 и 3 – 3.0
4	22.3 × 6.3	4 и 5 – 3.0
5	22.4 × 7.3	2 и 4 – 2.1

Примечание. Смещение от края подложки проводника № 1 10.1 мм.

при синтезе двухполосного фильтра были заданы центральные частоты его полос пропускания $f_1 = 0.80$ ГГц и $f_2 = 0.95$ ГГц и относительные ширины полос пропускания каналов $\frac{\Delta f_1}{f_1} = 5.0\%$, $\frac{\Delta f_2}{f_2} = 5.5\%$, которые определяли по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь в соответствующем канале. Задавался также максимально допустимый уровень потерь на отражение в обеих полосах пропускания $S_{11} \leq -14$ дБ. Полученные геометрические размеры полосковых проводников диплексера, обозначенных цифрами на рис. 2, представлены в табл. 2.

На АЧХ (рис. 2) видно, что разработанная конструкция имеет достаточно высокие характеристики двухполосного фильтра, каналы которого сформированы фильтрами третьего порядка. Этот факт, как и в диплексере, объясняется наличием полюсов затухания на АЧХ, которые возникли благодаря дополнительным связям, образованным входным и выходным резонаторами устройства между смежными с ними резонаторами каналов. Очевидно, что увеличение количества резонаторов в каналах приведет к повышению частотно-селективных свойств устройства. Важно отметить, что в конструкции двухполосного фильтра несложно увеличивать или уменьшать раздвижку между каналами, изменяя лишь соотношение длин полосковых проводников резонаторов, а ширину полос пропускания каналов можно варьировать независимо друг от друга в широких пределах изменением величины зазоров между полосковыми проводниками.

Для проверки точности электродинамического расчета 3D-модели исследуемой микрополосковой конструкции двухполосного фильтра был изготовлен экспериментальный образец устройства на основе геометрических размеров, полученных в результате синтеза топологии его проводников. На рис. 2 представлена фотография изготовленного фильтра, подложка которого имеет стандартные размеры 30×48 мм. Измеренные АЧХ фильтра показаны на рис. 2. Наблюдаемые небольшие расхождения измеренных и рассчитанных характеристик фильтра обусловлены, в первую очередь, неточностью изготовления рисунка полосковых проводников. Однако измеренные уровни минимальных потерь СВЧ-мощности в первом и во втором каналах опытного образца фильтра хорошо совпадают с расчетными значениями и составляют 1.4 и 1.7 дБ соответственно.

ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР

Проведенные исследования рассмотренного двумерного микрополоскового ФК показали возможность создания на его основе оригинальной

конструкции полосно-пропускающего фильтра, топология проводников которого показана на рис. 3. На входе и выходе фильтра присутствуют полуволновые нерегулярные резонаторы, электромагнитно связанные с четвертьволновыми резонаторами микрополоскового ФК. Сигнал, поступающий на вход фильтра, как и в рассмотренных выше устройствах, разделяется между двумя каналами, каждый из которых образован цепочкой из трех параллельных резонаторов. При этом на выходе устройства сигналы, прошедшие по этим каналам, суммируются. Однако важно отметить, что полуволновые резонаторы на входе и выходе фильтра благодаря своим нерегулярностям обеспечивают неодинаковую величину связи с каналами. В рассматриваемой конструкции связь входного резонатора сильнее с резонатором 4 (см. рис. 3), чем с резонатором 6, а на выходе фильтра – наоборот. Именно этот факт позволяет сформировать полосу пропускания фильтра, используя резонансы нижних мод колебаний всех 8 резонаторов конструкции.

Сплошной линией на рис. 3 показана АЧХ прямых потерь S_{21} разработанного фильтра, а штриховой линией представлена частотная зависимость его потерь на отражение S_{11} . Размеры топологии полосковых проводников устройства получены, как и ранее, параметрическим синтезом конструкции с использованием численного электродинамического анализа ее 3D-модели. Для определенности при синтезе фильтра были заданы центральная частота его полосы пропускания

$$f_1 = 1.0 \text{ ГГц и ее относительная ширина } \frac{\Delta f_1}{f_1} = 20\%,$$

которая определялась по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь в полосе пропускания. Задавался также максимально допустимый уровень потерь на отражение в полосе пропускания $S_{11} \leq -14 \text{ дБ}$. Полученные геометрические размеры полосковых проводников фильтра, обозначенных цифрами на рис. 3, представлены в табл. 3.

На рис. 3 видно, что разработанная конструкция полосно-пропускающего фильтра восьмого порядка обладает рядом достоинств. Она имеет, во-первых, высокую крутизну склонов АЧХ, во-вторых, достаточно широкую высокочастотную полосу заграждения и, наконец, в-третьих, большое затухание СВЧ-мощности в полосах заграждения. Очевидно, что все эти достоинства связаны с наличием полюсов затухания на АЧХ фильтра, природа которых, как уже объяснялось, обусловлена дополнительными связями [9] между крайними резонаторами микрополоскового ФК на входе и выходе устройства, которые обеспечиваются благодаря нерегулярным полуволновым резонаторам.

Отметим, что минимальный уровень потерь СВЧ-мощности в полосе пропускания фильтра

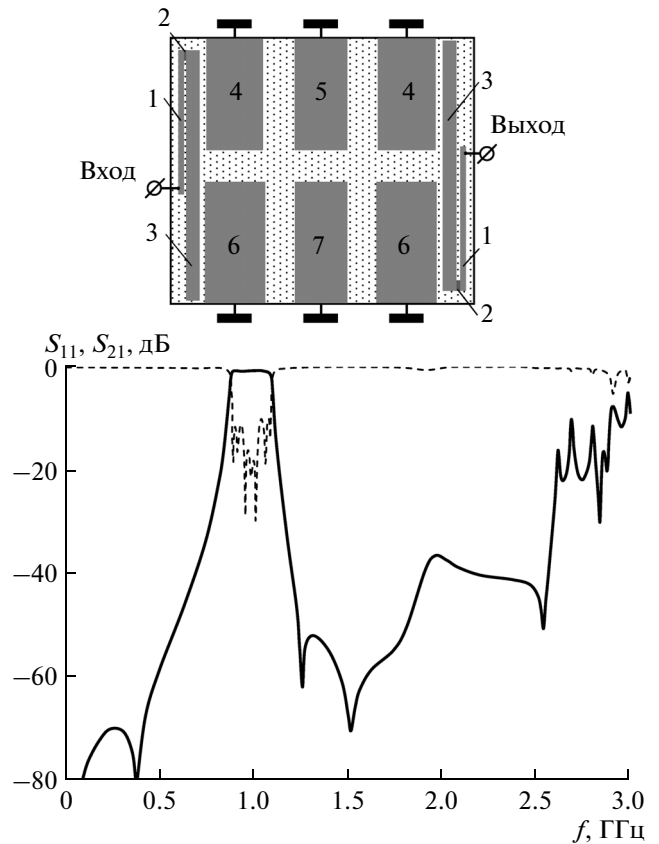


Рис. 3. Топология проводников полосно-пропускающего фильтра и его амплитудно-частотные характеристики. Цифрами обозначены регулярные участки проводников.

составляет 1.4 дБ . В этом устройстве также при необходимости повышения его частотно-селективных свойств достаточно увеличить количество резонаторов в его каналах. Для варьирования ширины полосы пропускания фильтра необходимо одновременно изменять соотношение длин по-

Таблица 3. Размеры топологии полосковых проводников полосно-пропускающего СВЧ-фильтра на двумерном микрополосковом фотонном кристалле ФК

Номер проводника	Размеры проводника, мм ²	Зазоры между проводниками, мм
1	11.10 × 0.15	1 и 4 – 0.65
2	0.60 × 0.15	1 и 6 – 0.65
3	20.00 × 1.05	4 и 5 – 1.80
4	8.80 × 4.45	6 и 7 – 2.05
5	8.80 × 4.40	4 и 6 – 2.60
6	9.80 × 4.60	5 и 7 – 2.60
7	9.80 × 3.60	

Примечание. Смещение от края подложки проводника № 1, 0.10 мм.

лосковых проводников резонаторов в каналах и величины зазоров между полосковыми проводниками. При уменьшении ширины полосы пропускания требуется уменьшение различия длины полосковых проводников в каналах, но увеличение зазоров между проводниками, а при увеличении ширины полосы — наоборот.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованные конструкции на основе двумерного микрополоскового ФК показали возможность создания на их основе различных СВЧ-устройств, в частности, диплексеров, полосно-пропускающих фильтров и фильтров с двумя полосами пропускания. Во всех устройствах поступающий на вход СВЧ-сигнал разделяется между двумя каналами, образованными взаимодействующими микрополосковыми резонаторами ФК. При этом в диплексере, имеющем два выходных порта, происходит частотное разделение сигналов между портами, а в полосно-пропускающем фильтре и двухполосном фильтре сигналы на выходе устройств суммируются.

На основе предложенного подхода можно конструировать частотно-разделительные устройства с большим чем два числом каналов. Например, трехканальное частотно-разделительное устройство не сложно создать на двумерном микрополосковом ФК размерностью 3×3 . В этом случае все резонаторы ФК-структуры могут быть полуволновыми, а для нерегулярного резонатора на входе устройства необходимо подобрать конфигурацию полоскового проводника так, чтобы обеспечить необходимую связь этого резонатора с тремя крайними резонаторами ФК-структуры. Очевидно, что на ФК размерностью 3×3 можно построить фильтр с тремя полосами пропускания и фильтр высокого порядка с одной полосой пропускания. В таких устройствах также необходимо подобрать конфигурацию полоскового проводника нерегулярного резонатора на входе и выходе устройства, обеспечивающего необходимое согласование с микрополосковым ФК.

Миниатюрность разработанных конструкций частотно-селективных СВЧ-устройств на основе микрополосковых ФК-структур и их высокие

электрические характеристики доказывают перспективность их применения в системах связи, радиолокации, радионавигации и в специальной радиоаппаратуре.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук, МК-5942.2014.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев Б.А., Ходенков С.А., Галеев Р.Г., Шабанов В.Ф.* Исследование микрополосковых конструкций широкополосных полосно-пропускающих фильтров // ДАН. 2015. Т. 461. № 1. С. 27–33.
2. *Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Tyurnev V.V.* A Dual-Mode Split Microstrip Resonator and Its Applications in Frequency Selective Devices // *Microwave and Opt. Technol. Lett.* 2013. V. 55. № 9. P. 2186–2190.
3. *Беляев Б.А., Сержантов М.А., Тюрнев В.В.* Микрополосковый диплексер на двухмодовых резонаторах // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 16. С. 25–33.
4. *Hong J.-S., Lancaster M.J.* *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications.* N.Y., Chichester; Weinheim; Brisbane; Singapore; Toronto: Wiley, 2001.
5. *Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф.* Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на сверхрешетках // ДАН. 2004. Т. 395. № 6. С. 756–760.
6. *Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф.* Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах // ДАН. 2005. Т. 400. № 2. С. 181–185.
7. *Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф.* Исследование добротности резонанса примесной моды в микрополосковой модели одномерного фотонного кристалла // ДАН. 2005. Т.403. № 3. С. 319–324.
8. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В.* Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 8. С. 143–148.
9. *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 Opt. Technol. Lett.* 2014. V. 56. № 9. P. 2021–2025.