

УДК 621.3.029.6

ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР-ПОЛЯРИЗАТОР НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ С РЕШЕТКАМИ ПОЛОСКОВЫХ ПРОВОДНИКОВ

© 2020 г. Б. А. Беляев^{1,2,*}, В. В. Тюрнев¹, А. С. Волошин^{1,2,3},
Ан. А. Лексиков¹, Р. Г. Галеев³, академик РАН В. Ф. Шабанов^{1,3}

Поступило 25.03.2020 г.

После доработки 25.03.2020 г.

Принято к публикации 25.03.2020 г.

Исследована новая конструкция многослойного полосно-пропускающего фильтра, в которой каждый резонатор состоит из двух одинаковых диэлектрических слоев с параллельными решетками полосковых проводников на внешних поверхностях и ортогональной к ним решеткой полосковых проводников между слоями. Конструкция фильтра на резонаторах со скрещенными решетками одновременно выполняет функцию поляризатора, прозрачного в заданной полосе частот, если вектор электрического поля волны параллелен внешним полосковым проводникам, но отражает волны с ортогональной поляризацией. Численный электродинамический анализ 3D-модели конструкции хорошо согласуется с результатами измерений опытного образца фильтра-поляризатора пятого порядка с относительной шириной полосы пропускания 14% и центральной частотой 13.4 ГГц. Потери СВЧ-мощности в полосе пропускания устройства при параллельной поляризации электромагнитной волны ~1.2 дБ, а при ортогональной – более 40 дБ.

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, потери на отражение, полосно-пропускающий фильтр, прямые потери

DOI: 10.31857/S2686740020030062

Известно, что использование электромагнитных волн с определенной поляризацией в системах связи, радиолокации, радионавигации, а также в специальной радиоаппаратуре не только повышает помехозащищенность, но и существенно улучшает характеристики оборудования. В частности, применение двухполяризационной технологии при передаче информации в радиорелейной связи увеличивает емкость канала [1], передавая сигналы в одной полосе частот, но на двух ортогональных поляризациях электромагнитных волн. Использование также двух чередующихся ортогональных поляризаций в многоканальных системах связи с близкими полосами пропускания позволяет значительно уменьшить взаимное влия-

ние смежных каналов друг на друга, что очень важно, когда полосно-пропускающие фильтры не обеспечивают требуемую развязку между каналами.

В настоящее время при конструировании поляризаторов широко используются так называемые частотно-селективные поверхности (ЧСП), представляющие собой диэлектрические слои с нанесенными на них разнообразными резонансными структурами из полосковых проводников. При этом ЧСП позволяют трансформировать линейно-поляризованную электромагнитную волну в волну с круговой поляризацией [2], но в сравнительно узкой полосе частот, или пропускать с малыми потерями волны с определенной линейной поляризацией, эффективно отражая волны с ортогональной поляризацией [3]. Исследования показывают, что конструкции поляризаторов на ЧСП одновременно являются полосно-пропускающими фильтрами, способными работать в дециметровом, сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн [3–6]. В оптическом диапазоне поляризатором может служить одномерный фотонный кристалл на слоистых диэлектрических гетероструктурах [7], который также одновременно служит полосно-пропускающим фильтром.

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского
Федерального исследовательского центра
“Красноярский научный центр” Сибирского отделения
Российской академии наук, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет,
Красноярск, Россия

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

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

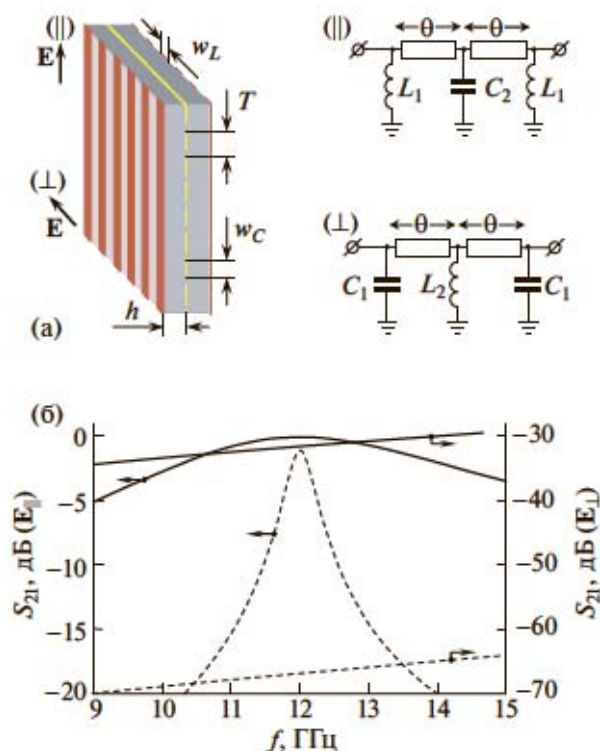


Рис. 1. а – Конструкция резонатора из двух диэлектрических слоев со скрещенными решетками полосковых проводников и его эквивалентные схемы для двух поляризаций ($E_{||}$ и E_{\perp}) падающей электромагнитной волны, б – частотные зависимости прямых потерь резонаторов.

Основным недостатком поляризаторов на ЧСП, использующих резонансные структуры из полосковых проводников, является сравнительно низкая собственная добротность полосковых резонаторов, что приводит к большим потерям мощности в полосе пропускания устройств. Более перспективными являются многослойные диэлектрические конструкции, в которых сами диэлектрические слои являются высокодобротными полуволновыми резонаторами, а 1D- или 2D-структуры из полосковых проводников на их поверхностях служат зеркалами с заданной отражательной способностью, как это продемонстрировано на полосно-пропускающих фильтрах в работах [8, 9]. В этих устройствах период полосковых структур выбирался значительно меньше длины волны, чтобы их резонансные частоты находились значительно выше полосы пропускания фильтров и не сужали высокочастотную полосу заграждения.

Конструкция [8], в которой между диэлектрическими слоями использовались одномерные регулярные решетки из параллельных полосковых проводников, является полосно-пропускающим фильтром только для линейной поляризации электромагнитных волн, когда вектор электрического поля волны $E_{||}$ направлен вдоль полосковых

проводников (параллельная поляризация). Однако в случае, когда вектор электрического поля E_{\perp} перпендикулярен направлению полосковых проводников (ортогональная поляризация), слоистая конструкция теряет свойства фильтра и становится почти прозрачной в широкой области частот, включая полосы заграждения. Очевидно, что на частотах полос заграждения фильтр [8] может служить поляризатором, эффективно отражая волны параллельной поляризации и пропускающая волны ортогональной поляризации. Недостатком такого поляризатора является большая неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для волн ортогональной поляризации. В настоящей работе проведены исследования оригинальных многослойных фильтров-поляризаторов, резонаторы которых состоят не из одного, а из двух слоев [10].

КОНСТРУКЦИЯ ФИЛЬТРА-ПОЛЯРИЗАТОРА

Фильтр-поляризатор строится на резонаторах, конструкция которых представляет собой два одинаковых диэлектрических слоя с параллельными решетками полосковых проводников на внешних поверхностях и ортогональной к ним решеткой полосковых проводников между слоями (рис. 1а). Период T у всех решеток одинаков, при этом он много меньше длины волны на собственной частоте первой моды колебаний резонатора (субволновые решетки). Справа на рис. 1а представлены эквивалентные схемы резонатора для параллельной ($E_{||}$) и ортогональной (E_{\perp}) поляризации электромагнитной волны, падающей из свободного пространства. Электрическая длина θ определяется толщиной слоев h и их относительной диэлектрической проницаемостью ϵ . Для параллельной поляризации волны полосковые проводники на внешних слоях являются индуктивностями L_1 , зависящими от ширины проводников, а полосковые проводники на внутренних слоях образуют емкость C_2 , зависящую от зазоров между проводниками. Для ортогональной поляризации, напротив, наружные решетки проводников образуют емкости C_1 , а внутренние – индуктивности L_2 .

Важно отметить, что исследуемая конструкция проявляет резонансные свойства только для волн продольной поляризации, если зазоры между проводниками у наружных решеток не слишком малы. В этом случае связь резонатора с внешним пространством, а значит и его нагруженная добротность, регулируется шириной полосковых проводников наружных (индуктивных) решеток. Такие субволновые решетки для электромагнитных волн играют роль зеркал с регулируемой отражательной способностью: чем уже полосковые проводники, тем меньше отражения, тем больше

связь с пространством и тем ниже добротность резонатора. Очевидно, что при уменьшении или увеличении ширины этих проводников резонансная частота конструкции соответственно будет уменьшаться или увеличиваться. К тому же, уменьшая или увеличивая зазоры между проводниками внутренних (емкостных) решеток, можно существенно понижать или повышать резонансную частоту рассматриваемой структуры.

На рис. 1б представлены АЧХ двух резонаторов на диэлектрических подложках RO4003C фирмы "Rogers Corporation", толщиной $h = 0.508$ мм, с $\epsilon = 3.38$, "склеенных" препрегом RO4450B, толщиной 0.127 мм, с $\epsilon = 3.54$, изготовленным той же фирмой. Резонаторы отличались шириной полосковых проводников наружных w_L и внутренних w_C решеток (см. рис. 1а), при этом период обеих решеток был одинаков $T = 4.8$ мм. АЧХ резонаторов рассчитывались численным электродинамическим анализом их 3D-моделей в пакете программ "CST Microwave Studio" для двух линейных поляризаций падающих волн. В первом резонаторе, характеристики которого изображены сплошной линией на рис. 1б, ширина проводников $w_L = 0.2$ мм, а во втором, характеристики которого изображены штриховой линией, $w_L = 2.0$ мм. Для объективности сравнения оба резонатора настраивались на одну центральную частоту $f_0 = 12$ ГГц изменением ширины проводников w_C внутренних решеток. При этом $w_C = 3.51$ мм для первого резонатора и $w_C = 4.52$ мм – для второго. Видно, что двухслойный резонатор обладает ярко выраженными поляризационными свойствами, причем поляризационная развязка (разница прохождения СВЧ мощности для двух поляризаций на резонансной частоте) у первого резонатора, имеющего нагруженную добротность $Q = 2.5$, составляет примерно 30 дБ, а у второго резонатора с добротностью $Q = 29$ – более 50 дБ. Важно отметить, что большие поляризационные развязки резонаторов связаны с сильным отражением СВЧ мощности от рассмотренной конструкции при ортогональной поляризации падающих волн. Основным недостатком поляризатора на исследованном резонаторе является узкая рабочая полоса частот.

Существенно расширить рабочую полосу частот и одновременно увеличить развязку для двух поляризаций прошедших электромагнитных волн позволяют многорезонаторные конструкции. На рис. 2 представлены конструкции фильтров-поляризаторов, состоящие из трех (рис. 2а) и пяти (рис. 2б) взаимодействующих резонаторов. На рис. 2 показаны амплитудно-частотные характеристики этих устройств, имеющих одинаковую относительную ширину полосы пропускания $\Delta f/f_0 = 14\%$ измеренную по уровню -3 дБ от уровня минимальных потерь, и одинаковую центральную

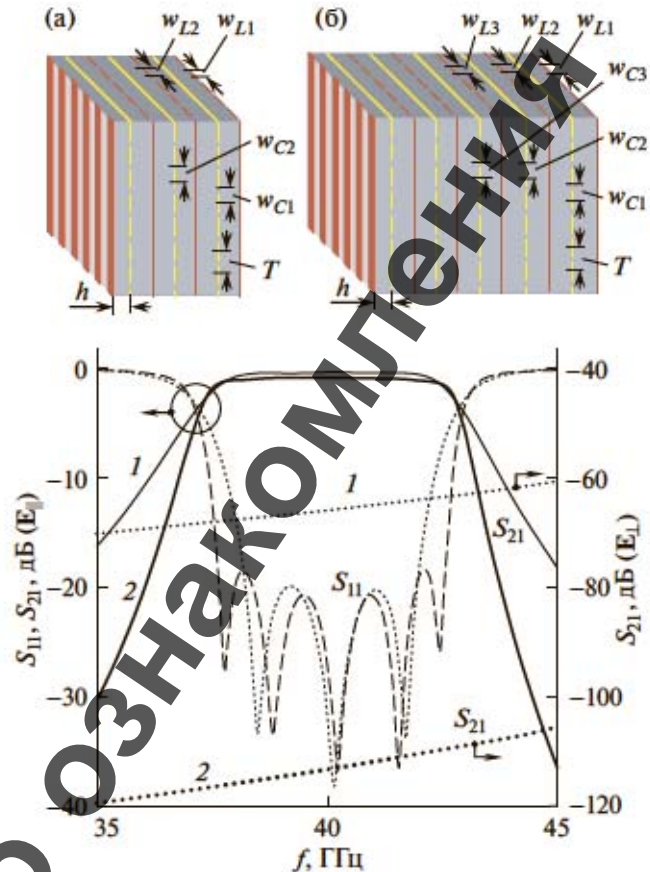


Рис. 2. Конструкции фильтров-поляризаторов третьего (а) и пятого (б) порядка, и их АЧХ соответственно – 1 и 2. Сплошные линии – при E_{\parallel} , точки – при E_{\perp} падающей волны.

частоту полосы пропускания $f_0 = 40$ ГГц. Вход и выход фильтров-поляризаторов окружает свободное пространство, поэтому конструкции симметричны относительно центральной плоскости. Слоистые структуры составлены из диэлектрических пластин RO3035C фирмы "Rogers Corporation" толщиной $h = 0.25$ мм с $\epsilon = 3.5$, металлизированных медью толщиной 9 мкм. Между слоями для их "склеивания" располагались слои препрега RO4450B толщиной 0.127 мм с $\epsilon = 3.54$. В обеих структурах период полосковых проводников во всех решетках был одинаков $T = 2$ мм.

Настройка полос пропускания для E_{\parallel} поляризации падающей волны, когда устройства работают как полосно-пропускающие фильтры, проводилась ручным параметрическим синтезом с использованием численного электродинамического анализа 3D-моделей в пакете программ "CST Microwave Studio". Фильтры считались настроенными, если максимумы уровней отражений СВЧ мощности на зависимостях $S_{11}(f)$ не превышали -20 дБ, что обеспечивало высокую равномерность прямых потерь $S_{21}(f)$ в полосе пропускания

Таблица 1. Ширина полосковых проводников решеток фильтров-поляризаторов третьего и пятого порядков с центральной частотой полосы пропускания 40 ГГц

Число резонаторов	w_{L1} , мм	w_{C1} , мм	w_{L2} , мм	w_{C2} , мм	w_{L3} , мм	w_{C3} , мм
3	0.20	1.25	0.93	1.42	—	—
5	0.16	0.90	0.93	1.23	1.42	1.42

Таблица 2. Ширина проводников металлических решеток фильтра-поляризатора пятого порядка с относительной шириной полосы пропускания $\Delta f/f_0 = 14\%$ и центральной частотой полосы пропускания $f_0 = 13.4$ ГГц

w_{L1} , мм	w_{C1} , мм	w_{L2} , мм	w_{C2} , мм	w_{L3} , мм	w_{C3} , мм
0.20	4.13	2.63	4.47	2.69	4.48

ния. Оптимальная настройка связей резонаторов друг с другом, а крайних резонаторов со свободным пространством осуществлялась так же, как и в [8], подбором ширины полосковых проводников “индуктивных” решеток w_{Li} ($i = 1-3$). Однако подстройка резонансных частот резонаторов, осуществлялась не подбором толщины диэлектрических слоев, как в [8, 9], а подбором ширины полосковых проводников “емкостных” решеток w_{Ci} . Ширины полосковых проводников всех решеток оптимально настроенных фильтров приведены в табл. 1.

Сравнивая амплитудно-частотные характеристики (рис. 2) трехрезонаторного (1) и пятирезонаторного (2) фильтров-поляризаторов, видно, что поляризационная развязка на частотах полосы пропускания для первого из них более 60 дБ, а для второго — более 100 дБ. Однако минимальные потери СВЧ мощности в полосе пропускания у первого устройства составили 0.48 дБ, а у второго — 0.84 дБ. При этом, как и следовало ожидать, частотно-селективные свойства у фильтра-поляризатора с большим числом резонаторов значительно выше.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ФИЛЬТРА-ПОЛЯРИЗАТОРА

Для экспериментальной проверки работоспособности исследованной слоистой конструкции фильтра-поляризатора был изготовлен опытный образец устройства, состоящего из пяти двухслойных резонаторов, имеющего площадь 300×300 мм². Десятислойная структура изготавливалась из диэлектрических пластин RO4003C толщиной $h = 0.508$ мм, $\epsilon = 3.38$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 1.5 \times 10^{-3}$, металлизированных медью толщиной 16 мкм. По технологии

многослойных печатных плат диэлектрические пластины соединялись в монолитную конструкцию препрегом RO4450B, толщиной 0.127 мм, $\epsilon = 3.54$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 4.0 \times 10^{-3}$. Предварительно устройство было синтезировано также ручным параметрическим синтезом с использованием численного электродинамического анализа его 3D-модели в пакете программ CST microwave Studio. Для определенности были заданы одинаковыми периоды индуктивных и емкостных решеток полосковых проводников у всех резонаторов $T = 4.8$ мм, а также зафиксирована ширина проводников индуктивных решеток наружных резонаторов $w_{L1} = 0.2$ мм (см. рис. 2б). При этих условиях в результате синтеза получились следующие характеристики устройства: относительная ширина полосы пропускания $\Delta f/f_0 = 14\%$, центральная частота полосы пропускания $f_0 = 13.4$ ГГц, минимальные потери СВЧ мощности в полосе пропускания 1.2 дБ и поляризационная развязка более 200 дБ. Размеры полосковых проводников синтезированного фильтра-поляризатора представлены в табл. 2.

На рис. 3 показана фотография монолитного устройства после его изготовления (а), а также фотографии фрагментов наружной — индуктивной (б) и центральной — емкостной (в) решеток полосковых проводников, сделанные до прессования слоев. Ниже под фотографиями на рис. 3 сплошной линией представлена частотная зависимость прямых потерь S_{21} , а штриховой линией — частотная зависимость потерь на отражение S_{11} , рассчитанные электродинамическим анализом 3D-модели фильтра-поляризатора. Результаты измерений прямых потерь $S_{21}(f)$, снятые на изготовленном образце фильтра-поляризатора для параллельной (1) и ортогональной (2) поляризаций векторным анализатором цепей R&S ZVA 40, показаны на рис. 3 точками. Измеренная относительная ширина полосы пропускания опытного образца $\Delta f/f_0 = 14\%$ и ее центральная частота $f_0 = 13.4$ ГГц хорошо совпадают с рассчитанными значениями на 3D-модели. Однако измеренная поляризационная развязка, хотя и превышает 40 дБ, но значительно меньше рассчитанной, что, очевидно, обусловлено малой площадью экспериментального образца фильтра-поляризатора. Действительно, в эксперименте расстояние между измерительными антеннами и опытным образцом нельзя делать слишком малым, чтобы не нарушать структуру плоской электромагнитной волны. Но даже при сравнительно небольших расстояниях антенн до образца наблюдается частичное прохождение СВЧ мощности с передающей антенны на приемную за счет дифракции волн на краях слоистой структуры. Естественно, что этот эффект особенно заметен при ортогональной поляризации падающих электромагнит-

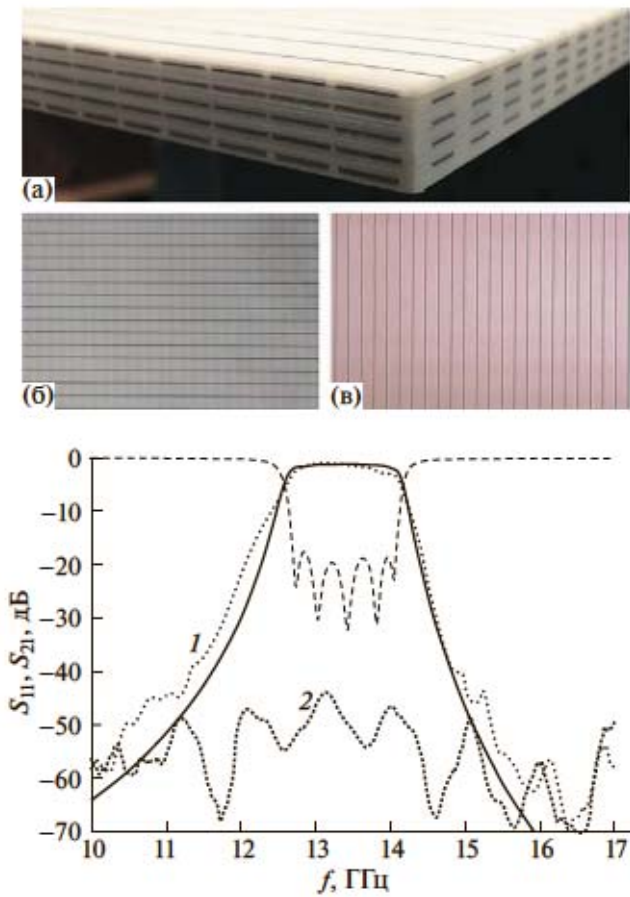


Рис. 3. Рассчитанные АЧХ фильтра-поляризатора пятого порядка при E_1 падающей волны: прямые потери – сплошная, потери на отражение – штриховая линия. Точки – измеренные характеристики прямых потерь опытного образца: 1 – при E_1 , 2 – E_2 . Вверху фотография устройства (а) и фрагменты его наружных (б) и внутренних (в) решеток полосковых проводников.

ных волн, когда происходит сильное отражение этих волн от фильтра-поляризатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследована новая оригинальная конструкция многослойного полосно-пропускающего фильтра, который одновременно является поляризатором электромагнитных волн. Фильтр прозрачен в полосе пропускания для волн одной линейной поляризации, но эффективно отражает волны с ортогональной поляризацией. Такой эффект достигается тем, что каждый резонатор в устройстве состоит из двух диэлектрических слоев с параллельными решетками полосковых проводников на внешних поверхностях двухслойной структуры и ортогональной к ним решеткой полосковых проводников между слоями. При этом все решетки субволновые, т.е. период решеток много меньше длины волны на частоте

первой моды колебаний резонатора. Решетки на внешних поверхностях резонаторов являются зеркалами, отражательная способность которых регулируется шириной полосковых проводников. Это позволяет в многослойном фильтре настраивать оптимальные связи резонаторов друг с другом, а крайних резонаторов – со свободным пространством при формировании заданной полосы пропускания. При определенной линейной поляризации падающих электромагнитных волн, когда устройство работает как полосно-пропускающий фильтр, решетки проводников между слоями каждого резонатора играют роль сосредоточенных емкостей, но они же играют роль индуктивностей для ортогональной поляризации, обеспечивая сильное отражение волн на входе. Важно отметить, что величиной зазоров между проводниками этих внутрирезонаторных решеток можно в широких пределах изменять частоты резонаторов, что, очевидно, необходимо при настройке характеристик заданной полосы пропускания фильтра. Возможность изменения частоты резонаторов позволяет не только использовать в фильтрах-поляризаторах одинаковые диэлектрические слои, что, несомненно, является одним из достоинств конструкции, но и в широких пределах изменять центральную частоту полосы пропускания устройства.

Высокие электрические характеристики фильтра-поляризатора и хорошее согласие электродинамического анализа его 3D-модели с результатами измерений на экспериментальном образце доказывают перспективность использования исследованной конструкции в радиотехнических системах. Например, в системах радиорелейной связи при использовании двухполяризационной технологии передачи информации, позволяющей увеличивать емкость канала.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России в ходе реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства (соглашение № 075-11-2019-078 от 12/13/2019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слюсар В.И. Современные тренды радиорелейной связи // Технологии и средства связи. 2014. № 4. С. 32–36.
2. Akbari M., Gupta Sh., Zorbakhsh S., Sebak A.R. A Linear to Circular Polarizer Based on Frequency Selective Surface Operating 30 GHz Applications. // 17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM). 2016. <https://doi.org/10.1109/antem.2016.7550113>.
3. Mostajabi Z., Rashed-Mohassel J. Short Wire Ultra-Wideband Filter and Polarizer // Proc. 45th European

- Microwave Conference. Paris, France. 2015. P. 343–346.
4. *Sanz-Izquierdo B., "Ted" Parker E.A., Robertson J.B., Batchelor J.C.* // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2010. V. 58. № 3. P. 690–696.
 5. *Ghosh S., Lim S.* A Miniaturized Bandpass Frequency Selective Surface Exploiting Three-Dimensional Printing Technique // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2019. V. 18. № 7. P. 1322–1326.
 6. *Liu Y., Yu Z., Liu W., Jia Q., Lu Y.* Terahertz Filters and Polarizers Using 2-D Subwavelength Hole Arrays // IEEE Photonics J. 2019. V. 11. № 1. P. 1–7.
 7. *Zhang W., Liu J., Huang W.P., Zhao W.* Polarization bandpass filter based on one-dimensional photonic crystal heterostructures. // J. Optical Society of America B. 2009. V. 26. № 10. P. 1845–1851.
 8. *Belyaev B.A., Tyurnev V.V.* Multilayer Bandpass Filter with Extended Lower and Upper Stop Bands // Optics Letters. 2015. V. 40. № 18. P. 4333–4335.
 9. *Беляев Б.А., Тюрнев В.В., Волошин А.С., Галеев Р.Г.* Микроволновый полосно-пропускающий фильтр на диэлектрических слоях с металлическими сетками // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. Вып. 10. С. 3–11.
 10. *Belyaev B. A., Tyurnev V.V.* Multilayer Bandpass Filter-Polarizer with Stopband Extension Far beyond Twofold Center Frequency // Microwave and Optical Technology Letters. 2018. V. 60. № 3. P. 630–634.

BANDPASS FILTER-POLARIZER ON DIELECTRIC LAYERED STRUCTURE WITH STRIP CONDUCTOR GRIDS

**B. A. Belyaev^{a,b}, V. V. Tyurnev^a, A. S. Voloshin^{a,b,c}, An. A. Leksikov^a, R. G. Galeev^c,
and Academician of the RAS V. F. Shabatov^{a,c}**

^a *Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Centre" of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

^b *Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation*

^c *Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation*

A new design of a multilayer bandpass filter is studied, in which each resonator consists of two identical dielectric layers with parallel lattices of strip conductors on the outer surfaces, and an orthogonal lattice of strip conductors between the layers. The filter design based on crossed lattices simultaneously performs the function of a polarizer, transparent in a required frequency band, if the electric field vector of an incident wave is parallel to the external strip conductors, but reflects waves with orthogonal polarization. Electrodynamic simulation of the 3D design model is in good agreement with the measured results for the prototype of fifth-order filter-polarizer with 14% of a fractional bandwidth and a central frequency 13.4 GHz. The passband loss in the device for the parallel polarization of the electromagnetic wave is ~1.2 dB, for the orthogonal one is more than 40 dB.

Keywords: frequency response, return loss, passband filter, insertion loss