

МОНОЛИТНЫЙ ФИЛЬТР НА ПОЛОСКОВЫХ РЕЗОНАТОРАХ С РАСЩЕПЛЕННЫМ ПРОВОДНИКОМ

А.О. Афонин^{1,2}, н.с., к.т.н., **А.В. Угрюмов^{1,2}**, н.с., к.т.н.,

И.В. Подшивалов³, аспирант, **Д.К. Огородников³**, аспирант.

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, г. Красноярск, Россия

²АО «НПП «Радиосвязь», г. Красноярск, Россия

³Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

E-mail: afoninao@iph.krasn.ru

Полосно-пропускающие фильтры (ППФ) являются важнейшими элементами систем связи, радионавигации, радиолокации, измерительной и специальной радиоаппаратуры. Они зачастую определяют массогабаритные и электрические характеристики итогового изделия, и, что немаловажно, его конечную стоимость. В этой связи актуальной является задача разработки новых миниатюрных конструкций фильтров, обладающих высокими частотно-селективными свойствами, технологичностью и низкой стоимостью при массовом производстве. Для ее решения в настоящее время активно исследуются различные конструкции фильтров на полосковых многопроводниковых резонаторах [1]. Такие резонаторы являются миниатюрными и при этом обладают сравнительно высокой собственной добротностью. Для реализации таких конструкций широко используется технология создания многослойных интегральных схем СВЧ на основе керамики с низкой температурой отжига (*LTCC*) [2]. В случае же массового производства СВЧ-устройств, особенно хорошо себя зарекомендовала технология многослойных печатных плат (*PCB*-технология) [3].

В *PCB*-технологии диэлектрические слои соединяются между собой специальным материалом – препрегом, влияние характеристик которого может существенно сказываться на характеристиках конечных устройств, особенно, на частотах выше 5 ГГц. В настоящей работе описана конструкция монолитного полоскового фильтра, созданного по *PCB*-технологии, у которого конфигурация проводников резонаторов позволила практически исключить влияние препрега на его характеристики, даже в сантиметровом диапазоне длин волн.

На рис. 1 приведена 3D-модель (в разрезе) разработанной конструкции монолитного полоскового фильтра пятого порядка. Фильтр состоит из двух диэлектрических слоев, разделенных слоем препрега. Топология проводников расположена на верхнем слое нижнего диэлектрика (зеленым цветом) и на нижнем слое верхнего (оранжевым цветом). Внешняя металлизация диэлектрических пластин играет роль экрана фильтра. Как видно из рисунка, резонатор фильтра состоит из двух расщепленных препрегом проводников, закороченных на экран концами с одной стороны. При этом верхний проводник резонатора имеет разрез. Такая конфигурация резонатора, во-первых, позволила нивелировать влияние характеристик препрега на собственные свойства резонатора, т.к. на частоте четвертьволнового резонанса разность потенциалов между противоположными точками на верхнем и нижнем проводнике равна нулю. Во-вторых, добавление поперечной щели на верхнем проводнике позволило сдвинуть вверх частоты паразитного резонанса, что привело к расширению высокочастотной полосы заграждения.

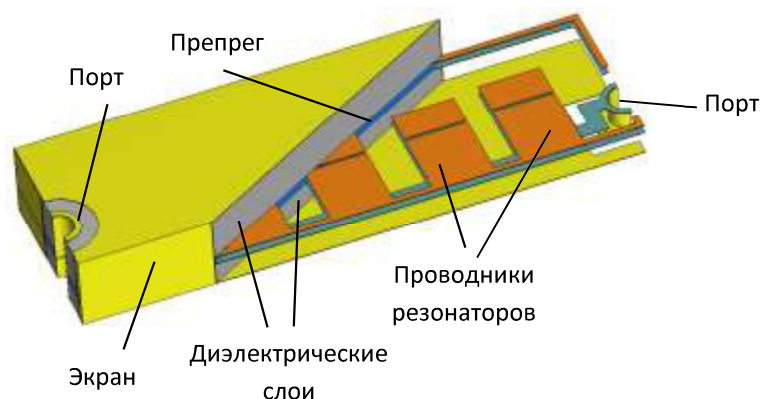


Рис. 1. 3D-модель спроектированного фильтра

В пакете программ *CST Studio Suite* был спроектирован фильтр пятого порядка по заданным параметрам: центральная частота полосы пропускания $f_0 = 9.43$ ГГц с относительной шириной полосы пропускания (по уровню -3 дБ) $\Delta f/f_0 = 6.0\%$. Уровень обратных потерь не выше -20 дБ. Настройка фильтров осуществлялась подбором длины проводников, зазоров между ними и величины кондуктивной связи резонаторов с портами. По результатам моделирования были получены следующие параметры модели: длина проводников резонаторов составила $l_{1,5} = 3.83$ мм, $l_{2,4} = 3.71$ мм и $l_3 = 3.69$ мм, ширина всех резонаторов $w = 2$ мм, ширина щелей 0.1 мм. Вход и выход фильтра подключены кондуктивно к портам с волновым

сопротивлением 50Ω . В качестве материала диэлектрических слоев был выбран RO4350 ($\epsilon_R = 3.66$, $\text{tg}\delta_R = 0.0037$) толщинами 0.762 мм для нижнего слоя и 1.524 мм для верхнего. Препрег из материала RO4450F ($\epsilon_R = 3.52$ и $\text{tg}\delta_R = 0.0041$) имел толщину 0.102 мм. Размеры фильтра составили $18.0 \times 5.4 \times 2.1$ мм, а масса устройства всего 0.5 г.

По результатам моделирования была изготовлена партия фильтров из 400 штук на единой многослойной печатной плате (МПП). Фотография одного из опытных образцов вместе с его частотными характеристиками приведена на рис. 2. Пунктирной линией показан результат моделирования, сплошными – результат измерений. Видно, что имеется хорошее согласие между результатами моделирования и экспериментом. Измеренная центральная частота полосы пропускания составила $f_0 = 9.45$ ГГц, а ее относительная ширина (по уровню -3 дБ) $\Delta f/f_0 = 5.7\%$. Минимальные вносимые потери в полосе пропускания фильтра составили 4.3 дБ, а уровень отражений в полосе пропускания не превышает -20 дБ. Стоит отметить высокую повторяемость характеристик у устройств со всей МПП.

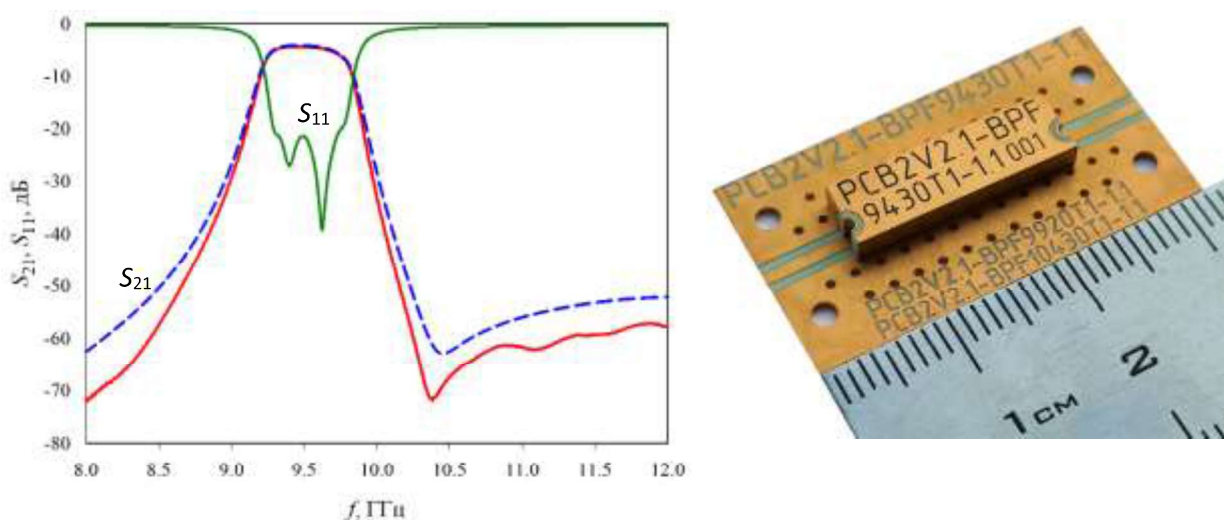


Рис. 2. АЧХ фильтра (пунктирная линия – результат моделирования, сплошные линии – результат измерений) и фотография образца на измерительном полигоне

Таким образом, разработана монолитная конструкция миниатюрного ППФ сантиметрового диапазона длин волн, предназначенная для серийного производства по *PCB*-технологии. Фильтры имеют низкую себестоимость при массовом производстве, а также высокую повторяемость характеристик, что доказывает

перспективность использования разработанной конструкции в радиотехнических системах.

Работа выполнена в рамках Соглашения №470 от 30.08.22 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. Multilayered Multiconductor Stripline Resonator and its Application to Bandpass Filter with Wide Stopband // Microwave and Optical Technology Letters, 59 (9), 2212 (2017).
2. Kholodnyak D., Kolmakov Ya. A., Vendik I., Trabert J.F., Mueller J., Drue K.-H., Hein M. Bandpass Filters for Ka-Band Satellite Communication Applications Based on LTCC // Proc. 38th European Microwave Conf. (Amsterdam, 2008), p. 211.
3. Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Leksikov A.A., Bal'va Y.F., Galeev R.G. A Monolithic Miniature Multi-Conductor Strip-Resonator Bandpass Filter // Technical Physics Letters, 47 (9), 645 (2021).

ВЛИЯНИЕ ПОЛИТОНАЛЬНОЙ ПОМЕХИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ БЕСПОРОГОВОГО ПОИСКА ШУМОПОДОБНОГО СИГНАЛА

Е. В. Кузьмин, доцент каф. «Радиотехника», канд. техн. наук, доцент,

Институт инженерной физики и радиоэлектроники

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», (г. Красноярск)

e-mail: ekuzmin@sfu-kras.ru

Ф. Г. Зограф, доцент каф. «Приборостроение и наноэлектроника», канд. техн.

наук, доцент, Институт инженерной физики и радиоэлектроники

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», (г. Красноярск)

e-mail: fzograf@sfu-kras.ru

Радиопомехи различного вида способны дестабилизировать работу многих радиоэлектронных систем (РЭС), в частности – информационно-измерительных