

Управляемые СВЧ-фильтры на сегнетоэлектрических подложках и полупроводниковых варикапах

В.О. Бобровская¹, Д.М. Альжанов¹, С.П. Зубко¹, Н.Ю. Медведева¹, П.А. Петрова¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе исследовались управляемые полосно-пропускающие фильтры с использованием различных элементов электрического управления. По результатам были разработаны конструкции управляемых фильтров с навесными сегнетоэлектрическими конденсаторами, с локальным напылением сегнетоэлектрика и фильтры на полупроводниковых варикапах, построены их передаточные характеристики.

Ключевые слова: кольцевой резонатор, СВЧ-фильтр, сегнетоэлектрик, варикап

1. Введение

СВЧ-фильтры активно используются в различных областях электроники, таких как радиотехника, телекоммуникации и радиомониторг, для выделения, подавления и поиска заданных частот. Развитие систем связи и загрязнение радиопространства ведет к увеличению количества используемых СВЧ-фильтров, однако снизить стоимость и массогабаритные размеры устройства можно, используя перестраиваемые СВЧ-фильтры. Проектирование и создание полосно-пропускающих фильтров, обладающих малыми потерями и размерами, а также эффективной управляемостью, позволяет увеличить производительность систем связи и улучшить пропускную способность [1,2].

2. Управляемый полосно-пропускающий фильтр на кольцевых резонаторах с использованием сегнетоэлектрических конденсаторов.

Все представленные в работе фильтры были реализованы на отрезках микрополосковой линии передачи. В качестве диэлектрической подложки использовался поликор с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9.8$ и тангенсом угла потерь $\text{tg}\delta = 0.001$, толщиной 1 мм, в качестве проводника использовалась медь толщиной 50 мкм.

Топология разработанного микрополоскового фильтра с навесными сегнетоэлектрическими планарными конденсаторами представлена на рисунке 2. Она содержит 4 кольцевых резонатора разной длины и разной ширины, крайние кольца имеют резонансный пик на частоте 2.98 ГГц, а центральные – на частоте 3.02 ГГц. СВЧ-порты связаны с крайними кольцами с помощью неуправляемых конденсаторов емкостью 2 пФ

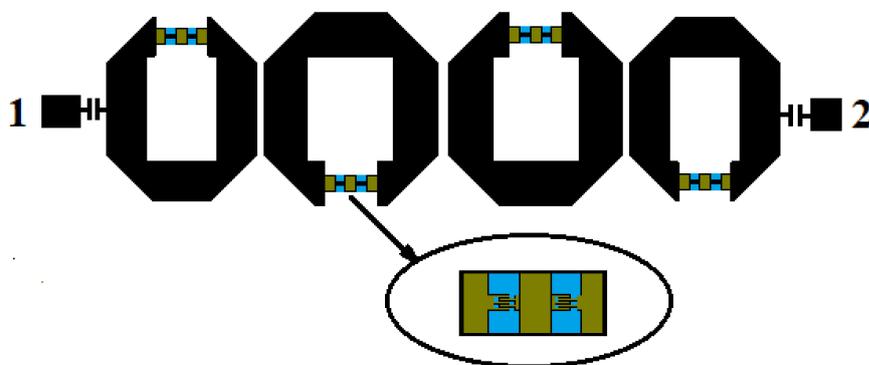


Рисунок 1 – Топология фильтра

На врезке показан управляемый сегнетоэлектрический конденсатор, который монтируется в разрыв кольца навесным монтажом. Сегнетоэлектрический конденсатор представляет собой последовательное соединение двух планарных конденсаторов встречно-штыревой конструкции. Экспериментально измеренная емкость конденсатора в отсутствие смещающего напряжения составляет 0.26 пФ, при подаче $U_{\max} = 300$ В – 0.14 пФ. Габаритные размеры фильтра составили: 27.7×6.3 мм. Смещающее напряжение подается на центральную контактную площадку сегнетоэлектрического конденсатора.

На рисунке 3 представлена рассчитанная АЧХ фильтра, показанного на рисунке 1. Перестройка по частоте составила 420 МГц, а полоса пропускания возрастает с 392 МГц до 476 МГц. При перестройке фильтра коэффициент отражения незначительно ухудшается.

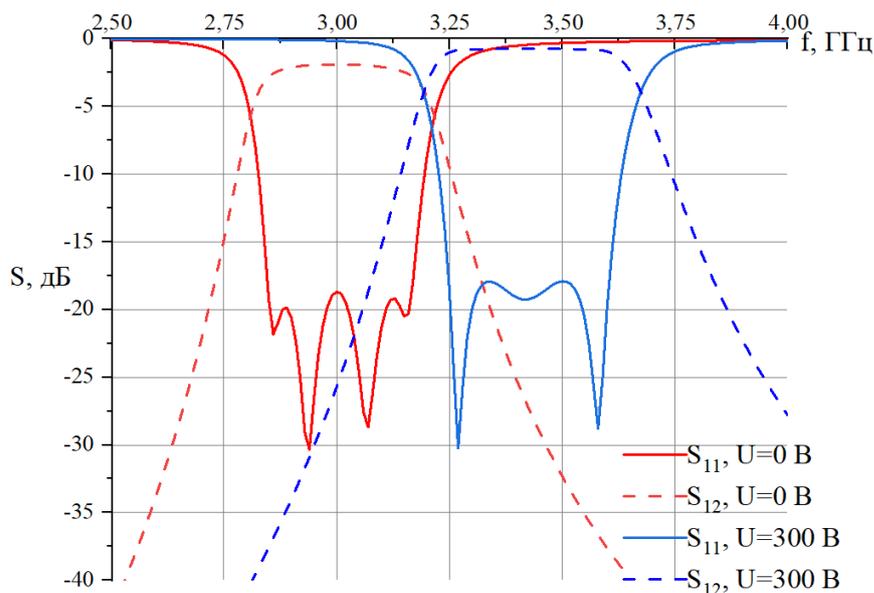


Рисунок 2 – АЧХ фильтра (электродинамическое моделирование)

Стоит отметить, что навесной монтаж усложняет и замедляет процесс изготовления. По этой причине был рассмотрен вариант с локальным напылением сегнетоэлектрика, позволяющая конструировать фильтры в виде монолитных схем.

3. Управляемый полосно-пропускающий фильтр на кольцевых резонаторах с локальным напылением сегнетоэлектрика

На рисунке 3 показана топология фильтра с использованием локального напыления сегнетоэлектрика под металлизацией в области разрывов в кольцевых резонаторах. При подаче смещающего напряжения емкость планарных конденсаторов, образованных разрывами в кольцах, уменьшается, уменьшая электрическую длину, а резонансная частота сдвигается в сторону больших значений.

Общая емкость двух зазоров шириной 10 мкм каждый при $U=0$ В составляет 0.49 пФ, а при подаче $U_{\max}=300$ В уменьшается до 0.27 пФ, т. е. управляемость составила 1.81. Параметры сегнетоэлектрического слоя рассчитаны по моделям из [3] исходя из размеров конденсатора и его экспериментально измеренных вольт-фарадных характеристик и соответствуют сегнетоэлектрику, использованному в навесных конденсаторах в п.п.2: $\epsilon_r(U_{\text{см}} = 0 \text{ В}) = 911$, $\epsilon_r(U_{\text{см}} = 300 \text{ В}) = 342$, $\text{tg}\delta = 0.02$.

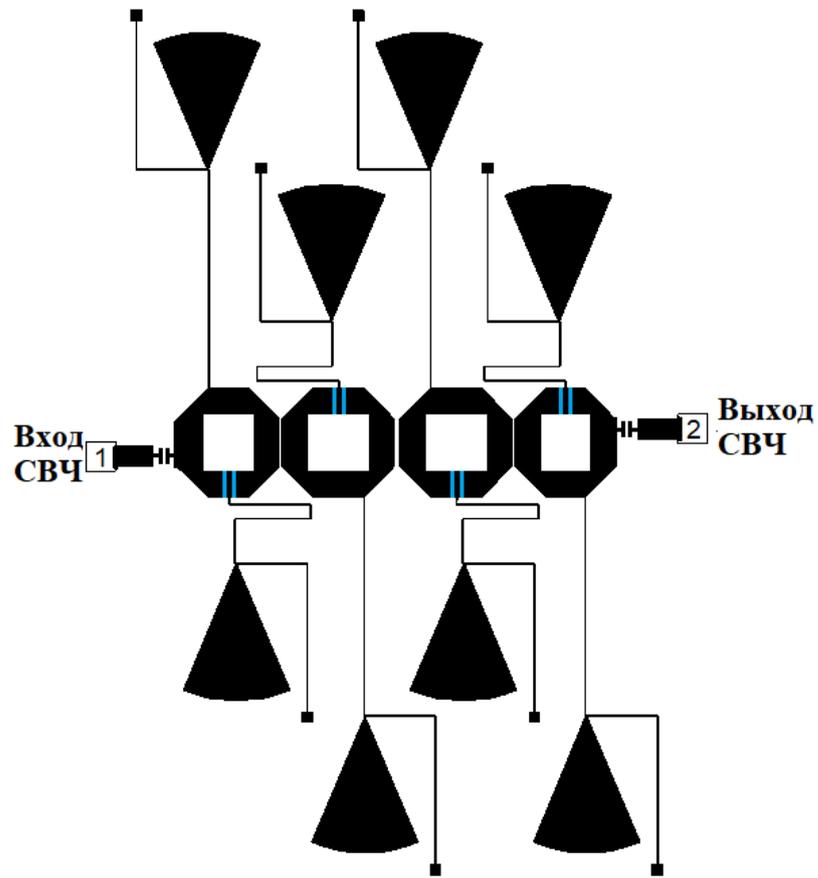


Рисунок 3 – Топология фильтра с локальным напылением сегнетоэлектрика

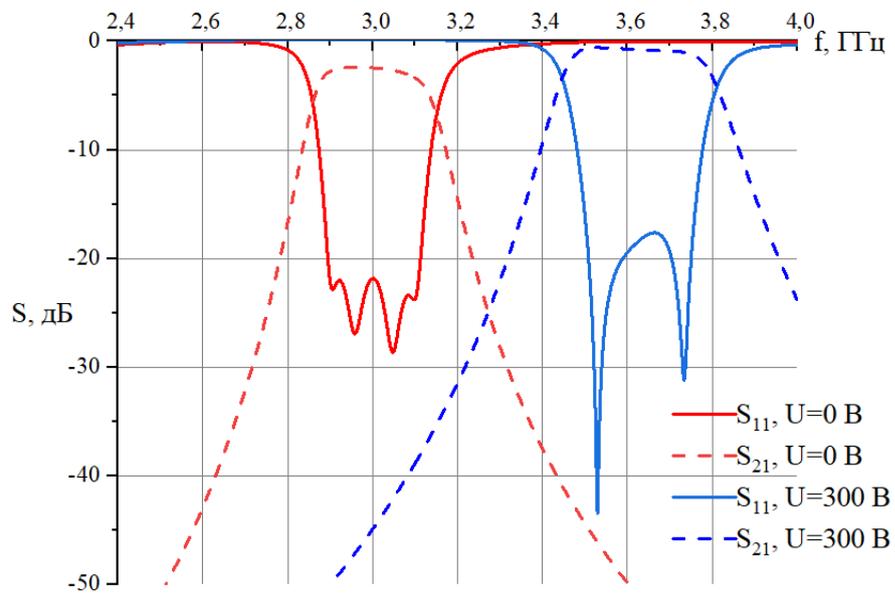


Рисунок 4 – АЧХ фильтра с локальным напылением сегнетоэлектрика

Как и в предыдущей конструкции СВЧ-порты связаны с крайними кольцами с помощью неуправляемых конденсаторов емкостью 2 пФ. Ширина полоска цепей смещения

была принята равной 50 мкм, длина четвертьволновых отрезков – 10.66 мм, а радиус шлейфа – 6.76 мм.

Перестройка АЧХ по частоте составила 620 МГц, а полоса пропускания меняется с 277 МГц до 359 МГц (рисунок 4). При перестройке фильтра наибольшее значение коэффициента отражения падает с –21.85 дБ до –17.64 дБ, а наименьшее значение коэффициента прохождения в полосе возрастает с –5.39 до –3.85 дБ.

4. Управляемый полосно-пропускающий фильтр на кольцевых резонаторах с локальным напылением композитного материала

Было проведено электродинамическое моделирование показанного на рисунке 4 фильтра при замене сегнетоэлектрического слоя на слой сегнетоэлектрического композита. Композит представляет собой диэлектрическую матрицу (LaAlO_3) с сегнетоэлектрическими включениями дисковой формы. При моделировании использовались зерна сегнетоэлектрика диаметра 1 мкм. Изменяя размеры сегнетоэлектрических включений можно эффективно управлять резонансной частотой электрострикционного механизма потерь, смещая их за пределы рабочего диапазона фильтра [4].

Диэлектрическая проницаемость композита была рассчитана в приближении модели эффективной среды и составила 461, а при подаче смещающего напряжения в 200 В она уменьшается до 182. Общая емкость зазоров шириной в 10 мкм при $U=0$ В равна 0.32 пФ, а при подаче потенциала в $U=200$ В равна 0.21 пФ. Управляемость композита хуже, чем управляемость чистого сегнетоэлектрика и в нашем случае равна 1.52.

Топология фильтра аналогична топологии, представленной на рисунке 4, однако, габаритные размеры увеличились и стали равны 42.3×27.4 мм.

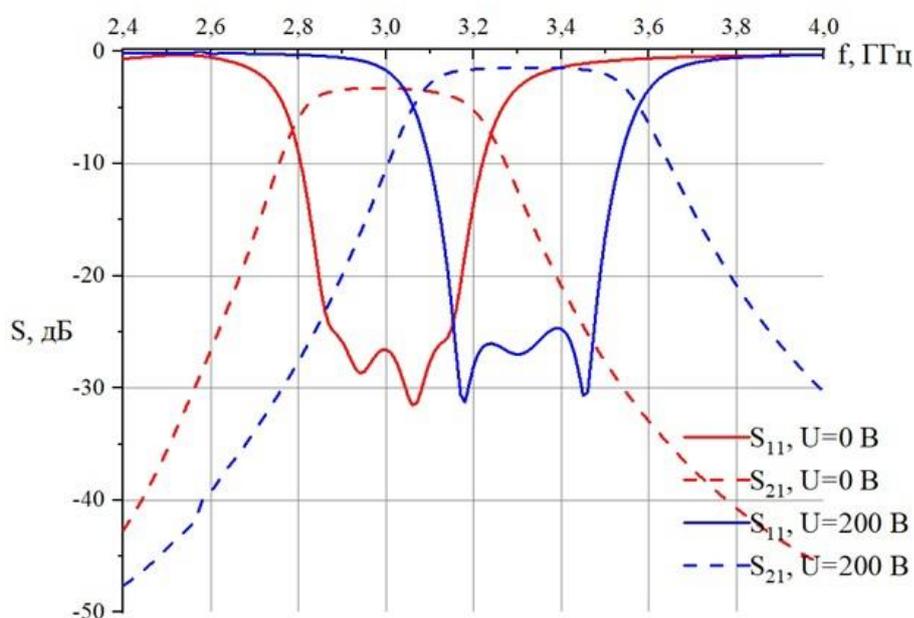


Рисунок 5 – АЧХ фильтра с использованием композитного материала

Полученная в результате электродинамического моделирования частотная зависимость переходной характеристики фильтра представлена на рисунке 5. Перестройка по частоте составила 320 МГц, а полоса пропускания возрастает с 427 МГц до 500 МГц. При перестройке фильтра наибольшее значение коэффициента отражения падает с –21.85 дБ до

–17.64 дБ, а наименьшее значение коэффициента прохождения в полосе возрастает с –6.25 до –4.42 дБ.

5. Моделирование управляемого полосно-пропускающего фильтра с использованием полупроводниковых варикапов

Электромагнитная структура полупроводникового варикапа, использованного в моделировании, представлена на рисунке 6.

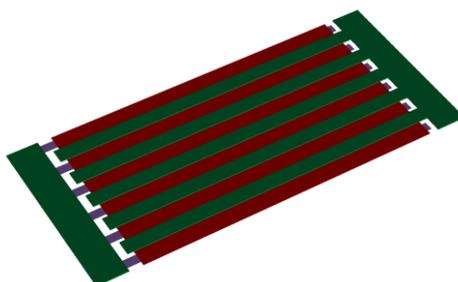


Рисунок 6 – Структура варикапа

В ходе моделирования была получена топология, представленная на рисунке 7. Габаритные размеры составили 37×27 мм.

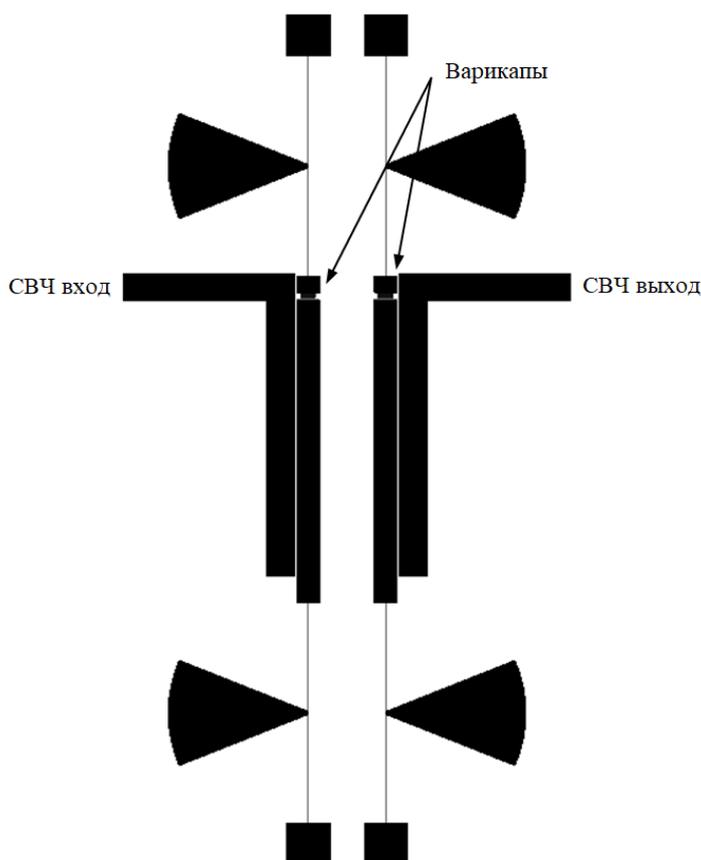


Рисунок 7 – Топология полосно-пропускающего фильтра

На рисунке 8 представлена амплитудно-частотная характеристика управляемого полосно-пропускающего фильтра с использованием полупроводниковых варикапов. Перестройка центральной частоты составила $\Delta f = 434$ МГц.

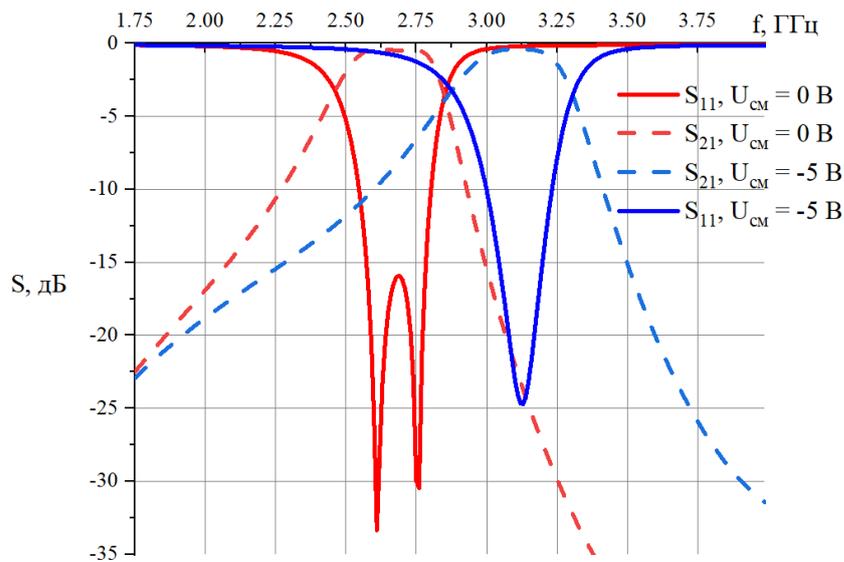


Рисунок 8 – Амплитудно-частотная характеристика фильтра

Заключение

В ходе работы были промоделированы несколько вариантов управляемых полосно-пропускающих фильтров. Результаты исследований показали, что наилучшей перестройкой и технологичностью изготовления обладает структура с использованием локального напыления сегнетоэлектрика.

Список литературы

1. Плескачёв В.В, Исследование и разработка перестраиваемых СВЧ-фильтров на основе сегнетоэлектрических конденсаторов: дис. канд. Антенны и СВЧ устройства и их технологии наук: 05.12.07. - СПб., 2004. - 174 с.
2. Сержантов А.М. Резонансные полосковые структуры и частотно-селективные устройства на их основе с улучшенными характеристиками: дис. доктора тех наук: 01.04.03. - Красноярск, 2015. - 174 с.
3. Vendik O.G., Zubko S.P. Ferroelectrics as constituents of tunable metamaterials, in "Theory and Phenomena of Metamaterials (Handbook of Artificial Materials)", Vol. I., edited by F. Capolino, Oxford, UK: Taylor and Francis Group, LLC. CRC Press, 2009. ISBN-10: 1-4200-5425-2.
4. Петрова П.А., Орлов В.С. Исследование диэлектрических потерь в конденсаторных структурах на основе наноструктурированных сегнетоэлектрических пленок. XI Всероссийская научно-техническая конференция "Электроника и микроэлектроника СВЧ". Сборник докладов. Санкт-Петербург. 30 мая - 3 июня 2022 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 406-408.