

**Е.Ю. Замешаева, П.А. Туральчук, М.А. Одит, А.А. Семенов,  
В.М. Тургалиев, И.В. Колмакова, И.Б. Вендик**  
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

## **Планарные СВЧ-фильтры, управляемые сегнетоэлектрическими варикондами**

*В работе представлены результаты моделирования микрополосковых резонаторов и СВЧ-фильтров, управляемых сегнетоэлектрическими конденсаторами - варикондами. Рассматриваются два типа устройств: используемые при комнатной температуре и при криогенных условиях. Для управления применяются конденсаторы на основе пленок BSTO (при комнатной температуре) и STO (в криогенных условиях). Устройства обладают малыми габаритами и низким уровнем вносимых потерь.*

**Ключевые слова:** пленки ВТСП, резонатор, СВЧ-фильтр, вариконд, BSTO, STO.

### **Введение**

Управляемые СВЧ-устройства находят широкое применение в телекоммуникационных системах. Предпочтительным является электронный метод управления. Под электронным управлением понимается изменение емкости управляющего элемента при изменении величины приложенного постоянного напряжения. Данный тип управления применяется в таких емкостных элементах как варикап (полупроводниковый переменный конденсатор), вариконд (сегнетоэлектрический управляемый конденсатор), МЭМС-конденсатор и др.

В настоящей работе рассматривается возможность применения варикондов для управления микрополосковыми резонаторами и СВЧ-фильтрами на их основе, в том числе при криогенных температурах. Для управления устройствами при комнатной температуре применяется вариконд на основе пленок  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  (BSTO), в то время как для криогенных применений используется  $SrTiO_3$  (STO).

Возможность разработки микрополоскового резонатора и фильтра 2-ого порядка с применением пленок высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) и варикондов на основе пленок STO демонстрируется в данной работе.

### **Микрополосковые резонаторы**

Для реализации планарных управляемых устройств СВЧ-диапазона применяются микрополосковые резонаторы, к достоинствам которых относят простоту расчета и изготовления. Различные виды микрополосковых резонаторов с цепями возбуждения представлены на рис. 1: (а) – резонатор, нагруженный на емкость, (б) – разомкнутый резонатор с открытыми концами [1].

Наиболее простым с точки зрения технологии изготовления является разомкнутый резонатор с открытыми концами (рис. 1, б). Реализация такого резонатора не требует выполнения переходных межслойных отверстий, предназначенных для заземления структуры. Кроме того, данный тип резонатора наиболее прост с точки зрения реализации цепей подачи смещения на управляющий элемент [2].

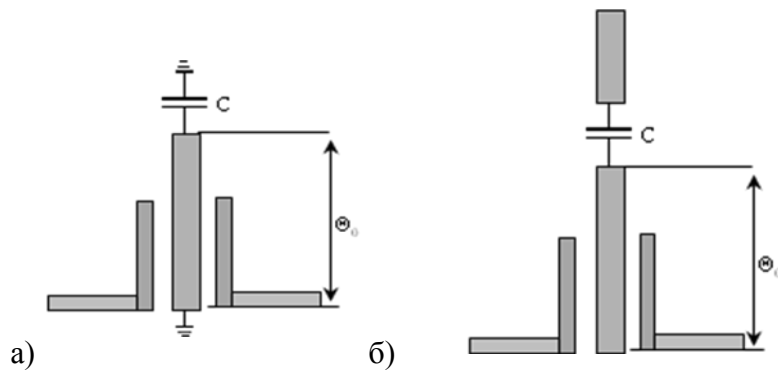


Рисунок 1

### Управление с применением варикондов на пленках BSTO

Для реализации управления в резонаторе и фильтре, выполненных на основе микрополосковых резонаторов, при комнатной температуре были использованы встречно-штыревые BSTO-вариконды, фотография которых приведена на рис. 2. Вольт-фарадная характеристика вариконда приведена на рис. 3. Параметры вариконда: максимальная емкость  $C(0) = 1,9$  пФ, управляемость  $n \approx 2$  (при  $U = 0 - 200$  В),  $tg\delta \approx 0,01$ .

Топология разомкнутого микрополоскового резонатора с элементами возбуждения и цепями смещения, выполненного на подложке из поликора ( $\epsilon_r = 9,8$ ,  $tg\delta = 0,001$ ) толщиной 0,5 мм с медной металлизацией, представлена на рис. 4. Габариты подложки  $30 \times 20$  мм<sup>2</sup>. Характеристики резонатора были промоделированы в пакете Sonnet. Результаты моделирования (коэффициент передачи для максимальной (1) и минимальной (2) емкости вариконда) приведены на рис. 5. Добротность резонатора  $Q \approx 85$ .

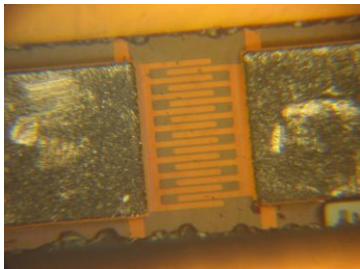


Рисунок 2

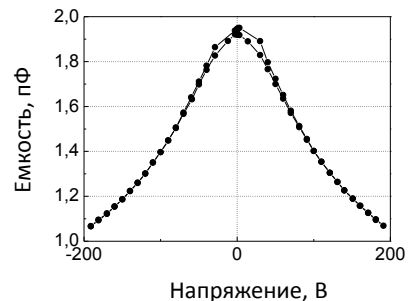


Рисунок 3

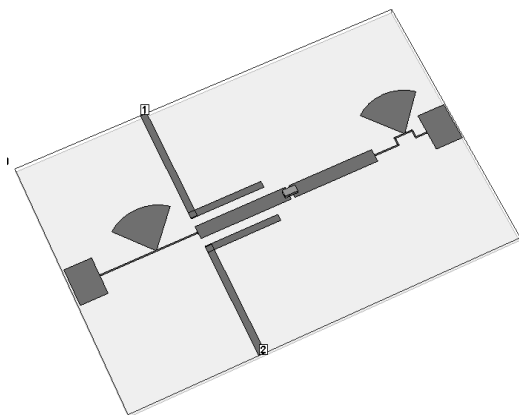


Рисунок 4

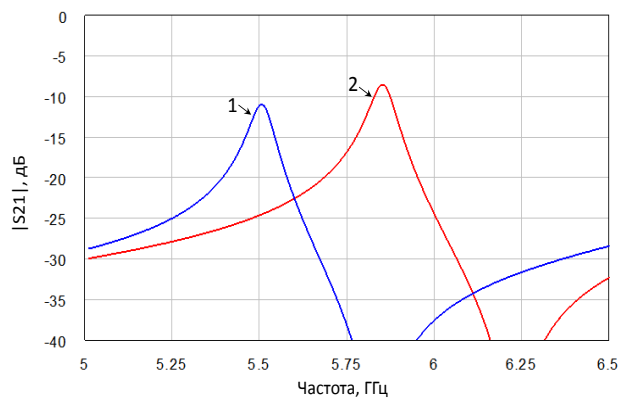


Рисунок 5

Топология фильтра 2-ого порядка, выполненного на основе описанных выше резонаторов, представлена на рис. 6. Для расчета топологии была применена методика, описанная в [3]. При реализации фильтра на подложке из поликора с управляющими BSTO-варикондами, были получены расчетные характеристики, продемонстрированные на рис. 7 (1 –  $C = 1,9$  пФ, 2 –  $C = 1$  пФ, сплошные линии -  $|S_{21}|$ , пунктирные линии -  $|S_{11}|$ ). Перестройка фильтра составляет 6%, потери в полосе пропускания 3 - 4,5 дБ.

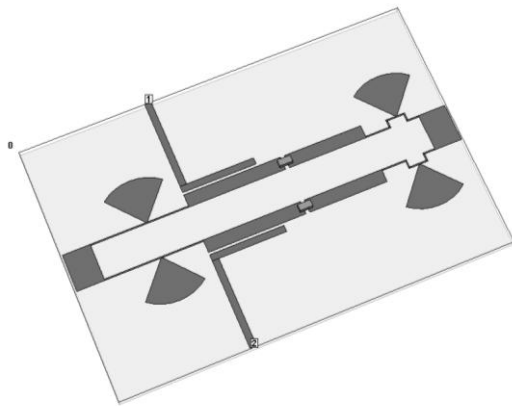


Рисунок 6

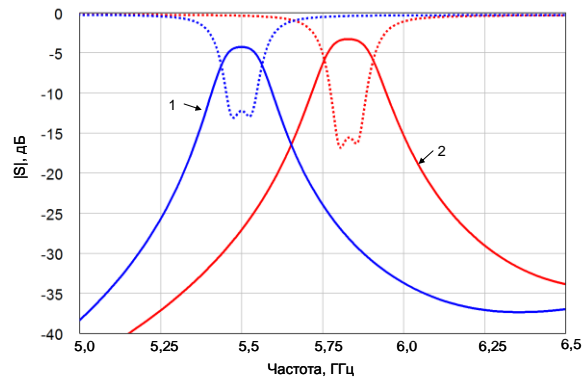


Рисунок 7

### Устройства с применением пленок ВТСП и STO-варикондов

Уменьшение потерь в полосе пропускания может быть обеспечено применением пленок высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) и STO-варикондов. Для оценки характеристик управляемого варикондом резонатора и фильтра 2-ого порядка при криогенных температурах топологии устройств, представленные на рис. 4 и 6 были выполнены на подложке из сапфира  $r$ -среза. Сапфир характеризуется анизотропной диэлектрической проницаемостью. Для  $r$ -среза сапфира при расположении микрополосковых линий под углом  $45^\circ$  по отношению к проекции главной кристаллографической оси на поверхность подложки тензор диэлектрической проницаемости становится диагональным. При этом можно ввести понятие эффективной изотропной диэлектрической проницаемости [4], которая при  $T < 100$  К равна  $\epsilon_r = 10,06$ . В расчете принято значение тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-4}$ . В качестве ВТСП применяется пленка  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) толщиной 330 нм. Двухсторонняя пленка YBCO нанесена на обе стороны сапфировой подложки толщиной 0,43 мм и покрыта защитной пленкой золота толщиной 200 нм. Изготовитель - фирма "Theva" [5]. В соответствии с данными изготовителя критическая температура  $T_c = 87$  К. Расчетная зависимость поверхностного сопротивления от температуры представлена на рис. 8. Использовалась модель поверхностного сопротивления [4]. В расчет были заложены следующие модельные параметры пленки ВТСП: толщина 350 нм,  $\alpha = 20$ ,  $\gamma = 2,1$ ,  $\sigma = 2,5 \cdot 10^6$  (Ом·м) $^{-1}$ . Значение  $R_s \leq 3$  мОм на частоте 10 ГГц для  $T = 77$  К.

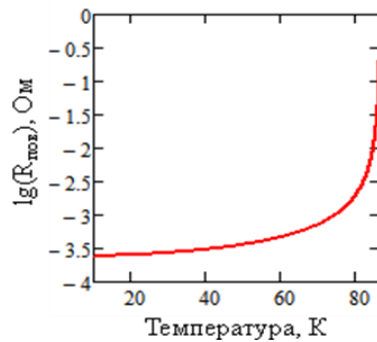


Рисунок 8

Для управления использовался вариконд на основе пленки титаната стронция STO, который относится к классу так называемых виртуальных сегнетоэлектриков, так как и при отсутствии сегнетоэлектрического фазового перехода обладает свойствами, характерными для сегнетоэлектрических материалов: зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и приложенного электрического поля.

Емкость STO-вариконда в виде планарного конденсатора (рис. 9), использованного для перестройки резонаторов, изменяется от 0,46 пФ при  $U_{\text{упр}} = 0$  В до 0,34 пФ при  $U_{\text{упр}} = 200$  В и  $T = 100$  К (рис. 10). Фактор потерь остается неизменным и равным.  $\text{tg}\delta = 0,005$ , что соответствует сопротивлению вариконда 0,3 Ом в эквивалентной последовательной схеме в частотном интервале 6 - 7 ГГц. Площадь вариконда  $1 \times 2,5$  мм<sup>2</sup>, ширина зазора 5 мкм.

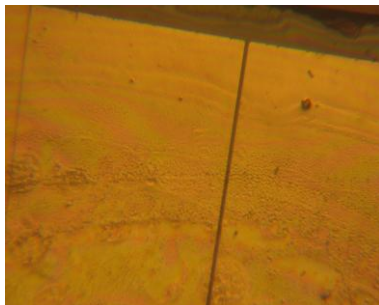


Рисунок 9

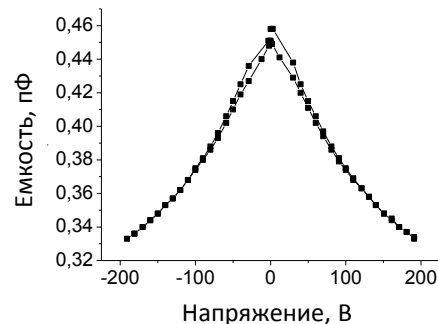


Рисунок 10

Для оценки управляемости фильтра при низких температурах была использована программа Mif [6], предназначенная для расчета характеристик микрополосковых фильтров, выполненных на пленках ВТСП. С использованием параметров топологии, приведенной на рис. 4 и 6, был произведен расчет характеристик устройств для двух значений температуры. Характеристики резонатора, полученные в результате моделирования, приведены на рис. 11 для  $C = 0,46$  пФ (сплошные линии) и  $C = 0,34$  пФ (пунктирные линии). Моделирование проводилось для двух значений температуры: 85 К (синие линии) и 65 К (красные линии). Соответствующие данные также представлены в табл.1.

Характеристики фильтра представлены на рис. 12: синие линии:  $C = 0,46$  пФ,  $T = 85$  К, красные линии:  $C = 0,46$  пФ,  $T = 65$  К, черные линии:  $C = 0,34$  пФ,  $T = 85$  К, фиолетовые линии:  $C = 0,34$  пФ,  $T = 65$  К, Коэффициент отражения  $|S_{11}|$  соответствует пунктирным линиям, сплошные линии обозначают коэффициент передачи  $|S_{21}|$ . В табл. 2 приведены основные характеристики фильтров, полученные в результате моделирования.

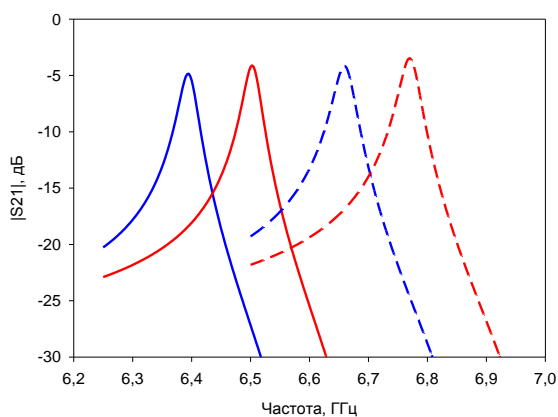


Рисунок 11

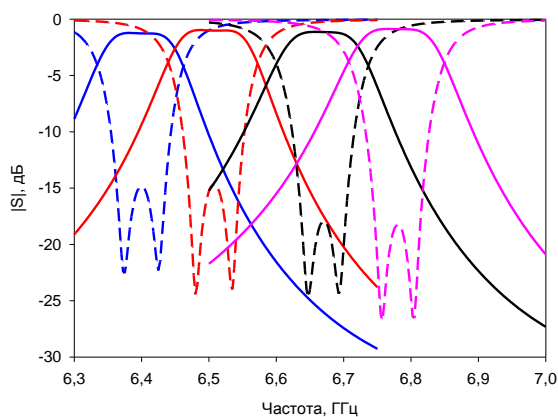


Рисунок 12

Таблица 1

C, пФ	T, К	Резонансная частота, ГГц	Добротность
0,46	85	6,39	211
	65	6,50	220
0,34	85	6,66	181
	65	6,77	193

Таблица 2

C, пФ	T, К	Центральная частота рабочего диапазона, ГГц	Уровень вносимых потерь, дБ
0,46	85	6,38	1,23
	65	6,49	0,96
0,34	85	6,66	1,13
	65	6,77	0,87

Таким образом, при изменении температуры в диапазоне 85 - 65 К перестройка фильтра составляет 1,7%, а при изменении управляющего напряжения (при управляемости вариконда  $n = 1,35$ ) при постоянной температуре перестройка фильтра составляет 4%. Вносимые потери в полосе пропускания ВТСП фильтра с STO-варикондами существенно меньше, чем в фильтрах на медной пленке с BSTO-варикондами.

Данная работа выполнена в рамках государственного контракта №11.519.11.1001 по теме «Микроволновые устройства на основе высокотемпературных сверхпроводников и сегнетоэлектриков с электронным управлением и расширенными функциональными возможностями для применения в телекоммуникационных и информационных системах».

#### Библиографический список

- Vendik, I. Figure of Merit and Limiting Characteristics of Tunable Ferroelectric Microwave Devices / I. Vendik, V. Pleskachev, and O. Vendik // Proc. of PIERS 2005, Hangzhou, China, August 22-26.
- Vendik, I. Tunable microwave filters using ferroelectric materials / I. Vendik, O. Vendik, V. Pleskachev, and M. Nikol'ski // IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 13, No.2. pp. 716-719, 2003.
- Маттей, Д.Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Д.Л. Маттей, Л. Янг, Е.М.Т. Джонс // - М.: Связь, 1971 (т. 1), 1972 (т. 2)
- Vendik, I.B. High temperature superconductor devices for microwave signal processing. Part 2: Superconducting microwave circuits / I.B. Vendik, O.G. Vendik, D.I. Kaparkov. - St.-Petersburg: Scladen Ltd., 1997. 136 P
- <http://www.theva.com/>
- Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2013610765 "Проектирование ВТСП фильтров СВЧ без дополнительной подстройки после изготовления (МИФ), авторы П.Н. Юдин, И.Б. Вендик