

13

## Перестраиваемые СВЧ-фильтры с управляемыми сегнетоэлектрическими конденсаторами

© Е.Ю. Замешаева, П.А. Туральчук, В.М. Тургалиев,  
М.А. Одит, И.В. Мунина, И.В. Колмакова,  
А.А. Семенов, И.Б. Вендик, О.Г. Вендик

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
„ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина)  
E-mail: MWLab@mwlab.spb.ru

Поступило в Редакцию 15 мая 2013 г.

Представлены результаты моделирования и экспериментального исследования микрополосковых СВЧ-резонаторов и фильтров, управляемых сегнетоэлектрическими конденсаторами. Для управления применяются конденсаторы на основе пленок BSTO (при комнатной температуре) и STO (в криогенных условиях). Охлаждаемые устройства выполнены на пленках высокотемпературного сверхпроводника состава  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Разработанные фильтры эффективно перестраиваются при приложении управляющего напряжения, обладают малыми габаритами и низким уровнем вносимых потерь.

Планарные частотно-избирательные СВЧ-устройства находят широкое применение в различных системах связи. Наиболее распространенными являются полосно-пропускающие фильтры. Использование перестраиваемых или реконфигурируемых фильтров позволяет увеличить эффективность их применения за счет расширения функциональных возможностей. Наиболее востребованным является электронный метод управления, при котором характеристика фильтра изменяется под действием управляющего напряжения. Как правило, в резонаторы фильтра включается элемент, чувствительный к управляющему воздействию. Таким элементом может быть конденсатор, управляемый напряжением. Данный тип управления применяется в емкостных элементах типа варикап (полупроводниковый переменный конденсатор), вариконд (сегнетоэлектрический управляемый конденсатор), МЭСМ-конденсатор и др.

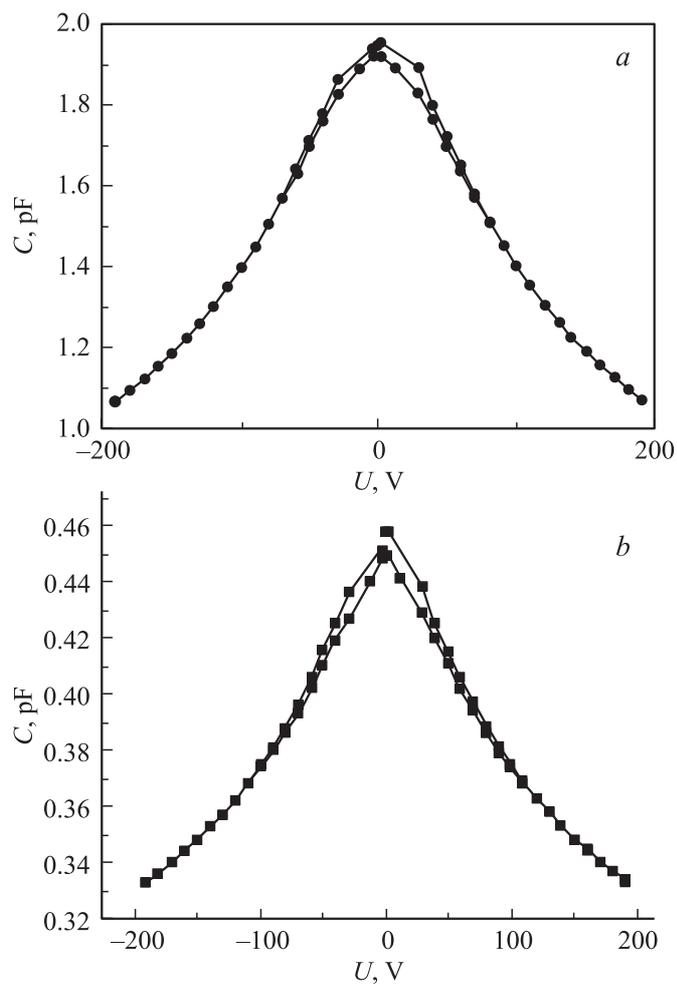
В данной работе рассматривается возможность применения варикондов для управления микрополосковыми СВЧ-резонаторами и фильтрами на их основе, в том числе при криогенных температурах. Для управления устройствами при комнатной температуре применяется вариконд на основе пленок  $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  (BSTO), в то время как для криогенных применений используется  $\text{SrTiO}_3$  (STO).

Приводятся результаты разработки перестраиваемого микрополоскового резонатора и фильтра 2-го порядка, в том числе с применением пленок высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП). Опыт работы с резонаторами и фильтрами на основе ВТСП-пленок состава  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) подтвердил возможность реализации резонаторов высокой добротности и фильтров с чрезвычайно малым уровнем вносимых потерь в полосе пропускания [1,2].

Используются различные виды микрополосковых резонаторов, в частности, резонатор, нагруженный на емкость, полуволновый разомкнутый резонатор с открытыми концами и др. [3]. Наиболее простым с точки зрения технологии изготовления является разомкнутый резонатор с открытыми концами. Реализация такого резонатора не требует выполнения переходных межслойных отверстий, предназначенных для заземления структуры, в нем легко выполняются цепи подачи смещения на управляющий элемент [4].

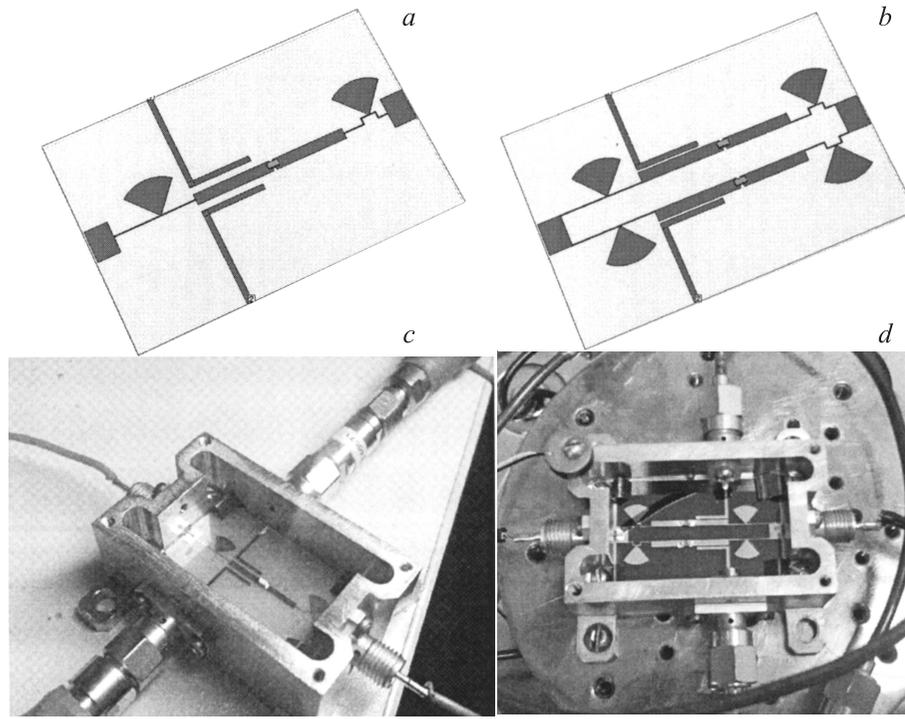
В качестве управляемых конденсаторов при комнатной температуре были использованы встречно-штыревые BSTO-вариконды, а для низких температур применялись планарные STO-вариконды. Вольт-фарадные характеристики варикондов приведены на рис. 1. Параметры BSTO-вариконда: максимальная емкость при нулевом напряжении  $C(0) = 1.9 \text{ pF}$ , управляемость  $n \approx 2$  (при  $U = 0 - 200 \text{ V}$ ),  $\text{tg } \delta \approx 0.02$ . Емкость STO-вариконда, измеренная при  $T = 100 \text{ K}$ , изменяется от  $0.46 \text{ pF}$  при  $U = 0 \text{ V}$  до  $0.34 \text{ pF}$  при  $U = 200 \text{ V}$ , управляемость  $n \approx 1.35$ , фактор потерь  $\text{tg } \delta = 0.005$  остается неизменным при подаче управляющего напряжения. Площадь STO-вариконда  $1 \times 2.5 \text{ mm}$ , ширина зазора  $5 \mu\text{m}$ .

Топология разомкнутого микрополоскового резонатора с элементами возбуждения и цепями смещения, выполненного на подложке из поликора ( $\epsilon_r = 9.8$ ,  $\text{tg } \delta = 0.001$ ) толщиной  $0.5 \text{ mm}$  с медной металлизацией, представлена на рис. 2, *a*. Габариты подложки  $30 \times 20 \text{ mm}$ . Топология фильтра 2-го порядка, выполненного с применением описанных выше резонаторов, представлена на рис. 2, *b*. Перестраива-



**Рис. 1.** Вольт-фарадные характеристики BSTO-вариконда при комнатной температуре (a) и STO-вариконда при  $T = 100$  К (b).

емые конденсаторы (вариконды) используются в качестве навесных элементов, расположенных в центре резонаторов. Место включения выбрано для обеспечения максимального коэффициента включения и



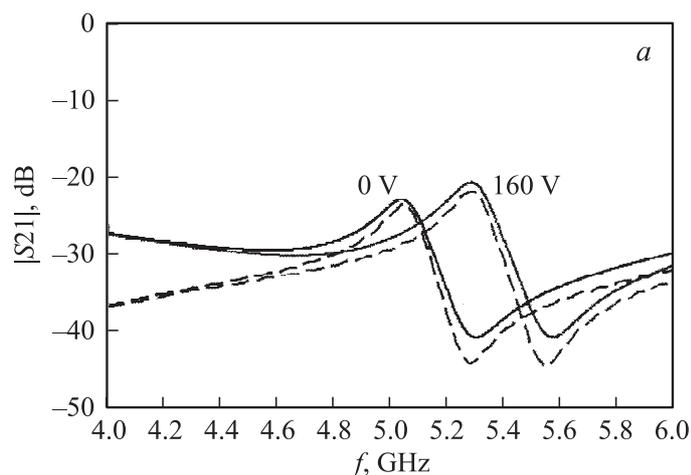
**Рис. 2.** Топология перестраиваемого микрополоскового резонатора (*a*) и перестраиваемого фильтра 2-го порядка (*b*). Фотографии медного перестраиваемого микрополоскового резонатора с BSTO-варикондом в корпусе (*c*) и перестраиваемого микрополоскового ВТСП-фильтра с STO-варикондами в корпусе (*d*).

соответственно максимальной перестройки резонаторов и фильтров. В соответствии с результатами электродинамического моделирования перестройка фильтра составляет 6%, потери в полосе пропускания 3.0–4.5 дБ.

Уменьшение потерь в полосе пропускания обеспечивается применением пленок ВТСП и STO-варикондов. Для оценки характеристик управляемого варикондом ВТСП-резонатора и фильтра 2-го порядка при криогенных температурах устройства, топология которых представлена на рис. 2, *a* и *b*, были использованы подложки 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, которая при  $T < 100$  К равна  $\epsilon_r = 10.06$  [5]. Для сапфира 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“ [6]. В соответствии с данными изготовителя критическая температура  $T_c = 87$  К. Значение поверхностного сопротивления  $R_s \leq 0.1 \text{ м}\Omega$  для  $T = 77$  К на частоте 10 GHz.

Для оценки управляемости фильтра при низких температурах была использована программа Mif [7], предназначенная для расчета характеристик микрополосковых фильтров, выполненных на пленках ВТСП. При температуре  $T = 65$  К перестройка фильтра при изменении управляющего напряжения (при управляемости вариконда  $n = 1.35$ ) составляет 4%. При этом уровень потерь в полосе пропускания порядка 1 дБ.

Экспериментальное исследование перестраиваемых резонаторов и фильтров производилось при нормальных условиях ( $T = 25^\circ\text{C}$ ) анализатором спектра Agilent N5241A. Напряжение смещения на BSTO-вариконде задается с помощью источника напряжения INSTЕК GPR16H500 в диапазоне от 0 до 160 В. Измерения ВТСП-устройств выполняются при следующих условиях: давление в вакуумной камере не



**Рис. 3.** Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (пунктирные линии) характеристики перестраиваемого резонатора с BSTO-варикондом (*a*), ВТСП-резонатора с STO-варикондом (*b*) и ВТСП-фильтра с STO-варикондами (*c*).

выше  $10^{-6}$  atm. (0.101 Pa); рабочая температура высокотемпературного сверхпроводника 60–80 К. Рабочие условия обеспечиваются использованием откачного вакуумного поста Pfeiffer-Vacuum HiCube 80 и криогенной машины Ricor K535. Исследование характеристик перестраиваемых ВТСП-резонаторов и фильтров выполнялось векторным анализатором цепей ZVH8 (Rohde&Schwarz). Напряжение смещения на STO-вариконде задается с помощью источника напряжения NY3005B-3 в диапазоне от 0 до 190 V.

Фотографии экспериментальных образцов перестраиваемого резонатора с BSTO-варикондом и ВТСП-фильтра с STO-варикондами представлены на рис. 2, *c* и *d*. Расчетные и экспериментальные характеристики этих устройств приведены на рис. 3. При изменении управляющего напряжения в интервале 0–190 V (управляемость STO-вариконда  $n = 1.35$ ) при температуре  $T = 70$  К перестройка фильтра составляет 3%. Вносимые потери в полосе пропускания ВТСП-фильтра с STO-варикондами не превосходят 1.5 dB, что существенно меньше, чем в

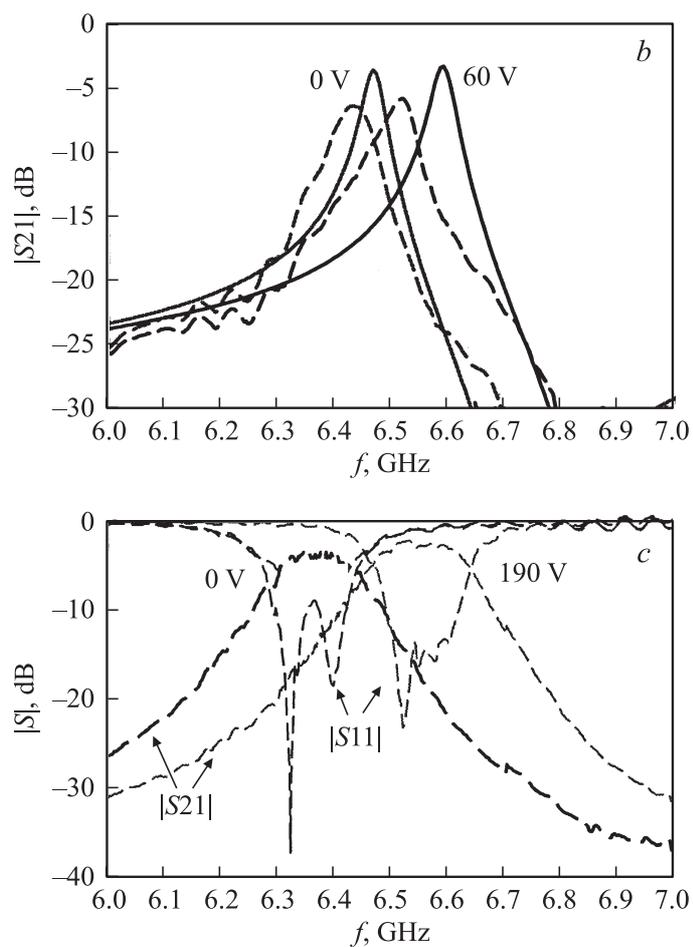


Рис. 3 (продолжение).

фильтрах на медной пленке с BSTO-варикондами (3–4.5 dB). Перестраиваемые ВТСП-фильтры с STO-варикондами могут найти практическое применение в составе охлаждаемых СВЧ-устройств различного назначения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного контракта № 11.519.11.1001 „Микроволновые устройства на основе высокотемпературных сверхпроводников и сегнетоэлектриков с электронным управлением и расширенными функциональными возможностями для применения в телекоммуникационных и информационных системах“.

## Список литературы

- [1] Ситникова М.Ф., Вендик И.Б., Вендик О.Г., Холодняк Д.В., Туральчук П.А., Колмакова И.В., Белявский П.Ю., Семенов А.А. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 18. С. 67–74.
- [2] Вендик И.Б., Вендик О.Г., Земляков К.Н., Колмаков И.В., Ситникова М.Ф., Туральчук П.А., Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 9. С. 64–69.
- [3] Vendik I., Pleskachev V., Vendik O. // Proc. PIERS. 2005. 22–26 August. Hangzhou, China.
- [4] Vendik I., Vendik O., Pleskachev V., Nikol'ski M. // IEEE Trans. Applied Superconductivity. 2003. V. 13. N 2. P. 716–719.
- [5] Vendik I.B., Vendik O.G., Kaparkov D.I. // High temperature superconductor devices for microwave signal processing. Part 2: Superconducting microwave circuits St.Petersburg: Sladen Ltd., 1997. 136 p.
- [6] <http://www.theva.com/>
- [7] Юдин П.Н., Вендик И.Б. Проектирование ВТСП фильтров СВЧ без дополнительной подстройки после изготовления (МИФ). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013610765.