

05.4

## Особенности технологии пленок высокотемпературных сверхпроводников для СВЧ-фильтров

© И.Б. Вендик, О.Г. Вендик, К.Н. Земляков, И.В. Колмакова,  
М.Ф. Ситникова, П.А. Туральчук, Д.В. Мастеров,  
С.А. Павлов, А.Е. Парафин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
„ЛЭТИ“

E-mail: MWLab@eltech.ru

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

E-mail: parafin@ipm.ipm.sci.nnov.ru

Поступило в Редакцию 26 ноября 2010 г.

Представлены результаты моделирования и экспериментальные характеристики полосно-пропускающих (ППФ) фильтров 4-го порядка, изготовленных на пленках ВТСП производства компании Theva (Мюнхен) и ИФМ РАН (Нижний Новгород). Из экспериментальных данных извлечены параметры модели поверхностного сопротивления исследуемых пленок. Полученные результаты подтверждают возможность реализации фильтров ВТСП с высококачественными характеристиками, полученными на базе пленок ВТСП, имеющих различную технологию изготовления.

Применение сверхпроводниковых пленок при проектировании полосовых СВЧ-фильтров позволяет уменьшить потери в полосе и получить высокую крутизну фронтов. Открытие в 1986 году высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) дало возможность создания высокочастотных микрополосковых резонаторов на их основе. В 1987 году была открыта сверхпроводимость керамики состава  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO) и впоследствии разработана технология роста эпитаксиальных пленок. Все приведенные фильтры в данной статье изготовлены на эпитаксиальных пленках YBCO.

Необходимо разделить два технологических процесса: А) выращивание эпитаксиальной пленки, и Б) получение требуемой геометрической

структуры, образованной сверхпроводящей пленкой на поверхности диэлектрической подложки.

А) В настоящее время наиболее распространены два принципиально разных технологических приема получения пленок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  на подложке  $\text{LaAlO}_3$ : осаждение пленки из трех источников вакуумного испарения металлов Y, Ba, Cu в атмосфере кислорода при соответствующей температуре подложки [1] и метод магнетронного распыления [2].

Первый процесс освоен немецкой фирмой ThevaGmbH. Для сопоставления свойств пленок ВТСП, полученных на основе разных технологий, на коммерческой основе были приобретены у фирмы Theva диски диаметром 2 дюйма и толщиной 0.5 mm из монокристаллического  $\text{LaAlO}_3$ . Пленка  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  толщиной  $0.7 \mu\text{m}$  была нанесена на обе поверхности диска.

Второй технологический процесс развивается на лабораторной основе в Институте физики микроструктур РАН в Нижнем Новгороде. На подложке  $\text{LaAlO}_3$  фирмы CrysTec GmbH размером  $12.5 \times 12.5 \times 0.5 \text{ mm}$  методом магнетронного распыления с обеих сторон были выращены пленки YBCO. Технология получения пленок подробно описана в работе [2]. Для распыления использовалась дисковая мишень YBCO стехиометрического (1–2–3) состава. Пленки выращивались *in situ* в рабочей смеси  $\text{Ar}/\text{O}_2$  при давлении  $\sim 50 \text{ Pa}$ . Для того чтобы обеспечить нанесение пленок на обе стороны подложки, использовался бесконтактный радиационный нагрев. Температура подложки  $\sim 750^\circ\text{C}$ . Скорость роста составляла  $30 \text{ nm/h}$ . Процесс формирования пленки заканчивали естественным охлаждением до комнатной температуры при давлении кислорода  $100 \text{ kPa}$ . Сначала пленка выращивалась на одной стороне подложки. После окончания процесса роста подложка с пленкой извлекалась из установки, переворачивалась, и процесс роста повторялся. Следует отметить, что в первом цикле роста происходило осаждение материала мишени на обратную сторону подложки, на которой формировалась тонкая пленка YBCO, служащая качественным подслоем для последующего роста пленки на второй стороне [3]. Совершенство пленки на второй стороне, благодаря „автоподслою“ несколько выше, поэтому она была выбрана для формирования рисунка микрополоскового фильтра. Толщина пленок, измеренная методом рентгеновской дифракции, оставила  $0.18 \mu\text{m}$ . Величина полуширины кривой качания ( $\text{FWHM}\omega$ ) рентгеновского отражения YBCO (005),

характеризующая разориентацию блоков мозаики в направлении оси  $c$  для пленок, была менее  $0.5^\circ$ .

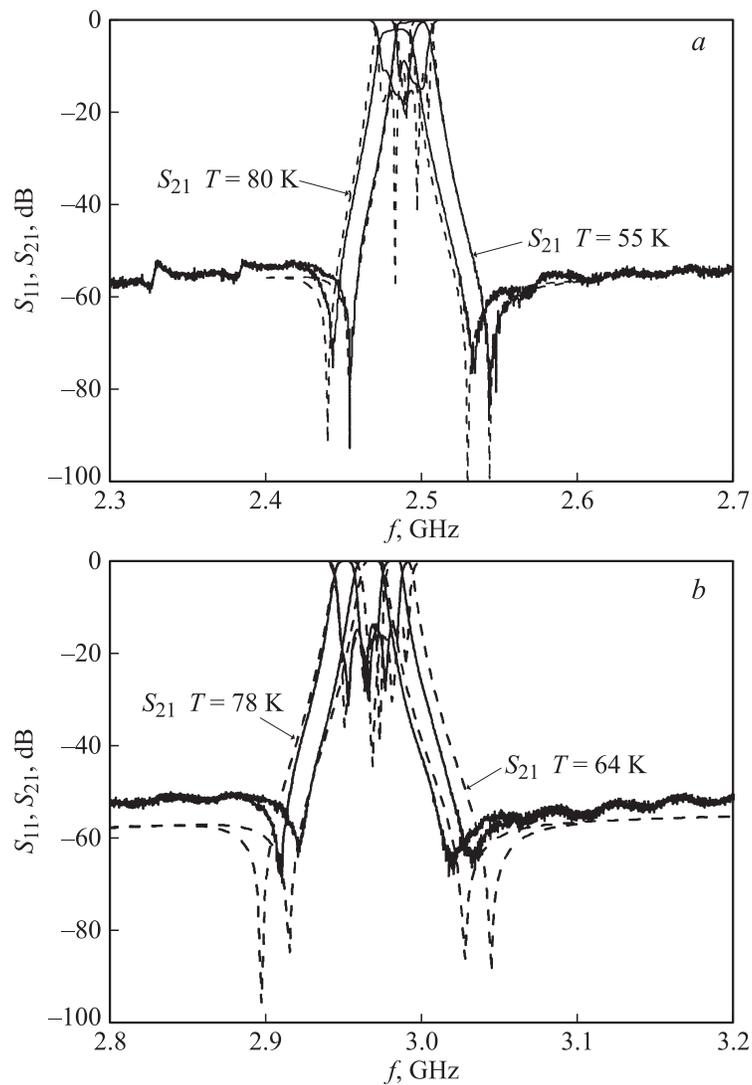
Б) Получение требуемой геометрической структуры осуществлялось с помощью хорошо разработанного технологического приема фотолитографии. Особенностью технологического приема является способ травления пленки ВТСП через „окна“, образовавшиеся в фоторезисте после его засвечивания. Мы использовали два способа травления: ионно-лучевое травление и химическое травление в жидком травителе.

Процесс ионно-лучевого травления пленок ВТСП и соответствующие режимы были разработаны в СПбГЭТУ „ЛЭТИ“ [4]. Для процесса ионного травления применялась установка ВУП-5, в которой был установлен дуопигатронный ионный источник. Технологическая камера откачивалась до давления  $10^{-6}$  Торр, и в процессе травления давление не поднималось выше  $10^{-3}$  Торр. Ионный источник формировал нейтрализованный пучок ионов аргона диаметром 35 mm и однородностью  $\sim 95\%$ . На поверхности анода магнитное поле составляет около 0.1 T и быстро спадает к оси разрядной камеры. Травление осуществлялось при ускоряющем напряжении 350 V при значении плотности тока  $\approx 0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Температура поверхности образца во время травления не превышала  $350^\circ\text{C}$ , а скорость травления составляла 4–5 nm/min. В результате травления формировались резки края полоски ВТСП, а сама полоска не подвергалась химическому воздействию.

Методом химического травления структура фильтар была изготовлена в ИФМ РАН. На пленке на второй стороне подложки стандартной фотолитографией с „мокрым“ химическим травлением была сформирована структура фильтра, первая сторона подложки при этом была защищена фоторезистом. Контактные площадки были изготовлены стандартной обратной („взрывной“) фотолитографией с использованием термического напыления серебра. Толщина серебра на контактных площадках составила около 0.1  $\mu\text{m}$ .

Успех получения структур ВТСП с помощью жидкостного травления объясняется, по-видимому, тем, что толщина пленки ВТС 0.18  $\mu\text{m}$  обеспечивала быстрый процесс травления, при этом ошибка в размерах элементов устройства за счет перетрава/недотрава была пренебрежимо малой.

На таких образцах были изготовлены фильтры ВТСП и проведены их испытания на криогенном стенде ЛЭТИ. Структура фильтра показана в работе [4] (рис. 2, а).



Частотная зависимость коэффициента передачи  $S_{21}$  и коэффициента отражения  $S_{11}$  фильтра четвертого порядка, полученного напылением из трех источников (a) и магнетронным распылением (b). Сплошные линии построены по результатам эксперимента, пунктирные — по результатам расчета.

**Таблица 1.** Модельные параметры пленок, полученных осаждением из трех источников

Подложка $\text{LaAlO}_3$		Пленка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$					
$h$ , mm	$\varepsilon_r$	$T_c$ , K	$d$ , nm	$\gamma$	$\lambda_L(0)$ , nm	$\alpha$	$\sigma$ , $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$
0.5	23.8	88	620	1.95	175	10	$2.5 \cdot 10^6$

*Примечание.* Центральная частота полосы пропускания фильтра  $f_0 = 2.5$  GHz; поверхностное сопротивление пленки  $R_{\text{SUR}} = 0.0380 \text{ m}\Omega$ ,  $T = 65$  K.

**Таблица 2.** Модельные параметры пленок, полученных магнетронным распылением

Подложка $\text{LaAlO}_3$		Пленка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$					
$h$ , mm	$\varepsilon_r$	$T_c$ , K	$d$ , nm	$\gamma$	$\lambda_L(0)$ , nm	$\alpha$	$\sigma$ , $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$
0.5	23.5	88	200	2.5	175	10	$2.5 \cdot 10^6$

*Примечание.* Центральная частота полосы пропускания фильтра  $f_0 = 2.98$  GHz; поверхностное сопротивление пленки  $R_{\text{SUR}} = 0.045 \text{ m}\Omega$ ,  $T = 65$  K.

Полосно-пропускающие фильтры были разработаны на центральную частоту 2.5 и 2.98 GHz с относительной полосой пропускания 1%. Фильтры представляют собой систему связанных полуволновых резонаторов S-образной формы. Моделирование произведено с использованием пакета электродинамического моделирования AWR и разработанной в СПбГЭТУ „ЛЭТИ“ специализированной программы MW Filters, которая позволяет извлечь параметры модели поверхностного сопротивления реальной пленки ВТСП из результатов измерения АЧХ тестовых структур.

Фильтры четвертого порядка изготовлены на квадратных подложках размером  $20 \times 20$  mm и  $12.5 \times 12.5$  mm. Первый — на пленках, полученных осаждением из трех источников; второй — на пленках, полученных магнетронным распылением. Размер подложки определил выбор рабочей частоты фильтра.

В качестве модельных параметров поверхностного сопротивления пленки были использованы: критическая температура  $T_c$ , нормальная проводимость  $\sigma_n(T_c)$ , параметр остаточного сопротивления  $\alpha$  и пара-

метр  $\gamma$ , ответственный за крутизну зависимости поверхностного сопротивления от температуры вблизи перехода [5]. Параметры модели были найдены с использованием процедуры извлечения их из экспериментальных характеристик [6]. Для этого в качестве экспериментального образца использовался микрополосковый резонатор, изготовленный на пленках YBCO фирмы Theva [4]. Синтез фильтров четвертого порядка выполнялся с использованием найденных параметров пленок.

На рисунке показаны частотные зависимости коэффициента передачи и коэффициента отражения исследованных фильтров. Полученные частотные характеристики фильтров позволяют извлечь модельные параметры пленок ВТСП [6]. В табл. 1 и 2 приведены модельные параметры пленок, полученных осаждением из трех источников (табл. 1), и пленок, полученных магнетронным распылением (табл. 2) соответственно.

Полученные результаты подтверждают возможность реализации высококачественных фильтров ВТСП, выполненных на пленках ВТСП, полученных с применением различной технологии изготовления. Этот результат открывает перспективу совершенствования технологии приборов ВТСП массового производства.

Работа выполнена при поддержке корпорации „Русский сверхпроводник“ и гранта РФФИ 09-08-00632-а.

## Список литературы

- [1] *Prusseit W.* Second-Generation HTS conductors. Springer. 2005. Chaper 6. P. 81–96.
- [2] *Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е., Дроздов Ю.Н.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 10. С. 103–107.
- [3] *Востоков Н.В., Дроздов Ю.Н., Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 18. С. 60–66.
- [4] *Ситникова М.Ф., Вендик И.Б., 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.
- [5] *Vendik O.G., Vendik I.B., Kaparkov D.I.* // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1988. V. 46. Part 1. N 5. P. 469–478. 1998.
- [6] *Юдин П.Н., Вендик И.Б.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 10. С. 62–69.