

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 полосных 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 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 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 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 Ar/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 nm/h . Процесс формирования пленки заканчивали естественным охлаждением до комнатной температуры при давлении кислорода 100 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° .

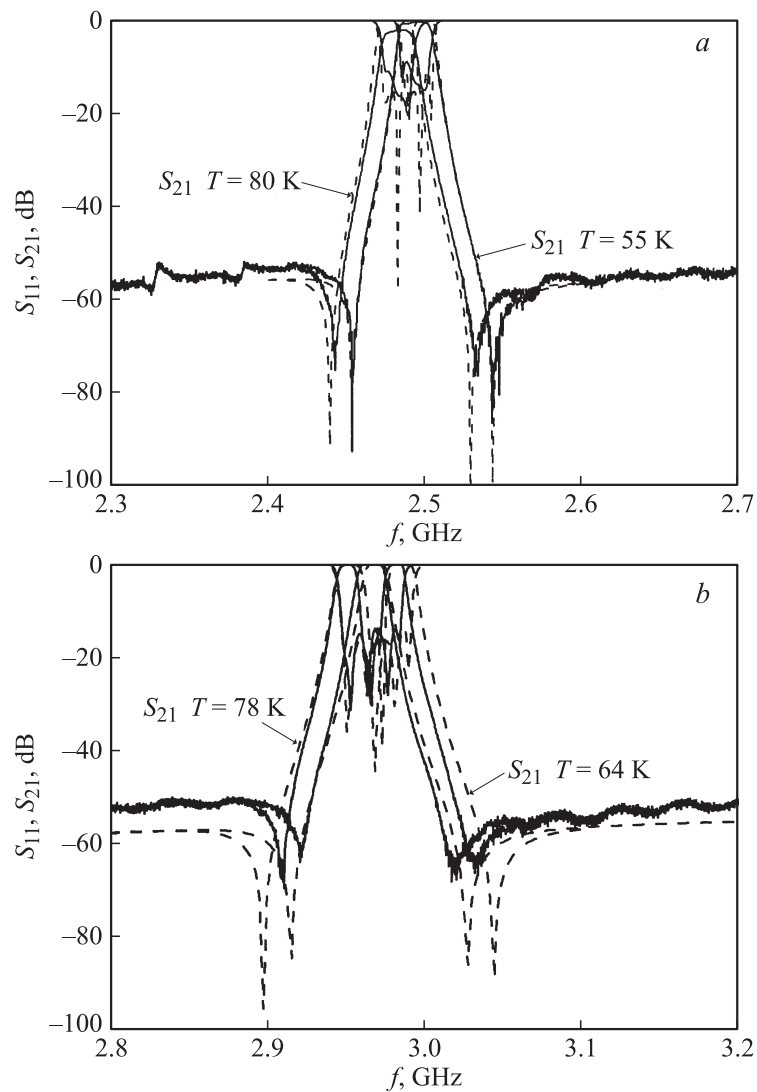
Б) Получение требуемой геометрической структуры осуществлялось с помощью хорошо разработанного технологического приема фотолитографии. Особенностью технологического приема является способ травления пленки ВТСП через „окна“, образовавшиеся в фоторезисте после его засвечивания. Мы использовали два способа 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°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 μm .

Успех получения структур ВТСП с помощью жидкостного травления объясняется, по-видимому, тем, что толщина пленки ВТС 0.18 μm 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 LaAlO ₃		Пленка YBa ₂ Cu ₃ O ₇					
h , mm	ϵ_r	T_c , K	d , nm	γ	$\lambda_L(0)$, nm	α	σ , ($\Omega \cdot \text{m}$) ⁻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 LaAlO ₃		Пленка YBa ₂ Cu ₃ O ₇					
h , mm	ϵ_r	T_c , K	d , nm	γ	$\lambda_L(0)$, nm	α	σ , ($\Omega \cdot \text{m}$) ⁻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 20×20 mm и 12.5×12.5 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 α и пара-

метр γ , 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.