

05;12

Моделирование и экспериментальное исследование микрополосковых резонаторов и фильтра на основе высокотемпературного сверхпроводника

© М.Ф. Ситникова, И.Б. Вендик, О.Г. Вендик, Д.В. Холодняк,
П.А. Туральчук, И.В. Колмакова, П.Ю. Белявский, А.А. Семенов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
„ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)
E-mail: sitnimf@gmail.com

Поступило в Редакцию 1 апреля 2010 г.

Описано исследование ВТСП микрополосковых резонаторов и фильтра, включающее моделирование электродинамических параметров пленки ВТСП, проектирование резонаторов и фильтра, их изготовление и тестирование. Для изготовления тестовых образцов использовались двухсторонние пленки YBCO на подложке из лантаната алюминия толщиной 0.5 mm. Для получения тестовой структуры использовался процесс фотолитографии с применением ионного травления для формирования структуры ВТСП резонатора и фильтра. Из эксперимента найдены параметры модели поверхностного сопротивления исследуемой пленки YBCO, а также толщина пленки и диэлектрическая проницаемость подложки. Адекватность модели и достоверность найденных параметров, использованных при синтезе и проектировании фильтра 4-го порядка, подтверждаются совпадением экспериментальных и расчетных характеристик.

Открытие в 1986 г. высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) сопровождалось большим интересом к физике этого явления и возможным практическим приложениям при рабочей температуре порядка температуры кипения жидкого азота (77 К). За 20 лет, прошедших с момента открытия ВТСП, накоплен большой опыт по синтезу и оптимизации ряда устройств, предназначенных для практического использования [1–4]. Среди устройств ВТСП, пригодных для эффективного практического использования, следует отметить ВТСП микрополосковые фильтры СВЧ-диапазона, обладающие существенным преимуществом по сравнению с традиционными СВЧ-фильтрами в

объемном исполнении. Авторами настоящей статьи были разработаны планарные СВЧ-фильтры, обладающие уникальными характеристиками, которые изготавливались и экспериментально исследовались в зарубежных лабораториях [5–8], поскольку соответствующего оборудования на тот момент в России не было. В настоящий момент лаборатории Санкт-Петербургского электротехнического университета „ЛЭТИ“ располагают современным оборудованием, позволяющим изготовить и экспериментально исследовать СВЧ-приборы на основе пленок ВТСП. В частности, это позволило осуществить полный цикл исследований резонаторов ВТСП, включая моделирование электродинамических параметров пленки ВТСП, проектирование резонаторов, их изготовление и испытание.

Для изготовления тестовых образцов резонаторов ВТСП использовались двухсторонние пленки YBCO толщиной около 700 nm на монокристаллической подложке лантаната алюминия толщиной 0.5 mm (производство фирмы Theva GmbH, Германия). Для получения тестовой структуры использовался процесс фотолитографии с применением ионного травления для формирования структуры резонатора ВТСП. Для процесса ионного травления применялась установка ВУП-5 с дуопигатронным ионным источником. Технологическая камера откачивалась до давления 133.32 Pa (10^{-6} Torr), в процессе травления давление не поднималось выше 10^{-3} Torr. Введение наряду с продольным поперечного многополюсного магнитного поля на периферии анодной области дуопигатрона существенно улучшила однородность распределения плотности тока в пучке ионов. Поперечное магнитное поле создавалось набором постоянных магнитов с чередующимися полюсами, расположенными вдоль образующей цилиндрического анода. На поверхности анода индукция магнитного поля имела величину порядка 0.1 T и быстро спадала к оси разрядной камеры. Травление осуществлялось при ускоряющем напряжении 350 V при плотности тока 0.3 mA/cm². Температура поверхности образца во время травления не превышала 100°C. Скорость травления составляла 4–5 nm/min.

На рис. 1 показан стенд для испытания ВТСП микрополосковых устройств СВЧ-диапазона. Стенд включает в себя: 1) малогабаритную криогенную машину K535 фирмы Ricor; 2) откачной вакуумный пост Hi Cube 80 фирмы Pfeifer Vacuum; 3) анализатор цепей 37269 D фирмы Anritsu; 4) разработанный нами вакуумный криостат, оснащенный

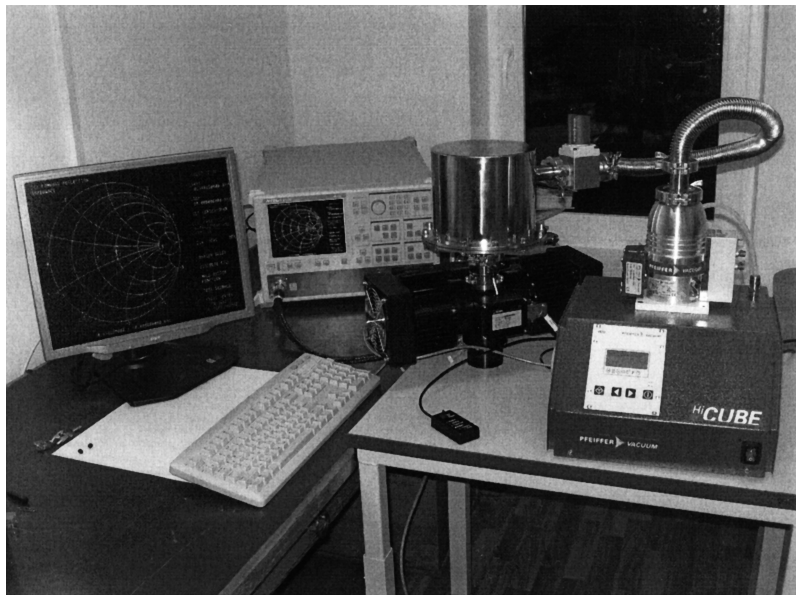


Рис. 1. Стенд для испытания устройств ВТСП СВЧ-диапазона.

герметизированными СВЧ-разъемами и полужесткими коаксиальными кабелями с низкой теплопроводностью.

На рис. 2, *a* показана тестовая структура двух связанных микрополосковых резонаторов, имеющих *S*-образную форму. Ширина микрополосковой линии $w = 0.2$ mm. Расчет волновых параметров микрополосковых линий и параметров матрицы рассеяния связанных резонаторов производился на основе специализированной программы, использующей модель электродинамических характеристик пленки ВТСП в СВЧ-диапазоне [3,4,9,10]. Было также разработано программное обеспечение, позволяющее извлекать параметры модели из экспериментальных резонансных характеристик резонаторов ВТСП, снятых при разных температурах [9,10].

На характеристики резонатора влияют параметры пленки ВТСП, определяющие ее поверхностный импеданс. Температурная зависимость этих параметров определяет зависимость характеристик резонатора

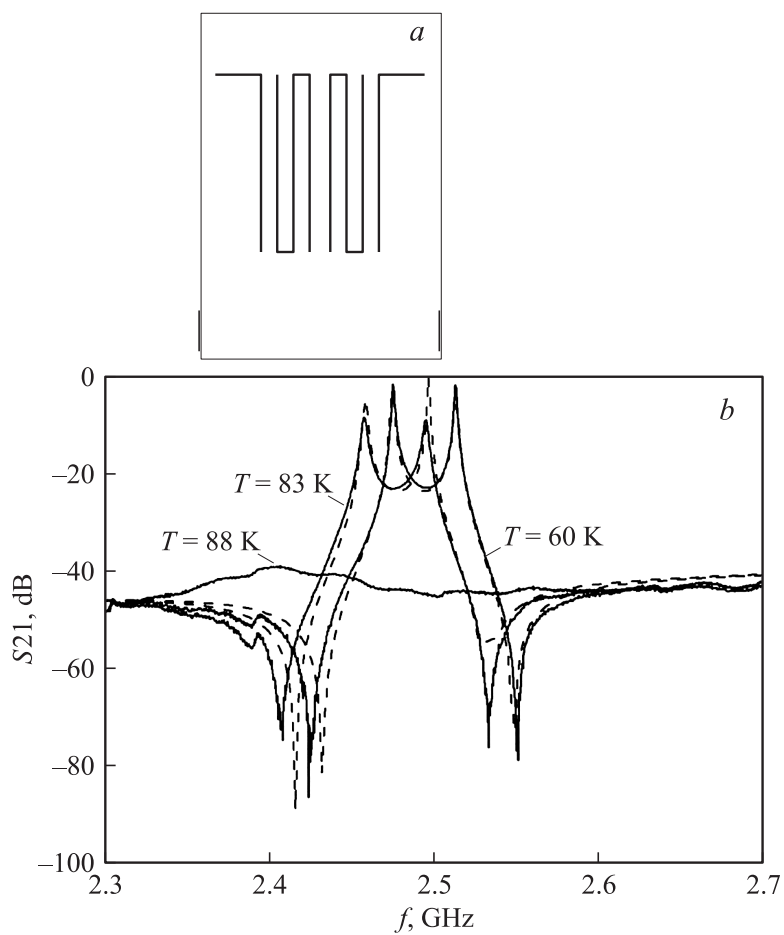


Рис. 2. Тестовая структура двух связанных резонаторов (*a*) и частотная зависимость коэффициента передачи двух связанных резонаторов при разных значениях температуры, полученная как экспериментально (сплошная линия), так и в результате расчета (пунктирная линия) с использованием найденных параметров пленки (*b*).

от частоты. Параметры модели поверхностного сопротивления пленки ВТСП представлены эмпирическими соотношениями [2–4]:

$$R_{sur}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_n(t)d} & \text{для } t \geq 1 \text{ (N-состояние),} \\ \frac{(\omega\mu_0)^2\sigma_n(t)}{1 + [\omega\mu_0\sigma_n(t)\lambda_L^2(t)]^2} \cdot \frac{\lambda_L^4(t)}{d} & \text{для } t < 1 \text{ (S-состояние),} \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\sigma_n(t) = \sigma_n(1) \begin{cases} t^{-1} & \text{для } t \geq 1 \text{ (N-состояние),} \\ t^{\gamma-1} + \alpha(1 - t^\gamma) & \text{для } t < 1 \text{ (S-состояние),} \end{cases} \quad (2)$$

$$[\lambda_L(0)/\lambda_L(t)]^2 = 1 - t^\gamma, \quad (3)$$

$$\lambda_L(0) = 0.13 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(1.27 - 0.5\gamma) \text{ [m]}. \quad (4)$$

Здесь d — толщина пленки ВТСП, $\omega = 2\pi f$, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, $\sigma_n(1)$ — проводимость нормальных носителей при температуре перехода $T = T_C$, $t = T/T_C$, $\lambda_L(0)$ — лондоновская глубина проникновения при $T = 0$, α — параметр остаточного сопротивления, γ — параметр модели, ответственный за крутизну зависимости поверхностного сопротивления от температуры вблизи перехода. В модели используются четыре подгоночных параметра: температура перехода T_C , нормальная проводимость $\sigma_n(1)$, параметры γ и α . Параметр $\gamma = 1.5-2.5$ зависит от качества пленки ВТСП: чем выше качество, тем больше γ и тем меньше поверхностное сопротивление пленки. Кроме того, по результатам эксперимента уточняются толщина пленки ВТСП и диэлектрическая проницаемость подложки.

Мнимая часть поверхностного импеданса описывается выражением:

$$X_{sur}(t) = \begin{cases} 0 & \text{для } t \geq 1 \text{ (N-состояние),} \\ \omega\mu_0 \frac{\lambda_L^2(t)}{d} & \text{для } t < 1 \text{ (S-состояние).} \end{cases} \quad (5)$$

Из (6) определяется кинетическая индуктивность сверхпроводящей пленки:

$$L_k(t) = \mu_0 \frac{\lambda_L^2(t)}{d}. \quad (6)$$

Температурная зависимость кинетической индуктивности связана с температурной зависимостью лондоновской глубины проникновения и в соответствии с (3) и (4) полностью определяется параметром γ . Вклад кинетической индуктивности в эффективную диэлектрическую проницаемость микрополосковой линии, образующей резонатор, определяет зависимость резонансной частоты резонаторов ВТСП от температуры.

На рис. 2, *b* приведена частотная зависимость коэффициента передачи двух связанных резонаторов при разных значениях температуры, полученная как экспериментально, так и в результате моделирования с использованием найденных параметров пленки. Как уже было сказано выше, параметры модели находятся из экспериментальных частотных характеристик микрополосковых резонаторов, полученных при разных температурах [9,10]. Найденные параметры модели исследуемой пленки YBCO: $T_c = 88$ К; $\gamma = 1.95$; $\alpha = 10$; $\sigma = 2.5 \cdot 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$. Толщина пленки $d = 0.62 \mu\text{m}$; диэлектрическая проницаемость подложки $\varepsilon = 23.8$. Найденным параметрам пленки соответствует поверхностное сопротивление пленки $R_{sur} = 0.02 \text{ m}\Omega$ при $T = 65$ К на частоте 2.5 GHz.

Обратим внимание на характеристики, представленные на рис. 2, *b*. При $T = T_c$ (88 К) коэффициент передачи весьма мал ($|S_{12}| \leq -40$ dB), хотя в этом случае на частоте $f = 2.4$ GHz намечается едва заметный максимум. При $T = 83$ К и $T = 60$ К наблюдаются типичные характеристики коэффициента передачи двух связанных резонаторов. С понижением температуры характеристика смещается в сторону более высоких частот. Это объясняется тем, что при понижении температуры уменьшается кинетическая индуктивность линии передачи. Найденные параметры пленки и подложки теперь могут быть использованы при синтезе и проектировании многоэлементных фильтров на тех же пленках.

Описанный прием нахождения параметров пленки ВТСП и подложки на основе простого резонатора (или двух связанных) [9,10] и последующий синтез и проектирование многоэлементного фильтра был неоднократно испытан [5–8] и показал успешные результаты. На основании полученного опыта был предложен и опробован метод проектирования многоэлементного фильтра, который не требует подстройки после изготовления [11].

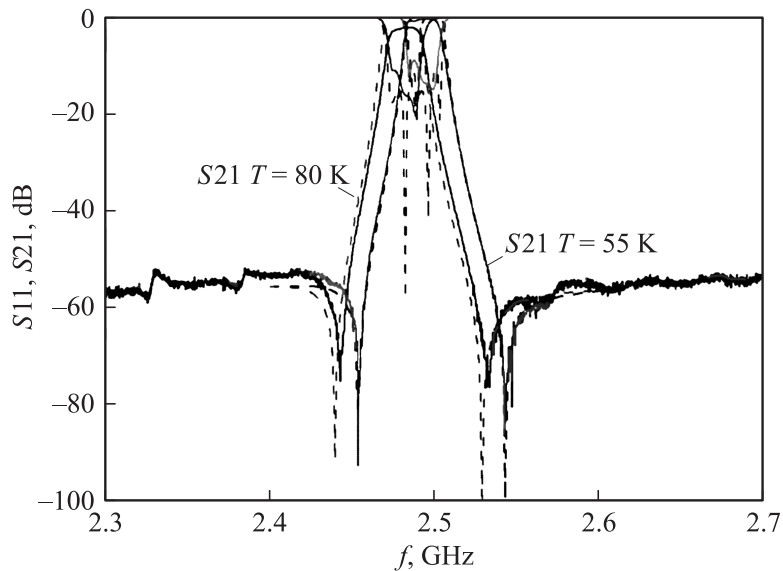


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента передачи и коэффициента отражения фильтра 4-го порядка при двух значениях температуры, полученная экспериментально (сплошная линия) и в результате расчета с использованием найденных параметров пленки (пунктирная линия).

В данной работе выполнено проектирование фильтра ВТСП 4-го порядка на S -образных резонаторах с учетом найденных параметров пленки и подложки. Для изготовления фильтра использовалась та же технология ионного травления. На рис. 3 представлены расчетные и экспериментальные характеристики фильтра для двух разных температур. Заметим, что экспериментальные и расчетные характеристики весьма хорошо совпадают. Это говорит об адекватности использованной модели и достоверности найденных параметров пленки и диэлектрической проницаемости подложки.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Корпорации „Русский сверхпроводник“.

Список литературы

- [1] Бельский М., Вендик О.Г., Гайдюков М.М., Карманенко С.Ф., Козырев А.Б., Колесов С.Г., Самойлова Т.Б. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. Приложение. С. 172–175.
- [2] Вендик О.Г. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 12. С. 1098–1102.
- [3] Vendik O.G., Vendik I.B., Kaparkov D.I. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1998. V. 46. Part 1. N 5. P. 469–478.
- [4] Vendik I.B., Vendik O.G., Deleniv A.N., Kondratiev V.V., Goubina M.N., Kholodniak D.V. // IEEE Trans. on MTT. 2000. V. 48. N 7. P. 1247–1255.
- [5] Vendik I.B., Deleniv A.N., Sherman V.O., Svishchev A.A., Kondratiev V.V., Kholodniak D.V., Lapshin A.V., Yudin N., Min B.-C., Choi Y.H., Oh B. // IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 2001. V. 11. N 1. P. 477–480.
- [6] Vendik I., Deleniv A., Svishchev A., Goubina M., Lapshin A., Zaitsev A., Schneider R., Geerk J., Aidam R. // IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 2001. V. 11. N 1. P. 361–364.
- [7] Gashinova M.S., Goubina M.N., Zhang Guoyong, Kolmakov I.A., Kolmakov Y.A., Vendik I.B. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. 2003. V. 51. N 3. P. 792–795.
- [8] Vendik I.B., Gashinova M.S., Goubina M.N., Kolmakov Y.A., Kolmakov I.A., Zhang G.Y. // IEEE Trans. Applied Superconductivity. 2003. V. 13. N 2. P. 284–286.
- [9] Юдин П.Н., Вендик И.Б. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 10. С. 62–69.
- [10] Vendik I., Yudin P. // IEEE Trans. Applied Superconductivity. 2003. V. 13. N 2. P. 280–283.
- [11] Vendik O.G., Vendik I.B., Deleniv A.N., Gashinova M.S., Lapshin A.V., Kholodniak D.V. // J. Superconductivity. 2001. V. 14. N 1. P. 23–30.