

УДК 637.621.3

**РАСЧЕТ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ****Головкина М.В., Феопемптов Р.С.***Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, e-mail: nauka77@yandex.ru*

В работе рассмотрена связанная микрополосковая линия на основе тонких пленок из высокотемпературных сверхпроводников. Проведены расчеты электродинамических параметров микрополосковой линии, исследовано влияние температуры на величину коэффициента передачи линии. Для расчетов использована феноменологическая модель зависимости проводимости высокотемпературного сверхпроводника от температуры, использующая четыре феноменологических параметра, которые определяются из экспериментальных данных, полученных для объемного сверхпроводника. Расчеты проведены для микрополосковой линии на основе тонких пленок сверхпроводника из высокотемпературной керамики YBCO. В результате расчетов продемонстрировано влияние температуры на коэффициент передачи микрополосковой линии. Показано, что при соответствующем подборе параметров, а именно размеров и толщины сверхпроводящих пленок, рассматриваемая линия может использоваться как при низких температурах, так и при температурах, близких к критической температуре сверхпроводника.

**Ключевые слова:** сверхпроводник второго рода, микрополосковая линия, коэффициент прохождения, критическая температура

**COMPUTATION OF TRANSFER COEFFICIENT OF COUPLED SUPERCONDUCTING MICROSTRIP LINE****Golovkina M.V., Feopemptov R.S.***Povolzhskiy State University of Telecommunication & Information, Samara, e-mail: nauka77@yandex.ru*

In this paper the coupled microstrip line based on thin films of high-temperature superconductors have been considered. The electrodynamic parameters of the microstrip line have been calculated. The effect of temperature on the transmission coefficient lines have been investigated. The calculations used the phenomenological model of the high-temperature superconductor by taking into account the temperature dependence of the conductivity. This model uses four phenomenological parameters, which are determined from the experimental data obtained for a bulk superconductor. The numerical calculations were performed for a microstrip line based on thin films of high-temperature superconductor ceramic YBCO. It was shown that with appropriate choice of size and thickness of the superconducting films considered microstrip line may be used not only at lower temperatures but also at temperatures close to the critical temperature of the superconductor.

**Keywords:** type-II superconductor, microstrip line, transmittance, critical temperature

Связанные микрополосковые линии, имеющие малые размеры, широко применяются для создания различных устройств, таких как фильтры, направленные ответвители, элементы согласования комплексных сопротивлений, линии задержки [6], [8]. Применение высокотемпературных сверхпроводников для изготовления микрополосковых линий позволяет существенно уменьшить потери по сравнению с микрополосковыми линиями на обычных проводниках [2, 3].

В связанных линиях имеется три проводника: две параллельные полоски и экран (или заземленная пластина). Рассмотрим следующую геометрию связанной микрополосковой линии: две полоски шириной  $W$  из высокотемпературного сверхпроводника расположены на расстоянии  $s$  друг от друга на подложке из диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью толщиной  $h$ . Диэлектрическая подложка разделяет сверхпроводящие полоски и проводящий экран, которые может быть выполнен как из сверхпроводящего материала, так и из обычного

проводника. Толщина сверхпроводящих полосок  $d$ . Предполагается, что сверхпроводящие полоски находятся в сверхпроводящем состоянии, соответственно температура  $T < T_c$ , где  $T_c$  – критическая температура для используемого сверхпроводника.

**Температурная модель**

Рассмотрим феноменологическую модель, теоретически описывающую параметры рассматриваемой микрополосковой линии, приведенную в работах [1, 5]. Модель применима в случае, если глубина проникновения поля в проводник много меньше толщины диэлектрической подложки  $h$ , на которую нанесены связанные проводники и заземленная пластина. Как правило, это приближение выполняется в практически используемых структурах связанных микрополосковых линий. Параметры модели являются подгоночными и определяются из сравнения с экспериментальными результатами, полученными для тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников, из которых выполнены полоски линии. Для

расчета характеристик микрополосковой линии необходимо знание поверхностного импеданса. В рамках предложенной в работах [1, 5] модели поверхностный импеданс записывается в виде:

$$Z_{sur}^0 = \left( \frac{i\omega\mu_0}{\sigma_1 - i\sigma_2} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\sigma = \sigma_1 - i\sigma_2$  – удельная проводимость сверхпроводника, которая в рамках используемой модели имеет следующую температурную зависимость [5]:

$$\sigma_1(t) = \sigma_n(1) \cdot [t^{y-1} + \alpha \cdot (1-t^y)], \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{\omega\mu_0\lambda_L^2}, \quad (3)$$

$$\left[ \frac{\lambda_L(0)}{\lambda_L(1)} \right]^2 = 1 - t^y, \quad (4)$$

Здесь  $\sigma_n(1)$  – проводимость нормальных носителей заряда при температуре  $T_c$ ,  $t = T/T_c$  – приведенная температура,  $T$  – температура,  $\lambda_L$  – лондоновская глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник,  $\lambda_L(0) = 0,13 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(1,27 - 0,5\gamma)$ ,  $\alpha$  – параметр остаточного сопротивления и  $\gamma$  – эмпирический параметр, определяющий температурную зависимость лондоновской глубины проникновения. Модель использует следующие феноменологические параметры:  $T_c$ ,  $\sigma_n(1)$ ,  $\alpha$  и  $\gamma$ . В случае использования сверхпроводника в виде тонкой пленки необходимо учитывать отражение электромагнитной волны от обеих границ пленки и рассчитывать поверхностный импеданс по формуле [1]:

$$Z_{sur} = R_{sur} + iX_{sur} = \frac{Z_{sur}^0}{th(ikd)}, \quad (5)$$

$$k(t) = \sqrt{-i\omega\mu_0\sigma_1(t) - \frac{1}{\lambda_L^2(t)}}. \quad (6)$$

Для описания линии передачи из высокотемпературных сверхпроводников используются следующие параметры: волновое сопротивление  $Z_0$ , волновое число  $\beta$  и коэффициент затухания  $\alpha_{at}$ . Волновое число  $\beta$  в микрополосковой линии рассчитывается по формуле:

$$\beta = \frac{\omega \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c}, \quad (7)$$

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_{eff}^0 \cdot \left( 1 + \frac{L_k}{L_1} \right), \quad (8)$$

Здесь  $\epsilon_{eff}$  – эффективная проницаемость подложки,  $\epsilon_{eff}^0$  – эффективная проницаемость подложки без учета вклада сверхпроводника,  $L_k$  – кинетическая индуктивность сверхпроводника,  $L_1$  – погонная индуктивность линии передачи. Кинетическая индуктивность сверхпроводника рассчитывалась в соответствии с подходом, предложенным в работе [7]. Кинетическая индуктивность для нечетной моды рассчитывалась по формуле

$$L_k^o = \frac{\mu_0\lambda_L}{I} a^o \coth\left(\frac{d}{\lambda}\right), \quad (9)$$

для четной моды

$$L_k^e = \frac{\mu_0\lambda_L}{I} a^e \coth\left(\frac{d}{\lambda}\right), \quad (10)$$

где

$$a^o = \frac{2}{W} \int_{s/2}^{W+s/2} H_x^o dx, \quad (11)$$

$$a^e = \frac{2}{W} \int_{s/2}^{W+s/2} H_x^e dx, \quad (12)$$

$W$  – ширина полоскового сверхпроводника,  $s$  – расстояние между полосками,  $I = 2K(k)$ ,  $K(k)$  – полный эллиптический интеграл [7],  $H_x^o$  и  $H_x^e$  –  $x$  – компонента магнитного поля для нечетной и четной моды, рассчитанная в соответствии с работой [7].

Коэффициент затухания определяется выражением:

$$\alpha_{at} = \frac{R_{sur}}{2Z_0W_{eff}}, \quad (13)$$

где  $R_{sur}$  – действительная часть поверхностного импеданса сверхпроводящей пленки,  $W_{eff}$  – эффективная ширина проводника линии с учетом неравномерного распределения плотности поверхностного тока по ширине проводника [5].

Зависимость кинетической индуктивности от температуры определяется температурной зависимостью лондоновской глубины проникновения магнитного поля в сверхпроводник. Как показано в работе [5], вклад кинетической индуктивности в эф-

фактивную диэлектрическую проницаемость микрополосковой линии, образующей резонатор, определяет зависимость резонансной частоты сверхпроводящих резонаторов от температуры. Целью данной работы является исследование коэффициента передачи сверхпроводящей полосовой линии и возможность управления коэффициентом передачи при изменении температуры.

### Результаты расчетов

Расчеты проводились для двух связанных полосок из высокотемпературного сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_7$ . На рисунках 1 и 2 представлены результаты расчета коэффициента передачи, проведенного в соответствии с формулами (1 – 13). Для расчетов использовались следующие параметры:  $\varepsilon_{eff}^0 = 200$ ,  $\gamma = 2.1$ ,  $\alpha = 5.2$ ,  $\sigma_n(1) = 1.7 \cdot 10^8 \text{ Ом} \times \text{м}$ ,  $T_c = 88 \text{ К}$ ,  $\varepsilon_{eff} = 9.8$ ,  $d = 0.25 \text{ мкм}$ . На рис. 1 показана температурная зависимость коэффици-

ента прохождения  $T$  для микрополосковой линии.

Из рис. 1 видно, что изменение температуры оказывает заметное влияние на величину коэффициента прохождения. Наиболее заметное изменение наблюдается при температурах, чуть ниже критической в диапазоне  $0.7 \times T_c < T < T_c$ . Причем, изменение частоты оказывает влияние на поведение коэффициента прохождения. При частоте  $\omega = 5 \cdot 10^{14} \text{ рад/с}$  коэффициент передачи уменьшается с ростом температуры, а при частоте  $\omega = 6 \cdot 10^{14} \text{ рад/с}$  возрастает.

На рис. 2 представлена частотная зависимость коэффициента передачи. Качественная зависимость коэффициента передачи соответствует экспериментальным данным для связанной микрополосковой линии, приведенным в работе [4]. При увеличении температуры полоса пропускания полосковой линии смещается в сторону более низких частот.

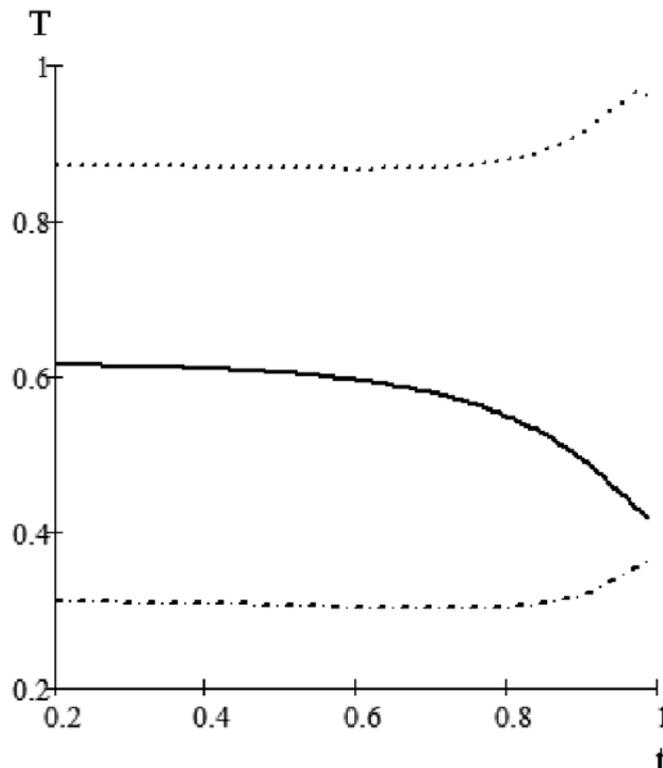


Рис. 1. График зависимости коэффициента прохождения  $T$  от приведенной температуры для разных частот. Сплошная кривая:  $\omega = 5 \cdot 10^{14} \text{ рад/с}$ , пунктирная кривая:  $\omega = 6 \cdot 10^{14} \text{ рад/с}$ , точечная кривая:  $\omega = 8 \cdot 10^{14} \text{ рад/с}$

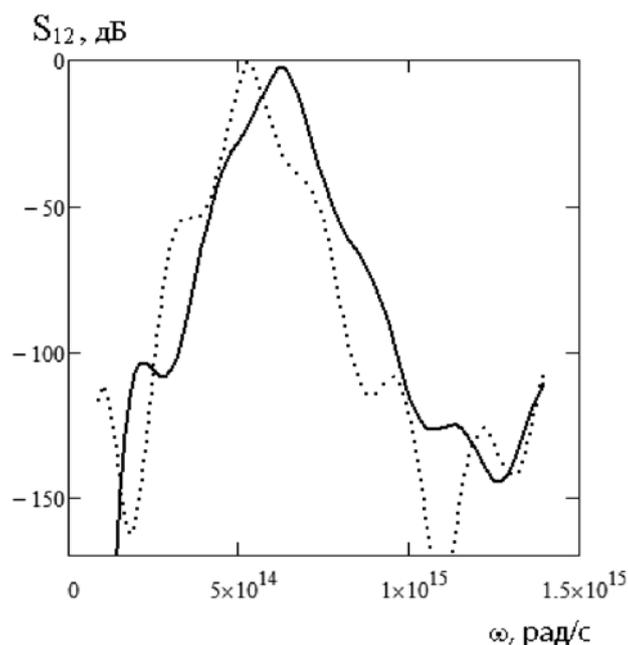


Рис. 2. График зависимости коэффициента передачи от частоты для высокотемпературного микрополоскового резонатора. Сплошная линия:  $T=0.7 T_c$ , пунктирная линия:  $T=0.98 T_c$ .

Особый интерес представляет зависимость коэффициента передачи для значений температур вблизи критической (пунктирная кривая). Как показано в работе [5], при увеличении температуры и приближении ее к критической коэффициент передачи существенно уменьшается. Как видно из рисунка 2 (пунктирная кривая) в случае повышения температуры соответствующий подбор параметров микрополосковой линии (толщины сверхпроводящей пленки, размеров полосок и расстояния между ними) приводит к тому, что сверхпроводящая микрополосковая линия демонстрирует большие значения коэффициента передачи даже при высоких температурах. Таким образом, результаты расчетов, проведенных в данной работе, говорят о возможности температурной перестройки параметров полосковой линии на основе высокотемпературных сверхпроводников и о возможности работы такой линии при температурах, близких к критической.

### Выводы

В работе проведен теоретический расчет электродинамических характеристик микрополосковой связанной линии на основе тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников. Показана возможность температурного управления коэффициентом передачи микрополосковой линии. В работе продемонстрировано, что соответствующий подбор параметров микрополосковой линии дает возможность ее использования при

температурах, близких к критической температуре для сверхпроводника. Результаты, полученные в работе, показывают перспективность применения высокотемпературных сверхпроводников с малыми потерями в оптоэлектронных устройствах, например фильтрах, параметры которых можно менять при изменении температуры.

### Список литературы

1. Распределение тока, поверхностный импеданс и затухание в сверхпроводниковых связанных микрополосковых фильтрах / Вендик И.Б. и др. // Журнал технической физики. – 1997. –Т. 67. –№ 2. –С. 83-88.
2. Глущенко А.Г., Головкина М.В. Распространение электромагнитных волн в периодических структурах со слоями сверхпроводника с электродинамическими параметрами в области нелинейности динамического смешанного состояния // Журнал технической физики. –2007. –Т. 77. –№ 10. –С. 118-120.
3. Головкина М.В. Магнитные свойства композита со сверхпроводящими включениями // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2010. –Т. 3. –№ 104. –С. 105-109.
4. Моделирование и экспериментальное исследование микрополосковых резонаторов и фильтра на основе высокотемпературного сверхпроводника / Ситникова М.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36. –№ 18. – С. 67-74.
5. Юдин П.Н., Вендик И.Б. Извлечение параметров модели поверхностного импеданса высокотемпературного сверхпроводника из экспериментальных характеристик микрополоскового резонатора // Письма в ЖТФ. –2003. – Т. 29. –№ 10. –С. 62-69.
6. Golovkina M.V. Specific features of the propagation of electromagnetic waves in a waveguiding structure with superconducting film and metamaterial // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. –2010. –V. 74. –№ 12. –P. 1669-1673.
7. Simple formulae for kinetic inductance of coupled superconducting microstrip lines / Kang J. et al. // Journal of Applied Physics. –1997. –V. 81. –№ 4. –P. 1829-1832.
8. Superconducting plasmonics and extraordinary transmission / Tsiatmas A. et al. // Applied physics letters. – 2010. –V. 97. –P. 111106-1-111106-3.