

05.4

## **Извлечение параметров модели поверхностного импеданса высокотемпературного сверхпроводника из экспериментальных характеристик микрорезонатора**

© П.Н. Юдин, И.Б. Вендик

С.-Петербургский государственный  
электротехнический университет „ЛЭТИ“  
E-mail: mwlab@eltech.ru

Поступило в Редакцию 24 декабря 2002 г.

Представлен метод извлечения модельных параметров высокотемпературных (ВТСП) пленок из экспериментальных резонансных характеристик микрорезонатора. Метод основан на корректной феноменологической модели поверхностного импеданса ВТСП пленки и точном расчете характеристик микрорезонатора. Процедура извлечения модельных параметров реализована с помощью генетического алгоритма. На базе описанных моделей была разработана программа, реализующая математический алгоритм, который позволяет находить на основе экспериментальных данных параметры модели ВТСП.

**1. Введение.** Пленки высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) находят применение в микроволновых устройствах, в частности в сверхузкополосных фильтрах благодаря чрезвычайно низкому значению поверхностного сопротивления. Разработка таких фильтров базируется на анализе планарных СВЧ структур, использующем корректные модели планарных ВТСП линий передачи с учетом характеристик сверхпроводящих пленок. Использование модели предполагает знание модельных параметров, которые рассматриваются как подгоночные. Для нахождения этих параметров необходимо использовать экспериментальные результаты, например резонансные характеристики планарных резонаторов, выполненных на той же пленке, на которой предполагается разработать фильтр.

В данной работе рассматривается связь характеристик микрополосковых ВТСП резонаторов с параметрами феноменологической модели поверхностного импеданса ВТСП и приводится описание разработанной процедуры извлечения параметров модели из этих характеристик с применением генетического алгоритма.

**2. Феноменологическая модель поверхностного импеданса ВТСП и его связь с характеристикой резонатора.** Феноменологическая модель поверхностного импеданса ВТСП, разработанная в [1–4], записывается в виде

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

где

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

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

$$[\lambda_L(0)/\lambda_L(t)]^2 = 1 - t^\gamma. \quad (4)$$

Здесь  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  — частота,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума,  $\sigma_n(1)$  — проводимость нормальных носителей заряда при температуре  $T_C$ ,  $t = T/T_C$ ,  $T$  — температура,  $\lambda_L$  — лондоновская глубина проникновения,  $\lambda_L(0) = 0.13 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(1.27 - 0.5\gamma)$  м,  $\alpha$  — параметр остаточного сопротивления и  $\gamma$  — эмпирический параметр, определяющий температурную зависимость лондоновской глубины проникновения. Модель использует 4 подгоночных параметра:  $T_C$ ,  $\sigma_n(1)$ ,  $\alpha$  и  $\gamma$ . При использовании пленочных структур следует учитывать отражение электромагнитной волны от обеих границ пленки и рассчитывать поверхностный импеданс по формуле

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

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

ВТСП линия передачи описывается волновым сопротивлением  $Z_0$  и параметрами распространения: волновым числом  $\beta$  и коэффициентом затухания  $\alpha_{at}$ . На параметры распространения существенно влияют

характеристики ВТСП проводников линии. Волновое число рассчитывается по формуле:

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

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_{eff}^0 \cdot (1 + L_k/L_1), \quad (8)$$

$$L_k = \frac{X_{sur}}{\omega\mu_0} = \mu_0\lambda_L^2 / (d \cdot w_{eff}). \quad (9)$$

Здесь  $\varepsilon_{eff}$  — эффективная проницаемость подложки,  $\varepsilon_{eff}^0$  — эффективная проницаемость подложки без учета вклада ВТСП,  $c$  — скорость света в вакууме,  $L_k$  — кинетическая индуктивность сверхпроводника,  $L_1$  — погонная индуктивность линии передачи,  $w_{eff}$  — эффективная ширина проводника линии передачи с учетом неравномерного распределения плотности поверхностного тока по ширине проводника [4,5].

Коэффициент затухания определяется выражением:

$$\alpha_{at} = \frac{R_{sur}}{2Z_0w_{eff}}. \quad (10)$$

При использовании отрезка ВТСП линии в качестве резонатора его связывают с внешними цепями с помощью элементов связи. Для расчета характеристик ВТСП резонатора на планарных линиях (микростриповая, копланарная) разработан программный продукт, обеспечивающий расчет элементов матрицы рассеяния  $[S]$  с учетом вклада ВТСП [6]. Программа использует квазистатистический метод анализа СВЧ структур в частотной области. Таким образом, характеристики резонатора  $[S]$  могут быть рассчитаны в диапазоне частот, при этом они зависят от температуры и от модельных параметров в соответствии с (1)–(10).

**3. Извлечение параметров модели из экспериментальных характеристик ВТСП резонатора.** Извлечение параметров модели осуществляется с помощью оптимизационной процедуры с применением генетического алгоритма, введенного ранее для описания эволюционного процесса биологических объектов [7]. Генетический алгоритм позволяет найти глобальный минимум целевой функции и является эффективным с точки зрения компьютерных затрат.

При построении символьной модели генетического алгоритма множество допустимых решений представляется в виде конечной популя-

ции особей. Каждая особь в популяции обладает мерой приспособленности к окружающей среде. Процесс поиска оптимального решения описывается процессом моделируемой „эволюции“, целью которой является нахождение особи (или множества особей), имеющей максимальную приспособленность, т. е. особи, соответствующей оптимальному значению.

Каждая особь представлена в виде набора некоторого числа генов (битовых строк заданной длины), называемого хромосомой. Число генов в хромосоме соответствует размерности решаемой задачи; каждый ген используется для кодирования небольшого интервала значений одного из параметров модели. По существу, такая кодировка соответствует разбиению пространства параметров на гиперкубы, которым соответствуют уникальные комбинации битов в хромосоме (генотип).

В данной задаче нахождения модельных параметров ВТСП ген представляет собой бинарный код одного из извлекаемых параметров:  $d, T_C, \sigma_N, \alpha, \gamma, \varepsilon$ . Хромосома — это совокупность генов. Число генов в хромосоме для данной задачи — максимум шесть, что соответствует случаю извлечения всего набора модельных параметров.

Каждое решение генетического алгоритма будет иметь следующую структуру:

1. Точка в пространстве параметров (фенотип):  $\mathbf{X} = (d, T_C, \sigma_N, \alpha, \gamma, \varepsilon)$  принадлежит  $\mathbf{D}$  из  $\mathbf{R}^N$ ;
2. Бинарная строка  $s$  фиксированной длины, однозначно идентифицирующая гиперкуб разбиения пространства параметров (генотип):  $s = (b_1, b_2, \dots, b_l)$  принадлежит  $S$ , где  $S$  — пространство представлений — бинарных строк длины  $l$ .
3. Скалярная величина  $m$ , соответствующая значению целевой функции в точке  $x$  (приспособленность):  $\mathbf{m} = f(x)$ .

В терминологии, принятой в теории ГА, такую структуру принято называть особью. Совокупность особей принято называть популяцией.

Как известно, в теории эволюции важную роль играет то, каким образом признаки родителей передаются потомкам. В генетических алгоритмах за передачу признаков родителям потомкам отвечает оператор, который называется *скрещивание* (его также называют кроссовер, или кроссинговер). Этот оператор определяет передачу признаков родителям потомкам. Действует он следующим образом: 1) из популяции выбираются две особи, которые будут родителями; 2) определяется

(обычно случайным образом) точка разрыва; 3) потомок определяется как конкатенация части первого и второго родителя.

Следующий генетический оператор предназначен для того, чтобы поддерживать разнообразие особей в популяции. Он называется оператором *мутации*. При использовании данного оператора каждый бит в хромосоме с определенной вероятностью инвертируется.

В принципе для функционирования генетического алгоритма достаточно этих двух генетических операторов, но на практике применяют еще и некоторые дополнительные операторы или их модификации.

Целевая функция для нахождения модельных параметров имеет следующий вид:

$$Q = Q(\mathbf{X}) = \sum_{k=1}^n \left( \frac{(S11_{exp} - S11_{cal}(\mathbf{X}_k))^2}{S11_{exp}^2} \right) + \sum_{k=1}^n \left( \frac{(S12_{exp} - S12_{cal}(\mathbf{X}_k))^2}{S12_{exp}^2} \right). \quad (11)$$

Здесь  $S11_{exp}$ ,  $S11_{cal}$ ,  $S12_{exp}$ ,  $S12_{cal}$  — экспериментальные и расчетные параметры рассеяния резонатора ( $S11$  — коэффициент отражения;  $S12$  — коэффициент передачи),  $n$  — число экспериментальных данных,  $\mathbf{X}$  — вектор параметров оптимизации:  $\mathbf{X} = (d, T_C, \sigma_N, \alpha, \gamma, \varepsilon)$ . В число подгоночных параметров (параметров оптимизации) включены толщина пленки  $d$  и диэлектрическая проницаемость подложки  $\varepsilon$ , так как, как правило, эти параметры неизвестны.

Требуется найти минимум целевой функции

$$\min_{x \in D} Q = Q(\mathbf{X}^*) = Q^*, \quad (12)$$

при заданных ограничениях:  $x_j^- \leq x_j \leq x_j^+$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ , где  $\mathbf{X}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*)$  есть вектор оптимальных параметров, соответствующих минимуму целевой функции  $Q(\mathbf{X})$ ,  $N$  — число оптимизируемых параметров.

Решение задачи нахождения экстремума целевой функции  $Q(\mathbf{X})$  генетическим алгоритмом состоит в следующем:

1. Инициализация начальной популяции.
2. Вычисление функций полезности для особей популяции.
3. Выбор индивидов из текущей популяции.

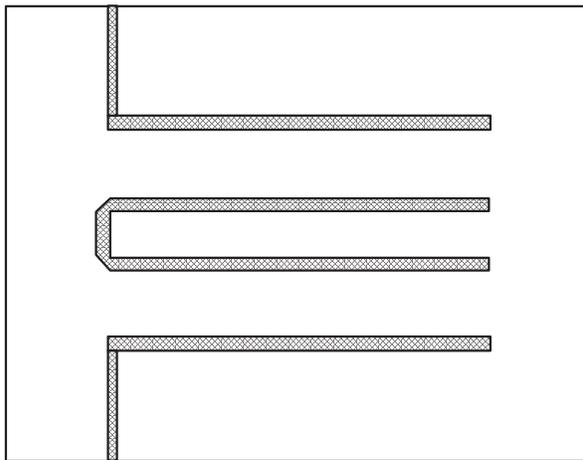


Рис. 1. Топология микрополоскового резонатора на пленке YBCO.

4. Применение операторов скрещивания и мутации для создания потомков.

5. Вычисление функции полезности для всех особей.

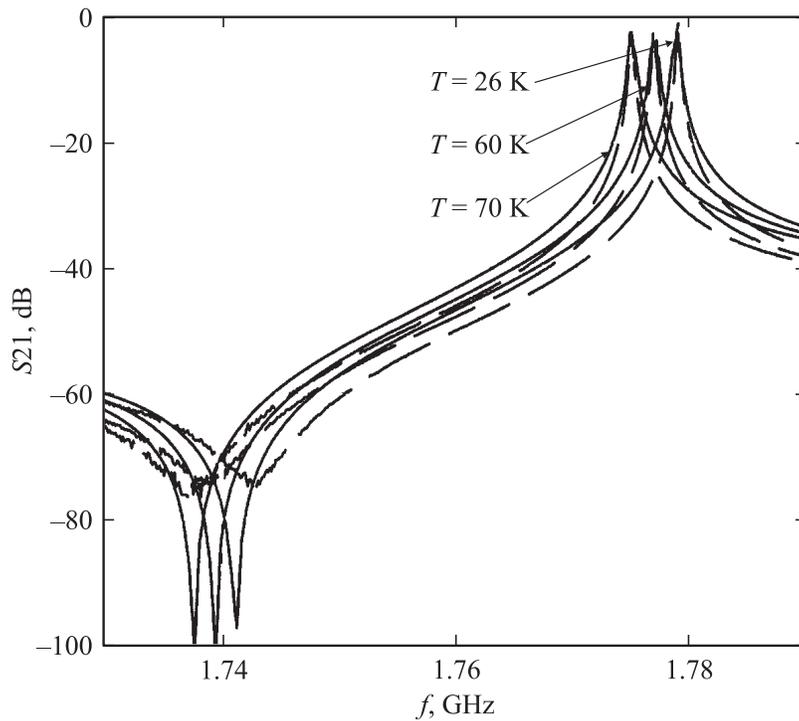
6. Выбор особей в новую популяцию.

7. Пункты 3–6 повторяются до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность определения минимального значения целевой функции  $Q(\mathbf{X})$  и соответствующего вектора параметров  $\mathbf{X}$ .

**4. Применение метода извлечения параметров модели к YBCO микрополосковому резонатору.** Микрополосковый резонатор в виде шпильки изготовлен на подложке  $\text{LaAlO}_3$  толщиной  $d = 450 \text{ nm}$  с использованием пленки YBCO (рис. 1) [8,9]. Резонатор представляет собой планарную многопроводную структуру, которая моделируется с помощью программы [6]. При этом учитываются все связи между линиями.

Процедура извлечения параметров применяется ко всем экспериментальным данным, полученным при разных температурах.

Были заданы параметрические ограничения:  $50 \text{ K} \leq T_c \leq 100 \text{ K}$ ;  $2 \leq \gamma \leq 5$ ;  $50(\Omega \cdot \text{m}^{-1}) \leq \sigma_n(1) \leq 100(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ;  $5 \leq \alpha \leq 20$ . Число хромосом в популяции 100.



**Рис. 2.** Рассчитанные (сплошная линия) и измеренные (пунктирная линия) характеристики резонатора.

Следующий набор параметров соответствует глобальному минимуму целевой функции (11):  $T_C = 85$  К,  $\gamma = 2.3$ ,  $\sigma_n(1) = 2.5 \cdot 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ,  $\alpha = 13$ . Диэлектрическая проницаемость подложки 23.63. Время расчета на Pentium IV 1.7 GHz (ОЗУ 256 МБ) составило 30 s.

Найденные параметры модели поверхностного импеданса использовались для расчета резонансных характеристик ВТСП резонаторов при различных температурах. Результаты расчета приведены на рис. 2, где для сравнения представлены экспериментальные характеристики. Имеет место хорошее соответствие между расчетными и измеренными характеристиками.

**5. Заключение.** Предложен метод извлечения параметров модели поверхностного импеданса ВТСП из экспериментальных характеристик резонаторов на микрополосковых ВТСП линиях. Совпадение экспериментальных резонансных характеристик резонаторов с расчетными, полученными с использованием извлеченных параметров модели, подтверждает, с одной стороны, корректность модели и, с другой стороны, пригодность процедуры извлечения модельных параметров.

## Список литературы

- [1] *Vendik I.* // *Superconductor Science and Technology*. 2000. V. 13. P. 974–982.
- [2] *Vendik O.G., Vendik I.B., Kaparkov D.I.* // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 1998. V. 46 (5). P. 469–478.
- [3] *Vendik I.B.* // *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*. March 2001. V. 11. N 1. P. 3545–3548.
- [4] *Vendik I.B., Vendik O.G., Kaparkov D.I.* *High-Temperature Superconducting Devices for Microwave Signal Processing. Part 2. Superconducting Microwave Circuits.* St. Petersburg: Skladen, 1997.
- [5] *Вендик И.Б., Губина М.Н., Деленив А.Н., Холодник Д.В.* // *ЖТФ*. 1997. Т. 42. В. 2. С. 83–87.
- [6] *Vendik I.B., Vendik O.G., Deleniv A.N., Kondratiev V.V., Goubina M.N., Kholodniak D.V.* // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.* July 2000. V. 48. N 7. P. 1247–1255.
- [7] *Goldberg D.* *Genetic Algorithms in Search Optimization And Machine Learning.* Addison-Wesley, New York, NY, 1989.
- [8] *Kim H.T., Min B.-C., Choi Y.H., Moon S.H., Lee S.M., Oh B., Lee J.-T., Park I., Shin C.-C.* // *IEEE Trans Applied Supercond.* 1999. V. 9 (2). P. 3909–3912.
- [9] *Deleniv A.N., Kholodniak D., Lapshin A., Vendik I., Yudin P., Min B.-C., Choi Y.H., Oh B.* // *Superconductor Science and Technology*. 2000. V. 13. P. 1419–1423.