

05.4

Моделирование пассивных сверхвысокочастотных устройств на основе высокотемпературных сверхпроводников для планарных многослойных анизотропных структур

© М.С. Гашинова, И.А. Колмаков, Я.А. Колмаков, И.Б. Вендик

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

Поступило в Редакцию 14 ноября 2001 г.

Выполнен электродинамический анализ произвольной многослойной среды, включающей анизотропные слои и содержащей проводники произвольной формы в одной из поверхностей раздела. В качестве проводников рассматриваются тонкие слои высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП). Интегральные уравнения для электрического поля решаются в пространственной области. Результатом численного решения электродинамической задачи является определение плотности поверхностного тока в процессе применения процедуры Галеркина и решения основного матричного уравнения относительно коэффициентов разложения плотности тока по введенному базису пространственно дискретных функций. Учет потерь в ВТСП осуществляется на основе определения эквивалентного поверхностного импеданса и применения граничных условий Леонтовича. Анизотропия учитывается в определении спектральной диады Грина для структур с произвольным количеством анизотропных или изотропных слоев.

Расчет распределения плотности поверхностного тока демонстрирует корректность предложенной модели.

Введение. Электрические свойства ВТСП делают привлекательным их использование для создания миниатюрных сверхузкополосных фильтров и подобных устройств. Наиболее важным аспектом при проектировании таких устройств является достижение высокой точности расчета распределения тока в структуре, что обеспечивается корректностью электродинамической модели с учетом параметров ВТСП

и анизотропии слоев. Необходимость учета анизотропии актуальна при использовании ВТСП пленок на подложках из монокристаллического сапфира.

Преимущества трехмерного анализа по сравнению с двумерным становятся очевидными при рассмотрении топологически сложных структур, поскольку данный подход позволяет в первую очередь преодолеть проблемы, связанные с учетом неоднородностей структуры.

Постановка задачи и анализ модели. Моделирование планарных структур осуществляется на основе решения интегральных уравнений, связывающих электрическое поле и электрические токи в плоскости расположения сигнальных электродов с диадой Грина в качестве ядра интегрального оператора [1]. Задача дискретизируется в результате введения пространственной сетки в плоскости, содержащей проводники, и базиса финитных функций для разложения плотности тока на введенной сетке. Интегральный оператор сводится к дискретному представлению в виде двойных рядов по индексам сетки.

Моделируемая структура представляет собой многослойную среду, ограниченную электрическими стенками, содержащую в одной из поверхностей раздела проводник произвольной формы. Поверхности раздела являются плоскостями, параллельными плоскости XU . Проводник разбивается на две области Ω и Q . В области Ω определяется искомое распределение плотности тока. Область Q является областью возбуждения, перекрывающейся с областью Ω , в которой задается фиксированная поверхностная плотность возбуждающего тока J_{imp} .

Тангенциальное электрическое поле $\mathbf{E}_t(x, y)$ в плоскости проводника может быть выражено в терминах плотности поверхностного тока $\mathbf{J}_t(x, y)$ в следующем виде:

$$j\omega\varepsilon_0\mathbf{E}_t = \iint_{\Omega} \mathbf{G}_E(x, y, x', y')\mathbf{J}_t(x', y')dy'dx', \quad (1)$$

где

$$\mathbf{E}_t = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}, \quad \mathbf{J}_t = \begin{pmatrix} J_x \\ J_y \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \mathbf{G}_E = \begin{pmatrix} G_{xx} & G_{xy} \\ G_{yx} & G_{yy} \end{pmatrix}$$

— диада Грина, представляющая собой ядро интегрального оператора векторного уравнения, ω — круговая частота, ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Введенная сетка позволяет определить базис из финитных функций, образованных произведением треугольных и прямоугольных импульсов

для разложения плотности поверхностного тока и отличающихся трансляционным сдвигом по пространственной координате.

Для определения выражений компонент диады Грина в спектральной области каждый диэлектрический слой описывается с помощью уравнений Максвелла и характеризуется тензором магнитной и диэлектрической проницаемости размерности 6×6 [2]. Это позволяет учесть анизотропию слоев, в отличие от метода, основанного на определении функций Грина как комбинации волновых импедансов поперечно-магнитной и поперечно-электрической волн в направлении Z [3].

Для рассматриваемой в нашем случае экранированной структуры ядро интегрального оператора может быть представлено как дискретное двумерное преобразование Фурье найденных спектральных выражений функции Грина.

В целях вычислительной эффективности ряды должны быть представлены соответствующими частичными суммами, верхний предел суммирования которых определяется заданной оценкой остаточного члена ряда.

Уравнение, связывающее тангенциальные составляющие электрического поля падающей, отраженной и прошедшей волн, имеет вид

$$\mathbf{E}_{inc} + \mathbf{E}_{scat} = \mathbf{E}_{tran} \Leftrightarrow \iint_D (\mathbf{G}J_{imp} + \mathbf{G}J_t) dS = Z_s J_t, \quad (2)$$

где D — прямоугольная область сечения структуры в плоскости XY , Z_s — эквивалентный поверхностный импеданс ВТСП-пленки. Ненулевой член в правой части уравнения обеспечивает учет потерь в случае неидеального проводника.

Представляя плотность искомого тока в виде разложения по введенному базису и выражая плотность тока источника также в терминах указанного базиса в результате применения тестирующей процедуры Галеркина для решения (2), получим систему линейных уравнений относительно коэффициентов разложения. Поверхностный импеданс тонкой ВТСП-пленки Z_s в правой части уравнения (2) определяется на основе феноменологической модели ВТСП [4]. Представление системы уравнений в виде матричного уравнения требует формирования массива элементов матрицы, причем учет симметрии структуры позволяет существенно ускорить процедуру решения детерминантного уравнения.

Параметры рассеяния являются элементами матрицы $[S]$ и находятся на основе вычисления комплексных амплитуд падающей и отраженной волн в выбранных референсных плоскостях [1]. Определение элементов матрицы рассеяния S производится в соответствии со следующими допущениями: длина секции каждой возбуждающей линии для устройства, содержащего n входов, предполагается достаточно протяженной и поддерживающей одну фундаментальную моду; постоянная распространения β вдоль отрезка линии определяется на основе двумерного электродинамического анализа линии передачи [5]. Для устройства с числом входов, равным n , рассматриваются n линейно-независимых состояний возбуждения.

В предположении, что в запитывающей микрополосковой линии распространяется фундаментальная мода, физически осмысленной является модель возбуждения, описывающая реальное распределение тока в поперечном сечении линии. В соответствии с этим требованием продольный ток в линии аппроксимируется с помощью так называемого Максвелловского веса — функции вида $(1 - (2x/w)^2)^{-1/2}$, где w — ширина линии.

Результаты и обсуждение. Распределение продольного тока в поперечном сечении микрополосковой линии на пленке YBCO при двух различных температурах и величине возбуждающего тока $I = 1$ А

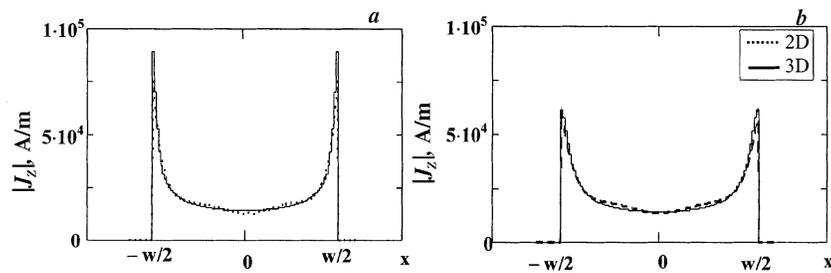


Рис. 1. Распределение продольного тока в поперечном сечении полосковой линии ($w = 45 \mu\text{m}$) на частоте 1 GHz при двух различных температурах: a — $T = 30$ К, b — $T = 77$ К. Для сравнения представлены результаты двумерного моделирования микрополосковой линии передачи [5]. Параметры подложки: толщина $h = 0.5$ mm, $\epsilon = 23.7$. Параметры пленки YBCO: толщина $t = 0.45 \mu\text{m}$, $\lambda_L(0) = 0.22 \mu\text{m}$, $\sigma_n(T_c) = 2.4 \cdot 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, $\gamma = 1.5$, $\alpha = 10$, $T_c = 87$ К.

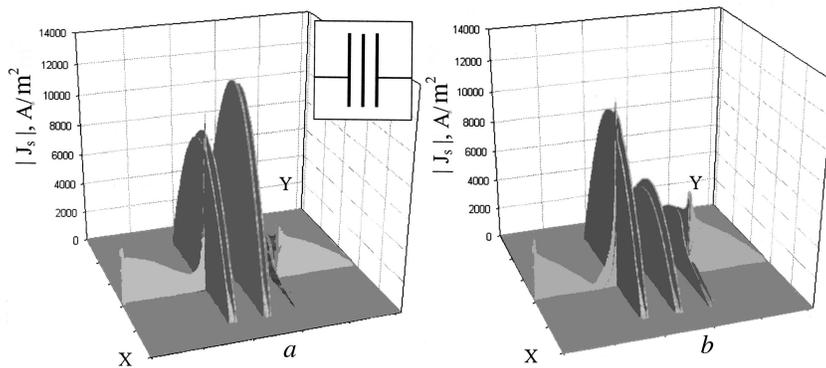


Рис. 2. Распределение плотности тока в трехзвенном фильтре на двух частотах в пределах полосы пропускания: a — $f_1 = 3.09$ GHz, b — $f_2 = 3.14$ GHz при температуре $T = 70$ K. Ширина линий 0.5 mm, длина резонаторов 12 mm, $D = 16 \times 16$ mm. Параметры подложки и пленки YBCO аналогичны параметрам рис. 1.

представлено на рис. 1. Там же приведен расчет, основанный на двумерной ($2D$) модели линии передачи [5]. Хорошее совпадение результатов $2D$ и $3D$ моделирования качественно подтверждается экспериментальными данными определения плотности поверхностного тока в ВТСП-структуре на основе измерения фотоотклика [6], а также теоретическими расчетами в квазистатическом приближении [7]. Поведение тока на краю полоски отражает увеличение глубины проникновения магнитного поля с увеличением температуры, что отвечает физической картине явления и модели ВТСП, предложенной в работе [4].

Для расчета пассивных ВТСП-структур разработана программа, основанная на предложенной модели. С ее помощью произведено моделирование распределения поверхностного тока для трехзвенного фильтра на связанных микрополосковых линиях, возбуждаемых T -сочленением (врезка рис. 2, a). Результаты расчета распределения тока в двух частотных точках в пределах полосы пропускания при величине возбуждающего тока $I = 1$ A представлены на рис. 2.

Работа выполнена по государственному контракту с Министерством науки и технологий Российской Федерации № 107-4(00)-П.

Список литературы

- [1] *Wertgen W., Jansen R.N.* // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. 1989. V. 2. P. 152–186.
- [2] *Mostafa A.A., Krowne C.M., Zaki K.A.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Dec. 1987. V. 35. N 12. P. 1399–1407.
- [3] *Itoh T.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. July 1980. V. 28. P. 733–736.
- [4] *Vendik I.B.* // Supercond. Sci. Technol. July 2000. V. 13. P. 974–982.
- [5] *Vendik I.B., Vendik O.G., Deleniv A.N., Kondratiev V.V., Goubina M.N., Kholodniak D.V.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. July 2000. V. 48. P. 1247–1255.
- [6] *Culbertson J.C., Newman H.S., Wilker C.* // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. N 3. P. 1–20.
- [7] *Sheen D.M., Ali S.M., Oates D.E., Withers R.S., Kong J.A.* // IEEE Trans. on Appl. Supercond. June 1991. V. 1. N 2.