

05.2;05.4;09;12

©1994

ЭФФЕКТИВНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ МАКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ НА САПФИРЕ (r -СРЕЗ)

*И.Б.Вендик, А.Н.Деленив,
Э.Т.Календаров, М.Ф.Ситникова*

Введение

Низкие диэлектрические потери и высокая теплопроводность подложек из сапфира при низкой температуре привлекают к нему внимание специалистов в области электроники СВЧ. Повышенный интерес к этому материалу возник в связи с успешным получением на нем пленок высокотемпературного сверхпроводника YBCO. Для этой цели используют два разных среза сапфира: m -срез [1] и r -срез [2,3], причем последний является предпочтительным из-за меньшего рассогласования параметров решетки YBCO и r -плоскости подложки. Сапфир характеризуется анизотропной диэлектрической проницаемостью, и в случае r -среза тензор диэлектрической проницаемости недиагонален [4,5,6]. Для расчета параметров микрополосковой линии на сапфировой подложке был предложен метод, основанный на представлении недиагонального тензора диэлектрической проницаемости в виде суммы изотропного диагонального тензора и

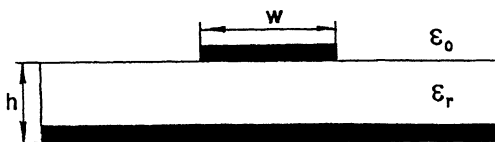


Рис. 1. Структура микрополосковой линии.

недиагонального, рассматриваемого как малое возмущение [4,5]:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{zz} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\epsilon_{xx} - \epsilon_{zz}) & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz}) & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Расчет является квазистатическим и не учитывает частотной дисперсии. В настоящей работе модель дополнена частотной зависимостью эффективной диэлектрической проницаемости, произведена экспериментальная проверка модели.

Модель эффективной диэлектрической проницаемости с учетом дисперсии

В соответствии с [4,5] квазистатическая эффективная диэлектрическая проницаемость микрополосковой линии на сапфире с учетом симметрии линии (рис. 1) может быть представлена в виде:

$$\epsilon_{\text{эфф}} = \epsilon_{\text{эфф}}^0 + (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz}) \cdot G(w/h), \quad (2)$$

где $\epsilon_{\text{эфф}}^0 = \epsilon_{\text{эфф}}^0(w/h, \epsilon_{zz})$ — статическая эффективная проницаемость микрополосковой линии шириной w на изотропной подложке толщиной h с проницаемостью ϵ_{zz} , $G(w/h)$ — геометрический фактор, определяемый эмпирическим соотношением

$$G(w/h) = 0.507 \cdot w/h - 0.358 \cdot (w/h)^2. \quad (3)$$

Для учета дисперсии в микрополосковой линии обычно используется эмпирическое соотношение вида [7]:

$$\epsilon_{\text{эфф}}(f) = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_{\text{эфф}}(0)}{1 + P(f)}, \quad (4)$$

где ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость изотропной подложки, $\varepsilon_{\text{эфф}}(0)$ — эффективная диэлектрическая проницаемость микрополосковой линии на сапфире в статическом приближении, $P(f)$ — эмпирическая функция частоты, геометрии линии и подложки. Воспользуемся выражением (4) для расчета эффективной диэлектрической проницаемости микрополосковой линии на сапфире, введя параметр — эквивалентную изотропную проницаемость ε_{is} , определяемую равенством фазовых скоростей в микрополосковых линиях одинаковой геометрии на изотропной и анизотропной подложках. Результаты расчета эквивалентной изотропной проницаемости для различной геометрии линий и их ориентации приведены в табл. 1. Ориентация линии задается углом φ между плоскостью симметрии микрополосковой линии и плоскостью подложки, содержащей кристаллографическую ось C . Поскольку компонента ε_{yy} в выражении (2) зависит от угла φ , то и эквивалентная изотропная проницаемость также определяется ориентацией микрополосковой линии относительно оси C .

Выражение (4) теперь можно представить в виде:

$$\varepsilon_{\text{эфф}}(f) = \varepsilon_{is} - \frac{\varepsilon_{is} - \varepsilon_{\text{эфф}}(0)}{1 + P(f)}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\text{эфф}}(0)$ определяется (2). Используем функцию $P(f)$ в форме [8], которая по утверждению авторов обеспечивает ошибку в расчете $\varepsilon_{\text{эфф}}(f)$ не более 0.6% для линии с параметрами $1 < \varepsilon_r < 20$ и $0.1 < \frac{w}{h} < 100$ вплоть до частоты 60 ГГц. Результаты расчета для микрополосковой линии с волновым сопротивлением $Z_0 = 50$ Ом на подложке толщиной 0.5 мм представлены в табл. 2.

Экспериментальное исследование и обработка результатов

Экспериментально исследовались полуволновые микрополосковые резонаторы, выполненные из меди на подложке из сапфира (r -срез) толщиной 0.5 мм (рис. 2). Ширина линий $w = 0.44 - 0.46$ мм, что соответствует волновому сопротивлению ~ 50 Ом. В качестве элементов возбуждения использовались емкостные щели длиной 0.35 мм, что обеспечивало слабую связь резонаторов с внешней цепью. Измеренная нагруженная добротность резонаторов порядка 200. Исследования проведены для трех различных ориентаций микрополосковых резонаторов: $\varphi = 0^\circ, 45^\circ$ и 90° . Измеряемые параметры: длина резонатора и резонансная частота.

Таблица 1. $h = 1$ мм

$w, \text{ мм}$ φ°	0.125	0.25	0.5	1	1.5	2	3	4
0	10.331	10.310	10.275	10.225	10.186	10.162	10.131	10.113
22.5	10.257	10.242	10.215	10.177	10.148	10.129	10.106	10.093
45	10.080	10.076	10.070	10.062	10.056	10.052	10.047	10.044
67.5	9.902	9.911	9.926	9.947	9.963	9.974	9.987	9.995
90	9.829	9.842	9.866	9.900	9.925	9.942	9.962	9.974

Таблица 2.

$f, \Gamma\Gamma\text{ц}$	2	4	6	8	10	12	14
$\varphi = 0^\circ$	6.787	6.836	6.893	6.975	7.025	7.097	7.171
$\varphi = 45^\circ$	6.680	6.727	6.783	6.845	6.911	6.980	7.052
$\varphi = 90^\circ$	6.574	6.620	6.675	6.734	6.798	6.865	6.935

Таблица 3.

Φ°	ε_{is}	$f, \Gamma\Gamma\text{ц}$	l_{σ_1}	l_{μ}	$\varepsilon_{\text{эфф}}^M$	$\varepsilon_{\text{эфф}}^\sigma$
0	10.234	9.331	5.775	5.771	6.995	7.005
45	10.064	9.375	5.788	5.785	6.875	6.882
90	9.895	9.464	5.778	5.775	6.796	6.803

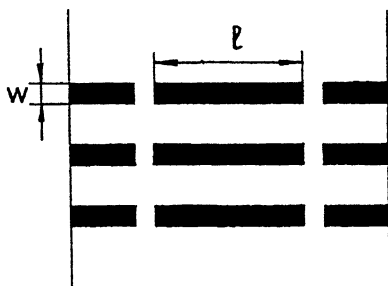


Рис. 2. Топология микрополосковых резонаторов с элементами связи.

Длина измерялась с точностью $\oplus 3$ мкм, а частота с точностью $\oplus 5$ МГц.

Поскольку измерения являются непрямими, необходимо произвести соответствующую обработку и найти эффективную диэлектрическую проницаемость по измеренным параметрам. Имеется однозначная связь между длиной резонатора l и его резонансной частотой f_0 :

$$l = \frac{c}{2f_0 \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}}} + \Delta l, \quad (6)$$

где c — скорость света, Δl — эквивалентное удлинение резонатора за счет элементов связи. Для нахождения $\epsilon_{\text{эфф}}$ воспользуемся моделированием эксперимента, сохранив при этом ту же резонансную частоту, что и в эксперименте. Нетрудно показать, что из (6) следует значение экспериментально измеренной эффективной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{эфф}}^{\text{в}}$:

$$\epsilon_{\text{эфф}}^{\text{в}} = \epsilon_{\text{эфф}}^{\text{м}} \left[-\frac{4(l_{\text{в}} - l_{\text{м}})}{c} \cdot f_0 \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}^{\text{м}}} \right]. \quad (7)$$

Здесь $\epsilon_{\text{эфф}}^{\text{м}}$ — расчетное значение проницаемости по модели (5), $l_{\text{в}}$ — измеренная длина резонатора, $l_{\text{м}}$ — длина резонатора, найденная моделированием эксперимента.

Длина $l_{\text{м}}$ и параметр Δl определялся моделированием условий эксперимента с помощью различных программных средств, в частности программы MICROWAVE HARMONICA (Compact Software). Моделирование осуществлялось введением всех геометрических размеров линий и зазоров связи, а также параметров подложки с эквивалентной изотропной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{\text{ис}}$. Значения $\epsilon_{\text{эфф}}(f)$, рассчитанные по формуле (5), и определенные с помощью программы TRL (Compact Software) для микрополосковых линий с геометрией и ориентацией, соответствующих условиям эксперимента, совпадают с точностью 0.3%, что позволяет считать моделирование достоверным.

В табл. 3 приведены результаты расчета и эксперимента. Заметим, что эффективная диэлектрическая проницаемость для разных ориентаций в условиях эксперимента изменялась на 1.5%. Погрешность измерения эффективной диэлектрической проницаемости при использованном методе обработки эксперимента равна

$$\frac{\Delta \varepsilon_{\text{эфф}}}{\varepsilon_{\text{эфф}}} = \sqrt{\left(\frac{2\Delta f_0}{f_0}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta l_0}{l_0}\right)^2} \quad (8)$$

и не превышает 0.15%. Таким образом, результаты измерения достоверны.

Заключение

Предложена модель для учета дисперсии в микрополосковой линии на анизотропной подложке (*r*-срез сапфира) в расчете эффективной диэлектрической проницаемости. Экспериментальная проверка подтвердила достоверность модели. Работа выполнена по проекту № 93223 Российской государственной программы по ВТСП.

Список литературы

- [1] Cole B.F., Liang G.C., Newman N., Char K., Zaharchuk G., Martens J.S. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61(14). P. 1727-1729.
- [2] Char K., Fork D.K., Geballe T.H., Landerman S.S., Taber R.C., Jacowitz R.D., Bridges F., Connel G.A., Boyce J.B. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56(8). P. 785-787.
- [3] Gao J., Klopman B.B.G., Aarnik W.A., Reitsma A.E., Gerritsma G.J., Rogalla H. J. Appl. Phys. 1992. V. 71(5). P. 2333-2337.
- [4] Vendik I.B., Vendik O.G., Gevorgian S.S. / Proc. 24th EuMC, 1994, Cannes, Reed Exh. Comp. P. 395-400.
- [5] Vendik I.B., Vendik O.G., Gevorgian S.S., Sitnikova M.F., Olsson E. ACAD model for microstrips on *r*-cut sapphire substrates, Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering, 1994, V. 5, October. (Принято к публикации).
- [6] Lee L.H., Lyons W.G., Orlando T.P., Ali S.M., Withers R.S. // IEEE Trans. on MTT. V. 41. N 12, P. 2359-2367.
- [7] Edwards T.C. Foundation for microstrip circuit design, J. Wiley & Sons, N.-Y., 1991. P. 414.
- [8] Kirschning M., Jansen R.H. // Electronics Letters. 1982. v. 18. P. 272-273.

Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет

Поступило в Редакцию
7 сентября 1994 г.