

*М. В. МИЩЕНКО, А. Ю. ФАРАФОНОВ, канд. техн. наук,
С.Н. РОМАНЕНКО, канд. физ.-мат. наук, Н. И. ФУРМАНОВА*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТВЕРСТИЯ В ЭКРАНИРУЮЩЕМ СЛОЕ НА ЗНАЧЕНИЕ ЕМКОСТЕЙ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ТОПОЛОГИИ В УСТРОЙСТВАХ НА СВЯЗАННЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ

Введение

В системах радиолокации, радионавигации, телекоммуникации широко используются устройства СВЧ на основе микрополосковых линий (МПЛ) передач. Исходя из предъявляемых к ним требований формируются топологии МПЛ, которые могут включать в себя области связанных линий, области одиночных линий, а также различные топологические неоднородности. При анализе подобных устройств наличие неоднородностей учитывается путем внесения в схему дополнительных емкостей, расчет которых может быть проведен с помощью аналитических формул [1, 2]. Однако эти формулы не обеспечивают необходимой точности и не дают возможности анализировать структуры с отверстиями в экранирующем слое. В то же время на рынке систем автоматизированного проектирования (САПР) существуют такие системы как AWR Microwave Office, HFSS, FEKO и др., с помощью которых можно создавать схемы устройств, формировать их топологии, проводить электромагнитный анализ и оптимизацию, получать выходные характеристики [3]. Но в этих САПР не имеется возможности вычислять значения емкостей неоднородностей топологии и исследовать их влияние на выходные параметры устройства.

Цель работы – исследование влияния отверстия в экранирующем слое на значение емкостей неоднородностей топологии устройств на связанных микрополосковых линиях.

Методика определения емкости неоднородностей МПЛ

Топологические неоднородности в МПЛ приводят к изменению электрического поля, т.е. к появлению эквивалентной емкости, которая при квазистатическом моделировании определяется избыточными зарядами [1]. Их распределение может быть определено в результате решения интегрального уравнения:

$$\varphi(r_p) = \int_{S_n} G(r_p, r_q) \cdot \sigma(r_q) ds_q, \quad (1)$$

где $\varphi(r_p)$ – потенциал в точке наблюдения; $\sigma(r_q)$ – распределение плотности заряда на поверхности S_n проводников с заданным значением потенциала; $G(r_p, r_q)$ – функция Грина краевой задачи или потенциал, наведенный в точке наблюдения p зарядом, расположенным в точке q в условиях поставленной задачи.

Решение интегрального уравнения (1) методом моментов с использованием кусочно-постоянных базисных функций и дельта-функций в качестве весовых приводит к системе линейных уравнений, которую можно записать в общем виде:

$$\varphi = G_{pq} \cdot \sigma, \quad (2)$$

где G_{pq} – матрица размерностью $n \times m$ (n и m – количество прямоугольных площадок, на которые делится поверхность полосок вдоль и поперек, соответственно); $\sigma = [\sigma_1, \dots, \sigma_n]^T$ – вектор поверхностных зарядов.

Элементы матрицы $G_{p,q}$ рассчитываются по соотношению

$$G_{pq} = \int_{S_q} G(r_p, r_q) ds_q, \quad (3)$$

где r_p, r_q – центры p -го и q -го участка поверхности полоски соответственно; S_q – поверхность q -го участка.

Соотношение (3) можно представить в виде [4]

$$G_{pq} = \frac{2}{4\pi\epsilon_0(1+\epsilon_r)} \sum_{n=0}^{\infty} \Gamma^n [f_{pq}(2nh+2h) - f_{pq}(2nh)], \quad (4)$$

где $\Gamma = \frac{1-\epsilon_r}{1+\epsilon_r}$,

$$f_{pq}(nh) = (y_p - y_{q1}) \ln \left[(y_p - y_{q1})^2 + (nh)^2 \right] - (y_p - y_{q2}) \ln \left[(y_p - y_{q2})^2 + (nh)^2 \right] + \\ + 2nh \left(\arctg \frac{y_p - y_{q1}}{nh} - \arctg \frac{y_p - y_{q2}}{nh} \right) - 2(y_{q2} - y_{q1}), \quad (5)$$

y_p, y_q – координаты концов края p -го и q -го участков соответственно.

Эквивалентная емкость неоднородности рассчитывается по соотношению [5]:

$$C_i = \frac{1}{\varphi_i} \sum_{n=1}^{N_i} \sum_{m=1}^{M_i} (\sigma_{nm} - \sigma_{0nm}) s_{nm}, \quad (6)$$

где φ_i – потенциал i -й полоски; N_i, M_i – число прямоугольных площадок, на которые разделен полосок вдоль и поперек, соответственно; s_{nm} – площадь nm -го участка; σ_{nm} – поверхностный заряд в центре nm -го участка; σ_{0nm} – поверхностный заряд в центре m -го участка, равноудаленного от концов полоски.

Представленная методика позволяет анализировать СВЧ-устройства с отверстиями в экранирующем слое как на однослойной, так и на многослойной подложке. А рассчитанные значения емкостей неоднородностей могут быть использованы для уточненного анализа устройств на МПЛ.

Численные результаты

На примере направленного микрополоскового ответвителя (НО), выполненного на двух связанных микрополосковых линиях с длиной области связи $l = 7.69$ мм, шириной линий $W = 0.432$ мм, зазором между линиями $S = 0.191$ мм, на подложке толщиной $h = 0.635$ мм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9.8$, шириной подводящих линий $W_{\text{п}} = 0.68$ мм и шириной отверстия в экранирующем слое $S_r = 0.92$ мм, были рассчитаны значения емкостей неоднородностей. На рис.1, а, б представлены схема топологии и 3-D модель направленного ответвителя с отверстием в экранирующем слое, соответственно. Области топологических неоднородностей, образованные резким изменением геометрии, обозначены символами “Сп” на рис.1, а.

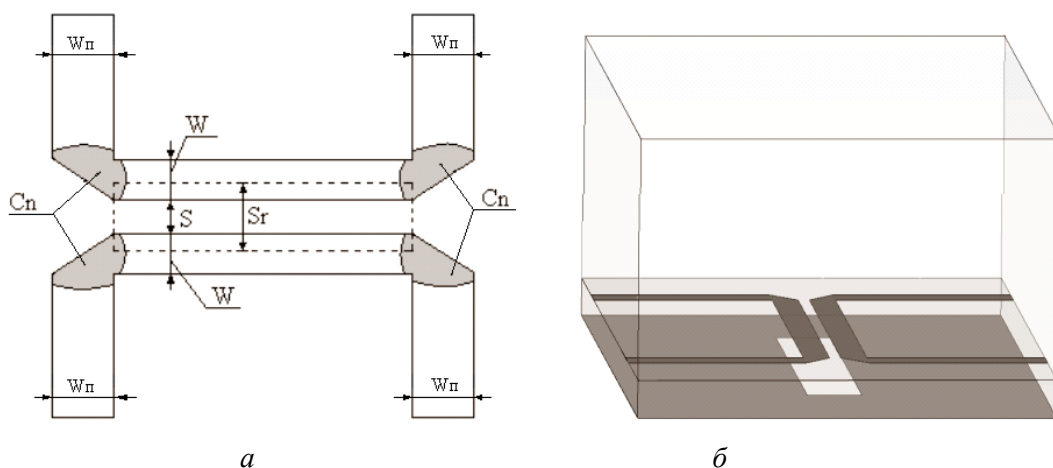


Рис. 1

В табл.1 приведены значения емкостей неоднородностей C_n направленного ответвителя без отверстия и с отверстием в экранирующем слое, а также значение емкости неоднородности, рассчитанной с помощью аналитической формулы [1].

Таблица 1

Параметр	НО с отверстием в экранирующем слое	НО без отверстия в экранирующем слое	Расчет по аналитической формуле [1]
$C_n, n\Phi$	0.070	0.090	0.13

По данным табл.1 видно, что аналитический расчет емкости неоднородности, не учитывающий всю топологию микрополоскового устройства [1], на 30.77 % превысил значение емкостей неоднородностей указанного НО без отверстия в экранирующем слое и на 46.15 % превысил значение емкостей неоднородностей рассматриваемого НО с отверстием в экранирующем слое. В то же время, как видно из табл.1, можно отметить, что введение отверстия шириной 0.92 мм в экранирующий слой направленного ответвителя привело к снижению емкостей неоднородностей на 22.22 %.

Значения емкостей неоднородностей были использованы для расчетов выходных параметров рассмотренного микрополоскового НО. Так, на рис.2 представлены переходные ослабления (ПО) направленного ответвителя с отверстием в экранирующем слое, полученные с использованием значений, указанных в табл.1, и полученные в результате электромагнитного анализа в системе HFSS. Также на рис. 2 представлено ПО идентичного НО без отверстия в экранирующем слое, емкости неоднородностей которого рассчитаны с помощью аналитических формул [1,].

Как видно из рис.2, результаты расчетов переходного ослабления НО с отверстием в экранирующем слое с учетом емкостей неоднородностей, рассчитанных по представленной методике, хорошо совпадают с электромагнитным анализом исследуемого устройства в системе HFSS; так в полосе частот от 2 до 6 ГГц отклонение не превышает 6 %. В то же время отклонение переходного ослабления НО, рассчитанного с учетом емкостей неоднородностей, полученных по аналитическим формулам [1], от результатов анализа в HFSS в полосе частот от 2 до 6 ГГц не превышает 12%.

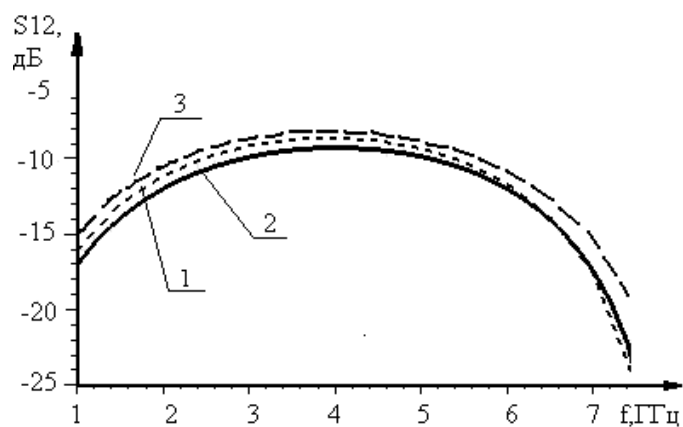


Рис. 2

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что для расчетов выходных параметров СВЧ-устройств на связанных МПЛ с учетом особенностей топологии применение аналитических формул расчета значений емкостей неоднородностей не обеспечивает достаточной точности. Это обусловлено тем, что при анализе неоднородностей МПЛ [1, 2], во-первых, не моделируется вся топология устройства, а лишь та часть, которая непосредственно формирует неоднородности; во-вторых, нет возможности анализировать структуры с отверстиями в экранирующем слое. Отклонение результатов расчета емкостей неоднородностей НО без отверстия в экранирующем слое по аналитическим формулам и с использованием представленной методике составило 30.77 %.

Также в результате проведенных исследований установлено, что внесение отверстия в экранирующий слой направленного ответвителя привело к уменьшению значений емкостей неоднородностей на 22.22 %. Из этого следует, что наличие отверстия в экранирующем слое (рис. 1) значительно влияет на распределение зарядов в областях неоднородностей топологии МПЛ и способствует уменьшению паразитных реактивностей.

Таким образом, с целью получения более точных результатов расчета выходных характеристик устройств СВЧ на микрополосковых линиях рекомендуем применять изложенную методику определения емкости неоднородностей МПЛ.

Результаты расчетов подтверждены результатами электромагнитного анализа исследуемой структуры в HFSS.

Направление дальнейших исследований связано с определением допусков на геометрические параметры устройств на микрополосковых линиях с учетом неоднородностей топологии.

Список литературы: 1. *Gupta K.C.* Microstrip lines and slotlines [Текст]/ К.С., Gupta, Ramesh Garg, Inder Bahl, Prakash Bhartia. – London: Artech House Inc. , 1996.-535 p. 2. *Bahl, I.J.* Lumped element for RF and microwave circuits / Inder Bahl – London:Artech House, 2003, – 488 p. 3. *Курушин, А.А.* Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS / С.Е. Банков, А.А. Курушин, Б.И. Разевиг. – М. : СОЛОН-Пресс, 2004. – 283 с. 4. *Карпуков Л.М.* Алгоритм моделирования функций Грина многослойных диэлектрических структур / Л.М., Карпуков // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2001.- №1. – С. 87 – 89. 5. *Silvester P.* Equivalent Capacitances of Microstrip Open Circuits / P. Silvester, P. Benedek // IEEE Trans. MTT – 1972. – № 8. – P. 390-395.

Запорожский национальный
технический университет

Поступила в редколлегию 15.03.2013