

3. Агафонов И. Л., Аманназаров А., Бескова Г. С. Методы анализа неорганических газов / под ред. В. М. Немца. СПб.: Химия, 1993. 560 с.

4. Алов Н. В. Аналитическая химия и физико-химические методы анализа. Т. 2 / под ред. А. А. Ищенко. СПб.: Академия, 2010. 416 с.

5. Ишанин Г. Г., Антонов А. С. Оптико-электронный газоанализатор для контроля диоксида азота // Приборостроение. 2014. № 1. С. 61–64.

6. ГОСТ 8.578–2002. Государственная поверочная схема для средств измерений содержания компонентов в газовых средах. М.: Изд-во стандартов, 2002.

A. S. Antonov, G. G. Ishanin

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

EXPERIMENTAL STUDIES OF OPTOELECTRONIC NITROGEN DIOXIDE GAS ANALYZER

This article about a new nitrogen dioxide gas analyzer based on the method of optical absorption spectroscopy, it is shown a diagram describing the method and principle of operation. Performed metrological research analyzer is described experimental method. The obtained experimental data are shown.

Nitrogen dioxide, optical absorption spectroscopy, nitrogen dioxide gas analyzer

УДК 621.396.677

А. А. Головков, Е. Н. Теплухин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

М. М. Григоров

ООО «Транстроника»

Электрические характеристики микрополосковой линии, имеющей подложку с пьедесталом

Найдены аппроксимирующие зависимости для волнового сопротивления и эффективной диэлектрической проницаемости микрополосковых линий, имеющих подложку с пьедесталом. Полученные соотношения могут использоваться для создания моделей отрезков подобных линий передачи, используемых в пакетах программ проектирования СВЧ-устройств.

Микрополосковая линия, подложка с пьедесталом, электрические параметры

В диапазоне частот 0.4...4 ГГц при мелкосерийном производстве СВЧ-печатных плат на основе органических диэлектриков широко используются фрезерно-сверлильные станки, например «Promat».

При формировании топологии проводников СВЧ-схем кроме фольги фрезой частично снимается диэлектрик подложки. В результате микрополосковые линии (МПЛ) имеют подложку с пьедесталом, на котором располагается проводник микрополосковой линии (см. рис. 1). Аналогичная ситуация возникает при формировании топологии проводников на тонких керамических подложках лазерными маркерами. В этом случае ис-

пользуется толсто пленочная технология нанесения металла на стороны подложки с дальнейшим формированием топологии схемы лазерным лучом, при котором происходит плавление и удаление металла вне проводников схемы. При этом, как правило, материал подложки, имеющий меньшую теплопроводность, испаряется даже интенсивнее, чем материал проводника.

Изменение конфигурации поперечного сечения МПЛ приводит к изменению основных электрических характеристик: увеличению волнового сопротивления на величину Δr и уменьшению эффективной диэлектрической проницаемости на величину $\Delta \epsilon_{эф}$ по сравнению с классической

МПЛ на плоской подложке [1]. В связи с этим представляет интерес оценить изменение волнового сопротивления и эффективной диэлектрической проницаемости у МПЛ с пьедесталом по сравнению с классической структурой МПЛ и в дальнейшем использовать эти результаты при формировании моделей МПЛ в процессе проектирования радиоустройств, например в пакете Microwave Office.

Оценка электрических характеристик МПЛ с пьедесталом. На рис. 1 показано поперечное сечение МПЛ с пьедесталом. Подложка МПЛ имеет исходную толщину H , за счет удаления части материала подложки в процессе формирования топологии проводник МПЛ расположен на пьедестале высотой a .

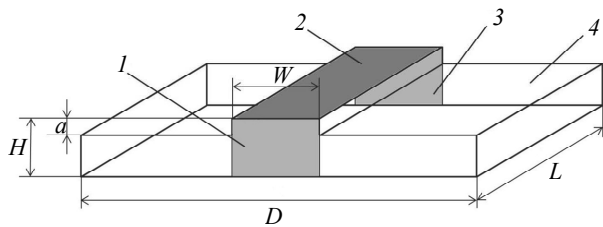


Рис. 1

На рис. 1 обозначено: 1 – возбуждающий порт; 2 – металлический проводник МПЛ толщиной δ и шириной W ; 3 – сопротивление нагрузки или нагрузочный порт; 4 – подложка размером $D \times L$ мм² толщиной H ; a – пьедестал проводника МПЛ с переменной высотой.

Электрические характеристики МПЛ с пьедесталом (рис. 1) исследовались моделированием в программе Ansoft HFSS [2]. Волновое сопротивление МПЛ определялось одновременным варьированием внутренних сопротивлений возбуждающего и нагрузочного портов и соответствовало получению минимума модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ и максимума модуля коэффициента передачи $|S_{21}|$ в диапазоне частот от 1 до 4 ГГц.

Моделирование было выполнено для подложек из органического диэлектрика с толщинами $H = 0.625, 1.27$ мм, при значениях диэлектрической проницаемости подложки $\epsilon = 3.38, 10.73$ и керамических подложек с толщинами $H = 0.508, 1.016, 1.27$ мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 10, 20$. Ширина проводника МПЛ для каждой из подложек принимала значения $W = 0.5, 0.75, 1.2, 1.8$ мм. Высота пьедестала варьировалась в пределах: $a = 0$ (пьедестал отсутствует), 0.05, 0.1, 0.25 мм. Подложка МПЛ имела размеры $26 \times$

$\times 30$ мм². Материал проводника МПЛ и металлизации нижнего слоя подложки по проводимости соответствовал меди толщиной $\delta = 17$ мкм.

Для примера на рис. 2 показаны полученные на основе результатов моделирования зависимости относительного изменения волнового сопротивления $(\Delta\rho/\rho_0)$ от относительной высоты пьедестала (a/H) при различной ширине проводника линии (H/W) для двух вариантов подложки.

По результатам моделирования с помощью методов факторного анализа была получена формула, связывающая относительное изменение волнового сопротивления МПЛ на пьедестале с волновым сопротивлением МПЛ на плоской подложке толщиной H в зависимости от геометрии поперечного сечения МПЛ:

$$\rho = \rho_0 (1 + \Delta\rho/\rho_0),$$

где ρ_0 – волновое сопротивление МПЛ без пьедестала;

$$\Delta\rho/\rho_0 = (0.6a/H + 0.02) \times (-1.2 \cdot 0.8^\epsilon + 1) (0.5H/W + 0.5). \quad (1)$$

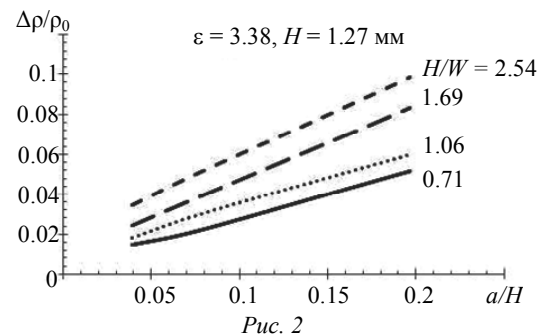


Рис. 2

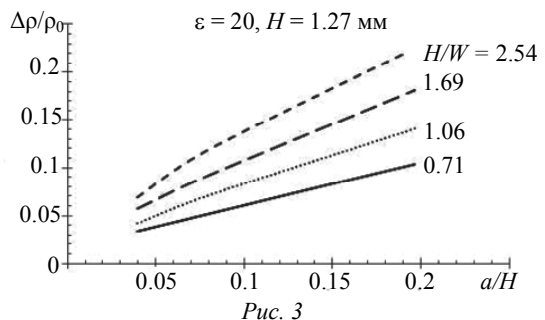


Рис. 3

Зависимости относительного изменения волнового сопротивления МПЛ от высоты пьедестала при $\epsilon = 3.38$ и $\epsilon = 20$ показаны на рис. 2 и 3 соответственно.

Для наиболее распространенных случаев МПЛ, когда высота пьедестала a составляет не более 20 % от общей толщины подложки H , по-

грешность расчета волновых сопротивлений по соотношению (1) не превышает 2%. Для примера на рис. 4 показаны сравнительные зависимости изменения волнового сопротивления МПЛ с пьедесталом, полученные в результате электромагнитного моделирования в пакете Ansoft HFSS и рассчитанные по соотношению (1).

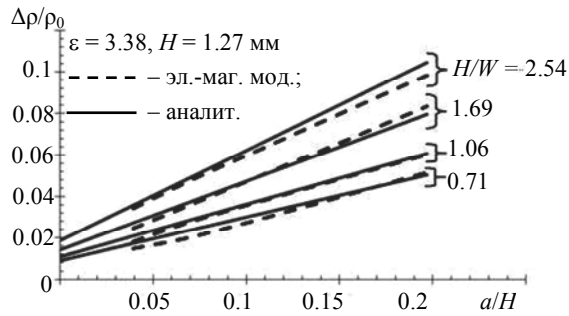


Рис. 4

Для вычисления значения эффективной диэлектрической проницаемости использовались точные значения волновых сопротивлений МПЛ с пьедесталом. Вычислением фазового угла коэффициента передачи $S_{21} - \varphi_{21}$ определялись электрические длины линии на трех частотах, по которым рассчитывалась эффективная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{эф}$. Для примера на рис. 5 представлены зависимости относительного уменьшения эффективной диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{эф}/\epsilon_{эф_0}$) по сравнению с МПЛ с плоской подложкой в зависимости от относительной высоты пьедестала (a/H) при различных ширинах проводника МПЛ (H/W).

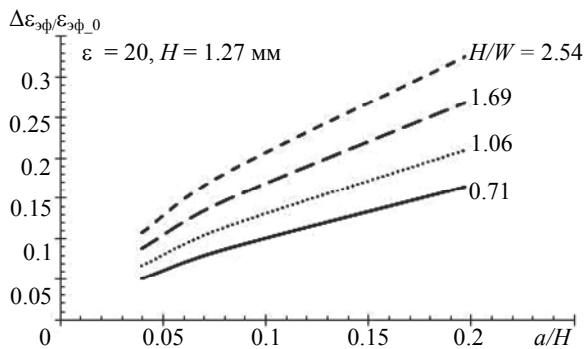


Рис. 5

Полученное в результате моделирования относительное изменение эффективной диэлектрической проницаемости от высоты пьедестала при трех различных значениях диэлектрической проницаемости материала подложки показано на рис. 6.

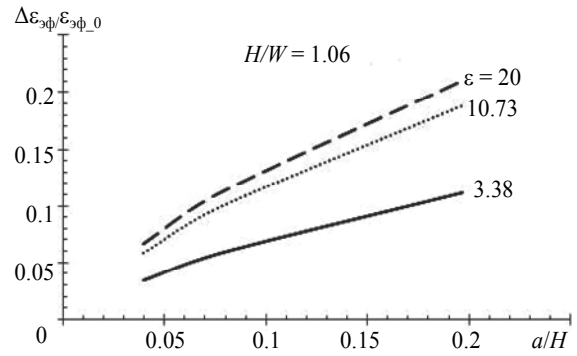


Рис. 6

По аналогии с волновым сопротивлением МПЛ с пьедесталом была получена формула для эффективной диэлектрической проницаемости таких линий:

$$\epsilon_{эф} = \epsilon_{эф_0} (1 - \epsilon_{эф}/\epsilon_{эф_0}),$$

где $\epsilon_{эф_0}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость для МПЛ без пьедестала;

$$\Delta\epsilon_{эф}/\epsilon_{эф_0} = (0.5a/H + 0.015) \times (2 + 2 \cdot 0.82^\epsilon) (0.5H/W + 0.45). \quad (2)$$

Для МПЛ, у которых высота пьедестала составляет не более 20% от общей толщины подложки, погрешность формулы (2) также не превышает 2%.

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальная проверка полученных соотношений была выполнена на образце МПЛ, изготовленном с помощью фрезерного станка «Promat». Размеры подложки образца МПЛ составляли 26×30 мм², высота подложки $H = 1.27$ мм, ширина проводника $W = 1.2$ мм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 10.6$, толщина металлизации $\delta = 17...18$ мкм (Arlon). Высота пьедестала МПЛ, измеренная методом светового свечения, составляла $a = 72 \pm 1$ мкм. Волновое сопротивление МПЛ без пьедестала соответствует $\rho = 49.6$ Ом, $\epsilon_{эф} = 7.88$, волновое сопротивление и эффективная диэлектрическая проницаемость МПЛ с пьедесталом, рассчитанные по формулам (1), (2) соответственно, составляли $\rho = 54$ Ом, $\epsilon_{эф} = 6.82$. На рис. 7 и 8 показаны результаты измерений $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ экспериментального образца МПЛ в диапазоне 1...4 ГГц и кривые, рассчитанные в пакете Microwave Office с использованием полученных ранее результатов.

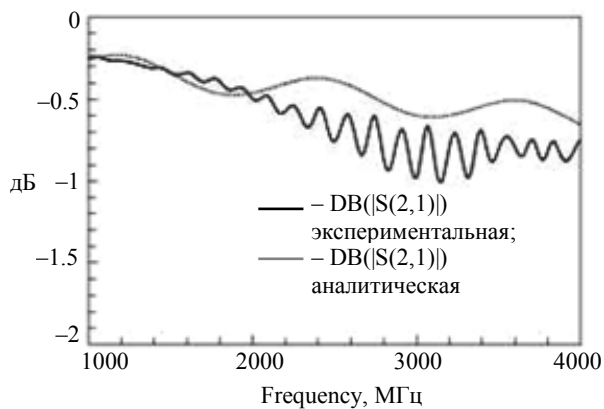


Рис. 7

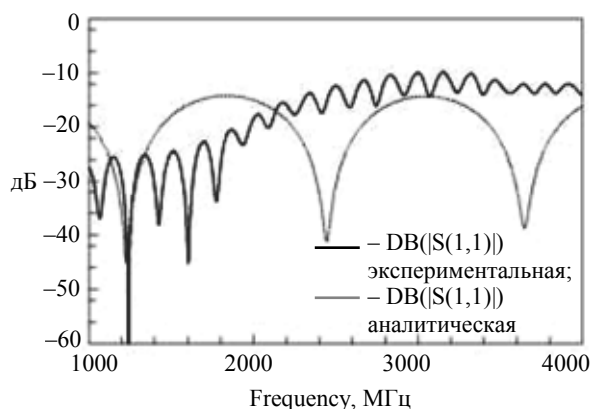


Рис. 8

Как видно из кривых (рис. 7, 8), совпадение экспериментальных и расчетных кривых получилось удовлетворительным, что позволяет рекомендовать использование полученных результатов для проектирования радиоустройств на основе МПЛ при мелкосерийном производстве СВЧ-техники.

В результате работы получены инженерные формулы, связывающие ρ и $\epsilon_{\text{эф}}$ МПЛ с пьедесталом, позволяющие скорректировать задание на изготовление СВЧ-цепей на станках Promat и лазерных маркерах по результатам их электрического моделирования. С помощью полученных соотношений возможно и решение задачи построения моделей МПЛ с пьедесталом для наиболее распространенных пакетов программ проектирования СВЧ-устройств, например Microwave Office.

Публикация выполнена в рамках государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ» (задание № 2014/187, код проекта 1031) базовой части государственного задания Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев В. В., Занин В. И., Трещев В. М. Электростатическое моделирование полосковых линий: учеб. пособие. М.: Универс-груп, 2005. 120 с.

2. Банков С. Е., Курушин А. А. Расчет антенн и СВЧ-структур с помощью HFSS Ansoft. М.: ЗАО «НПП „РОДНИК“», 2009. 256 с.

A. A. Golovkov, E. N. Teplukhin
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

M. M. Grigorov
Transtronics Ltd

ELECTRIC CHARACTERISTICS OF THE MICROSTRIP LINE HAVING A SUBSTRATE WITH A PEDESTAL

The approximating dependences for the wave resistance and effective dielectric permeability of the microstrip lines having a substrate with a pedestal are found. The received ratios can be used for creation of models of pieces of the similar transmission lines used in software packages of design of the microwave oven of devices.

Microstrip line, substrate with a pedestal, electrical parameters