

УДК 537.868.4

Исследование наноразмерных пленочных структур для микрополосковых устройств миллиметрового диапазона

Мальцев П. С.^{1,*}, Федоркова Н. В.¹

[*ihavenoaddress@yandex.ru](mailto:ihavenoaddress@yandex.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье приведены результаты теоретического исследования источников потерь микрополосковых устройствах миллиметрового диапазона волн. Исследования приведены на примере наиболее распространенного в конструкциях балансных устройств СВЧ направленного ответвителя Ланге, состоящего из нескольких тонких микрополосковых проводников, разделенных узкими зазорами. Исследованы влияния на характеристики направленного ответвителя Ланге структуры микрополоскового проводника, диэлектрического пленочного изолирующего покрытия, конструкции навесных перемычек между проводниками ответвителя. Расчеты произведены для наиболее распространенной конструкции. В результате исследований даны практические рекомендации по конструкторско-технологическому проектированию микрополосковых устройств миллиметрового диапазона волн, изготавливаемых по тонкопленочной технологии.

Ключевые слова: миллиметровый диапазон волн, направленный ответвитель Ланге, микрополосковые устройства

В настоящее время в системах беспроводной связи и сетях передачи мультимедийной информации осуществляется переход от традиционного сантиметрового диапазона (СМ) радиоволн к миллиметровому [1].

В этом диапазоне устройства конструируются как в микрополосковом, так и волноводном исполнении. При этом микрополосковое (МПЛ) исполнение предпочтительнее, благодаря существенному выигрышу по габаритно-массовым показателям. Верхней границей применения условно можно считать 50 МГц.

Однако при конструировании микрополосковых устройств миллиметрового диапазона (ММ) возникают значительные трудности, в том числе технологические. Их влияние можно исследовать на примере наиболее распространенного элемента схем балансных устройств - направленного ответвителя (НО) Ланге [2].

Длина НО должна составлять четверть длины волны, т.е в исполнении для ММ диапазона менее 1 мм на подложке с диэлектрической проницаемостью 9,8. При этом

геометрические размеры связанных линий составляют порядка 10 мкм, поэтому данные устройства особенно чувствительны к влиянию производственных допусков.

В ММ диапазоне длин волн микрополосковые устройства изготавливаются по тонкопленочной технологии путем нанесения нескольких металлических пленок из различных металлов с целью удовлетворения жестким требованиям по обеспечению высокой адгезии к подложке, малого удельного сопротивления, возможности пайки и микросварки, стойкости к окислению и коррозии.

Толщина пленок является основным доминирующим фактором, определяющим свойства устройств ММ диапазона.

Основным параметром, определяющим толщину наносимой проводящей пленки, является толщина скин-слоя [3]. Задача технолога состоит в выборе толщины проводящего слоя меди размером три - пять скин слоев и минимально возможной толщины адгезионного подслоя хрома. Толщина скин слоя определяется по формуле:

$$\delta_c = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_a \sigma}} \quad (1)$$

Где f – частота;

μ_a – магнитная проницаемость металла;

σ – проводимость металла.

При помощи программного обеспечения AWR Design Environment [4] и его модуля электромагнитного моделирования EMsight была исследована чувствительность конструкции НО Ланге (рис.1) к различным видам конструкторско-технологических факторов.

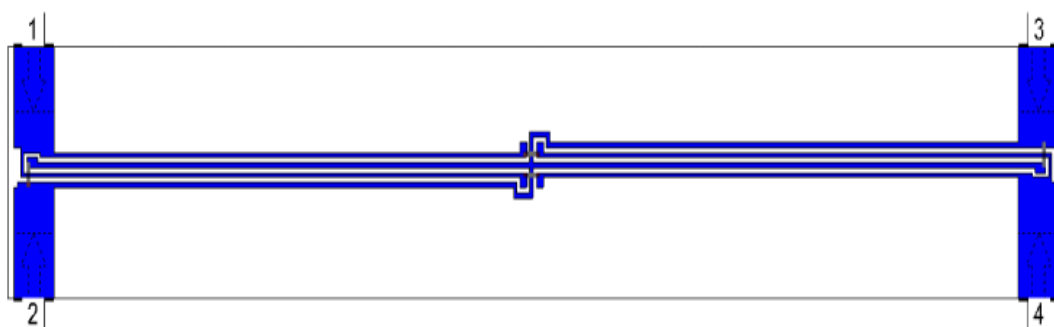


Рис. 1. Модель НО Ланге выполненная в модуле EMsight

Для принятой тонкопленочной технологии толщина подслоя хрома в сантиметровом (СМ) не более 300 Å. Поэтому критерием выбора толщины подслоя хрома в ММ диапазоне была задача получения потерь в пленочном проводнике из чистого хрома не более чем в СМ диапазоне.

На графике рисунка 2 приведены результаты расчета АЧХ НО, выполненного из хрома толщиной 300 Å.

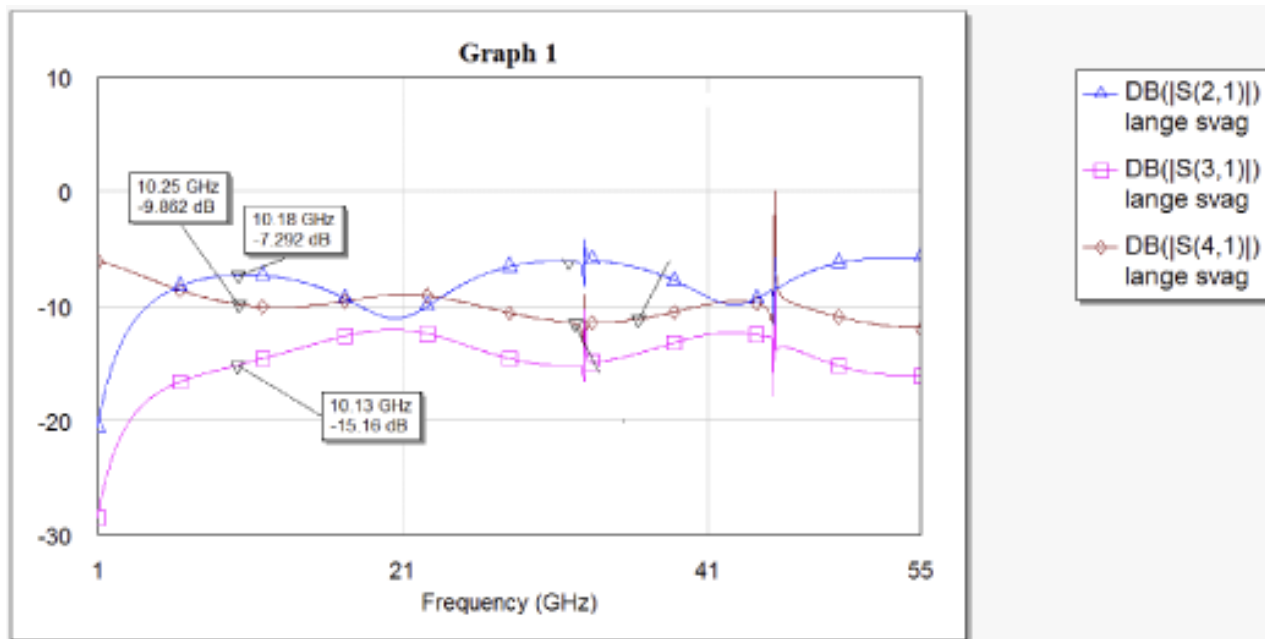


Рис. 2. АЧХ НО выполненного из хрома для СВ диапазона

Анализ рисунка АЧХ показал, что в подслое хрома толщиной 300 Å имеют место потери от 7,2 до 9,9 дБ.

Толщина хрома уменьшалась до тех пор, пока потери в НО стали не хуже чем в СВ диапазоне.

В результате исследования установлено, что для сохранения параметров НО необходимо уменьшить толщину до 100 Å и менее.

При изготовлении НО Ланге между его проводниками привариваются тонкие золотые перемычки, которые затем закрепляются высокочастотным лаком, например УР-231. В ММ диапазоне длина НО Ланге такова, что лак покрывает всю конструкцию, поэтому имеет место ухудшение характеристик устройства.

С помощью программы EMsigth проведен анализ АЧХ НО Ланге с лаком марки УР-231 ТУ-6-21-14-90 и без него. В модель внесены значения диэлектрической проницаемости лака $\epsilon = 5$ и $\text{tg}\delta = 0,03$. Результаты расчета представлены в таблице 1:

Таблица 1. Результаты расчета АЧХ НО с слоем лака и без лака

Параметры НО	Без лака	С лаком
Ширина полосы пропускания по уровню затухания 4 дБ, ГГц, (%)	5,5 (18%)	3,7 (12%)
Ширина полосы пропускания по уровню развязки 15 дБ, ГГц, (%)	12,8 (43%)	6,6 (22%)
Переходное затухание на центральной частоте, дБ	3,7	4,7
Развязка на центральной частоте, дБ	19	12,6

Сравнение результатов расчета АЧХ показывает, что добавление слоя лака уменьшает полосу пропускания НО по уровню затухания 4 дБ на 6 %; по уровню развязки 15 дБ на 21 %. При этом на центральной частоте затухание возрастает на 1 дБ, развязка уменьшается на 6,4 дБ.

Для монтажа перемычек в конструкции НО Ланге используют золотую проволоку марки кр.Зл 999,9 ТУ 48–1–155–84 толщиной от 10 до 30 мкм.

В программе исследовано влияние на АЧХ НО Ланге количества и высоты перемычек.

Анализ показал, что число перемычек практически не влияет на его характеристики.

Перемычки являются дополнительным источником потерь на излучение, поэтому был проведен анализ для трех высот перемычек 100, 300 и 500 мкм.

Установлено, что увеличение высоты перемычки существенно влияет на параметры НО на центральной частоте полосы пропускания. При этом ширина полосы пропускания по параметру развязки значительно уменьшается (таб. 2).

Таблица 2. Результат расчета АЧХ НО с различной высотой перемычек

Параметры	Высота 100 мкм	Высота 300 мкм	Высота 500 мкм
Ширина полосы пропускания по уровню затухания 4 дБ, ГГц	5,5 (18 %)	6 (20 %)	3,4 (11 %)
Ширина полосы пропускания по уровню развязки 15 дБ, ГГц	12,8 (43 %)	2 (7 %)	-
Переходное затухание на центральной частоте, дБ	3,7	5,3	4,1
Развязка на центральной частоте, дБ	19	13,7	10,8

Проведенные ранее теоритические и экспериментальные исследования показали, что в ММ диапазоне на характеристики микрополосковых устройств значительное влияние оказывают вид (конфигурация) топологического рисунка платы в местах соединения линии передачи. Эти неоднородности топологии вносят в электрическую схему устройства дополнительные свойства индуктивности, емкости и трансформатора сопротивлений[5].

Был проведен анализ модели рис. 1 для соотношения ширины линии проводника (0,01 мкм) к ширине контактной площадки: 1/3, 1/5 и 1/8.

Результат расчета АЧХ НО с различным соотношением представлен в таблице 3.

Таблица 3. Результат расчета АЧХ НО с различным соотношением ширин пленочного проводника

Параметры	Соотношение 1/3	Соотношение 1/5	Соотношение 1/8
Ширина полосы пропускания по уровню затухания 4 дБ, ГГц	5,5 (18 %)	5,5 (18 %)	5,3 (18 %)
Ширина полосы пропускания по уровню развязки 15 дБ, ГГц	12,8 (43 %)	12,8 (43 %)	11,6 (39%)
Переходное затухание на центральной частоте, дБ	3,7	3,7	3,8
Развязка на центральной частоте, дБ	19	17,3	16,4

Анализ показал, что увеличение перепада ширин в указанных пределах практически не влияет на ширину полосы пропускания. Однако при этом развязка уменьшается на центральной полосе частот от 19 до 16,4 дБ.

Таким образом, в результате теоретического исследования с помощью программного продукта на примере прецизионной конструкции микрополоскового направленного ответвителя Ланге определены рекомендации по разработке микрополосковых устройств миллиметрового диапазона:

- 1) для тонкопленочной технологии изготовления необходимо наносить адгезионный подслои хрома толщиной менее 100 Å;
- 2) не применять лак УР 231 для фиксации проволочных перемычек;
- 3) не превышать соотношения ширины проводника к ширине контактной площадки 1/5;
- 4) для выполнения соединения между микрополосковыми проводниками НО Ланге рекомендуется использовать две перемычки;
- 5) высота соединительных перемычек должна быть не выше 100 мкм.

Список литературы

1. Розанов. Б.А. Приемники миллиметровых волн. М.: Радио и связь. – 1989. – 5 с.
2. Вишневецкий, В.М. Радиорелейные линии связи в миллиметровом диапазоне: новые горизонты скоростей. Электроника: наука, технология, бизнес. – 2011. – №1. – С. 90-97.
3. Чернушенко А.М., Петров Б.В., Малорацкий Л.Г. Конструирование экранов и СВЧ-устройств. Москва «Радио и связь» 1990 – 24 с.
4. Дмитриев Е.Е. Основы моделирования в Microwave Office 2009. 2011г. – 87 с.
5. Бахарев С.И., Вольман В.И., Либ Ю.Н. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.

The Study of Nanoscale Film Structures for Millimeter Wave Microstrip Devices

P.S. Maltsev^{1,*}, N.V. Fedorkova¹

[*ihavenoaddress@yandex.ru](mailto:ihavenoaddress@yandex.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: millimeter wave, directional coupler Lange, microstrip device

Currently, in wireless communication systems and multimedia information transmission networks a transition from a traditional centimeter range of the radio waves to the millimeter one is under way. Thus, in the range up to 70 GHz, the design concept is, generally, micro-strip. Many of these elements are sensitive to the fabrication tolerances. A directional coupler of Lange, for example, is such element in balanced low noise amplifiers and balanced mixers. It is the most broadband of all known types of devices.

The millimeter wave micro-strip devices are thin-film manufactured by coating the several films of various metals. Each layer serves its purpose: an adhesive layer, conductive core layer, barrier layer, and a protective one.

In the film conductors of microwave devices the currents flow only in a thin surface skin layer, with its thickness measured upward from the plane of the substrate. In case of millimeter wave it is a few tenth of a micron and it is the smaller, the greater is material conductivity and permeability.

Therefore, the main dominant factor in determining the losses in millimeter wave device is the thickness of the adhesive under-layer, which is made of Cr.

There are known studies concerning the effect of the Cr under-layer thickness on the losses in the transmission lines, but they are experimental and have no theoretical validation.

The millimeter wave micro-strip device designs have an additional source of losses in the circuits that is design elements made as the wire and strip jumpers in the micro-strip circuit boards. Their dimensions are comparable with the wavelength in the line, i.e. shorter than the 1st mm.

An additional source of losses is wire and strip golden jumpers between the elements of PCB layout.

These jumpers are fixed via microwave lacquers, the electrical parameters of which deteriorate the radio performance of device as a whole, especially in the millimeter wave.

These theoretical studies were performed using the software AWR Design Environment. We used electromagnetic modeling module EMSight.

To analyze the loss in the adhesive Cr under-layer, was created a calculation model of coupler.

To define the requirements for the thickness of Cr under-layer in the millimeter wave, were calculated the similar losses in the film conductor of thickness established by manufacturers, i.e. 300 Å for the centimeter wave designs.

Then, owing to reducing Cr thickness the losses reached in the millimeter wave design were not worse than in the centimeter wave one.

The influence of loss in dielectric films, fixing air jumpers, was analyzed by comparing the characteristics of two structures with lacquer available or without it. Thus, the presence of lacquer deteriorated device characteristics.

The article also investigates how the number of jumpers effects on parameters of the frequency response of directional coupler. Calculations have shown that the number of jumpers has no effect on device parameters.

The jumper is a source of radiation losses as well, so the impact of its height has been analyzed. As a result, it has been found that the jumper height has a significant impact on the signal characteristics.

Earlier conducted theoretical and experimental studies have shown that the type of topological pattern of the board in joints of transmission lines additionally couples the properties of inductance, capacitance, and transformer resistance into electrical circuit of device. Therefore, the impact of increasing width of the contact pad on the coupler parameters has been analyzed. The results showed that parameter of signal isolation deteriorated.

Conducted analysis resulted in recommendations for development of millimeter wave micro-strip devices.

References

1. Rozanov B.A. *Priemniki millimetrovykh voln* [Millimeter-wave receivers]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 5 p. (in Russian).
2. Vishnevskiy V.M. Radio relay millimeter-wave communication systems: new velocity horizons. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes - Elektronika: Science, Technology, Business*, 2011, no.1, pp. 90-97. (in Russian).
3. Chernushenko A.M., Petrov B.V., Maloratskiy L.G. *Konstruirovaniye ekranov i SVCh-ustroystv* [Designing screens and microwave devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1990. 24 p. (in Russian).
4. Dmitriev E.E. *Osnovy modelirovaniya v Microwave Office* [Basics of simulation in Microwave Office 2009], 2011. 87 p. (in Russian).
5. Bakharev S.I., Vol'man V.I., Lib Yu.N. *Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCh poloskovykh ustroystv* [Calculation and design of microwave strip devices manual]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 328 p. (in Russian).