

УДК 621.396.69

Защитные покрытия и их влияние на характеристики микрополосковых устройств

*Тюкаев Р.Р., студент
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Овечкин В.С., ассистент
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
main@r11-11.bmstu.ru*

Непрерывно растущая потребность человечества в объеме передаваемой и получаемой информации диктует необходимость активного освоения все более высокочастотной области электромагнитного спектра. Наряду с развитием радиоэлектронной техники к ней предъявляются все более высокие требования по повторяемости, технологичности и надежности. Особенно это касается высокотехнологичных изделий такого сегмента военной и гражданской техники, как производство модулей АФАР и их функциональных узлов. Высокая надежность, хорошая воспроизводимость параметров, малые масса и габаритные размеры при требуемых электрических характеристиках, возможность практически полной автоматизации, как конструирования, так и изготовления, дешевизна при массовом производстве, а также ряд других факторов определили быстрое развитие и внедрение микрополосковой технологии.[1] В связи с этим у микрополосковых технологий практически нет прямых конкурентов, кроме, может быть, полосковых устройств (симметричных), но устройства на несимметричных линиях значительно проще в изготовлении, скорость распространения сигнала в этих линиях выше, а основным ограничением является лишь уровень передаваемой мощности. Указанные преимущества несимметричных микрополосковых линий определяют необходимость разработки приемов устранения их недостатков.

В виду того, что поле распространяется и в открытом пространстве, и в пространстве между проводником и экраном (рисунок 1) не существует строгого математического аппарата, описывающего краевые поля и поля излучения; расчет может быть произведен приблизительно, а доработка конечного устройства производится путем экспериментальной оптимизации значений широкого ряда параметров.

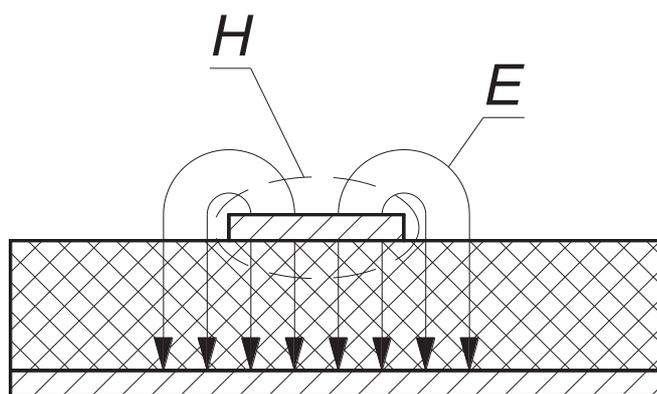


Рис. 1. Структура поля микрополосковой линии

Наличие открытой границы раздела сред приводит к существенной уязвимости микрополосковых устройств: они неустойчивы к разнообразным воздействиям со стороны окружающей среды; изменение температуры, влажности и химического состава воздуха приводят к изменению их характеристик. На сегодняшний день, основным способом борьбы с этим недостатком является установка микрополосковых устройств в герметичные корпуса, чего вполне достаточно, если устройства применяются в системах, не испытывающих существенных перегрузок. В военной технике ситуация обстоит иначе: изделия в составе сложной системы, в зависимости от назначения, нередко подвергаются значительным перегрузкам порядка 9g и более. В подобных условиях герметичность защитного корпуса может быть нарушена и, как следствие, устройства не будут функционировать должным образом, что приведет в лучшем случае к неправильной работе системы, в худшем – к ее потере. С другой стороны необходимость установки герметичного корпуса приводит к удорожанию изделия.

Другим способом устранения влияния окружающей среды, лишенным недостатка предыдущего, является нанесение защитного покрытия (например, в виде лака) поверх открытой поверхности несимметричной микрополосковой линии с токопроводящими полосками. Возникает необходимость подбора защитного покрытия с параметрами максимально близкими к параметрам воздуха, чтобы снизить, а в идеале сделать пренебрежимо малым, влияние среды на электрические параметры устройства. В целом, механизм влияния покрытий достаточно сложен и имеет особенности, важнейшими из которых являются зависимость характеристик изделия от толщины защитного покрытия, влияние покрытия на согласование устройства и на прямые потери в линии.

Влияние покрытие на согласование объясняется зависимостью волнового сопротивления от эффективной диэлектрической проницаемости линии:

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{\eta}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}} \cdot \ln \left(\frac{8 \cdot h}{W} + 0,25 \cdot \frac{W}{h} \right) & \text{для } \left(\frac{W}{h} \leq 1 \right), \\ \frac{\eta}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}} \cdot \left[\frac{W}{h} + 1,393 + 0,667 \cdot \ln \left(\frac{W}{h} + 1,444 \right) \right]^{-1} & \text{для } \left(\frac{W}{h} > 1 \right). \end{cases} \quad (1)$$

где $\eta = 120 \cdot \pi$ Ом,

$\varepsilon_{\text{эф}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость, определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \left(1 + 10 \cdot \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} - Q, \quad (2)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала;

h – толщина диэлектрика;

W – ширина проводящей линии;

Q – коэффициент учитывающий особенности среды распространения;

$$Q = \frac{\varepsilon - 1}{4,6} \cdot \frac{\frac{t}{h}}{\sqrt{\frac{W}{h}}}. \quad (3)$$

Отметим, что с увеличением тангенса угла диэлектрических потерь лака прямые потери в линии соответственно возрастают.

Влияние толщины покрытия объясняется характером распространения электромагнитной волны в неоднородной среде: фактически, при наличии лака волна распространяется в трех средах: диэлектрике, лаке и воздухе. Для учета данного фактора нужно точно знать толщину (часто оказывается невозможным), либо делать покрытие настолько значительным по толщине, чтобы волна распространялась в двух средах – диэлектрике линии и лаке покрытия. Расчеты показывают, что для исключения влияния воздуха достаточно взять толщину защитного покрытия равной половине толщины подложки. В этом случае практически вся энергия электромагнитного поля будет сосредоточена в двух средах, а влиянием воздуха можно пренебречь. Однако при применении толстых слоев лака достоинства несимметричных полосковых линий практически теряются, и становится рациональней использовать симметричные полосковые линии. С другой стороны, применение тонких слоев лака позволяет сохранить достоинства микрополосковой линии, обладает технологичностью, но требует дополнительных усилий по разработке устройства. В настоящее время, эту задачу можно эффективно решать, что и будет показано ниже.

В настоящее время существуют стандартные защитные покрытия с заявленными значениями диэлектрической проницаемости 2...3 в низкочастотной области. На СВЧ эти значения могут значительно отличаться, следовательно, влияние таких покрытий в

устройствах СВЧ диапазона может кардинальным образом изменить характеристики устройства.

Возникает задача определения влияния защитного покрытия на характеристики изделия. Специально для этого было разработано два микрополосковых устройства: гибридный мостовой делитель мощности и направленный ответвитель на 10 дБ со связью по полю. Оба устройства работают в диапазоне частот 9 – 10 ГГц. В качестве материала подложки используется Rogers TMM10i ($\epsilon = 9,8$; $\text{tg}\delta = 0,01$) с толщиной 1 мм, толщина металлизации экрана и проводящий линии 20 мкм.

На рисунке 2 представлена схема прямоугольного мостового делителя мощности.

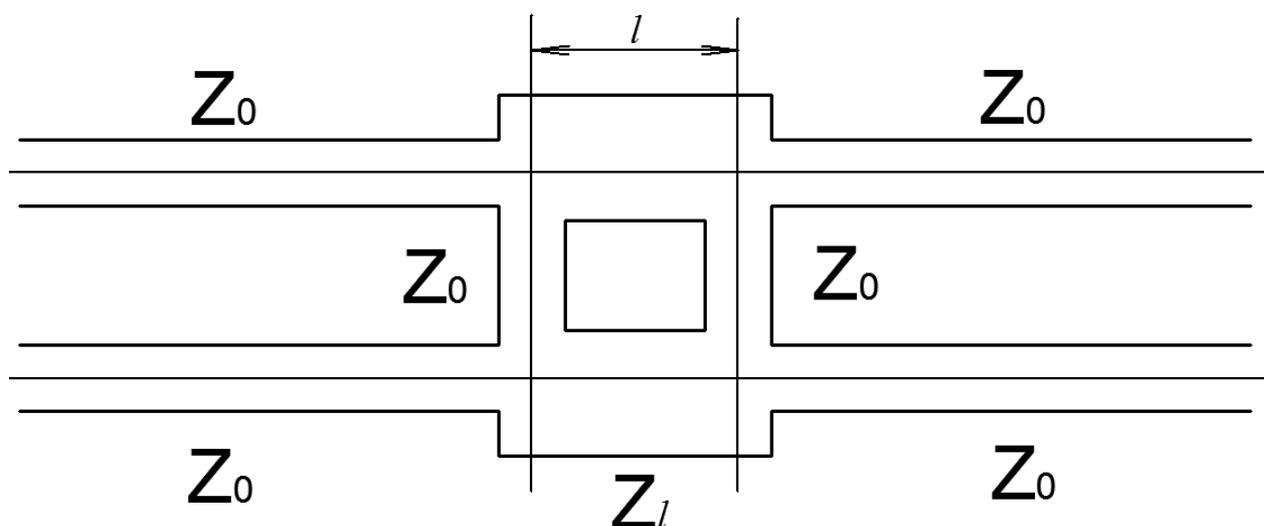


Рис. 2. Схема мостового делителя

Свойства делителя определяются длиной моста l , определяемой по формуле:

$$l = \frac{\lambda}{4 \cdot \sqrt{\epsilon_{эф}}}, \quad (4)$$

где λ – длина волны в свободном пространстве;

$$Z_l = \frac{Z_0}{\sqrt{2}}, \quad (5)$$

где $Z_0 = 50$ Ом – волновое сопротивление входной (выходной) линии;

Z_l – волновое сопротивление моста.

Требуется рассчитать мостовой делитель, согласованный во всем диапазоне рабочих частот, с частотой равного деления 9,5 ГГц.

По предварительным расчетам в программе электродинамического моделирования была построена трехмерная модель. Её анализ показал, что расчетная модель не обеспечивает требуемых характеристик и нуждается в дополнительной оптимизации. В процессе оптимизации модели осуществляется доработка геометрии делителя с целью

получения требуемых характеристик. Исследование результатов моделирования привело к необходимости введения в модель дополнительно разработанных и рассчитанных коаксиально-копланарно-микроросковок переходов, позволяющих уменьшить потери при переходе с микроросковок линии на коаксиальную, улучшить согласование.[2] После сквозной оптимизации конструкции делителя была получена окончательная компоновка устройства, вид модели которой представлен на рисунке 3.

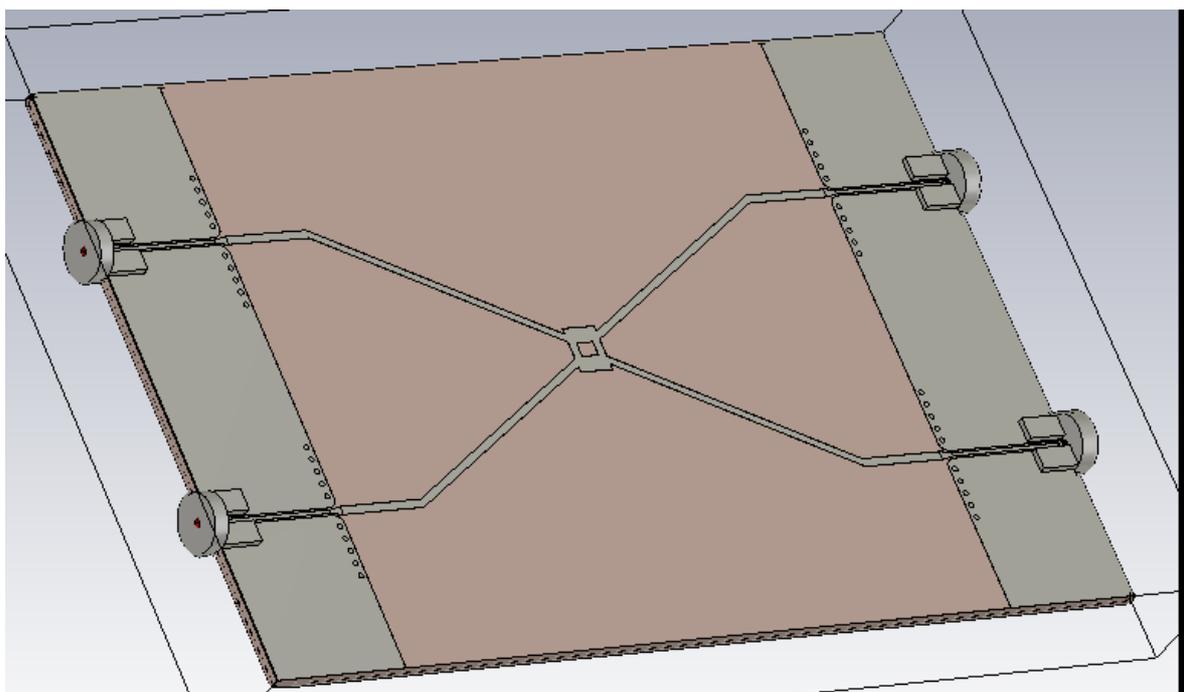


Рис. 3. Оптимизированный мостовой делитель мощности

Вид частотной зависимости элементов матрицы рассеяния устройства приведен на рисунке 4.

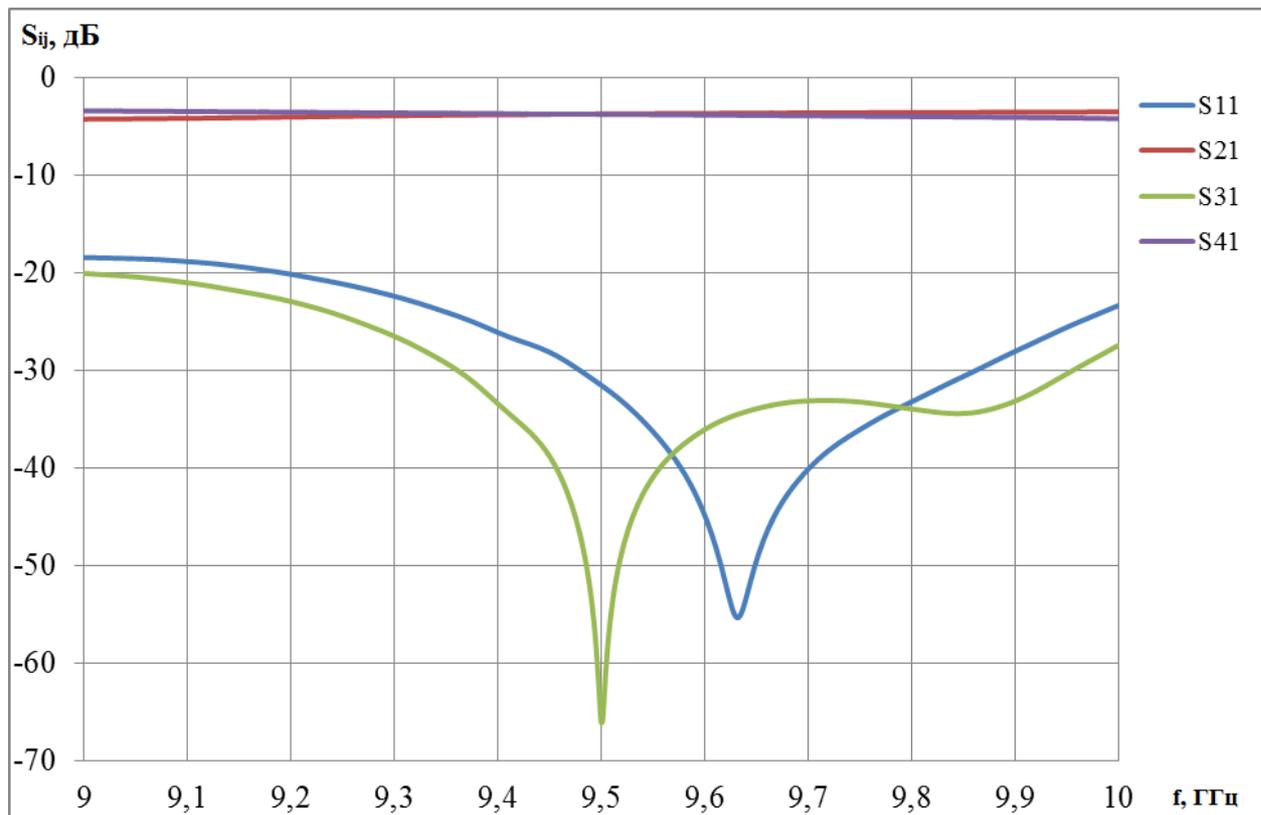


Рис. 4. Характеристики мостового делителя мощности без покрытия

Далее оценивалось влияние защитного покрытия со следующими параметрами $\varepsilon = 3$ и $\text{tg}\delta = 0,02$ на характеристики устройства. Для анализа влияния использовался случай нанесения покрытия толщиной 50 мкм. Выбор толщины был обусловлен реальными технологическими условиями применения подобных лаков. Результаты моделирования устройства с нанесенным покрытием на основе лаковой полимерной композиции представлены в виде частотных зависимостей элементов матрицы рассеяния на рисунке 5

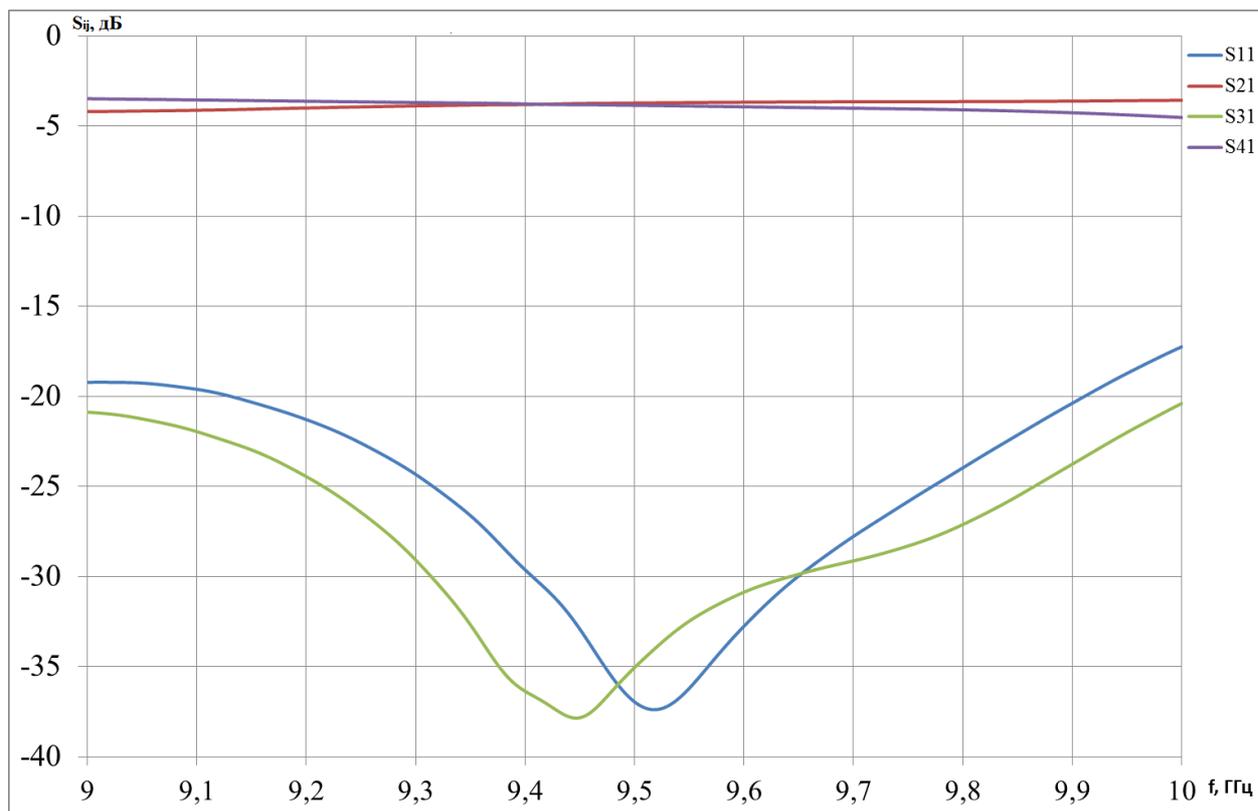


Рис. 5. Характеристики мостового делителя мощности с покрытием

Влияние слоя лака в модели проявляется в виде сдвига частоты равного деления на 90 МГц в область нижних частот; за счет рассогласования произошло ухудшение развязки. Точки экстремума графиков развязки и возвратных потерь так же сместились в область нижних частот на 50 и 90 МГц соответственно.

Также было исследовано влияние лакового защитного покрытия на свойства другого тестового устройства – направленного ответвителя со связью по полю. Схема такого ответвителя представлена на рисунке 6.

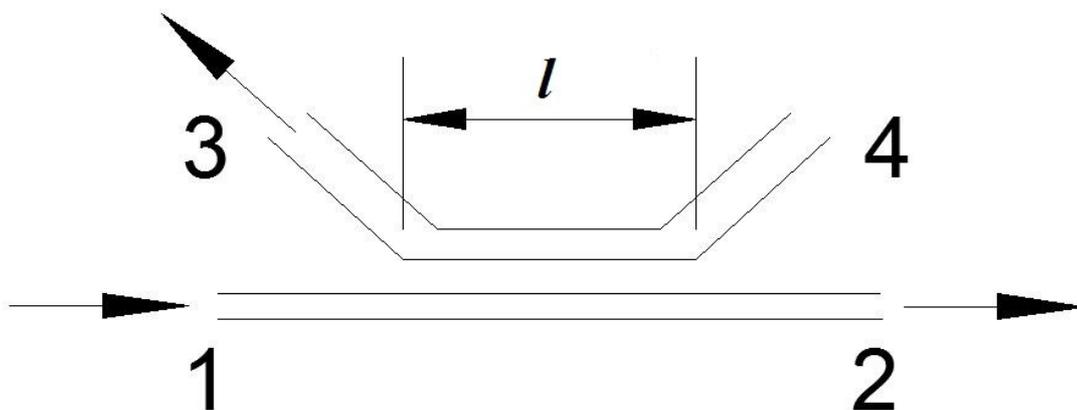


Рис. 6. Направленный ответвитель со связью по полю

Его параметры зависят от длины участка связи, определяемого в первом приближении формулой 4.[3]

При подаче на вход «1» основная часть мощности проходит на выход «2», на выход «3» поступает ослабленная на 10 дБ часть мощности, выход «4» является развязанным со входом «1». Необходимо отметить, что если требуется передать часть мощности не в третье, а в четвертое плечо необходимо увеличить длину линии связи до $3l$.

Вид модели законченного устройства с введенными коаксиально-копланарно-микророскопическими переходами и уточненной геометрией представлен на рисунке 7.

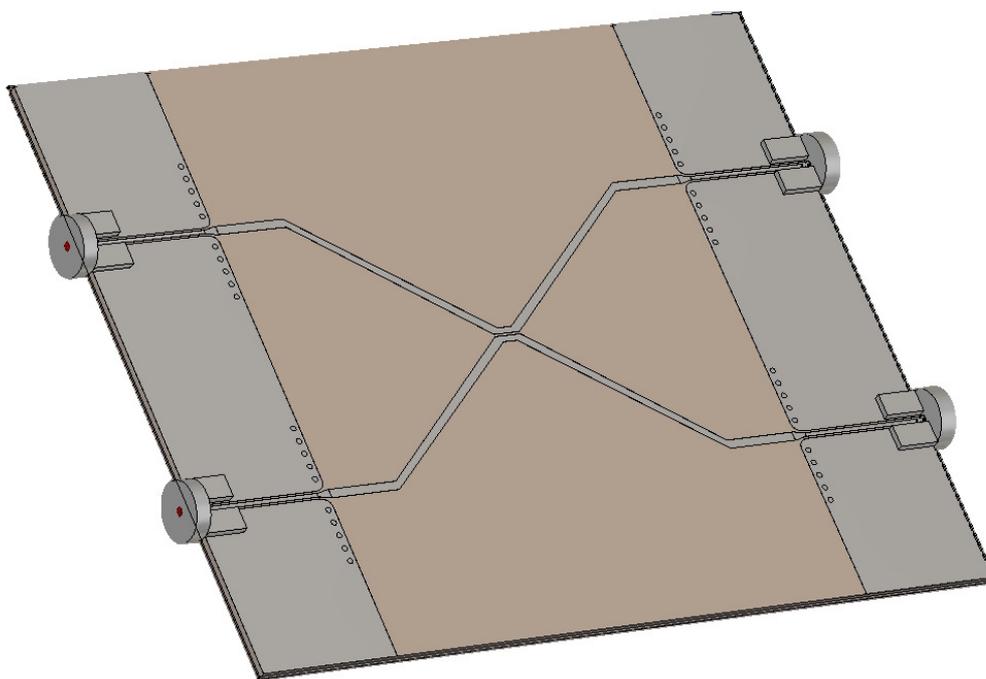


Рис. 7. Оптимизированный направленный ответвитель

В результате анализа устройства получены следующие частотные характеристики, представлены на рисунке 8.

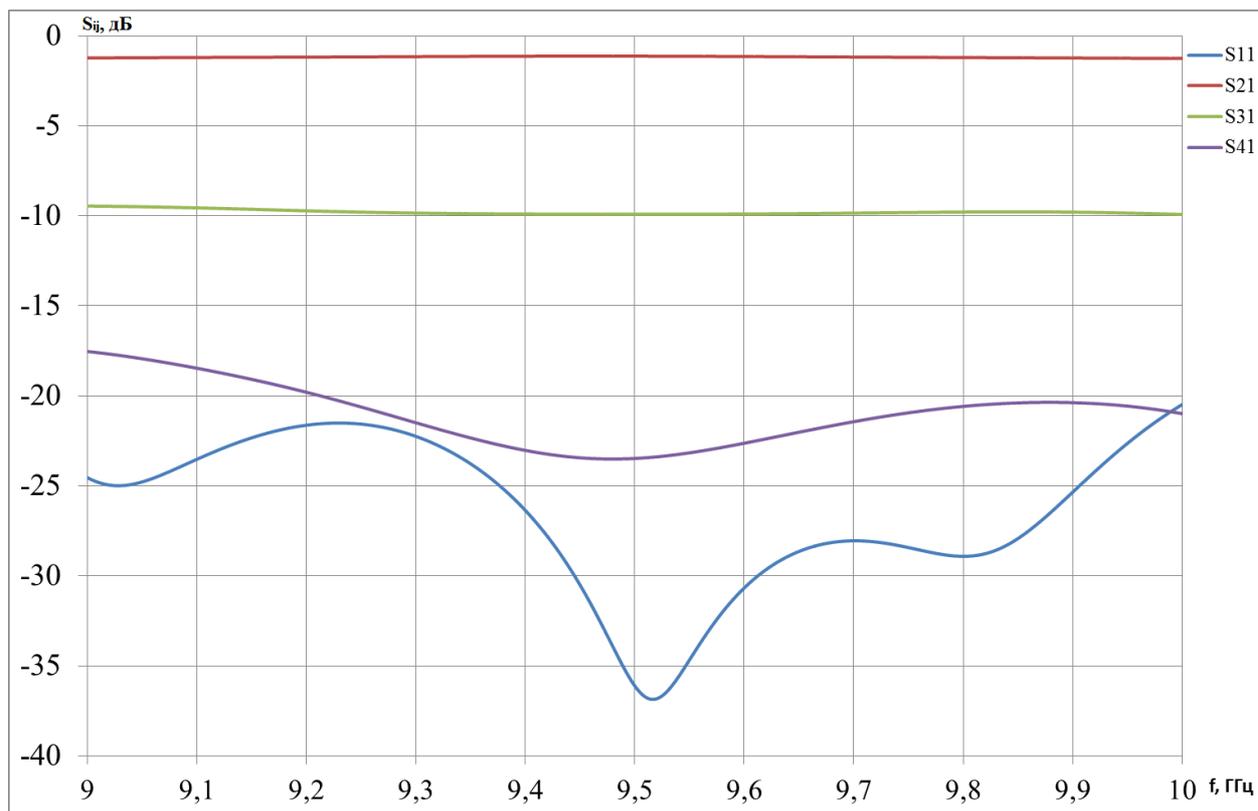


Рис. 8. Характеристики направленного ответвителя без покрытия

Отметим, что прямые потери в рабочем диапазоне частот составляют 1,3 дБ, переходное ослабление на центральной частоте 9,91 дБ, развязка 23,5 дБ, а возвратные потери не превышают -21 дБ, что соответствует уровню КСВн не более 1,2.

Далее, в программе электродинамического моделирования, было рассмотрено влияние защитного покрытия с параметрами $\epsilon = 3$ и $\text{tg}\delta = 0,02$ и толщиной 50 мкм.

Результаты анализа моделирования направленного ответвителя с нанесенным защитным покрытием представлены на рисунке 9.

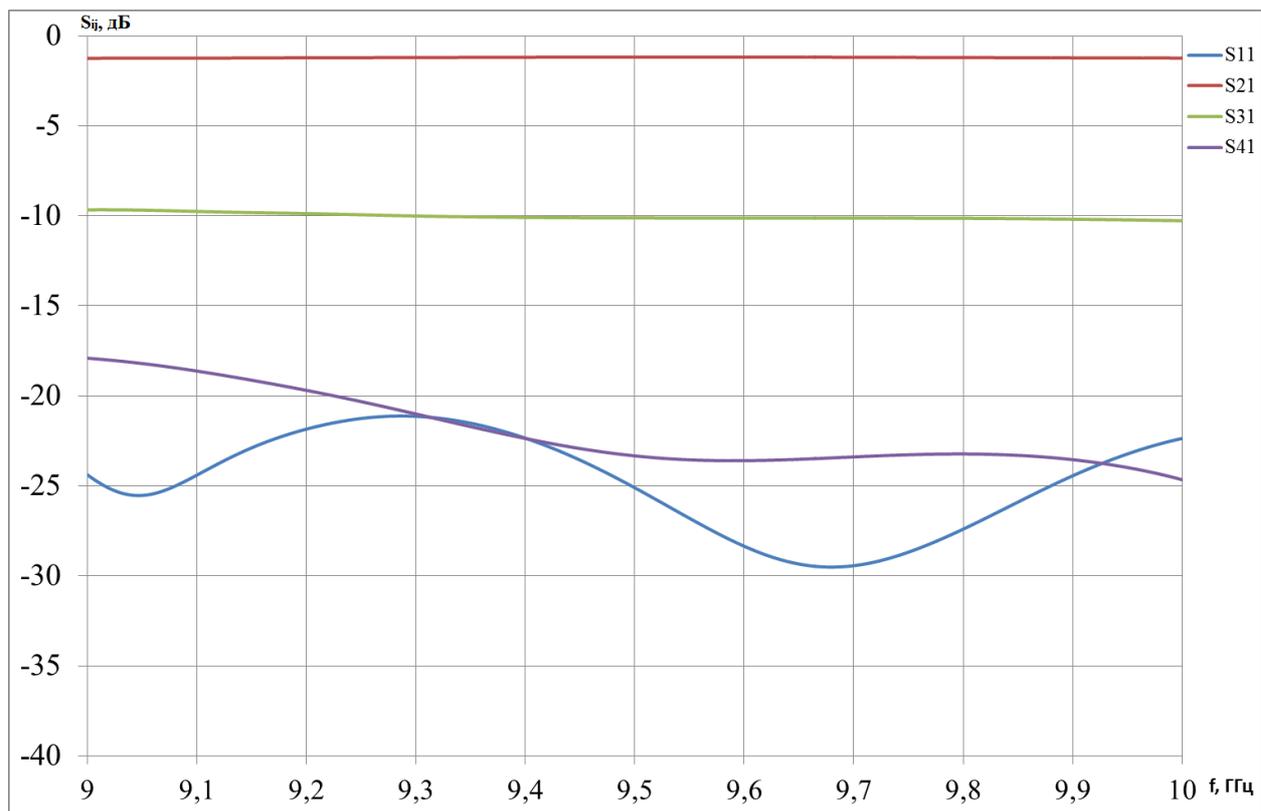


Рис. 9. Характеристики направленного ответвителя с защитным покрытием

При рассмотрении результатов анализа направленного ответвителя с защитным покрытием было отмечено незначительное ухудшение согласования. Интерес в данном эксперименте представляет то, что локальный минимум возвратных потерь сместился в область не нижних частот, а в область верхних. Этот факт объясняется противоположной направленностью входного поля и поля канала ответвления. Если длину линии связи сделать $3l$, то мощность ответвится в канал «4», а сдвиг экстремума возвратных потерь произойдет в область нижних частот.

Таким образом, проведенный анализ подтверждает ожидаемое влияние защитного покрытия и позволяет дать количественные оценки изменения характеристик устройств, покрываемых лаком с известными параметрами.

Возможности современной вычислительной техники и программного обеспечения позволяют вести разработку подобных устройств, изначально учитывая особенности их реализации, в том числе и нанесение защитного покрытия. На сегодняшний день этот способ является оптимальным при создании устройств с требуемыми характеристиками, обеспечивающих независимость режима работы от состояния окружающей среды.

Список литературы

1. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств/ С.И. Бахарев, В.И. Вольман, Ю.Н Либ и др.; Под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. —328 с, ил.
2. Прохорова В.В., Литун В.И., Овечкин В.С. Коаксиально-микророскопический переход с использованием копланарной линии // Научно-техническая конференция «Радиооптические технологии в приборостроении». п. Небуг, Туапсинский район, Краснодарский край, Россия : рабочие материалы конф. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 257-260.
3. Microwave engineering/ David M. Pozar.–4th ed. John Wiley & Sons, Inc/2011. 732 p.
4. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие. Изд. 2-е. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 416 с.
5. Конструирование и расчет полосковых устройств. Учебное пособие для вузов. Под редакцией чл. Корр. Академии наук БССР проф. И.С. Ковалева, М., «Сов. Радио», 1974.