

Влияние элемента связи на характеристики межслойного перехода на основе симметричной щелевой линии

А.А. Борисов^{1,2}, С.Б. Клюев^{1,2}, В.А. Иовдальский^{1,2}, В.В. Демшевский^{1,2}

¹АО «НПП «Исток им. Шокина»

²Филиал РТУ МИРЭА в г. Фрязино

Аннотация: в работе исследовалось влияние размеров элемента связи (круглого отверстия) на характеристики межслойного перехода, созданного на основе симметричной щелевой линии в диапазоне частот 6-35 ГГц. Методом конечных элементов проведен расчет характеристик перехода. Проведено сравнение характеристик перехода для различных размеров элемента связи. Определено влияние геометрических размеров на характеристики перехода.

Ключевые слова: симметричная щелевая линия, межслойный переход, элемент связи, метод конечных элементов, матрица рассеяния, диэлектрическая проницаемость подложки.

1. Введение

Отличительной особенностью любого периода развития радиоэлектроники и радиотехники является совершенствование существующих образцов изделий, а также создание новых, отвечающих современным требованиям. Для реализации требуемых характеристик и параметров образцов изделий значимую роль играют интегральные схемы (ИС) диапазона СВЧ, с помощью которых может решаться задача многофункциональных узлов, схем, блоков, например, для радиотехнической аппаратуры и вычислительной техники. Для создания ИС СВЧ приходится применять новые технические решения, позволяющие существенно улучшить характеристики и параметры аппаратуры.

С целью улучшения схемных решений ИС, гибридных ИС (ГИС) и расширения их применения используются различные типы и классы линий передач (ЛП), которые обеспечивают передачу сигнала в заданном направлении с минимально возможными потерями как в плоскости распространения сигнала, так и в многослойных структурах СВЧ (в вертикальном направлении). При этом в конструкции ИС и ГИС СВЧ могут применяться комбинации отрезков различных ЛП, и тогда приходится решать задачу их согласования для улучшения электрических и массогабаритных характеристик как отдельных элементов, так и изделия в целом.

Отрезки ЛП являются одним из основных элементов при проектировании и создании ИС и ГИС СВЧ. Для минимизации потерь сигнала в ЛП, особенно, в многослойных структурах, вновь возник интерес к щелевым ЛП и их разновидностям, а также к их модификациям, к таким как: симметричная щелевая линия (СЩЛ), несимметричная щелевая линия (НЩЛ), несимметричная двухщелевая линия, а также полосковые ЛП. Для сравнения НЩЛ и СЩЛ обладают большей широкополосностью по сравнению с другими планарными линиями, например, несимметричной полосковой линией, а также простотой конструктивного исполнения на ее основе базовых элементов (БЭ), что во многом упрощает включение в нее (последовательно или параллельно) полупроводниковых приборов (ППП) [1].

Появление современных программных продуктов на базе численных методов, позволяет исследовать щелевые линии на новом уровне с учетом улучшения

параметров ИС и ГИС СВЧ в целом.

2. Физическая модель межслойного перехода. Метод моделирования и результаты численных расчетов.

Для расширения применения ЩЛ в функциональных узлах, схемах, блоках и многослойных структурах предложен многослойный переход на основе СЩЛ, физическая модель которой представлена на рис. 1. Конструктивно СЩЛ выполнена на подложке с диэлектрической проницаемостью ϵ_r , и содержит щель шириной w , выполненную в тонком проводящем слое толщиной t , расположенном на одной стороне плоскопараллельной подложки. Электрическое поле волны (рис. 1) основного типа в СЩЛ почти поперечное ($E_z \ll E_x, E_y$), а у магнитного поля все три составляющие сравнимы по амплитуде, поэтому основным типом волны в СЩЛ является H -волна [2, 4, 5]. При этом в щели концентрируются линии электрического поля, а линии магнитного поля имеют вид эллипсов, переходящих в кривые типа «седло» [2, 5]. Преимуществом СЩЛ являются малые вносимые потери и широкий диапазон рабочих частот, но большие значения волнового сопротивления ограничивает ее применение в СВЧ устройствах [1]. Изменение больших значений волнового сопротивления возможно, например, смещением щели от центра структуры к краю, как показано в [6] или применение 2-х звенного трансформатора волновых сопротивлений [7].

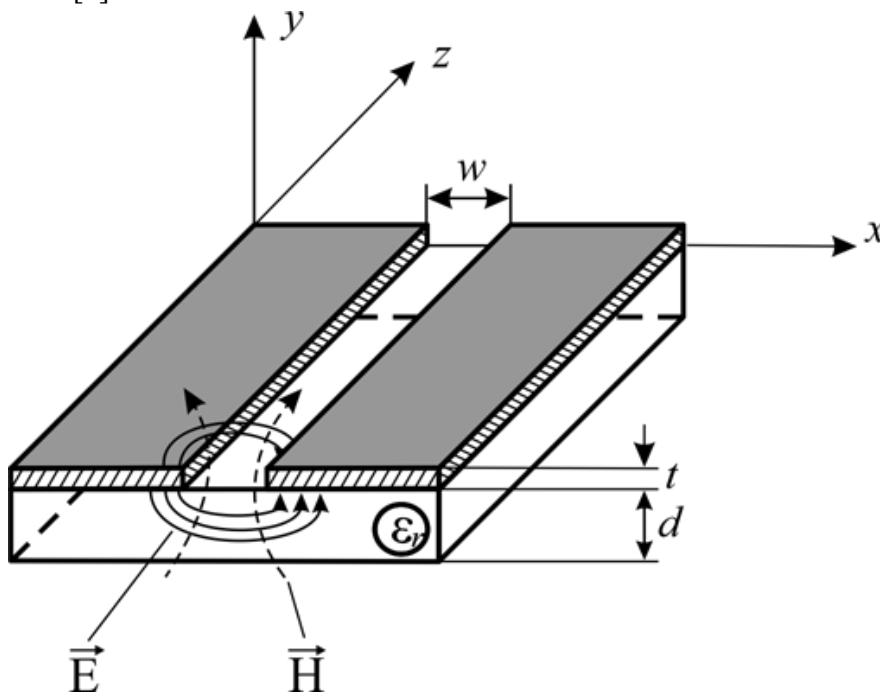


Рисунок 1. Физическая модель СЩЛ и линий напряженности основной волны, где d – толщина подложки с диэлектрической проницаемостью ϵ_r , t – толщина металлических экранов (полуплоскостей), w – ширина щели.

Для передачи электромагнитной волны с одного слоя (одной плоскопараллельной стороны подложки) СЩЛ на другой слой (другую сторону) в вертикальном направлении в конструкцию линии вводится элемент связи (в виде круглого отверстия), который не нарушает регулярность линии и ранее рассмотренный в [8, 9], и который образует межслойный переход. Физическая модель межслойного перехода представлена на рис. 2. Рассматриваемый межслойный переход (рис. 2) состоит из подложки 3 с диэлектрической проницаемостью ϵ_r , на противоположные стороны которой нанесены металлические экраны 1, образующие щель 2 шириной w .

Отличительной конструктивной особенностью рассматриваемого перехода является отверстие 4 с частичной металлизацией 5 (элемент связи), которое сохраняет размер ширины щели 2 (w) как на одной стороне подложки 3, так и на другой ее стороне.

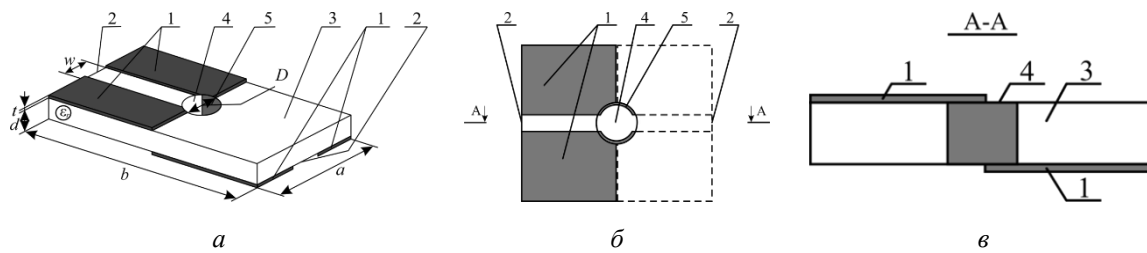


Рисунок 2. Переход на основе СЩЛ, *a* – физическая модель, *б* – вид сверху модели, *в* – продольный разрез модели; где 1 – плоские металлические экраны, 2 – ширина щели w , 3 – плоскопараллельная диэлектрическая подложка толщиной d и диэлектрической проницаемостью ϵ_r , 4 – частично металлизированное отверстие диаметром D , 5 – металлизация отверстия, a – ширина модели, b – длина модели, t – толщина металлических экранов.

Представленный на рис. 2 межслойный переход – сложная волноведущая структура, в состав которой включен элементом связи, нарушающий регулярность СЩЛ. Аналитическое решение задачи по определению характеристик перехода получить не удастся, поэтому ее приходится решать приближенно с помощью численных методов. Для решения поставленной задачи применен численный метод конечных элементов (МКЭ) – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, возникающих при решении задач прикладной физики. МКЭ имеет ряд преимуществ: возможность моделировать любые геометрически сложные узлы, схемы и электромагнитную среду, возможность учесть толщину металлических экранов, возможность моделировать любые граничные условия, в выборе базисных функций (они берутся в виде кусочно-непрерывных функций, которые обращаются в нуль всюду, кроме ограниченных подобластей, являющихся конечным элементом). При этом в данной структуре – межслойный переход – уравнения Максвелла решаются вместе с граничным условием Дирихле (непрерывность тангенциальных составляющих электрического поля на границе диэлектрика с воздухом).

В математической модели межслойного перехода учтены потери в материале диэлектрической подложки и металлических экранах. С помощью МКЭ рассчитаны характеристики перехода в частотном диапазоне $\Delta f=5,0-35,0$ ГГц. Основой межслойного перехода является подложка с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=9,8$ и $\text{tg}\delta=1 \times 10^{-4}$ (керамический материал – алюмооксидная керамика с содержанием Al_2O_3 99,7% – поликор) [10], а его геометрические размеры равны ширина $a=10$ мм, длина $b=20$ мм, толщина подложки $d=0,5$ мм, ширина щели $w=0,2$ мм ($w/d=0,4$), толщина металлического экрана $t=10$ мкм.

Рассмотрены две модели межслойного перехода (рис. 2) с разными значениями диаметров D частично металлизированного отверстия 4, рассчитаны их характеристики и определено влияние размеров отверстия на характеристики перехода: модель 1 – диаметр отверстия $D_1=0,56$ мм ($D_1=2,8w$) и модель 2 – диаметр отверстия $D_2=0,76$ мм ($D_2=3,8w$), при чем центр каждого отверстия находится в точке пересечения центра щели, а их отношение равно $D_2/D_1 \approx 1,36$. Выбор размеров диаметров частично металлизированного отверстия объясняется тем, что для модели 1 – ограничен технологическими трудностями, а для модели 2 – ухудшением прочностных параметров материала перехода (особенно при применении

диэлектрической подложки толщиной $d < 0,5$ мм).

Результаты расчетов характеристик перехода и влияния размеров частично металлизированного отверстия представлены в виде частотных зависимостей S -параметров матрицы рассеяния: коэффициента прохождения (рис. 3, *а*) и коэффициента отражения (рис. 3, *б*). Представленные результаты расчета коэффициента прохождения S_{21} (рис. 3, *а*) показывают, что диапазон частот для модели 1, в котором вносимые потери перехода не превышали уровень $-0,5$ дБ составил $\Delta f_1 = 6,04 \div 31,09$ ГГц (или $\Delta f_1 = 25,05$ ГГц), для модели 2 – $\Delta f_2 = 6,12 \div 27,36$ ГГц (или $\Delta f_2 = 21,24$ ГГц), при этом отношение полосы рабочих частот для рассматриваемых моделей равно $\Delta f_1 / \Delta f_2 = 1,17$ и улучшение S_{21} для модели 1 по сравнению с моделью 2 более, чем 2 раза, например, в области частоты 30 ГГц. Установлено, что значения коэффициента отражения S_{11} (рис. 3, *б*) в диапазоне частот $\Delta f = 6,04 \div 31,7$ ГГц для модели 1 улучшены примерно в 1,5 раза по сравнению со значениями модели 2. Следует отметить, что изменение характеристик для модели 2 начинается с частоты $f = 31,7$ ГГц, например, расширение диапазона частот (рис. 3, *а*) при некотором ухудшении значений коэффициента прохождения S_{21} и улучшении коэффициента отражения S_{11} (рис. 3, *б*).

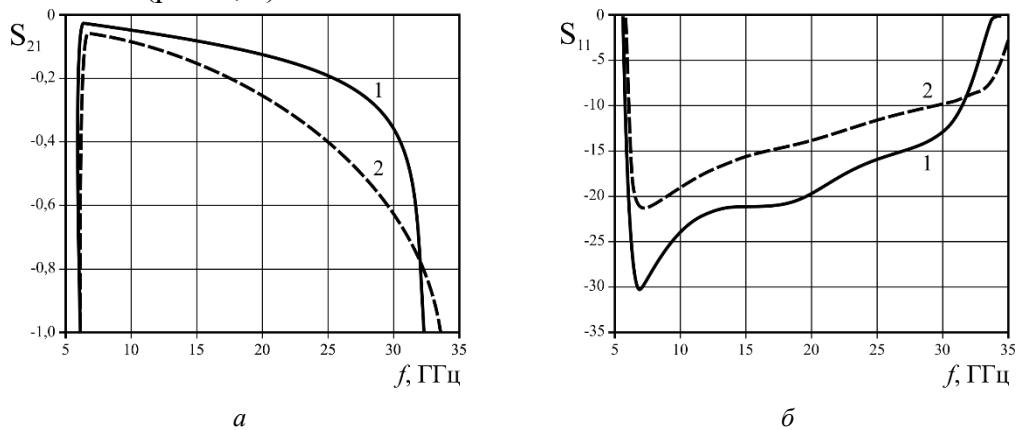


Рисунок 3. Зависимости коэффициентов матрицы рассеяния модели (*а*) – коэффициента прохождения и (*б*) – коэффициента отражения от частоты; кривая 1 – модель 1 ($D=0,56$ мм) изменение волнового сопротивления в переходе с шириной щели w , кривая 2 – модель 2 $D=0,76$ мм.

В результате расчетов установлено, что для модели 1 волновое сопротивление изменяется в пределах $Z_{в1} = 139 \div 69$ Ом, для модели 2 волновое сопротивление изменяется в пределах $Z_{в2} = 151 \div 70$ Ом.

3. Заключение

На основе представленных результатов расчетов показана возможность передачи электромагнитной волны из одного слоя плоскопараллельной диэлектрической пластины в другой, тем самым подтвердив возможность создания и применения межслойного перехода в интегральных схемах СВЧ на основе симметричной щелевой линии. Установлено влияние размера элемента связи в межслойном переходе на его характеристики. Получены зависимости элементов матрицы рассеяния в широком диапазоне частот. Подтверждена возможность передачи электромагнитной волны на разные слои диэлектрической подложки с минимально возможными вносимыми потерями в широком диапазоне частот.

Список литературы

1. Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. / Под ред. Ю.В. Пименова: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь. 2000. – 536 с.

2. Гвоздев В.И., Нефёдов Е.И. Объемные интегральные схемы СВЧ. М.: Наука, 1985. – 256 с.
3. Малышев В.А., Червяков Г.Г., Лабынцев В.А. Основы электродинамики и микроволновой техники. Учеб. пособие. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. 2008. – 596 с.
4. Григорьев А. Д. Электродинамика и микроволновая техника: Учебник. 2 е изд., доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2022. 704с.
5. Гридин В.Н. Электродинамика структур крайневых частот / В.Н. Гридин, Е.И. Нефедов, Т.Ю. Черникова; [Отв. Ред. О.М. Бедоцерковский] – М.: Наука. 2002. – 359 с.
6. Клюев С.Б., Иовдальский В.А., Демшевский В.В., Марин В.П. Исследование характеристик щелевой линии со смещением щели к краю диэлектрической подложки // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. 2023. Т. 15. № 4. С. 53–63. DOI: <https://doi.org/10.18127/j22250980-202304-06>.
7. Клюев С.Б., Иовдальский В.А., Демшевский В.В. Волновое сопротивление широкополосного щелевого перехода // Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком-2024»), г. Москва, РТУ МИРЭА: сборник научных статей. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2024, с. 334-336.
8. Патент на изобретение № 2820073 С1 РФ, МПК Н 01 Р 3/08. Симметричная щелевая линия передачи сигнала СВЧ-диапазона с межслойным переходом: приоритет 20.02.2024 г., опубликовано 28.05.2024, бюл. № 16-2024 / С. Б. Клюев, В. А. Иовдальский, В. В. Демшевский.
9. S.B. Klyuev; V.A. Iovdalskiy The Screen Thickness Effect on Characteristics and Parameters of a Symmetrical Slot Line // 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE) IEEE Catalog Number: CFP22521-POD. 22-23 September 2022, pp.123-124. DOI: 10.1109/APEDE53724.2022.9912783.
10. ТУ 6366-000-07593894-2013. Подложка. Технические условия.