

Устройства распределения СВЧ на основе симметричной щелевой линии

В.В. Демшевский, В.В. Лободин, С.Б. Ключев, И.А. Богачев, С.С. Сидоренко, А.Д. Баженов

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Аннотация: в работе представлены результаты математического моделирования вариантов конструкций Y-образного симметричного делителя на симметричной щелевой линии в Ku диапазоне частот на подложке с высокой диэлектрической проницаемостью. Показана возможность работы делителя в широкой полосе рабочих частот с коэффициентом передачи от -3,24 дБ до -3,62 дБ, при этом волновые сопротивления на выходах делителя равны 50 Ом.

Ключевые слова: Делитель мощности, симметричная щелевая линия, матрица рассеяния, волновое сопротивление, Y-образная симметричная структура, диэлектрическая проницаемость.

1. Введение

В сложных многофункциональных радиотехнических устройствах делители мощности являются неотъемлемым элементом конструктивно-технических решений. Именно от конструктивно-технических решений зависят как характеристики делителя, так и его массогабаритные размеры, а также назначение и размеры аппаратуры в целом. Со стремительным развитием технологии изготовления планарных волноведущих структур, совершенствованием их конструкции и улучшением их характеристик, делители, выполненные на основе печатной технологии, являются наиболее востребованными для применения в СВЧ и КВЧ устройствах, обеспечивая необходимые требования, предъявляемые к перспективным образцам аппаратуры. Учитывая также задачи миниатюризации и повышения надежности элементов и аппаратуры на их основе, делители, изготовленные по тонкопленочной технологии, одновременно соответствуют предъявляемым задачам, а также способствуют улучшению характеристик аппаратуры и одновременно уменьшают ее массогабаритные размеры.

Применение схмотехнических решений при проектировании делителей на основе планарных волноведущих структур позволяет распределять передаваемую мощность сигнала с минимальными вносимыми потерями. В этом случае конструктивным базисом при создании делителей используются различные типы линий передачи, обеспечивающие требуемую топологию металлических пленок на поверхности диэлектрической подложки. В зависимости от требований и назначения существует множество вариантов реализации делителя на разных линиях передач, самыми распространенными из которых является микрополосковая линия (МПЛ) и симметричная щелевая линия (СЩЛ).

МПЛ эффективно применяется при проектировании функциональных узлов, когда ее поперечные размеры много меньше длины волны [1]. Однако, при использовании МПЛ в сантиметровом диапазоне (СМД) и при освоении миллиметрового диапазона (ММД) с ее применением проявляются недостатки, характерные для данного типа линии: рост затухания (потери в металле), увеличение тепловых потерь либо потери на излучение.

Поэтому, применение СЩЛ, которая обладает малыми потерями [2–8], для проектирования и исследования характеристик делителя в СМД и ММД является актуальной задачей.

2. Математическое моделирование Y-образного делителя и разработка его конструкции. результаты моделирования.

Наиболее востребованным вариантом делителей для применения в радиотехнике является образец Y-образной формы. Учитывая преимущества СЩЛ, проектирование, моделирование и исследование его характеристик проводится на ее основе.

Классическая модель СЩЛ (рисунок 1) представляет собой открытую направляющую структуру, которая содержит щель шириной w , выполненную в тонком проводящем слое толщиной t , расположенном на одной стороне плоскопараллельной подложки толщиной d с диэлектрической проницаемостью ϵ_r . Электрическое поле волны 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 ЩПЛ является H-волна [9-11].

При использовании СЩЛ в качестве линии передачи электромагнитное поле излучения энергии должно быть минимальным, особенно если СЩЛ располагается в закрытом объеме. Это достигается путем использования подложек с высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon_r \geq 9$), что обеспечивает концентрацию силовых линий поля вблизи щели, и тем, что на поверхности металлических экранов ток распределяется по большой площади [12].

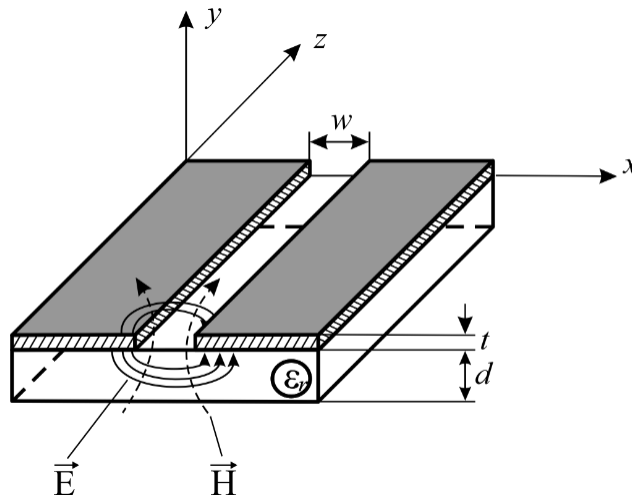


Рисунок 1. Физическая модель симметричной щелевой линии и линии напряженности основных типов волн, распространяющихся в ней, где d – толщина диэлектрического основания, t – толщина металлических полуплоскостей, w – ширина щели, образованная металлическими полуплоскостями.

Учитывая, что рассматриваемая СЩЛ относится к линиям передачи открытого типа, то расчет ее характеристик, а также делителя на ее основе возможен численными методами математического моделирования, обоснованность применения которых приведена в [12]. Для исследования и анализа характеристик открытых волноведущих структур и функциональных узлов на их основе используются, например, такие системы автоматизированного проектирования СВЧ для электромагнитного моделирования базируются на различных способах решения: на методе моментов (MoM), методе конечных элементов (МКЭ, FEM) и методе конечного интегрирования (FIT) и др.

Для определения характеристик делителя в данной работе применяется метод математического моделирования – МКЭ, имеющий ряд преимуществ: исследуемый объект может иметь любую геометрическую форму и электромагнитную среду; можно моделировать любые граничные условия [12].

Далее на основе СЩЛ выбрана Y-образная симметричная структура делителя на

диэлектрической подложке толщиной $d = 0,5$ мм и толщиной металлических пластин, образующих щель, равной $t = 0,008$ мм. Ширина входного и выходных отрезков щели равна $w = 0,4$ мм.

Модель Y-образного делителя представлена на рисунке 2.

Для численных расчетов характеристик модели делителя применена диэлектрическая подложка, представляющая собой керамическое основание на основе алюмооксидной керамики с содержанием Al_2O_3 99,7% (поликор), с $\varepsilon_r = 9,8$ и $\text{tg}\delta = 1 \times 10^{-4}$. Значения волнового сопротивления входа и выходов делителя приняты равными $Z_0 = 50$ Ом.

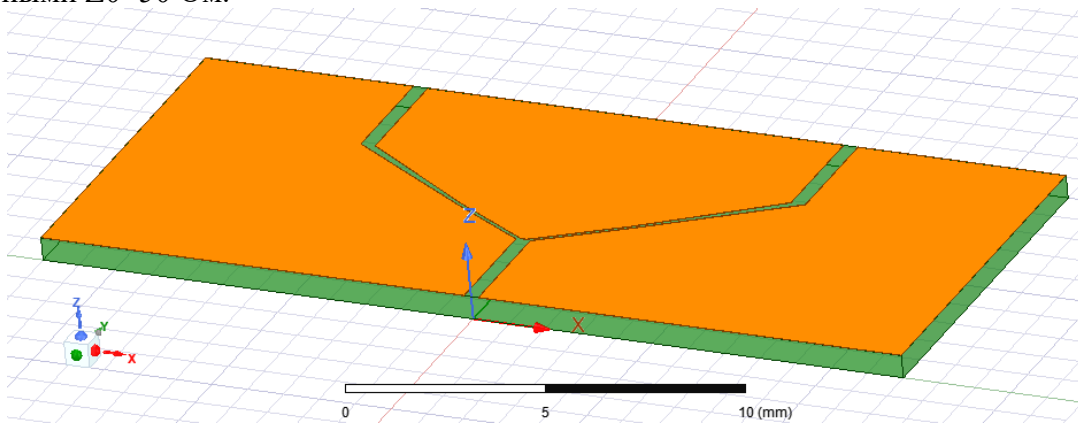


Рисунок 2. Модель Y-образного делителя

В результате проведенных расчетов характеристики делителя в диапазоне рассматриваемых частот были получены численные значения элементов матрицы рассеяния, значения которых представлены на рисунке 3.

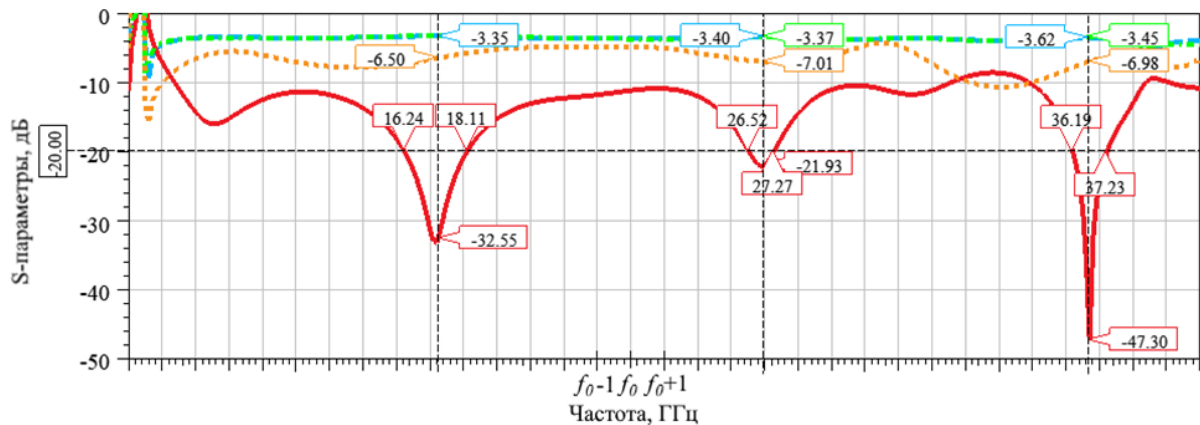


Рисунок 3. Зависимость S -параметров делителя от частоты, S_{11} – (—) красного цвета и $S_{21/31}$ – (— / —) зелёного/голубого цвета, f_0 – центральная частота

Отметим, что в рассматриваемом диапазоне частот коэффициент прохождения плавно изменяется и находится в интервале значений $S_{21} = -3,35 \dots -3,62$ дБ (рисунок 3), при этом коэффициент отражения имеет резонансный характер, а его значения изменяются в интервале $S_{11} \approx -7,55 \dots -47,3$ дБ (рисунок 3), развязка между выходными каналами находится в интервале значений от -6,5 дБ до -6,98 дБ (рисунок 3).

Как можно наблюдать из результатов на рисунке 3 коэффициент отражения исследуемой модели делителя/сумматора имеет резонансный характер, который образуется за счёт наличия острых углов в линии, которые вызывают нежелательные переотражения и паразитные излучения, что в свою очередь влияет на согласование ССЛ.

Устранение резонансного характера коэффициента отражения можно обеспечить исключением максимального количества углов в топологии щели.

На рисунке 4 приведена модель такой топологии где все повороты были скруглены. Для согласования коэффициента отражения в топологии щели был добавлен трансформатор сопротивления в виде области щели с большей шириной.



Рисунок 4. Модель Y-образного делителя с плавными поворотами щели.

Результаты электродинамического расчёта модели Y-образного делителя с плавными поворотами щели приведены на рисунке 5.

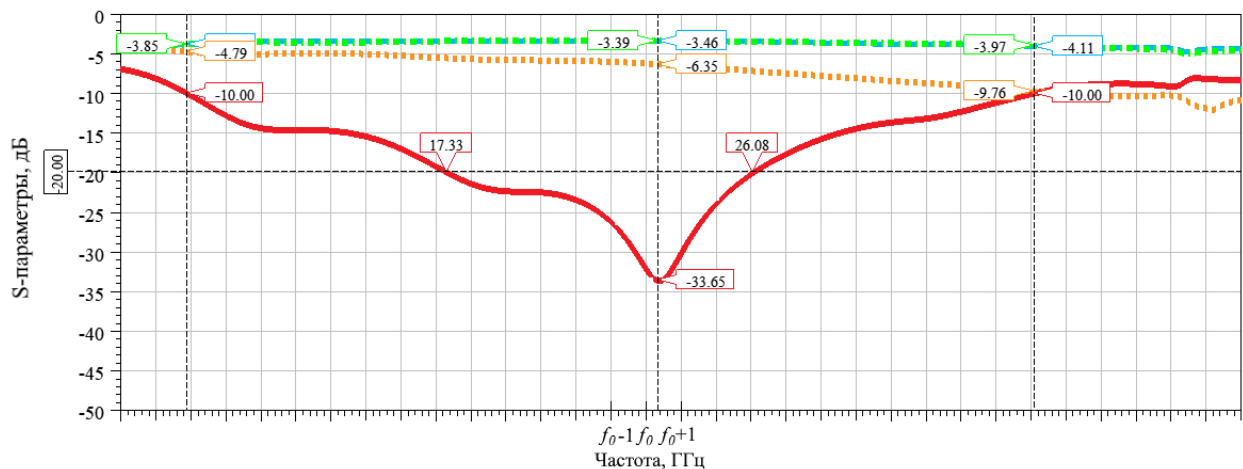


Рисунок 5. Зависимость S-параметров делителя от частоты с плавными поворотами щели.

Из результатов расчётов (рисунок 5) мы можем сделать вывод, что резонансный характер коэффициента отражения пропал, но при этом все-таки имеется резонанс на центральной частоте рассматриваемого диапазона с коэффициентом отражения -33,65 дБ, положение которого меняется при изменении положения трансформатора. При этом коэффициент передачи во всём диапазоне составляет $S_{21} = -3,39...-4,11$ дБ. Устранение резонансного характера коэффициента отражения в полосе частот привело к небольшим потерям в коэффициенте передачи.

3. Заключение

Проведённые исследования показывают, что разработанные модели Y-образного симметричного делителя на СЩЛ, позволяют реализовывать передачу сигнала с минимальными вносимыми потерями, не превышающими -3,62 дБ в полосе частот

шириной более 300% K_u диапазона, при этом волновые сопротивления на входе и выходе делителей равны 50 Ом, что упрощает согласование рассмотренных в работе устройств с другими типами линий передачи и применять их в многослойных структурах.

Исследованные конструкции Y-образного симметричного делителя на СЩЛ, учитывая техническую возможность их реализации, может быть рекомендована для использования в серийном производстве изделий электронной техники

Список литературы

1. Банков С.Е. Интегральная СВЧ-оптика. 2018.
2. Ключев С.Б. Модифицированная симметричная щелевая линия для интегральных схем СВЧ- и КВЧ-диапазонов. //Научные технологии. 2022. - Т. 23. - № 6. - С. 5–11.
3. Гвоздев В.И. Объемные интегральные схемы СВЧ. / Гвоздев В.И. Нефёдов Е.И. - 1985.
4. Пименов Ю. В., Вольман В. И., Муравцов А. Д. Техническая электродинамика/Под редакцией ЮВ Пименова: учеб. пособие для вузов //М.: Радио и связь. – 2000.
5. Никольский ВВ Н. Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн [Учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов]. – Наука, 1989.
6. Нефёдов Е. И. Электромагнитные поля и волны. – 2014.
7. Нефёдов Е. И. Техническая электродинамика: учебное пособие //М.: ИЦ «Академия. – 2008.
8. Малышев В. А., Червяков Г. Г., Лабынцев В. А. Основы электродинамики и микроволновой техники //учебное пособие/ВА Малышев, ГГ Червяков, ВА Лабынцев.–Таганрог: ТТИ ЮФУ. – 2008.
9. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ. – 1990.
11. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ устройств. – 1987.
12. Ключев 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.
13. Патент РФ на изобретение №2776955 приоритет 07 сентября 2021 г., МПК H01P 3/08 // Симметричная щелевая линия передачи сигнала СВЧ- и КВЧ-диапазонов. Ключев С.Б., Иовдальский В.А., Налогин А.Г., Пашков А.Н.