

УДК 621.372

Г.Г. Гошин, С.Ю. Екимов, В.П. Семибратов, А.В. Фатеев

Анализ и моделирование сверхширокополосных фиксированных аттенюаторов СВЧ-диапазона

Проведено исследование сверхширокополосных фиксированных аттенюаторов в диапазоне частот от 0 до 50 ГГц для трёх видов топологии резистивного слоя: прямоугольной, крестообразной топологии и крестообразной с прорезью с поверхностными сопротивлениями 50 и 100 Ом/кв. Исследованы зависимости модулей коэффициентов отражения и передачи. Проведено исследование нерегулярного резистивного слоя.

Ключевые слова: аттенюатор, коэффициент отражения, коэффициент передачи, резистивный слой, топология.

Фиксированный аттенюатор представляет собой диэлектрическую пластину прямоугольной формы, на одну или обе стороны которой нанесен тонкий (меньше толщины скин-слоя) слой резистивного материала, на пластине имеются проводящие центральные и корпусные контакты. Топологии слоев показаны на рис. 1.

В работе представлены результаты исследования сверхширокополосных фиксированных аттенюаторов. Рассматривались три вида топологии резистивного слоя: прямоугольная, крестообразная и крестообразная с прорезью. Использовались два резистивных слоя – 50 и 100 Ом/кв. Для данных топологий при фиксированных габаритных размерах подложки, центрального и корпусного контакта рассчитывались модули коэффициентов отражения и передачи в диапазоне частот от 0 до 50 ГГц. Номиналы ослабления аттенюаторов 3; 6; 10; 20 и 30 дБ.

Проведено исследование нерегулярного резистивного слоя. В виде последовательного соединения нескольких резистивных слоев крестообразной формы с малым номиналом ослабления, которые давали суммарное значение ослабления 30 дБ.

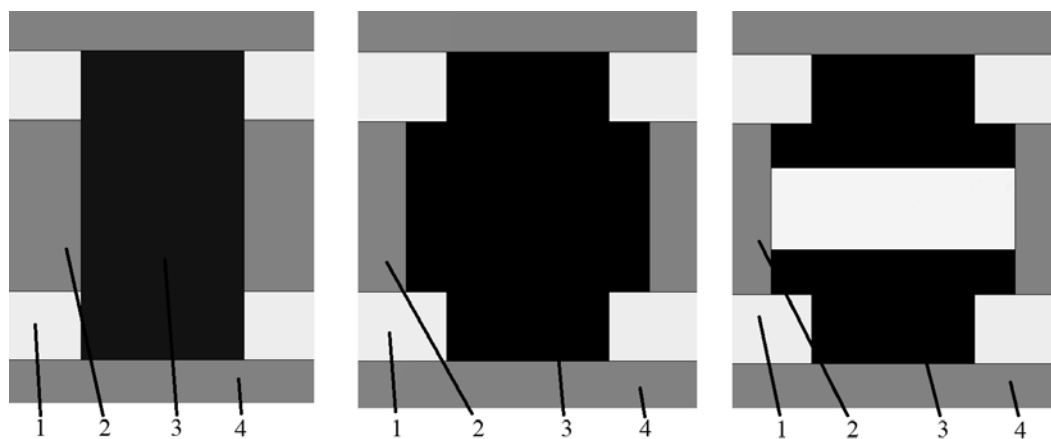


Рис. 1. Топология резистивного слоя: 1 – диэлектрическая подложка; 2 – центральные контакты; 3 – резистивный слой; 4 – корпусные контакты

Основная часть. Сначала были рассчитаны геометрические размеры резистивных слоёв по заданному поверхностному сопротивлению и необходимому номиналу ослабления. Для расчёта использовался подход, основанный на применении метода конформного отображения в математическом пакете MathCad. Суть подхода заключается в следующем: методом конформного отображения контур резистивного слоя переводится на вещественную ось и на основе метода электростатической аналогии определяется матрица взаимных емкостей линейных контактов пластины, отображенных на вещественную ось, затем находится матрица проводимостей резистивного слоя. По этой матрице проводимостей на основе теории четырехполюсников определяется входное (выходное) сопротивление и затухание резистивного слоя [1].

Входное (выходное) сопротивление рассчитывается как

$$R_{ВХ} = R_{ВЫХ} = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{K\left(\operatorname{sn}\left(\left(1-\frac{\tau}{D}\right)K'(k), k'\right)\right) \cdot K\left(\operatorname{cn}\left(\frac{\tau}{D}K'(k), k'\right)\right)}{K\left(\operatorname{cn}\left(\left(1-\frac{\tau}{D}\right)K'(k), k'\right)\right) \cdot K\left(\operatorname{sn}\left(\frac{\tau}{D}K'(k), k'\right)\right)}}, \quad (1)$$

где D, L – ширина и длина резистивного слоя пластины; ρ – поверхностное сопротивление резистивного слоя; τ – ширина полосковой подводящей линии; $K(k), K'(k)$ – полные эллиптические интегралы первого рода с модулем k ; который находится из соотношения $K(k) = \frac{1}{D}K'(k)$.

Затухание резистивного слоя рассчитывается как

$$A = 20 \lg \frac{Y_{11} + \sqrt{|Y|}}{Y_{21}} = 20 \lg \left(\frac{\sqrt{B} + 1}{\sqrt{B} - 1} \right), \quad (2)$$

где $B = \frac{K\left(\operatorname{sn}\left(\frac{\tau}{D}K'(k), k'\right)\right) \cdot K\left(\operatorname{sn}\left(\left(1-\frac{\tau}{D}\right)K'(k), k'\right)\right)}{K\left(\operatorname{cn}\left(\frac{\tau}{D}K'(k), k'\right)\right) \cdot K\left(\operatorname{cn}\left(\left(1-\frac{\tau}{D}\right)K'(k), k'\right)\right)}$.

Эллиптические функции вычислялись по алгоритму, приведённому в [2]. Поиск требуемых электрических параметров проводился с помощью параметрической оптимизации. Затем в CST Microwave Studio было проведено моделирование аналитически рассчитанных резистивных слоёв. Для трёх видов топологии резистивного слоя при поверхностном сопротивлении, равном 50 и 100 Ом/кв., рассчитывалась матрица S -параметров для 5 номиналов ослабления: 3; 6; 10; 20 и 30 дБ. По результатам моделирования был проведён сравнительный анализ частотных характеристик аттенуаторов. По итогам анализа были сделаны следующие выводы:

1. Для поверхностного сопротивления 100 Ом/кв. замечено, что наилучшее согласование имеет аттенуатор с прямоугольным резистивным слоем, хотя у него есть ряд недостатков по сравнению с крестообразной топологией резистивного слоя. К этим недостаткам относится большая неравномерность коэффициента передачи, порядка 8 дБ для больших номиналов ослабления. Здесь и далее в тексте говорится об аттенуаторах, без каких-либо согласующих элементов, которые могут уменьшить неравномерность коэффициента передачи либо улучшить согласование устройства. Также при использовании диэлектрической подложки с фиксированными габаритными размерами и фиксированными размерами центральных и корпусных контактов не всегда можно добиться необходимого согласования. Это связано с тем, что у такой топологии будет лишь одна степень свободы (длина резистивного слоя) в отличие от крестообразной топологии, где имеется две степени свободы (длины регулярных отрезков резистивного слоя).

2. Для поверхностного сопротивления 50 Ом/кв. была замечена особенность, что наилучшее согласование было у аттенуатора с крестообразной топологией резистивного слоя с прорезью. Это объясняется тем, что ёмкость, образуемая между центральными контактами за счет отсутствия резистивного слоя, вносит дополнительное влияние на высоких частотах, что приводит к улучшению согласования устройства. Также дополнительное влияние ёмкости значительно уменьшает неравномерность коэффициента передачи на высоких частотах.

При исследовании нерегулярного резистивного слоя использовались два варианта последовательного соединения нескольких резистивных слоёв крестообразной формы с малым номиналом ослабления (2, 4, 5 и 8 дБ), чтобы в сумме получить 30 дБ ослабления (рис. 2).

Была установлена закономерность, что при изменении порядка включения резистивных слоёв, ни коэффициент отражения, ни коэффициент передачи не меняются. У топологии аттенуатора с нерегулярным резистивным слоем согласование намного лучше, чем у топологии аттенуатора с регулярным резистивным слоем, настроенным на то же ослабление. Также, коэффициент передачи нерегулярного резистивного слоя имеет меньшую неравномерность.

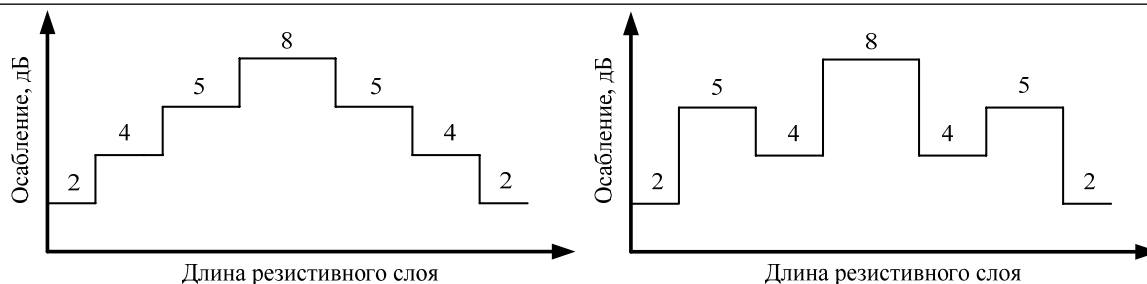
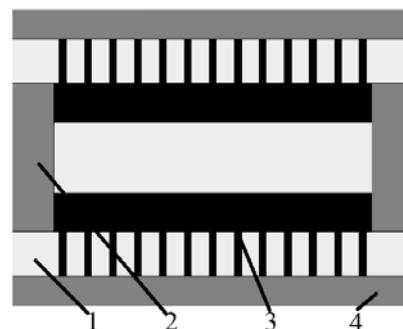


Рис. 2. Зависимость ослабления от длины резистивного слоя для топологии аттенюатора с нерегулярным резистивным слоем

Если совместить нерегулярный резистивный слой и крестообразный резистивный слой с прорезью, то получим частный случай гребенчатого резистивного слоя (рис. 3). Если сделать такой слой регулярным, то получим хорошее согласование в диапазоне частот до 50 ГГц.

Рис. 3. Топология гребенчатого резистивного слоя:
1 – диэлектрическая подложка; 2 – центральные контакты;
3 – резистивный слой; 4 – корпусные контакты



Заключение. Для поверхностного сопротивления 50 Ом/кв. лучшим вариантом будет использование гребенчатого резистивного слоя. Такая топология будет иметь хорошее согласование, поскольку на высоких частотах ёмкость, образуемая между центральными контактами за счет отсутствия резистивного слоя, будет вносить дополнительное влияние, которое улучшит согласование устройства и уменьшит неравномерность коэффициента передачи. Чтобы увеличить это влияние, можно поместить в зазор резистивного слоя свободный проводник. Для данной топологии редко применяются дополнительные подстроечные элементы, что намного упрощает конструкцию устройства и его себестоимость. Гребенчатый резистивный слой используется как для аттенюаторов, так и для нагрузок в широком диапазоне частот.

Для поверхностного сопротивления 100 Ом/кв. можно использовать прямоугольный резистивный слой. До 20 ГГц аттенюаторы с таким резистивным слоем будут иметь хорошее согласование и небольшую неравномерность коэффициента передачи. Но такой резистивный слой проигрывает по ряду показателей гребенчатому резистивному слою.

Крестообразный резистивный слой используется в тех случаях, когда не удастся достигнуть необходимых характеристик, используя прямоугольный резистивный слой. Существенное преимущество такого слоя заключается в том, что его можно использовать с любым поверхностным сопротивлением резистивного слоя. Так же такую топологию резистивного слоя полезно использовать, когда нет возможности изменить размеры центральных и корпусных контактов и габаритные размеры платы.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07.09.2010 г. в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Садков В.Д. Расчет тонкопленочной аттенюаторной пластины / В.Д. Садков, Ю.А. Горячев. – Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника. – 1977. – Вып. 2. – С. 13–19.
2. Сычев А.Н. Комбинированный метод частичных ёмкостей и конформных отображений для анализа многомодовых полосковых структур. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 138 с.

Гошин Геннадий Георгиевич

Профессор каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧ и КР) ТУСУРа

Тел.: +7 (382-2) 70-15-18

Эл. почта: goshingg@svch.tusur.ru

Екимов Сергей Юрьевич

Аспирант каф. СВЧ и КР ТУСУРа

Эл. почта: ekimov@micran.ru

Семибратов Владимир Павлович

Аспирант каф. СВЧ и КР ТУСУРа

Эл. почта: svr@micran.ru

Фатеев Алексей Викторович

Аспирант каф. СВЧ и КР ТУСУРа

Эл. почта: fateevav@svch.tusur.ru

Goshin G.G., Ekimov S.Yu., Semibratov V.P., Fateev A.V.

Analysis and modeling of ultra wideband fixed attenuators of microwave range

There was carried out the investigation of ultra wideband fixed attenuators in a range of frequencies from 0 to 50 GHz for three types of resistive film topology: rectangular, cross topology and cross slotted with a surface resistance of 50 and 100 ohms / sq. Their absolute reflectance and transmission were examined. We also studied an irregular resistive film.

Keywords: attenuator, reflection coefficient, transfer coefficient, resistive film, topology.
