©2020 г.
Пилькевич А.В.,
Фомина К.С.,
Садков В.Д.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ ПЛЕНОЧНЫХ ПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЧ И СВЧ АТТЕНЮАТОРОВ

Предложены топологии поглощающих элементов на основе однородной резистивной пленки для волноводных, коаксиальных и полосковых аттенюаторов широкого диапазона ослаблений, обеспечивающие снижение в среднем на 40% максимальных значений градиента потенциала и плотности, выделяющейся в резистивной пленке, мощности по сравнению с типовыми топологиями. Приведены графики, показывающие выигрыш в величине градиента потенциала и плотности мощности в зависимости от соотношений размеров поглощающих элементов.

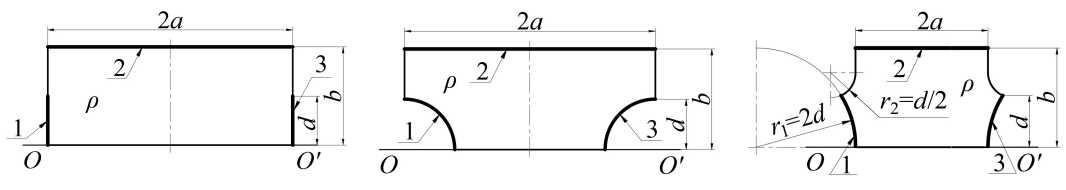
Ключевые слова: резистивные пленочные поглощающие элементы, фиксированные аттенюаторы.

Широкополосные фиксированные аттенюаторы (волноводные, коаксиальные, полосковые) с пленочными поглощающими элементами (ПЭ) широко используются в телевизионных, радиоприемных и измерительных системах [1]. ПЭ таких аттенюаторов выполняются, как правило, на основе распределенных резистивных структур, отличающихся от ПЭ с дискретными пленочными резисторами (по П- или Т-схемам) повышенной широкополосностью, нечувствительностью к точечным дефектам и неоднородностям, разбросу технологических параметров, большей устойчивостью к импульсным и температурным воздействиям [2].

Для реализации требуемого диапазона ослаблений в волноводных и коаксиальных аттенюаторах используют симметричные относительно линии OO' ПЭ прямоугольной (рисунок 1, а – большие и средние ослабления) и Т-образной топологии (рисунок 2, а – средние и малые ослабления) [3, 4]. Несимметричные ПЭ (в полосковых и микрополосковых аттенюаторах) обеспечивают одинаковое с симметричными ослабление при меньшем в 2 раза сопротивлении резистивной пленки.

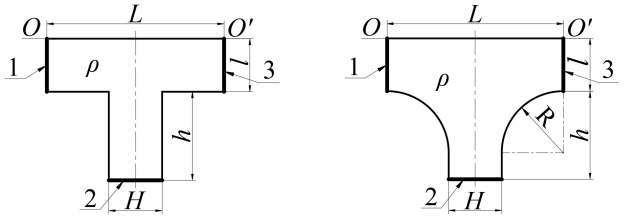
Исследования показывают, что распределение плотности тока и рассеиваемой мощности по поверхности рассматриваемых ПЭ сильно неоднородно (особенно в области входного контакта ПЭ рисунок 1, а и угла $3\pi/2$ ПЭ рисунок 2, а). Это приводит к снижению уровня допустимой мощности, ухудшению температурной и временной стабильности, надежности аттенюаторов [4].

Цель работы – предложить топологии ПЭ с меньшими значениями градиентов потенциалов и плотностей мощности в резистивной пленке с учетом того, что оптимальный профиль контактов 1 и 3 ПЭ рисунок 1, а (профиль постоянного градиента потенциала), как показано в [5], близок при малых d/b к полуокружности, оценить величину этого снижения и получить соотношения для расчета.



а **б** **в**

Рисунок 1 – ПЭ типовой (а) и предложенной топологий для больших (б) и малых (в) ослаблений: 1 и 3 - входной и выходной контакты; 2 - заземленный контакт



а **б**

Рисунок 2 – Т-образный ПЭ типовой (а) и предложенной (б) топологии: 1 и 3 - входной и выходной контакты; 2 - заземленный контакт

1. Прямоугольный ПЭ

Типовой и предлагаемый несимметричные варианты топологии ПЭ для реализации больших ослаблений приведены на рисуне 1, а, б, отношение максимальных значений их градиентов потенциалов и плотностей мощностей, выделяющихся в пленке и полученных с помощью программы Elcut [6], – на рисунке 3. Максимальные значения градиента потенциала и плотности мощности в предлагаемой топологии ПЭ снижаются в среднем (в практически важном случае $d / b \approx 0{,}5$) в 1,3 и 1,6 раза соответственно.

Соотношения для входного сопротивления (Ом) и ослабления (дБ) ПЭ рисунок 1, а известны [7]:

$$R = \frac{\rho}{2}\sqrt{\frac{K'(m_1)K(m)}{K(m_1)K'(m)}},$$

$$g = 20\lg\left[2\Big/\left(\sqrt{\frac{K'(m_1)K'(m)}{K(m)K(m_1)}}-1\right)+1\right],$$

$$m = cn\left(\frac{d}{b}K',k'\right),\ m_1 = cn\left[\left(1-\frac{d}{b}\right)K',k'\right], \quad (1)$$

$$K'/K = b/a,$$

где ρ – удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки; K и K' – полные эллиптические интегралы 1-го рода модуля k и $k' = (1-k^2)^{1/2}$; $cn(U, k')$ – эллиптический косинус Якоби амплитуды U и модуля k'.

Выражения (1) существенно упрощаются в случае длинного и короткого ПЭ.

При $b / a < 1/3$ получаем:

$$R = (\rho/2)K'[\sin(\pi d/2b)]/K[\sin(\pi d/2b)], \quad (2)$$
$$q = 8{,}68\pi a/b.$$

При $b / a > 3$ имеем:

$$R = (\rho/2)[(1-d/b)/(d/b)]^{1/2}, \quad (3)$$
$$q = 8{,}68(2a/b)/[(d/b)/(1-d/b)]^{1/2}.$$

Зависимости отношений ослаблений и входных сопротивлений ПЭ (рисунок 1, а, б) приведены на рисунке 4. При одинаковых размерах топология (рисунок 1, б) обеспечивает меньшее ослабление и требует большего удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки для получения требуемого входного сопротивления. Заданные ослабление и входное сопротивление получают при увеличении длины ПЭ (рисунок 1, б) в среднем на 20-30% и удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки на 12-20%.

Для диапазона $0{,}1 < b / a < 1$, $0{,}2 < d / b < 0{,}8$ ($d / b = \alpha$, $b / a = \beta$) приведем расчетные соотношения для ослабления и нормированного входного сопротивления оптимизированной топологии, полученные моделированием в Elcut [6]:

$$q = (797{,}3410\alpha^2 - 643{,}6601\alpha + 48{,}4540)\beta^2 + (-721{,}0201\alpha^2 + 545{,}0802\alpha - 60{,}1110)\beta - 76{,}6131\alpha^2 + 82{,}6561\alpha + 41{,}7201. \quad (4)$$

$$R/\rho = \varphi = (0{,}5163\alpha^2 - 0{,}6381\alpha + 0{,}1577)\beta^2 + (-0{,}3391\alpha^2 + 0{,}4013\alpha - 0{,}0715)\beta + 1{,}3391\alpha^2 - 2{,}7773\alpha + 1{,}6241. \quad (5)$$

Для диапазона малых ослаблений близкой к оптимальной является топология рисунок 1, в, обеспечивающая выигрыш в среднем в 1,4 раза по максимальным величинам градиента потенциала (рисунок 5) и плотности мощности, выделяющейся в пленке. Отношения ослаблений и входных сопротивлений ПЭ рисунок 1, а, в приведены на рисунке 6.

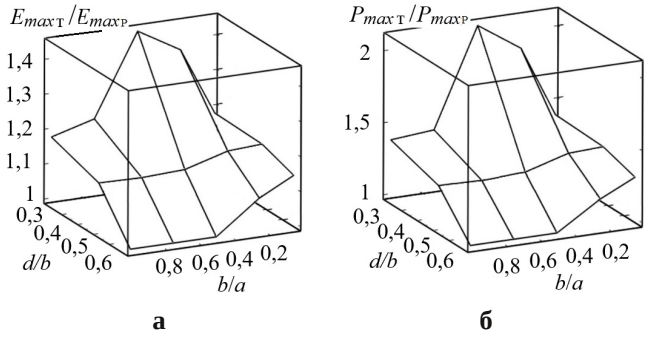
Для диапазона $5 < b / a < 20$, $0{,}2 < d / b < 0{,}8$ для ПЭ рисунок 1, в по результатам моделирования имеем:

$$q = (28{,}517\alpha^2 - 33{,}455\alpha + 33{,}737)\times \beta^{(0{,}2733\alpha^2 - 0{,}0280\alpha - 0{,}8433)},\ \text{дБ}, \quad (6)$$

$$R/\rho = \varphi = (-0{,}0207\alpha^2 + 0{,}0198\alpha - 0{,}0035)\beta^2 + (0{,}6933\alpha^2 - 0{,}7020\alpha + 0{,}1466)\beta - 1{,}5717\alpha^2 - 0{,}0325\alpha + 1{,}6506. \quad (7)$$

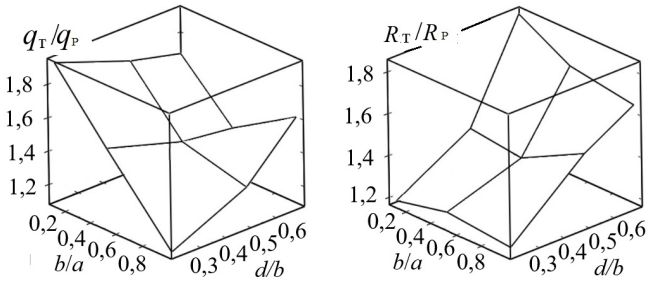
2. Т-образный ПЭ

Предлагаемый вариант топологии Т-образного ПЭ для реализации средних ослаблений, позволяющий снизить величины плотности тока и гради-



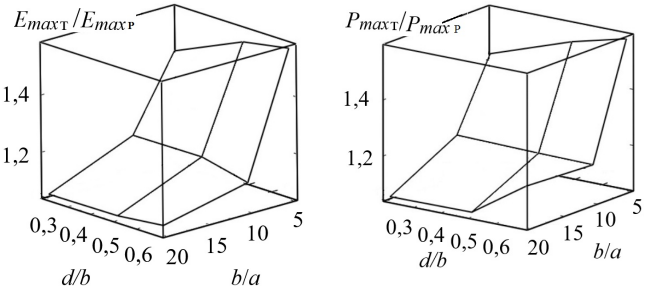
а б

Рисунок 3 – Отношение максимальных значений градиентов потенциалов (а) и плотностей мощностей в пленке (б) ПЭ типовой (рисунок 1, а) и предложенной (рисунок 1, б) топологии



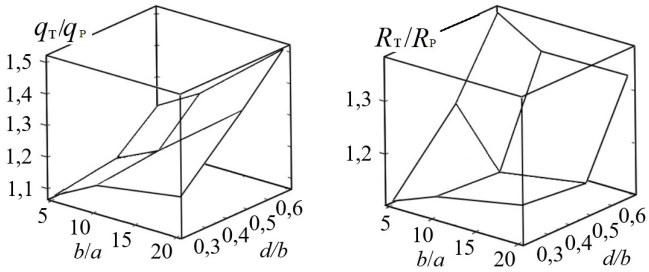
а б

Рисунок 4 – Отношения ослаблений (а) и входных сопротивлений (б) ПЭ типовой (рисунок 1, а) и предложенной (рисунок 1, б) топологии



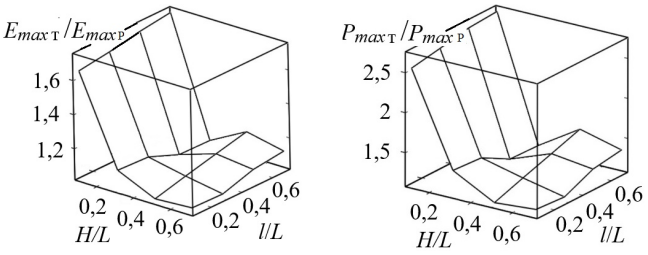
а б

Рисунок 5 – Отношение максимальных значений градиентов потенциалов (а) и плотностей мощности (б) ПЭ типовой (рисунок 1, а) и предложенной (рисунок 1, в) топологии



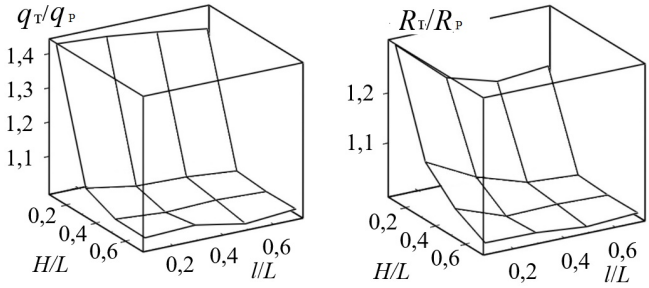
а б

Рисунок 6 – Отношения ослаблений (а) и входных сопротивлений (б) ПЭ рисунок 1, а, в



а б

Рисунок 7 – Отношение максимальных значений градиентов потенциалов (а) и плотностей мощности (б) ПЭ рисунок 2, а, б для случая h / H = 5



а б

Рисунок 8 – Отношения ослаблений (а) и входных сопротивлений (б) ПЭ типовой (рисунок 2, а) и предложенной (рисунок 2, б) для случая h / H = 5

ента потенциала в ПЭ рисунок 2, а путем скругления внутреннего угла в $3\pi / 2$, приведен на рисунке 2, б. Его расчет, после приведения к прямоугольному ПЭ по соотношениям (8), полученным в [4], проводится с учетом ограничений $l / L \geq 0{,}7$ и $h / H \geq 0{,}5$ по формулам (1) - (3).

$$\frac{l_2}{\pi} = m = \frac{l}{L} + \frac{1}{2\pi}\left(a \ln\frac{1+a}{1-a} - \ln\frac{4}{1-a^2}\right),$$
$$\frac{h_2}{\pi} = n = \frac{h}{H} + \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{a}\ln\frac{1+a}{1-a} - \ln\frac{4}{1-a^2} + 2\ln\frac{1}{a}\right). \quad (8)$$

Отношение максимальных значений градиентов потенциалов и плотностей мощности ПЭ

рисунок 2, а, б для случая $h / H = 5$ приведено на рисунке 7.

Выигрыш в среднем составляет 1,4 раза по величине максимального градиента потенциала и 2 раза по максимальным значениям плотности мощности, выделяющейся в пленке. Зависимости отношений ослаблений (а) и входных сопротивлений (б) ПЭ типовой (рисунок 2, а) и предложенной (рисунок 2, б) для случая $h / H = 5$ приведены на рисунке 8.

Для ПЭ рисунок 2, б при $1 < h / H = \alpha < 10$, $0{,}1 < l / L = \beta < 0{,}7$, $0{,}1 < H / L = \gamma < 0{,}7$ приведем расчетные соотношения для ослабления q и нормированного входного сопротивления R / ρ, полученные по результатам моделирования [6]:

$$q = a\gamma^3 + b\gamma^2 + c\gamma + d, \text{ дБ}, \quad (9)$$

$$a = e\beta^3 + f\beta^2 + g\beta + j,\ b = k\beta^3 + m\beta^2 + n\beta + o,$$

$$c = p\beta^3 + q\beta^2 + r\beta + s,\ d = t\beta^3 + u\beta^2 + y\beta + z,$$

$$e = 18{,}6490\alpha^2 - 235{,}4099\alpha + 720{,}4200,$$

$$f = -25{,}9340\alpha^2 + 308{,}3999\alpha - 870{,}2899,$$

$$g = 10{,}8620\alpha^2 - 117{,}5099\alpha + 292{,}4700,$$

$$j = -1{,}1150\alpha^2 + 9{,}4684\alpha - 28{,}3269,$$

$$k = -24{,}5990\alpha^2 + 307{,}9099\alpha - 1019{,}099,$$

$$m = 34{,}1899\alpha^2 - 400{,}02999\alpha + 1219{,}8999,$$

$$n = -14{,}2999\alpha^2 + 150{,}0699\alpha - 403{,}6700,$$

$$o = 1{,}4450\alpha^2 - 11{,}4629\alpha + 43{,}6909,$$

$$p = 9{,}4074\alpha^2 - 116{,}0699\alpha + 431{,}7500,$$

$$q = -13{,}0130\alpha^2 + 147{,}7499\alpha - 507{,}9899,$$

$$r = 5{,}3834\alpha^2 - 53{,}1890\alpha + 164{,}2599,$$

$$s = -0{,}5515\alpha^2 + 4{,}1386\alpha - 26{,}5799,$$

$$t = -0{,}0659\alpha^2 + 0{,}0966\alpha - 33{,}9479,$$

$$u = 0{,}0119\alpha^2 + 2{,}4937\alpha + 34{,}9189,$$

$$y = 0{,}0489\alpha^2 - 2{,}6228\alpha - 10{,}01699,$$

$$z = 0{,}05680\alpha^2 - 0{,}8584\alpha + 13{,}4240,$$

$$R / \rho = \varphi = a\gamma^3 + b\gamma^2 + c\gamma + d, \quad (10)$$

$$a = e\beta^3 + f\beta^2 + g\beta + j,\ b = k\beta^3 + m\beta^2 + n\beta + o,$$

$$c = p\beta^3 + q\beta^2 + r\beta + s,\ d = t\beta^3 + u\beta^2 + y\beta + z,$$

$$e = 4{,}9918\alpha^2 - 113{,}21\alpha + 466{,}9201,$$

$$f = -6{,}5233\alpha^2 + 192{,}9100\alpha - 696{,}9401,$$

$$g = 2{,}1482\alpha^2 - 92{,}8430\alpha - 337{,}7301,$$

$$j = -0{,}1182\alpha^2 + 10{,}0210\alpha - 72{,}5111,$$

$$k = -12{,}1250\alpha^2 + 239{,}4099\alpha - 811{,}8601,$$

$$m = 16{,}0870\alpha^2 - 381{,}7299\alpha + 1193{,}6000,$$

$$n = -5{,}9281\alpha^2 + 177{,}7501\alpha - 570{,}2399,$$

$$o = 0{,}5143\alpha^2 - 19{,}1460\alpha + 119{,}5999,$$

$$p = 8{,}7191\alpha^2 - 153{,}3001\alpha + 467{,}58001,$$

$$q = -11{,}8250\alpha^2 + 236{,}0101\alpha - 678{,}9001,$$

$$r = 4{,}7384\alpha^2 - 109{,}1101\alpha + 320{,}9801,$$

$$s = -0{,}4958\alpha^2 + 11{,}6521\alpha - 66{,}4870,$$

$$t = -2{,}6102\alpha^2 + 40{,}2140\alpha - 105{,}1601,$$

$$u = 3{,}7168\alpha^2 - 60{,}9041\alpha + 151{,}6901,$$

$$y = -1{,}6421\alpha^2 + 28{,}4941\alpha - 70{,}8691,$$

$$z = 0{,}1832\alpha^2 - 2{,}5805\alpha + 15{,}2250.$$

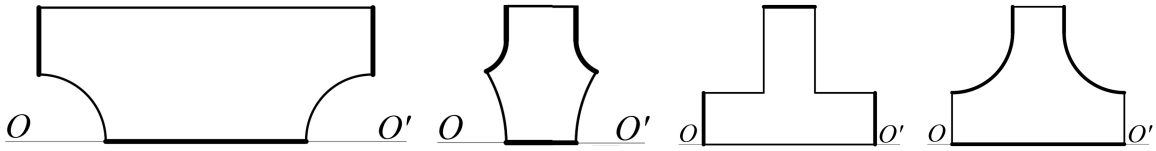
Погрешность соотношений (4) - (7), (9), (10) не превосходит 3%, что существенно ниже погрешности изготовления.

Практический интерес представляют как несимметричные (рисунок 9), так и симметричные (относительно линии OO') ПЭ, получаемые инверсией граничных условий рассмотренных ПЭ (рисунок 9, а – инверсией ПЭ рисунок 1, б; рисунок 9, б – инверсией ПЭ рисунок 1, в; рисунок 9, в – рисунок 2, а; рисунок 9, г – рисунок 2, б). При этом ослабление ПЭ рисунок 9 (симметричного и несимметричного) остается равным ослаблению соответствующего исходного ПЭ и вычисляется по (4), (6), (8) и (1), (9). Нормированное входное сопротивление $RBX / \rho = 1 / \varphi$ для несимметричных ПЭ из (5), (7), (8) и (1), (10), $R / \rho = 2 / \varphi$ – для симметричных. ПЭ рисунок 9 (в структуре их потенциального поля линии тока переходят в линии потенциала и наоборот) также отличаются более равномерным распределением плотности тока, мощности и градиента потенциала по сравнению с типовыми с выигрышем не менее 40%.

Отметим, что малогабаритные (2 × 2 мм, 1 × 1 мм и менее) навесные ПЭ широкого диапазона ослаблений для поверхностного монтажа выполняются с использованием кусочно-однородных резистивных пленок [7] или однородных с проводящими и непроводящими включениями [8].

Выводы

Предложены топологии ПЭ широкого диапазона ослаблений для волноводных, коаксиальных и полосковых аттенюаторов, обеспечивающие снижение в среднем на 40% максимальных значений градиента потенциала и плотности мощности, выделяющейся в резистивной пленке, по сравнению с типовыми ПЭ. Их использование позволит повысить уровень допустимой мощности, температурную и временную стабильность, надежность аттенюаторов.



а **б** **в** **г**

Рисунок 9 – ПЭ с инвертированными граничными условиями

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Львов А.Е., Рудоясова Л.Г., Шишков Г.И., Щербаков В.В. Тонкопленочные полосковые аттенюаторы // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 5. С. 40-46.

2. Шишков Г.И. Широкополосные фиксированные аттенюаторы // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 1. С. 110-114.

3. Садков В.Д., Подмогаев В.Е., Моругин С.Л., Ширяев Д.Д. Анализ и синтез поглощающих элементов с резистивной пленкой сложной геометрической формы // Труды Радиотехнического института АН СССР. 1982. № 46. С. 48-60.

4. Садков В.Д. Расчет Т-образных аттенюаторных пластин для сверхширокополосных коаксиальных и полосковых аттенюаторов СВЧ // Электронная техника. Серия Электроника СВЧ. 1988. Вып. 7. С. 24-29.

5. Садков В.Д., Уткин В.Н. Оптимальный профиль входных контактов аттенюаторной пластины на основе распределенных резистивных структур // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2008. № 12. С. 65-67.

6. Elcut. Сайт компании ООО «Тор»: www.tor.ru.

7. Садков В.Д., Фомина К.С. Поглощающие элементы для реализации широкого диапазона ослаблений // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 4. С. 238-243.

8. Садков В.Д., Фомина К.С., Пилькевич А.В. Поглощающие элементы на основе однородной резистивной пленки для реализации широкого диапазона ослаблений мощности радиосигналов // Известия вузов. Электроника. 2018. № 5. С. 477-485.

Поступила 10.05.2019.

Pilkevich A.V.,
Fomina K.S.,
Sadkov V.D.

OPTIMIZATION OF TOPOLOGY OF THE FILM ABSORBING ELEMENTS HF AND VERY HIGH FREQUENCY OF ATTENUATORS

The topology of the absorbing elements on the basis of a homogeneous resistive film for waveguide, coaxial and strip attenuators of broad range of easing providing decrease on average by 40% of the maximum values of a potential gradient and density of the power which is selected in a resistive film in comparison with standard topology is offered. The diagrams showing a prize in the value of a potential gradient and density of power depending on ratios of the sizes of the absorbing elements are provided.

Keywords: resistive film absorbing elements, fixed attenuators.