

УДК 621.372.8

Л.Г. Рудоясова, Г.И. Шишков, В.В. Щербаков

ТОНКИЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ПЛЕНКИ В УСТРОЙСТВАХ СВЧ И КВЧ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описаны физические основы работы и даны технические характеристики коаксиальных фиксированных широкополосных аттенуаторов.

Ключевые слова: резистивные пленки, волноводы, дисперсионные характеристики, пластинчатые резисторы, фиксированные аттенуаторы, ослабление, погрешности.

Введение

Тонкие (много меньше толщины скин-слоя) резистивные пленки широко применяются в СВЧ уже достаточно давно [1].

Резистивные пленки на плоских диэлектрических пластинах (подложках) используются в волноводной технике в качестве нагрузок, фиксированных и переменных аттенуаторов, а также в высокоточных поляризационных аттенуаторах.

Основой коаксиальных нагрузок являются цилиндрические резисторы (сопротивления). На цилиндрических и шайбовых резисторах созданы коаксиальные аттенуаторы в диапазоне от постоянного тока до нижней границы СВЧ-диапазона.

Тонкие резистивные пленки используются в качестве поглощающих элементов в составе СВЧ гибридно-интегральных схем, в устройствах для непосредственного измерения мощности в СВЧ-диапазоне. Такие пленки на диэлектрических подложках применяются в качестве узлов связи в волноводных направленных ответвителях для обеспечения равномерности переходного ослабления и коэффициента направленности. Тонкие резистивные пленки нашли применение в конструкциях микрополосковых линий передачи в качестве элементов подавления высших типов волн [2].

Применение тонких резистивных пленок на диэлектрических подложках в круглых, эллиптических и прямоугольных волноводах явилось прорывом в создании наиболее распространенных устройств СВЧ и КВЧ широкополосных коаксиальных аттенуаторов.

Один из авторов данной статьи в 1960 году впервые в мировой практике для создания широкополосных коаксиальных аттенуаторов предложил использовать новую электродинамическую структуру: отрезок круглого волновода, в диаметральной плоскости перегороженного тонкой резистивной пленкой на диэлектрической подложке (пластинчатым резистором).

В дальнейшем для улучшения технических характеристик аттенуаторов (равномерности ослабления по частоте, степени согласования с внешним трактом) стали применять отрезки эллиптических волноводов.

Исследования прямоугольных волноводов с тонкими резистивными пленками на диэлектрических подложках привели к усовершенствованию аттенуаторов на полосковых линиях [3,4] и улучшению технических характеристик волноводных аттенуаторов.

Первоначально разработки пластинчатых резисторов и аттенуаторов на их основе базировались на экспериментальных исследованиях.

Расширение диапазона частот до 18 ГГц и выше потребовало проведения исследований на электродинамическом уровне неоднородных волноводных структур с резистивными пленками и диэлектриками, поскольку введение их в полые волноводы приводит к значительным качественным изменениям характеристик распространения волн.

Рассмотрим основные электродинамические характеристики в круглом, эллиптическом

ском и прямоугольном волноводах с тонкими резистивными пленками на диэлектрических подложках.

Круглый волновод с резистивными пленками

Рассмотрим круглый волновод, диаметрально перегороженный диэлектрической пластиной с нанесенными по одну или обе ее поверхности тонкими резистивными пленками, который является основной электродинамической структурой, используемой на практике для создания широкополосных коаксиальных аттенуаторов.

На рис. 1 представлено поперечное сечение такого волновода с двумя резистивными пленками.

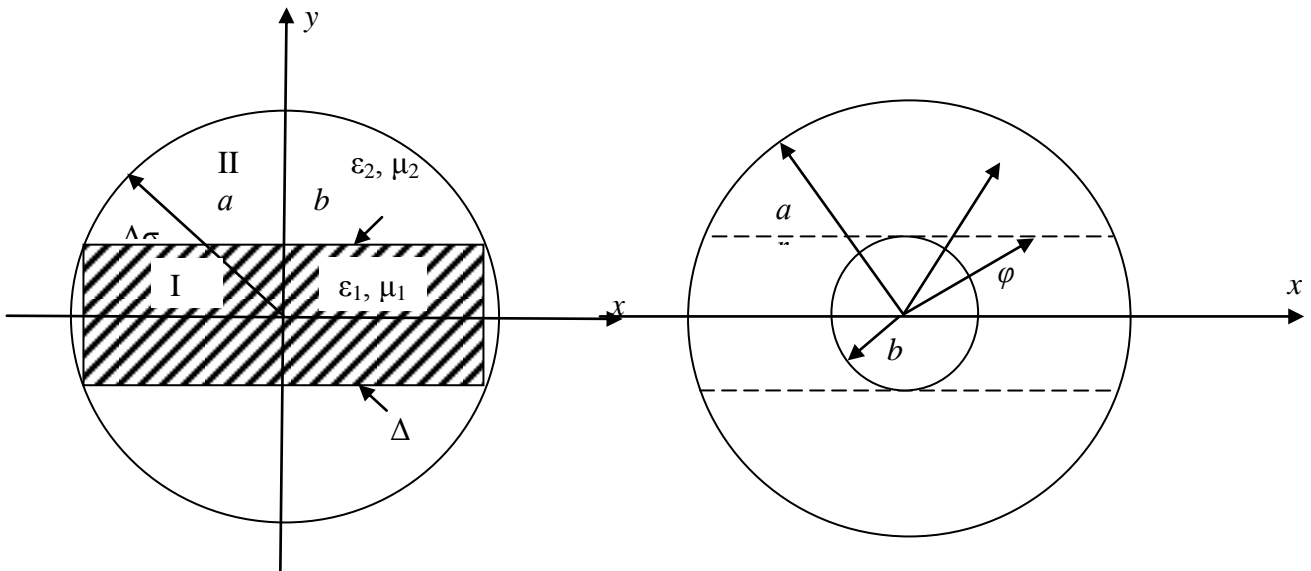


Рис. 1. Круглый волновод с резистивными пленками на диэлектрической подложке:
 a – радиус волновода; b – половина толщины подложки; $\epsilon_{1,2}, \mu_{1,2}$ – диэлектрическая и магнитная проницаемости областей I, II; $\Delta\sigma$ – поверхностная проводимость пленок; Δ – толщина пленок

Будем считать, что стенки волновода идеально проводящие. Поскольку граничные условия на пленке могут быть удовлетворены только при использовании полных наборов собственных функций выделенных областей I и II, то электрические и магнитные вектора Герца, описывающие поля в этих областях, записываем в виде

$$\Pi_{z1}^e = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos k\pi x / 2a \cdot \sin \alpha_{1k} y \cdot e^{-i\beta z} \tag{1}$$

$$\Pi_{z1}^m = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cdot \sin k\pi x / 2a \cdot \cos \alpha_{1k} y \cdot e^{-i\beta z}$$

$k=1,3,5\dots$ для области I;

$$\Pi_{z2}^e = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot \chi_{1n}(\alpha_2 r) \cdot \sin(2n + 1)\varphi \cdot e^{-i\beta z} \tag{2}$$

$$\Pi_{z2}^m = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cdot \chi_{2n}(\alpha_2 r) \cdot \cos(2n + 1)\varphi \cdot e^{-i\beta z}$$

$n=0,1,2,3\dots$ для области II,

где

$$\chi_{1n}(\alpha_2 r) = \frac{J_{2n+1}(\alpha_2 r) \cdot N_{2n+1}(\alpha_2 a) - J_{2n+1}(\alpha_2 a) \cdot N_{2n+1}(\alpha_2 r)}{J_{2n+1}(\alpha_2 b) \cdot N_{2n+1}(\alpha_2 a) - J_{2n+1}(\alpha_2 a) \cdot N_{2n+1}(\alpha_2 b)},$$

$$\chi_{2n}(\alpha_2 r) = \frac{J_{2n+1}(\alpha_2 r) \cdot N'_{2n+1}(\alpha_2 a) - J'_{2n+1}(\alpha_2 a) \cdot N_{2n+1}(\alpha_2 r)}{J_{2n+1}(\alpha_2 b) \cdot N'_{2n+1}(\alpha_2 a) - J'_{2n+1}(\alpha_2 a) \cdot N_{2n+1}(\alpha_2 b)}$$

– линейные комбинации функций Бесселя $J_{2n+1}(\alpha_2 r)$ и Неймана $N_{2n+1}(\alpha_2 r)$, обеспечивающие выполнение граничных условий по поверхности волновода $r=a$ [5].

Волновые числа связаны соотношениями

$$\varepsilon_1 \mu_1 \omega^2 = \alpha_{1k}^2 + (\kappa\pi/2a)^2 + \beta^2, \alpha_{1k}^2 + (\kappa\pi/2a)^2 = \alpha_1^2, \varepsilon_2 \mu_2 \omega^2 = \alpha_2^2 + \beta^2. \quad (3)$$

Поскольку рассматриваемая система имеет потери, продольное β и поперечные $\alpha_{1,2}$ волновые числа полагаем комплексными: $\alpha_{1,2} = \gamma_{1,2} + i\delta_{1,2}$, $\beta = \beta_1 + i\beta_2$, $\alpha_{1k} = \gamma_{1k} + i\delta_{1k}$.

Ввиду симметричности системы относительно оси x , для составления дисперсионного уравнения достаточно реализовать граничные условия только на одной из пленок.

На границе $y = b$ $r = \sqrt{x^2 + b^2}$, $\cos \varphi = x/\sqrt{x^2 + b^2}$, $\sin \varphi = b/\sqrt{x^2 + b^2}$.

Выражая компоненты поля, тангенциальные по отношению к этой границе, через вектора Герца, подставляем их в граничные условия, соответствующие методу поверхностного тока [6]:

$$E_{z1}(y = b) = E_{z2}(y = b), \quad E_{x1}(y = b) = E_{x2}(y = b), \quad (4)$$

$$H_{z1}(y = b) - H_{z2}(y = b) = -\Delta\sigma E_{x1}(y = b), \quad H_{x1}(y = b) - H_{x2}(y = b) = \Delta\sigma E_{z1}(y = b),$$

которые приводят к системе четырех функциональных уравнений:

$$\alpha_1^2 \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_{\kappa} \cdot \cos \kappa\pi x/2a \cdot \sin \alpha_{1\kappa} b = \alpha_2^2 \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot N_{1n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) \cdot \sin(2n+1)\varphi, \quad (5)$$

$$\sum_{\kappa=1}^{\infty} [\beta A_{\kappa} \kappa\pi/2a + \omega\mu_1 \alpha_{1\kappa} B_{\kappa}] \cdot \sin \kappa\pi x/2a \cdot \sin \alpha_{1\kappa} b = - \sum_{n=0}^{\infty} [\beta A_n \alpha_2 \cdot N'_{1n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) - \frac{\omega\mu_2}{\sqrt{x^2 + b^2}} \cdot (2n+1) B_n N_{2n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2})] \cdot \sin(2n+1)\varphi \cdot \cos \varphi + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\beta(2n+1)}{\sqrt{x^2 + b^2}} A_n * \right. \\ \left. * N_{1n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) - \omega\mu_2 \alpha_2 B_n N'_{2n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) \right] \cdot \cos(2n+1)\varphi \cdot \sin \varphi, \quad (6)$$

$$\alpha_1^2 \sum_{\kappa=1}^{\infty} B_{\kappa} \cdot \sin \kappa\pi x/2a \cdot \cos \alpha_{1\kappa} b - \alpha_2^2 \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cdot N_{2n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) \cdot \cos(2n+1)\varphi = \\ = -i\Delta\sigma \sum_{\kappa=1}^{\infty} [\beta \kappa\pi/2a A_{\kappa} + \omega\mu_1 \alpha_{1\kappa} B_{\kappa}] \cdot \sin \kappa\pi x/2a \cdot \sin \alpha_{1\kappa} b, \quad (7)$$

$$\sum_{\kappa=1}^{\infty} [\omega\varepsilon_1 \alpha_{1\kappa} A_{\kappa} - \beta \kappa\pi/2a B_{\kappa}] \cdot \cos \kappa\pi x/2a \cdot \cos \alpha_{1\kappa} b - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\omega\varepsilon_2}{\sqrt{x^2 + b^2}} (2n+1) A_n * \right. \\ \left. * N_{1n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) - \beta \alpha_2 N'_{2n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) B_n \right] \cdot \cos(2n+1)\varphi \cdot \cos \varphi + \sum_{n=1}^{\infty} [\omega\varepsilon_2 \alpha_2 A_n * \\ * N'_{1n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2}) - \frac{\beta(2n+1)}{\sqrt{x^2 + b^2}} B_n N_{2n}(\alpha_2 \sqrt{x^2 + b^2})] \cdot \sin(2n+1)\varphi \cdot \sin \varphi = \\ = -i\Delta\sigma \alpha_1^2 \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_{\kappa} \cdot \cos \kappa\pi x/2a \cdot \sin \alpha_{1\kappa} b. \quad (8)$$

Используя в соответствии с методом частичных областей условия ортогональности собственных функций на интервале $x \in [0 - a]$, переходим от системы функциональных уравнений (5–8) к бесконечной системе линейных однородных алгебраических уравнений относительно коэффициентов A_k, B_k, A_n, B_n .

Запись условия нетривиальности решений этой системы приводит к дисперсионному уравнению волн в рассматриваемом волноводе.

Выражая A_k и B_k через A_n и B_n , приходим к бесконечной системе линейных однородных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов A_n и B_n :

$$\sum_{n=0}^{\infty} (R_{nk}A_n + S_{nk}B_n) = 0, \quad \sum_{n=0}^{\infty} (L_{nk}A_n + M_{nk}B_n) = 0, \quad (9)$$

где $R_{nk}, S_{nk}, L_{nk}, M_{nk}$ – сложные функции частоты, индексов волн, геометрических и электрических параметров структуры [7]. Результаты решения дисперсионного уравнения при заданных параметрах $\Delta\sigma, \epsilon_1, a$ и b приведены на рис. 2. Расчет проведен при удельном поверхностном сопротивлении пленки $R_{\Pi} = 100 \text{ Ом}/\square$ ($R_{\Pi} = 1/\Delta\sigma$).

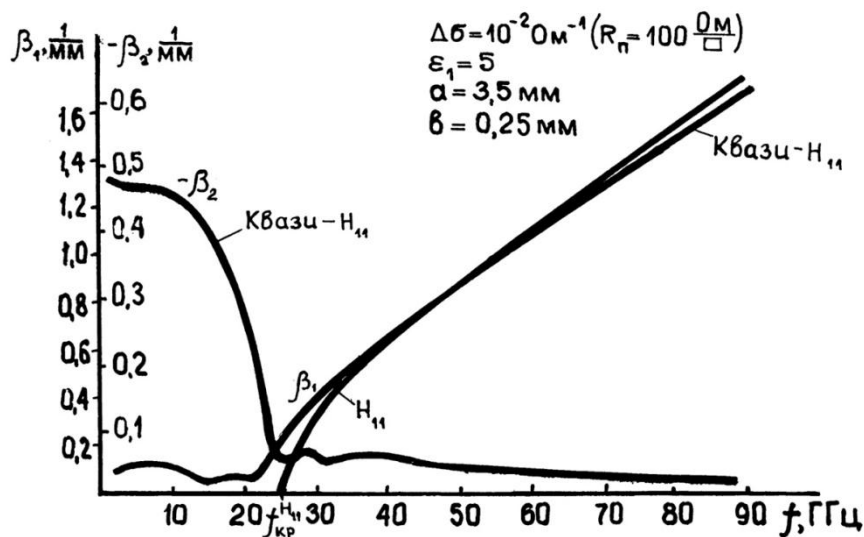


Рис.2. Зависимость фазовой постоянной β_1 и коэффициента затухания β_2 от частоты

Из рис. 2 видно, что кривые зависимости фазовой постоянной β_1 и коэффициента затухания β_2 от частоты имеют общую закономерность. Исследуемая волна не имеет критической частоты. Отсутствует скачок фазовой постоянной и коэффициента затухания при переходе через частоту, соответствующую критической частоте полого волновода. Затухание с увеличением частоты уменьшается. При этом резкий его спад наблюдается вблизи критической частоты волны H_{11} полого круглого волновода. Фазово-частотная характеристика на частотах $f > f_{кр}^{H_{11}}$ прилегает к характеристике волны H_{11} полого круглого волновода, в связи с чем рассматриваемую волну можно классифицировать как квази- H_{11} .

Результаты расчета показывают, что рассматриваемый волновод на основной волне является существенно диссипативной системой лишь до частоты, соответствующей критической частоте волны H_{11} . При этом неравномерность затухания в диапазоне $f \in [0 - f_{кр}^{H_{11}}]$ можно регулировать параметрами пленки и диэлектрической подложки.

Одной из важнейших является характеристика затухания в зависимости от частоты. Резкий спад затухания (рис. 2) вблизи критической частоты волны квази- H_{11} можно объяснить следующим образом. В волноводе с резистивной пленкой на частотах меньше критической затухание определяется двумя факторами: поглощением в пленках и частичной запретельностью волновода (частичной потому, что при наличии пленки имеется распространение

энергии). При подходе к критической частоте затухание за счет запердельности волновода уменьшается, и на частотах выше критической остается только поглощение в пленке.

Для всех экранированных неоднородно заполненных волноводов с резистивными пленками характерна общая закономерность: при всех $R_{\text{п}}$ – уменьшение затухания с ростом частоты. Она объясняется втягиванием с ростом частоты поля в диэлектрик и уменьшением за счет этого его величины на резистивной пленке, а также с уменьшением влияния запердельного режима.

В круглом волноводе для равномерно распределенной резистивной пленки существует область значений $R_{\text{п}} \in [90 - 120]$ Ом/□ оптимальной как с точки зрения получения минимального погонного затухания, что важно для создания аттенуаторов с малым ослаблением, так и с точки зрения обеспечения максимально равномерного ослабления аттенуаторов в рабочем диапазоне частот, начиная от постоянного тока. Влияние диэлектрической проницаемости подложки на коэффициент затухания тонких резистивных пленок экспериментально и теоретически исследовано в [8,9].

Результаты расчета коэффициента затухания волны квази- H_{11} показали, что на низких частотах $f < (2-3)$ ГГц диэлектрик практически не влияет на структуру поля и соответственно на затухание волны. На высоких частотах электромагнитное поле все более втягивается в диэлектрик и сильнее взаимодействует с пленкой. Возрастание затухания при увеличении ϵ диэлектрика подложки начинает сказываться при соотношении $2\pi a/\lambda > 0,85$.

При расчете электродинамических характеристик рассматриваемой структуры предполагалось, что тонкий поглощающий (резистивный) слой равномерно распределен по поверхности подложки. Однако практически это не всегда выполняется. На степень равномерности распределения пленки влияют технологический процесс нанесения слоя и его юстировки (подгонки), качество поверхности подложки и другие факторы.

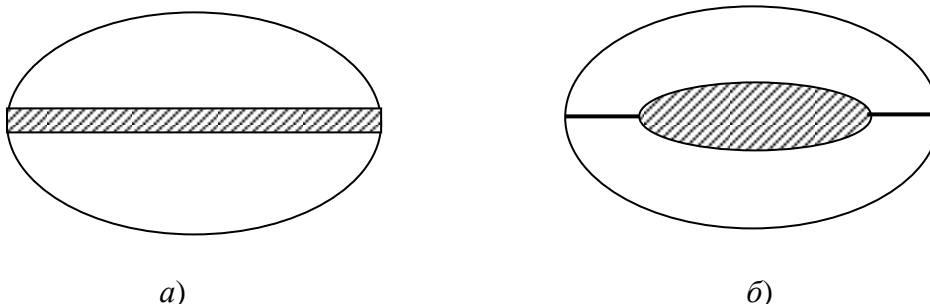
Влияние неравномерности резистивного слоя пластинчатого резистора на зависимость ослабления аттенуатора от частоты исследовано экспериментально в [10].

В работе показано, что неравномерность резистивного слоя серийных малогабаритных резисторов является достаточно малой и в диапазоне частот до 18 ГГц (коаксиальный тракт сечением 7/3,04 мм) оказывает минимальное влияние на частотную зависимость ослабления аттенуаторов. Это влияние становится еще меньше в диапазонах частот до 26 (коаксиальный тракт сечением 3,5/1,52 мм) и до 50 ГГц (коаксиальный тракт сечением 2,4/1,04 мм).

Эллиптический волновод с резистивной пленкой

Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность применения эллиптических волноводов при разработке коаксиальных аттенуаторов СВЧ-диапазона волн [11]. Теоретические исследования полей в волноводах эллиптического сечения с резистивными пленками связано со значительными математическими трудностями расчета функций Маттье в комплексной плоскости.

В [12] было получено решение комплексного дисперсионного уравнения для двухслойного эллиптического волновода на основе приближенного представления функций Маттье в комплексной плоскости.



а)

б)

Рис. 3. Эллиптический волновод с резистивной пленкой на диэлектрической подложке (а) и его математическая модель (б)

Эллиптический волновод с тонкой резистивной пленкой на диэлектрической подложке показан на рис. 3, а. Математическая модель волновода с пленкой показана на рис. 3, б. Экран выбран эллиптическим с размерами осей, как у реального волновода. Диэлектрическая пластина заменена эллиптическим цилиндром в соотношении его осей 10:1. Гальванический контакт пленки, находящейся на поверхности диэлектрика, с экраном обеспечен введением продольных идеально проводящих тонких перегородок вдоль продольной оси экрана, не нарушающих структуру поля четной волны HE_{11}^+ в двухслойном эллиптическом волноводе с пленкой.

Расчеты дисперсионных характеристик и характеристик затухания, проведенные для разных величин удельного поверхностного сопротивления в диапазоне частот 1-7,5 ГГц, показали наличие частот, характерных для критических частот, на которых исчезает взаимодействие поля с резистивной пленкой. Эта критическая частота совпадает с критической частотой волны HE_{11}^+ в двухслойном эллиптическом волноводе без пленки.

Из расчетов следует, что в диапазоне частот до 5 ГГц подбором конфигурации эллиптического волновода возможно уменьшение частотной зависимости ослабления аттенуаторов с 10 до 2% от величины ослабления 20 дБ.

Аналогичные результаты получены ранее экспериментально [11]. В серийные коаксиальные аттенуаторы типа ДО-2 (коаксиальный тракт сечением 16/7 мм), выполненные на пластинчатых резисторах С2-20 с односторонним резистивным покрытием, были поставлены экспериментально подобранные по длине (не выходящей за предел длины резистивного слоя) и по профилю латунные (как и металл корпусов аттенуаторов) эллиптические вкладыши. Они образовывали эллиптические волноводы с резистивными пленками на диэлектрических подложках.

Измерение ослабления и КСВН проводились на аттенуаторах с ослаблением 5, 10, 15 и 20 дБ в диапазоне от постоянного тока до 5 ГГц. С применением вкладышей величина КСВН аттенуаторов уменьшалась с 1,9 до 1,25, а отклонение (разброс) ослабления на верхних частотах в процентах к ослаблению на постоянном токе для каждого из аттенуаторов уменьшался с 15-20 до 2%.

В аттенуаторах, волноводы которых имеют диаметры 3,5 мм и 2,4 мм, конструктивно сложно вводить эллиптические вкладыши. В таких аттенуаторах вместо вкладышей применяются так называемые регулировочные металлические винты.

Прямоугольный волновод с резистивной пленкой

Исследованию свойств прямоугольных волноводов с резистивными пленками посвящено немало работ, в том числе [13–15].

Рассмотрим прямоугольный волновод с изотропной резистивной пленкой, примыкающей к диэлектрику. Поперечное сечение волновода изображено на рис. 4.

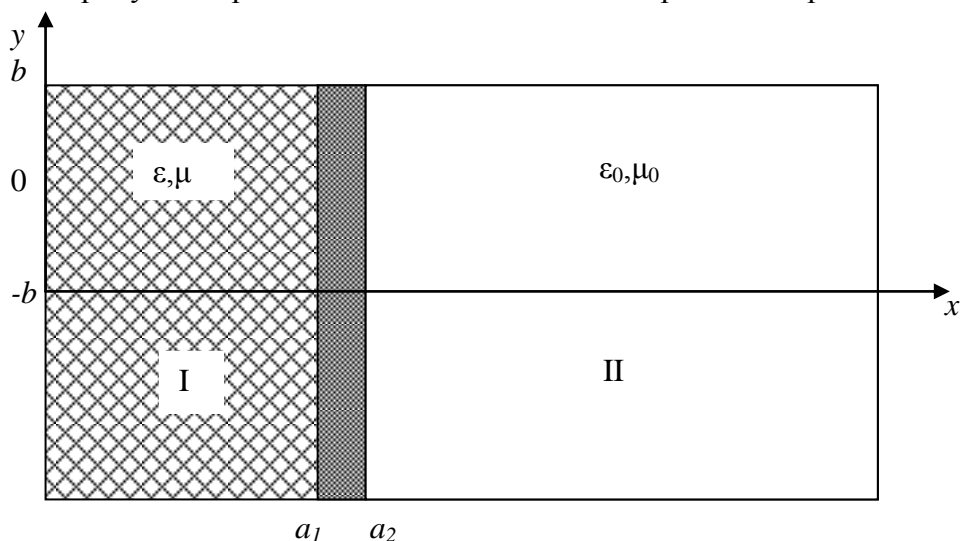


Рис. 4. Прямоугольный волновод с резистивной пленкой на диэлектрике

Полагаем, что стенки волновода идеально проводящие, резистивная пленка – тонкая, ϵ , μ диэлектрика – действительные величины. С учетом этого при постановке задачи можно воспользоваться методом поверхностного тока [6].

Из-за наличия в пленке как продольных, так и поперечных токов поля волн в волноводе в общем случае являются гибридными. При решении дифракционной задачи поле в волноводе с пленкой представим в виде набора гибридных волн. Запишем продольные компоненты обоих векторов Герца в выделенных областях:

$$\Pi_{z1}^e = A_1 \cdot \sin \kappa_{x1} x \cdot \sin \kappa_y (y - b) \cdot e^{-i\beta z},$$

$$\Pi_{z1}^m = B_1 \cdot \cos \kappa_{x1} x \cdot \cos \kappa_y (y - b) \cdot e^{-i\beta z}$$

для области I;

$$\Pi_{z2}^e = A_2 \cdot \sin \kappa_{x2} (x - a_3) \cdot \sin \kappa_y (y - b) \cdot e^{-i\beta z},$$

(11)

$$\Pi_{z2}^m = B_2 \cdot \cos \kappa_{x2} (x - a_3) \cdot \cos \kappa_y (y - b) \cdot e^{-i\beta z}$$

для области II.

В выражениях (10) и (11) введены следующие обозначения:

$$\kappa_y = n\pi/2b, \kappa_{x1} = \sqrt{\epsilon\mu\omega^2 - \kappa_y^2 - \beta^2}, \kappa_{x2} = \sqrt{\epsilon_0\mu_0\omega^2 - \kappa_y^2 - \beta^2}, \beta = \beta_1 + i\beta_2,$$

где $\beta_{1,2}$ – продольные волновые числа.

Суть метода поверхностного тока заключается во введении разрывного граничного условия на резистивной пленке для тангенциальных компонент магнитного поля при сохранении условия непрерывности для тангенциальных компонент электрического поля. Граничные условия в плоскости пленки при $x = a_2$ записываются при этом в виде

$$E_{y1} = E_{y2}, \quad E_{z1} = E_{z2}, \quad H_{y2} - H_{y1} = j_z \text{ пов}, \quad H_{z2} - H_{z1} = -j_y \text{ пов},$$

где $j_z \text{ пов} = \Delta\sigma E_{z2}$, $j_y \text{ пов} = \Delta\sigma E_{y2}$, σ – удельная проводимость пленки, Δ – ее толщина.

Применение метода поверхностного тока позволяет исключить из рассмотрения поля в области $x \in [a_1 - a_2]$, занимаемой резистивной пленкой.

Выражая компоненты поля через вектора Герца и подставляя их в граничные условия (12), получаем систему четырех алгебраических уравнений относительно неизвестных амплитудных коэффициентов A_1, A_2, B_1, B_2 . Понижая ее порядок, приходим к системе двух линейных алгебраических уравнений относительно A_1, A_2 . Записывая условие нетривиальности решений системы, получаем дисперсионное уравнение двухслойного прямоугольного волновода с резистивной пленкой между слоями.

Результаты решения системы уравнений в виде фазовых характеристик и характеристик затухания приведены в [16]. Рассматриваемая гибридная волна в двухслойном волноводе без пленки соответствует волне LE_{11} . В отличие от обычных волноводов с потерями в стенках, дисперсионные характеристики волны в исследуемом волноводе имеют плавный характер. При переходе через частоту, соответствующую критической волновода без пленки, отсутствует скачек дисперсионных характеристик.

Наибольший интерес при создании аттенуаторов представляет зависимость постоянной затухания от частоты. Она имеет два характерных участка. В пределах значений $2\pi a_3/\lambda$ от нуля до 3,5 участок кривой относительно пологий, далее начинается резкое уменьшение затухания, связанное с концентрацией поля в диэлектрике. Затухание изменяется в зависимости от величины удельного поверхностного сопротивления $R_{\text{п}}$ при одинаковой диэлектрической проницаемости ϵ подложки.

Можно подобрать такое $R_{\text{п}}$ пленки, при котором постоянная затухания практически не будет зависеть от частоты в достаточно широкой полосе частот. При различных значениях диэлектрической проницаемости подложки затухание практически неизменно. Диэлектрическая проницаемость существенно влияет на характеристики затухания лишь на высоких частотах ($2\pi a_3/\lambda=7$).

В [17] рассмотрены результаты решения методом поверхностного тока краевой задачи для прямоугольного волновода, разделенного вдоль его оси анизотропно (в направлении оси y) проводящей резистивной пленкой (рис. 5).

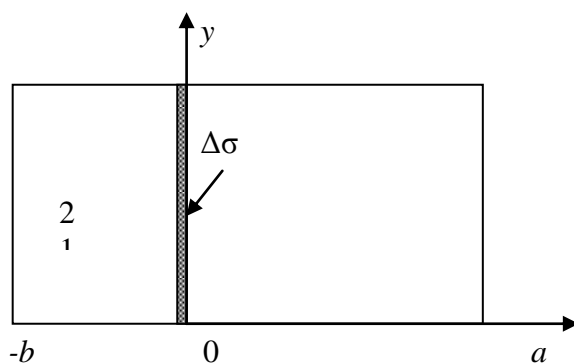


Рис. 5. Прямоугольный волновод с резистивной пленкой

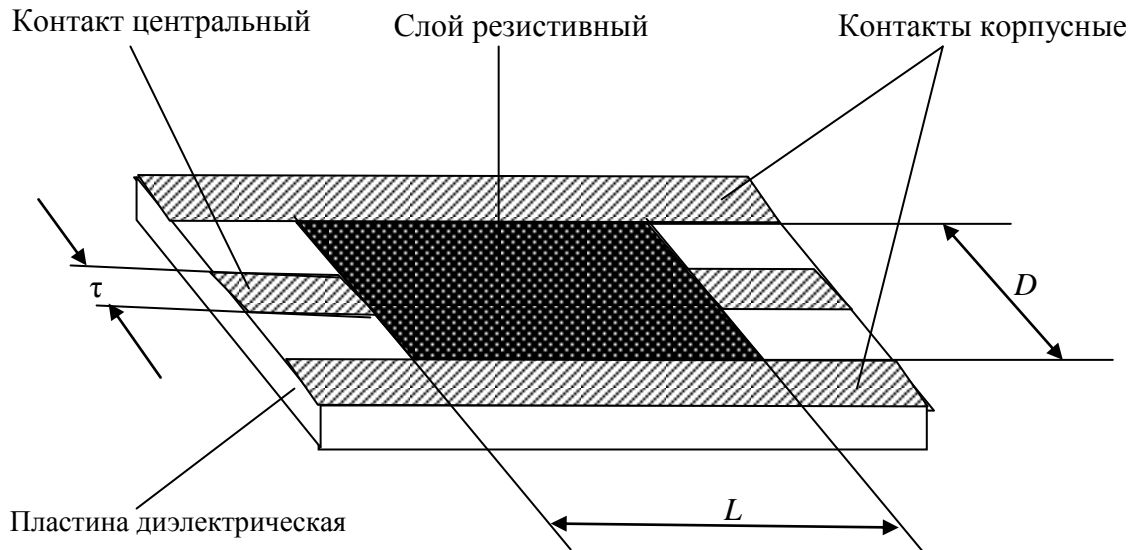
В таком волноводе могут существовать волны типа H_{m0} . При симметричном расположении резистивной пленки с затуханием будут распространяться лишь волны с нечетным индексом m . У волн с четным индексом касательные к поверхности резистивной пленки компоненты электрического поля равны нулю, в результате чего все волновые числа являются либо действительными, либо мнимыми величинами. В общем случае при произвольном (по оси x) расположении резистивной пленки в волноводе также могут существовать волны типа H_{m0} . Однако, за исключением случаев $a/b = n/l$ (n, l – целые положительные числа), все волны будут распространяться с затуханием.

Получены дисперсионные характеристики волны H_{10} для волновода с симметрично расположенной пленкой. При больших поверхностных сопротивлениях резистивной пленки (порядка 300-3000 Ом/□) дисперсионная характеристика близка к дисперсионной характеристике полого прямоугольного волновода. При этом у волны H_{10} в рассматриваемом волноводе с пленкой отсутствуют критические частоты. Резкое увеличение фазовой постоянной β_1 происходит в области частот, прилегающих критической частоте волны H_{10} полого волновода. При этом происходит также резкое уменьшение постоянной затухания β_2 . При уменьшении поверхностного сопротивления зависимость фазовой постоянной от частоты изменяется во всем диапазоне частот, начиная от постоянного тока. При оптимальном выборе поверхностного сопротивления резистивной пленки можно добиться постоянства коэффициента затухания в широкой полосе частот.

Это качество прямоугольного волновода с тонкой резистивной пленкой, как и прямоугольного волновода с такой же пленкой на диэлектрической подложке, делает их перспективными при создании волноводных СВЧ- и КВЧ-аттенюаторов с равномерным ослаблением в диапазоне волновода.

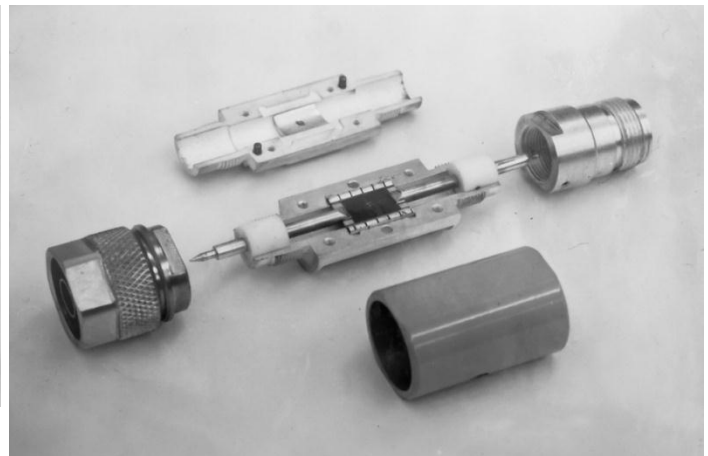
Технические характеристики коаксиальных фиксированных широкополосных аттенюаторов

Результаты теоретических и экспериментальных исследований неоднородных волноводящих структур с тонкими резистивными пленками положены в основу разработок высокоточных широкополосных коаксиальных аттенюаторов. Основным элементом таких аттенюаторов является пластинчатый резистор. На рис. 6 показана наиболее распространенная конструкция пластинчатого резистора в виде прямоугольной диэлектрической пластины с нанесенной на одну или обе ее стороны тонкой резистивной пленкой и контактными площадками.

**Рис. 6. Пластинчатый резистор:**

L - длина резистивного слоя; D - ширина резистивного слоя равна диаметру участка круглого волновода аттенюатора; τ - ширина центральных контактов равна диаметру центрального проводника коаксиальной линии

Для точечных центральных контактов величина ослабления сигнала на единицу длины резистивного слоя $A = 8,68 \pi/D$ дБ/ед.длины. Величина входного (выходного) сопротивления резистора на постоянном токе при подключенной к выходу (входу) нагрузки ($50 \pm 0,1$) Ом составляет ($50 \pm 0,5$) Ом. На рис. 7 и рис. 8 показаны внешний вид и узлы аттенюаторов в коаксиальном тракте сечением 7/3,04 мм.

**Рис. 7. Внешний вид аттенюаторов****Рис. 8. Узлы аттенюаторов**

Современные пластинчатые резисторы изготавливаются на керамической подложке (поликоре толщиной 0,5 мм и 0,25 мм, $\epsilon=9,6$) с использованием тонкопленочной технологии. Резистивный сплав – РС 5406 К-Ni, контактные поверхности – золото.

В Нижегородском НИПИ «Кварц» разработаны пластинчатые резисторы С6-8 с двухсторонним резистивным покрытием. На их базе созданы фиксированные коаксиальные аттенюаторы модели 148 (коаксиальный тракт сечением 7/3,04 мм), работающие в диапазоне от постоянного тока до 18 ГГц, с номинальными значениями ослабления 3, 6, 10, 20, 30 дБ, погрешностью ослабления не более $\pm 1,0$ дБ для аттенюаторов до 20 дБ и $\pm 1,5$ дБ для аттенюа-

торов 30 дБ. Величина КСВН не превышает 1,6, входная мощность – 1 Вт, габариты – $\varnothing 24 \times 74$ мм [18].

С освоением миллиметровых волн были разработаны малогабаритные пластинчатые резисторы габаритами $5,5 \times 7,0 \times 0,5$ мм и $4,4 \times 5,5 \times 0,25$ мм, имеющие двухстороннее резистивное покрытие.

На базе малогабаритных резисторов созданы коаксиальные аттенюаторы модели 1016, работающие в диапазоне от постоянного тока до 26,5 ГГц (коаксиальный тракт сечением $3,5/1,52$ мм) и модели 1007 - в диапазоне от постоянного тока до 50 ГГц (коаксиальный тракт сечением $2,4/1,04$ мм). Номинальные значения ослабления обеих моделей аттенюаторов 3, 6, 10, 20, 30 дБ. Аттенюаторы модели 1016 имеют погрешность по ослаблению $\pm (0,7-1,5)$ дБ в зависимости от величины ослабления и КСВН не более 1,1 - 1,5 в зависимости от частоты. Входная мощность – 1 Вт, габариты – $\varnothing 13 \times 31$ мм. Аттенюаторы модели 1007 имеют погрешность по ослаблению $\pm (0,7-3,5)$ дБ в зависимости от величины ослабления и поддиапазона частот (0 - 26,5 ГГц, 26,5 – 37,5 ГГц, 37,5 – 50 ГГц) и КСВН не более 1,35–2,1 в зависимости от частоты. Входная мощность – 0,5 Вт, габариты – $\varnothing 12,2 \times 28$ мм.

Дальнейшее улучшение характеристик коаксиальных аттенюаторов на пластинчатых резисторах связано в основном с изменением конфигурации резистивной пленки (например, в виде сетки для резисторов с одно или двухсторонним покрытием), повышением идентичности величин удельного поверхностного сопротивления (для резисторов с двухсторонним покрытием), повышением равномерности резистивного слоя (для пластинчатых резисторов со сплошной резистивной пленкой), уменьшением переходного сопротивления между резистивной пленкой и контактными площадками резистора, совершенствованием возбуждающих (воспринимающих) электродов аттенюаторов.

Библиографический список

1. **Слущкая, В.В.** Тонкие пленки в технике СВЧ/ В.В. Слущкая. – М.: Сов. радио, 1967. - 456с.
2. Патент 2024120 РФ. Микрополосковая линия передачи / А.И. Гулин, В.К. Майстренко, А.А. Радионов, С.Б. Раевский, Г.И. Шишков // Б.И. 1994. Бюл. № 22.
3. А.С. 240789 СССР. Фиксированный аттенюатор/Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов // Б.И. 1969. № 13.
4. А.С. 866617 СССР. Фиксированный аттенюатор/Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов, Ю.А. Горячев//Б.И. 1981. Бюл. № 35.
5. **Веселов, Г.И.** К теории двухслойного диэлектрического волновода в цилиндрическом экране/Г.И. Веселов, Л.А. Любимов // Радиотехника и электроника. 1963. Т.8. №9. С. 1530–1536.
6. **Раевский, С.Б.** К теории двухслойных волноводов с резистивной пленкой между слоями / С.Б. Раевский // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1974. Т.17. № 11. С. 1703–1706.
7. **Шишков, Г.И.** О применении круглого волновода с резистивными пленками на диэлектрической подложке в СВЧ аттенюаторах // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1982. Вып.6. С. 46–53.
8. **Бунтилов, В.М.** Анализ затухания круглого волновода с резистивными пленками на диэлектрической подложке / В.М. Бунтилов, А.Е. Иванов, Г.И. Шишков // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1983. Вып.6. С. 65 – 68.
9. **Иванов, А.Е.** Расчет волноводов с резистивными пленками для тонкопленочных СВЧ аттенюаторов/А.Е. Иванов, Г.И. Шишков//Вестник Верхне-Волжского отделения Академии технологических наук РФ. Сер. Высокие технологии в радиоэлектронике. 1997. Вып.1. С. 86 - 90.
10. **Бунтилов, В.М.** Влияние неравномерности поглощающего слоя пластинчатого резистора на ослабление аттенюатора/ В.М. Бунтилов, С.П. Макарычева, Г.И. Шишков// Техника средств связи. Сер. РИТ. 1979. Вып.7. С. 54 – 57.
11. **Бунтилов, В.М.** Улучшение параметров аттенюаторов с пластинчатым резистором/ В.М. Бунтилов, Г.И. Шишков//Обмен опытом в радиопромышленности. 1970. Вып. 3. С. 88 – 90.
12. **Белов, Ю.Г.** Двухслойный экранированный эллиптический волновод с резистивной пленкой/Ю.Г. Белов, О.И. Раевская, С.Б. Раевский, Г.И. Шишков//Техника средств связи. Сер. РИТ. 1982. Вып.2. С. 39 – 45.

13. **Калмык, В.А.** Прямоугольный волновод, перегороденный резистивной пленкой / В.А. Калмык, С.Б. Раевский // Радиотехника и электроника. 1975. Т.20. № 10. С. 2185–2186.
14. **Калмык, В.А.** Дисперсионные свойства прямоугольного волновода, перегороденного резистивной пленкой / В.А. Калмык, С.А. Маркова, С.Б. Раевский // Радиотехника и электроника. 1976. Т.21. № 9. С. 1978–1980.
15. **Калмык, В.А.** Некоторые особенности распространения волн в волноводах с резистивной пленкой / В.А. Калмык, Г.В. Павловская, С.Б. Раевский // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1977. Т.20. № 4. С. 585–589.
16. **Рудоясова, Л.Г.** Двухслойный прямоугольный волновод с резистивной пленкой / Л.Г. Рудоясова, Г.И. Шишков // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1983. Вып. 1. С. 43–46.
17. **Калмык, В.А.** Прямоугольный волновод с анизотропной резистивной пленкой / В.А. Калмык, С.Б. Раевский, Г.И. Шишков // Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. 1989. Т. 32. № 7. С. 78–79.
18. Коаксиальные, волноводные и оптические устройства: каталог. Нижегородский НИПИ «Кварц». – Нижний Новгород, 2010.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

L.G. Rudojasova, G.I. Shishkov, V.V. Sherbakov

FINE REZISTIVNYE FILMS IN DEVICE SVF AND KVF

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose It is described physical bases of the work and are given technical features coaxial fixed broadband attenuator.

Design/methodology/approach The Basic researches round, elliptical and square-wave waveguides with resistive films, were conducted on base of the method of the partial areas with use the method of the surface current.

Findings The fine resistive of the film are used as absorbing element in composition SVCH hybrid-integral schemes, in device for direct measurement of the powers in SVCH range. Such films on dielectrics substrate are used as nodes relationship in waveguides directed coupler for ensuring the uniformities of the connecting weakening and factor to directivities. The fine resistive of the film has found using in design microstrip line of the issue as element of the suppression of the high types of the waves [2].

Research limitations/implications At calculation waveguides features of the considered structure was expected that fine consuming layer evenly portioned on surfaces of the substrate. However practically this far from is always executed. On degree of the uniformities of the sharing the film affects the technological process of the fixing layer and his tailorings, quality to surfaces of the substrate and other factors.

Originality/value The Results theoretical and experimental studies lumpy waveguides structures with fine resistive film prescribed in base of the developments broadband coaxial attenuator. There were are created fixed coaxial attenuators to models 148 working within the range of from direct current before 18 GGC, models 1016, working within the range of from direct current before 26,5 GGC and models 1007 - within the range of from direct current before 50 GGC.

Key words: resistive films, waveguide, dispersion features, lamellar resistors, fixed attenuators, weakening, inaccuracy.