

Проектирование малогабаритных аттенюаторов с малым уровнем ослабления

В.А. Бажиллов, Е.А. Михалицын

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород
ул. Минина, 24

В статье рассматриваются вопросы проектирования микрополосковых аттенюаторов с низким уровнем ослабления 1–4 дБ. Одной из основных особенностей таких устройств является неоднородный характер распределения величины поверхностного сопротивления резистивной структуры. Проведен расчет контактных сопротивлений низкодецибелльных аттенюаторов с учетом влияния лазерной подгонки по низкоомной и высокоомной резистивным пленкам. Представлены зависимости температурных коэффициентов сопротивлений резистивной структуры от величины лазерного реза, а также результаты исследования влияния точной юстировки на частотные характеристики СВЧ-аттенюаторов.

Ключевые слова: низкодецибелльные аттенюаторы, резистивные пленки, лазерная подгонка.

Введение

Резистивные аттенюаторы в микрополосковом тонкопленочном исполнении находят широкое применение в составе приемопередающей СВЧ-аппаратуры и используются для калиброванного ослабления мощности, развязки взаимодействующих функциональных узлов, согласования импедансов в межкаскадных СВЧ-цепях. В литературе подробно рассмотрены вопросы расчета и проектирования тонкопленочных резистивных аттенюаторов среднего и высокого уровня ослабления [1–3], тогда как аттенюаторы с малым ослаблением (0,5...4 дБ) в силу ряда их особенностей освещены не в полной мере.

В стремлении уменьшить габаритные размеры и расширить диапазон рабочих частот устройства переход к распределенной двухпленочной резистивной структуре позволяет достичь улучшенных характеристик низкодецибелльного аттенюатора по сравнению с конструкциями на основе однородных резистивных пленок. Формирование в едином технологическом процессе двух резистивных пленок с резко отличающимися поверхностными сопротивлениями представляет отдельную задачу и требует контроля значительного числа технологических параметров.

Несколько смягчить конструктивно-технологические требования к формированию топологии и самому процессу изготовления аттенюатора позволяет лазерная подгонка ослабления.

Однако анализ влияния лазерной подгонки резистивных пленок на частотные характеристики и тепловые режимы работы устройства в литературе практически отсутствует. Вместе с тем компромиссное соотношение технологических возможностей производства и требований к техническим характеристикам аттенюатора позволит увеличить выход годной готовой продукции и снизить ее стоимость.

В данной работе представлены результаты исследования влияния величины реза неоднородной резистивной структуры на частотные свойства и нагрузочную способность фиксированных аттенюаторов малого уровня ослабления. Проводится расчет погрешности и температурной неустойчивости характеристик аттенюатора. При этом очень важным аспектом расчета является его нацеленность на практическое применение в инженерной и технологической деятельности.

1. Конструктивная модель резистивного аттенюатора

Микрополосковый резистивный аттенюатор с малым уровнем ослабления конструктивно представляет собой диэлектрическую пластину (1) (поликор, лейкосапфир), на верхнюю сторону которой нанесены две резистивные пленки (4) с различными значениями поверхностного сопротивления, а также подводящие (2) и заземляющий (3) контакты (рис. 1). Между входным

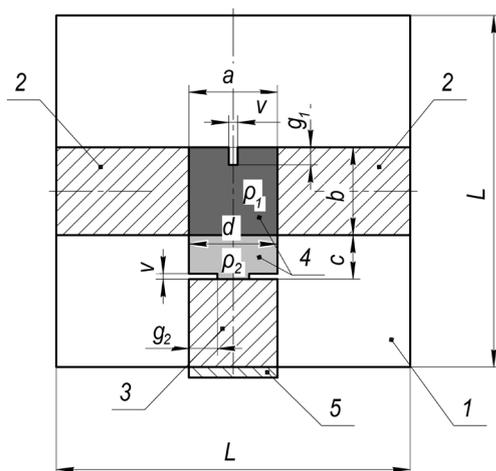


Рис. 1. Эскиз топологии платы аттенюатора: 1 – диэлектрическая подложка; 2 – входной и выходной контакты; 3 – заземляющий контакт; 4 – резистивные пленки, $\rho_2 > \rho_1$; 5 – заземляющая перемычка

и выходным контактами (2) напыляется резистивная пленка с малой величиной поверхностного сопротивления $\rho_1 = 4-25$ Ом/□, длиной a и шириной b . Пленка с высоким значением поверхностного сопротивления $\rho_2 = 80-1000$ Ом/□ примыкает к низкоомной и соединяется с заземляющим контактом. Геометрические размеры пленки $c \times d$. Заземление осуществляется с помощью перемычки.

Технологический процесс изготовления аттенюаторов выполняется в следующей последовательности. На диэлектрическую подложку последовательно напыляется адгезионный слой, высокоомная, а затем низкоомная резистивные пленки. После нанесения проводящего слоя методами фотолитографии формируются контактные площадки, область с низким, а затем с высоким поверхностным сопротивлением – путем селективного химического травления низкоомной резистивной пленки с поверхности высокоомной. Выбор резистивных материалов и соответствующих им химических травителей во многом определяет качество резистивной структуры и ее нагрузочную способность.

Представленная конструктивная модель аттенюатора на основе неоднородной тонкопленочной резистивной структуры позволяет получать номиналы ослабления A от 0,5 до 4 дБ. Погрешность величины ослабления на постоянном токе обозначим ΔA , неравномерность ослабления в полосе рабочих частот – α . Точная юстировка величины ослабления на постоянном токе обеспечивается лазерной подгонкой по низкоомной и высокоомной резистивным пленкам, как показано на рис. 1. Частотная неравномерность

ослабления зависит от геометрических размеров неоднородной резистивной структуры, а также от величины лазерных резов g_1 и g_2 . Симметричность лазерных резов относительно оси симметрии резистивной структуры обеспечивает симметричность частотных характеристик плеч аттенюатора. Диаметр лазерного луча обозначен v .

Эквивалентная схема замещения аттенюатора на постоянном токе представляет собой П-образное соединение трех сосредоточенных сопротивлений: последовательного R_1 и двух сопротивлений на землю R_2 и R_3 [1]. Параметры подобной схемы поддаются строгому инженерному расчету методом симметрично-асимметричного возбуждения [4]. Полагая лазерную подгонку по высокоомной резистивной пленки симметричной относительно оси симметрии устройства, сопротивление $R_3 = R_2$. Тогда величина затухания и нормируемое к стандартному волновому сопротивлению микрополосковой линии $R_{СТ} = 50$ Ом входное сопротивление устройства r находятся по формулам:

$$A = 20 \lg \left[\left(1 + \frac{1}{r_2} \right) \left(1 + \frac{r_1}{2} + \frac{r_1}{2r_2} \right) \right]; \quad (1)$$

$$r = \left(\frac{1}{r_2} + \frac{r_2 + 1}{r_1 r_2 + r_2 + r_1} \right)^{-1},$$

где r_1, r_2 – нормируемые к $R_{СТ}$ сопротивления R_1 и R_2 .

Непосредственно номинальные значения сопротивлений рассчитываются по заданной величине ослабления при $r = 1$ путем решения полученной из соотношений (1) системы уравнений. Целевые значения сопротивлений R_1 и R_2 переобозначим как R_1^0 и R_2^0 соответственно.

Таким образом, поставленная задача создания аттенюатора с уровнем ослабления на постоянном токе $A \pm \Delta A$ сводится к определению геометрических размеров и поверхностных сопротивлений пленок аттенюатора, обеспечивающих требуемые значения сопротивлений R_1 и R_2 , а также допустимых отклонений указанных величин с учетом лазерной подгонки.

2. Теоретический расчет контактных сопротивлений

Расчет сопротивлений R_1 и R_2 проведем аналитически. Для этого рассечем исходную распределенную резистивную структуру вдоль оси симметрии OO' . Рассчитав сопротивление этой структуры с контактами, расположенными так,

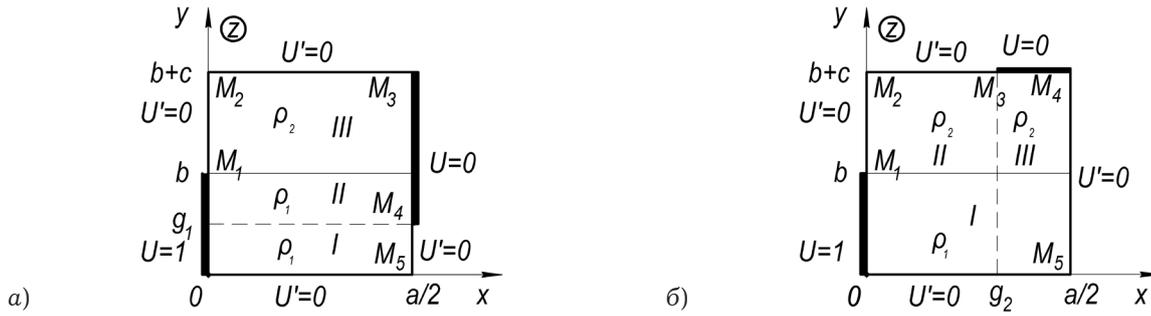


Рис. 2. Распределенные резистивные структуры

как показано на рис. 2, а, определим значение $1/2R_1$. Рассчитав контактное сопротивление структуры, изображенной на рис. 2, б, получим величину сопротивления R_2 . Ширину лазерного реза v при расчете будем полагать равной нулю.

Численный анализ проведем методом разделения переменных в квазистатическом приближении. Для этого запишем для первой структуры рис. 2, а в областях:

$$I (x \in [0, a/2], y \in [0, g_1]),$$

$$II (x \in [0, a/2], y \in [g_1, b]),$$

$$III (x \in [0, a/2], y \in [b, b+c]),$$

и для второй структуры рис. 2, б в областях:

$$I (x \in [0, a/2], y \in [0, b]),$$

$$II (x \in [0, g_2], y \in [b, b+c]),$$

$$III (x \in [g_2, a/2], y \in [b, b+c]),$$

уравнения Лапласа относительно поля потенциалов в резистивной структуре $U_i(x, y)$:

$$\frac{d^2 U_i}{dx^2} + \frac{d^2 U_i}{dy^2} = 0 \quad (i = I, II, III) \quad (2)$$

при краевых условиях для первой структуры:

$$U_I(0, y) = U_{II}(0, y) = U_1,$$

$$U_{II}(a/2, y) = U_{III}(a/2, y) = U_2,$$

$$\left. \frac{\partial U_I}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_I}{\partial x} \right|_{x=a/2} = 0, \quad (3.1)$$

$$\left. \frac{\partial U_{III}}{\partial y} \right|_{y=b+c} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{III}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0,$$

и для второй:

$$U_I(0, y) = U_1,$$

$$U_{II}(a/2, y) = U_{III}(a/2, y) = U_2,$$

$$\left. \frac{\partial U_I}{\partial x} \right|_{x=a/2} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_I}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{II}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad (3.2)$$

$$\left. \frac{\partial U_{II}}{\partial y} \right|_{y=b+c} = 0, \quad \left. \frac{\partial U_{III}}{\partial x} \right|_{x=a/2} = 0,$$

при условиях сопряжения для первой структуры:

$$U_I(x, g_1) = U_{II}(x, g_1),$$

$$U_I(x, b) = U_{II}(x, b),$$

$$\left. \frac{\partial U_I}{\partial y} \right|_{x=g_1} = \left. \frac{\partial U_{II}}{\partial y} \right|_{y=g_1}, \quad (4.1)$$

$$\left. \frac{\partial U_{II}}{\partial y} \right|_{y=b} = \Omega \left. \frac{\partial U_{III}}{\partial y} \right|_{y=b},$$

и для второй резистивной структуры:

$$U_I(x, b) = U_{II}(x, b),$$

$$U_{II}(g_2, y) = U_{III}(g_2, y),$$

$$\left. \frac{\partial U_I}{\partial y} \right|_{y=b} = \Omega \left. \frac{\partial U_{II}}{\partial y} \right|_{y=b},$$

$$\left. \frac{\partial U_{II}}{\partial x} \right|_{x=g_2} = \left. \frac{\partial U_{III}}{\partial x} \right|_{x=g_2}, \quad (4.2)$$

$$\left. \frac{\partial U_I}{\partial y} \right|_{y=b} = \Omega \left. \frac{\partial U_{III}}{\partial y} \right|_{y=b},$$

где $\Omega = \rho_1 / \rho_2$ – параметр, характеризующий степень неоднородности резистивной структуры.

Поставленные краевые задачи (2)–(4) решаем методом разделения переменных. Для поля потенциалов в областях I–III первой структуры (рис. 2, а) получаем:

$$U_I = 1 + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \sin(\alpha_n x) \text{ch}(\alpha_n y),$$

$$U_{II} = \frac{a/2 - x}{a/2} + \sum_{n=0}^{\infty} B_n \sin(\beta_n x) \times \{ \text{ch}[\beta_n(y - g_1)] + \text{ch}[\beta_n(b - y)] \}, \quad (5.1)$$

$$U_{III} = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin[\alpha_n(a/2 - x)] \text{ch}[\alpha_n(b + c - y)],$$

и второй резистивной структуры:

$$U_I = 1 + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \sin(\alpha_n x) \text{ch}(\alpha_n y),$$

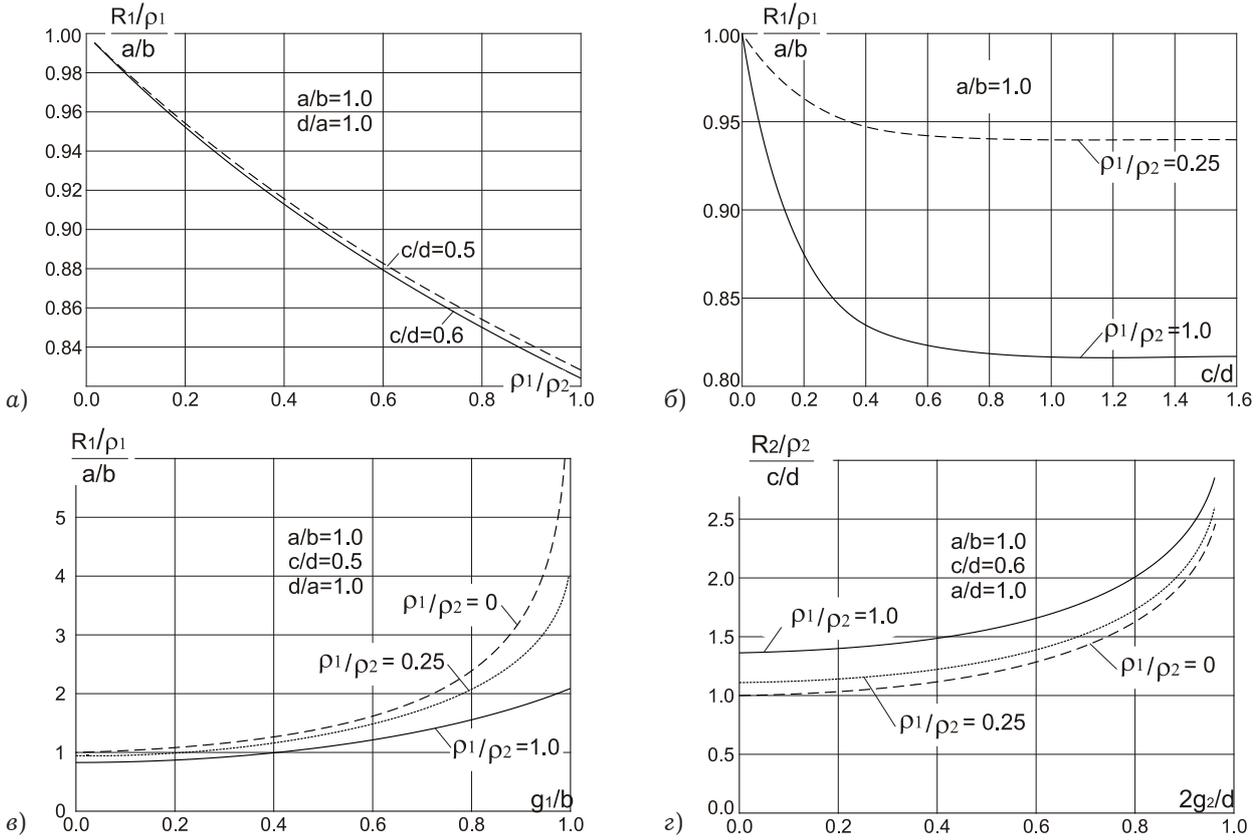


Рис. 3. Результаты расчета сопротивлений

$$U_{II} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos[\beta_n x] \text{ch}[\beta_n (b + c - y)], \quad (5.2)$$

$$U_{III} = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos[\beta_n x] \text{sh}[\beta_n (b + c - y)],$$

где

$$\alpha_n = \frac{\pi(2n + 1)}{a}, \quad \beta_n = \frac{2\pi n}{a}.$$

Подставляя выражения для полей потенциалов (5.1) и (5.2) в условия сопряжения (4.1) и (4.2), получаем систему линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов A_n, B_n, C_n . Выражая B_n, C_n через коэффициенты A_n , приходим к следующей бесконечной системе уравнений относительно коэффициентов $A'_n = A_n(-1)^n \text{sh}(\alpha_n a / 2)$ для первой структуры:

$$\sum_{k,n=0}^{\infty} \frac{A'_n}{(\alpha_n / \beta_k)^2 - 1} \times \left\{ \text{cth}(\alpha_n g_1) + \frac{\alpha_n}{\beta_k} \frac{1 + \text{ch}[\beta_k (b - g_1)]}{\text{sh}[\beta_k (b - g_1)]} \right\} = 1, \quad (6.1)$$

и для второй резистивной структуры:

$$\sum_{k,n=0}^{\infty} A'_n I_{nk} \times \left\{ \text{cth}(\alpha_n g_2) + \frac{1}{\Omega} \frac{\alpha_n}{\beta_k} \text{cth}[\beta_k (b + c - g_2)] \right\} = I_k, \quad (6.2)$$

где

$$I_{nk} = \frac{a}{2\pi} \left\{ \frac{\cos \left[\frac{\pi g_2}{a} (2(n + k) + 1) \right]}{2(n + k) + 1} + \frac{\cos \left[\frac{\pi g_2}{a} (2(n - k) + 1) \right]}{2(n - k) + 1} \right\} - \frac{a}{2\pi} \left\{ \frac{1}{2(n + k) + 1} + \frac{1}{2(n - k) + 1} \right\},$$

$$I_k = \frac{1}{\beta_k} \sin \frac{2\pi k g_2}{a}.$$

Решая полученные системы линейных уравнений (6.1) и (6.2) методом редукции, находим коэффициенты A_n . Сопротивление рассматриваемых структур находится, исходя из величины тока, протекающего через поперечное сечение резистивного слоя вблизи контакта OM_1 , по формулам:

$$R_1 = 2 / \left[\frac{1}{\rho_1} \sum_{n=0}^{\infty} A'_n \right],$$

$$R_2 = \rho_1 / \left[\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ A'_n + 2B_n \text{sh}[\beta_n (b - g_2)] - 2 \frac{b - g_2}{a} \right\} \right]. \quad (7)$$

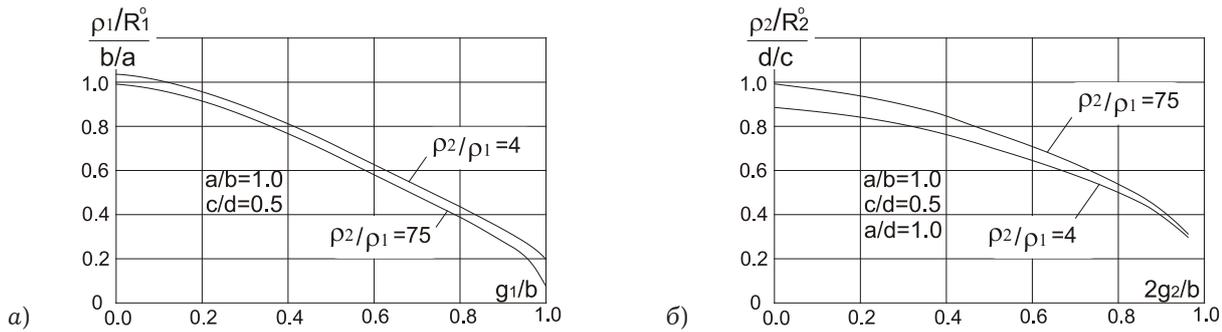


Рис. 4. Зависимость величин поверхностных сопротивлений резистивных пленок ρ_1 (а) и ρ_2 (б), нормированных к целевым значениям сопротивлений R_1^0 (а) и R_2^0 (б), от нормированных величин лазерного реза g_1/b (а) и g_2/d (б)

Сравнение результатов расчета контактного сопротивления при $\Omega = 1$ и $\Omega = 0$ ($\rho_2 \gg \rho_1$) с результатами, полученными для однородных резистивных структур методом конформных отображений [1], показало расхождение не более чем на 0,15 %.

На рис. 3 приведены графики зависимости сопротивления R_1 от параметра неоднородности резистивной структуры (а), от коэффициента формы высокоомного резистора (б), от относительной величины лазерного реза низкоомной пленки (в), а также сопротивления R_2 от относительной величины лазерной подрезки высокоомной резистивной пленки вблизи заземляющего контакта (г).

Анализ представленных на рисунке зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

в отсутствие лазерной подгонки:

- нормированное к ρ_1 сопротивление R_1 тем меньше, чем меньше поверхностное сопротивление высокоомной резистивной пленки ($0,94 < R_1/\rho_1 < 1$ при $4 < \rho_2/\rho_1 < 100$, $0,5 < c/d < 0,6$, $a/b = 1$, $d/a = 1$);

- с увеличением геометрических размеров высокоомной резистивной пленки отношение R_1/ρ_1 уменьшается асимптотически;

- нормированное к ρ_2 сопротивление R_2 тем меньше, чем меньше поверхностное сопротивление низкоомной резистивной пленки ($1 < R_2/\rho_2 < 1,1$ при $4 < \rho_2/\rho_1 < 100$, $0,5 < c/d < 0,6$, $a/b = 1$, $d/a = 1$);

при лазерной подгонке:

- нормированное к ρ_1 сопротивление R_1 с ростом величины лазерного реза g_1 увеличивается тем быстрее, чем больше поверхностное сопротивление и меньше геометрические размеры высокоомной резистивной пленки;

- скорость роста нормированного к ρ_2 сопротивления R_2 с увеличением величины лазерного реза g_2 возрастает.

3. Анализ погрешности и температурной нестабильности характеристик аттенюатора

На рис. 4 показаны графики соответствия величин лазерных резов по низкоомной и высокоомной резистивным пленкам поверхностным сопротивлениям резистивных пленок, при которых обеспечиваются требуемые значения сопротивлений R_1^0 после подгонки. Это позволяет оценить необходимую степень лазерной подгонки по значениям поверхностных сопротивлений пленок, полученных в результате технологического процесса напыления. Таким образом, погрешность величин сопротивлений после точной юстировки зависит не от погрешности элементов топологии или величин поверхностных сопротивлений, а от погрешности величины лазерного реза, и вызвана главным образом локальным нагревом резистивной пленки в области подгонки. Очевидно, что при фиксированной скорости движения и мощности лазерного луча чем меньше поверхностное сопротивление резистивной пленки, тем больше время лазерной подгонки и выше температура локального нагрева, а следовательно, результирующая погрешность сопротивления также увеличивается. Указанные обстоятельства напрямую связаны с теплофизическими свойствами материалов резистивной структуры. При этом в силу малой толщины резистивных пленок основной теплоотвод от точки взаимодействия лазерного луча с резистивным материалом будет осуществляться через диэлектрическую подложку. И в случае подложки из поликора с относительно небольшим коэффициентом теплопроводности эффективный нагрев резистивной структуры может привести к погрешностям целевых значений сопротивлений, сравнимым с аппаратной точностью системы автоматики лазерной подгонки.

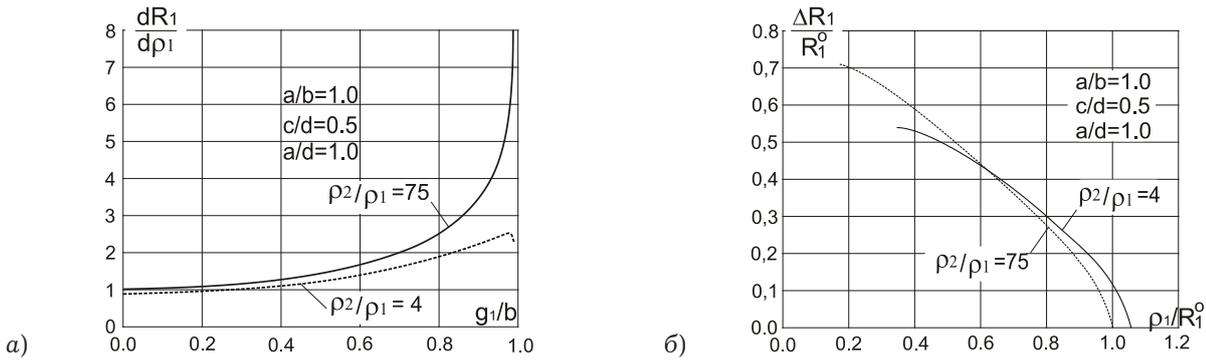


Рис. 5. Графики зависимости величины производной $\partial R_1 / \partial \rho_1$ от относительной величины лазерного реза (а) и относительной погрешности сопротивления $\Delta R_1 / R_1^0$ от нормированного поверхностного сопротивления резистивной пленки ρ_1 / R_1^0 (б)

Проведем оценку возникающий погрешности сопротивления R_1 после лазерной подгонки при максимальном эффективном перегреве ΔT_1 резистивной структуры в 25 °С, соответствующем максимальной ширине реза $g_1 / b = 1$. Зададимся линейной зависимостью ΔT_1 от g_1 с коэффициентом пропорциональности $\alpha_g = 50$ град/мм.

$$\frac{\Delta R_1}{R_1^0} \approx \frac{\partial R_1}{\partial \rho_1} \frac{\rho_1}{R_1^0} \alpha_{\rho 1} \alpha_g g_1, \quad (8)$$

где $\alpha_{\rho 1}$ – ТКС низкоомной резистивной пленки ($\alpha_{\rho 1} = \partial \rho_1 / (\rho_1 \partial T)$),

$$\frac{\partial R_1}{\partial \rho_1} \approx \frac{\Delta R_1}{\Delta \rho_1}$$

рассчитывается численно согласно разработанной математической модели.

Результаты расчета показаны на рис. 5. Спад величины производной $\partial R_1 / \partial \rho_1$ (рис. 5, а) при величине параметра неоднородности резистивной структуры $\Omega = 1/4$ и относительных величинах лазерного реза $g_1 / b > 0,98$ связан с перераспределением плотности тока в область высокоомной резистивной пленки. При больших значениях отношения $\rho_2 / \rho_1 = 75$ шунтирующее действие высокоомной пленки минимально и спада величины производной не наблюдается.

Согласно полученным результатам (рис. 5, б), относительная погрешность сопротивления $\Delta R_1 / R_1^0$ при половинной величине лазерного реза порядка 0,5 %, что сравнимо с аппаратной точностью установки лазерной подгонки и должно учитываться при проектировании аттенуаторов.

Поскольку лазерная подгонка по высокоомной резистивной пленке проводится вблизи заземляющей контактной площадки с высоким коэффициентом теплопроводности, погрешностью сопротивления ΔR_2 за счет локального нагрева резистивной структуры можно пренебречь.

Температурная нестабильность характеристик аттенуатора в большей степени определя-

ется температурными изменениями сопротивлений резистивной структуры ΔR_i^t . Вследствие малости ТКЛР материала подложки, влиянием температурного изменения топологических размеров резистивной структуры на сопротивления R_i можно пренебречь по сравнению с температурным изменением поверхностных сопротивлений пленок. Тогда относительное температурное изменение сопротивлений ΔR_i^t запишется в виде

$$\frac{\Delta R_i^t}{R_i^0} \approx \alpha_{R_i} \Delta T = \sum_{j=1}^2 \left(\frac{\partial R_i}{\partial \rho_j} \frac{\rho_j}{R_i^0} \alpha_{\rho_j} \right) \Delta T, \quad (9)$$

где

$$\alpha_{\rho_j} = \frac{\partial \rho_j}{\rho_j \partial T}$$

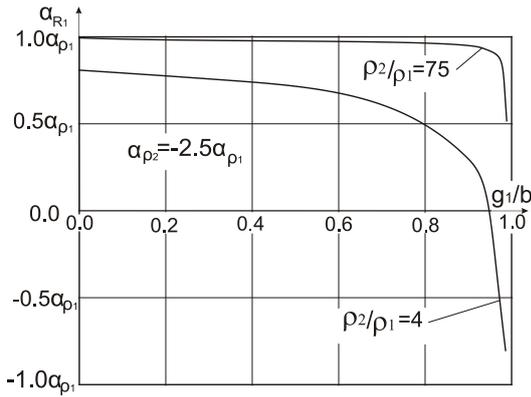
– ТКС резистивных пленок; ΔT – температурный перегрев резистивной структуры;

$$\alpha_{R_i} = \frac{\partial R_i}{R_i^0 \partial T}$$

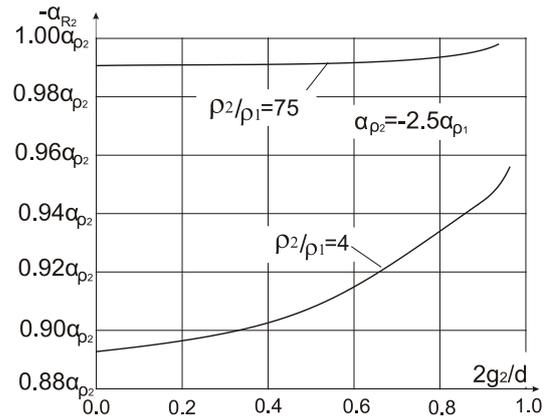
– температурный коэффициент сопротивления R_i .

Для определенности в расчетах зададимся нихромовой низкоомной резистивной пленкой и высокоомной пленкой, изготовленной на основе силицидов хрома и характеризующейся отрицательным ТКС: $\alpha_{\rho_2} = -2.5\alpha_{\rho_1}$. Пренебрегая температурной зависимостью ТКС резистивной структуры и проводя численный расчет производных $\partial R_i / \partial \rho_j$ согласно разработанной математической модели, температурный уход сопротивлений представим в виде зависимости коэффициентов α_{R_i} от относительных величин лазерных резов (рис. 6).

Монотонное убывание абсолютной величины тепловых коэффициентов с ростом степени лазерной подгонки связано с перераспределением плотности электрического тока из низкоомной в область высокоомной резистивной пленки с отрицательным ТКС. Следует также заметить, что уменьшение параметра неоднородности Ω

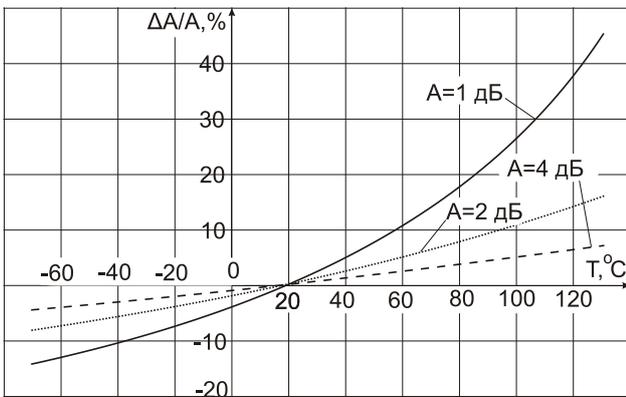


а)

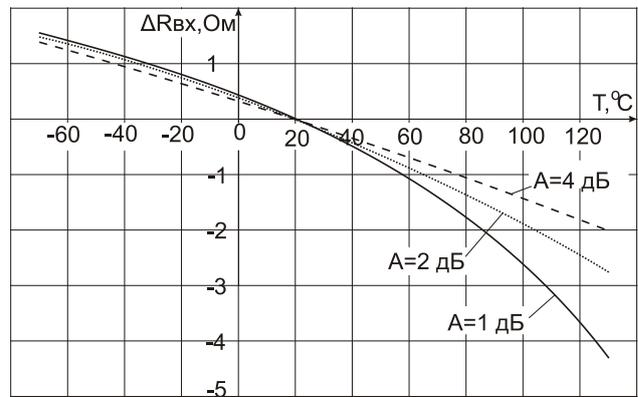


б)

Рис. 6. Графики зависимости температурного коэффициента сопротивления R_1^0 (а) и R_2^0 (б) от относительной величины лазерного реза при различных значениях параметра неоднородности резистивной структуры



а)



б)

Рис. 7. Графики температурной зависимости относительной погрешности величины ослабления (а) и абсолютной температурной погрешности входного сопротивления (б) ($\alpha_{p_1} = 10^{-4}$ град $^{-1}$, $\alpha_{p_2} = -2.5\alpha_{p_1}$)

вплоть до нулевых значений в отсутствие точной юстировки приводит к устремлению коэффициента α_{R_1} к значению α_{p_1} , поскольку при этом снижается шунтирующее действие высокоомной резистивной пленки. Согласно полученным результатам, при некотором значении лазерного реза низкоомной пленки можно добиться α_{R_1} близкого к нулю, что справедливо лишь в отношении аттенуаторов с невысокой неоднородностью резистивной структуры и значительной степенью юстировки. На практике указанная особенность практически нереализуема в силу влияния температурной зависимости ТКС. Зависимость коэффициента α_{R_2} от величины подгонки тем менее выражена, чем выше неоднородность резистивной структуры (меньше параметр неоднородности Ω).

В силу нелинейного характера зависимости характеристик аттенуатора от указанных сопротивлений температурную погрешность ослабления и входного сопротивления найдем в квадратичном приближении:

$$\Delta A = \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \left[\frac{\partial^{(n)} A}{n! \partial r_i^{(n)}} (\Delta r_i)^n \right] + \frac{\partial^2 A}{\partial r_1 \partial r_2} \Delta r_1 \Delta r_2; \tag{10}$$

$$\Delta r = \sum_{i=1}^2 \sum_{n=1}^2 \left[\frac{\partial^{(n)} r}{n! \partial r_i^{(n)}} (\Delta r_i)^n \right] + \frac{\partial^2 r}{\partial r_1 \partial r_2} \Delta r_1 \Delta r_2.$$

Такой выбор аппроксимации продиктован главным образом интересом к расчету температурной нестабильности характеристик аттенуатора при максимальном перегреве, когда температурный уход сопротивлений R_1^0 и R_2^0 становится существенным. Результаты расчета в диапазоне рабочих температур $-70 \dots +130$ °C приведены на рис. 7. При этом с ростом температуры погрешность ослабления увеличивается, что связано с отрицательным значением ТКС высокоомной пленки. При этом абсолютная и относительная погрешности ослабления увеличиваются, а входное сопротивление уменьшается быстрее у аттенуаторов с меньшими ослаблениями.

Нельзя не отметить, что случай температурных коэффициентов поверхностных сопротив-

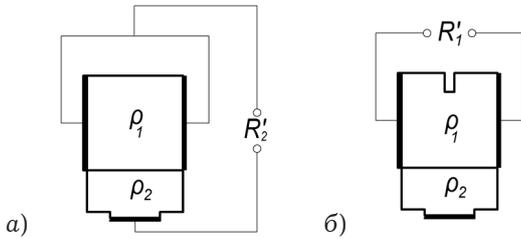


Рис. 8. Схемы технологического контроля

лений резистивных пленок с разными знаками является наихудшим в отношении характеристик температурной стабильности ослабления и входного сопротивления низкодецибелльных аттенуаторов.

Поскольку провести непосредственное измерение значений сопротивлений R_1 и R_2 вследствие особенностей топологии аттенуатора практически невозможно, для оценки реализуемой величины ослабления и ее точной юстировки предлагается измерять в процессе лазерной подгонки сопротивления R'_1 и R'_2 , которые связаны с R_1 и R_2 соотношениями:

$$R'_1 = \frac{R_1 R_2}{R_1 / 2 + R_2}; \quad R'_2 = \frac{R_2}{2}. \quad (11)$$

Схемы измерения указанных сопротивлений представлены на рис. 4. Поскольку введение прорези по низкоомной резистивной пленке изменяет только R_1 , а подрезка высокоомной резистивной пленки изменяет оба сопротивления [5], то сначала следует проводить лазерную подгонку по высокоомной резистивной пленке (рис. 7, а), затем – по низкоомной (рис. 7, б). В табл. 1 приведены результаты расчета сопротивлений R_1 и R_2 , а также R'_1 и R'_2 , обеспечивающих заданную величину ослабления.

4. Частотные характеристики аттенуатора

Другим важным аспектом проектирования широкополосных малогабаритных аттенуаторов с точной лазерной юстировкой является анализ влияния величины реза на частотные характеристики ослабления и КСВ. Эквивалентная схема СВЧ-платы аттенуатора с подводящими линиями представлена на рис. 9. Паразитная емкость на землю C_3 определяется габаритными размерами резистивной структуры и величиной лазерного реза по высокоомной пленке f_2 . Величина последовательной паразитной индуктивности резистивной структуры L_2 зависит от длины a резистивной пленки и величины лазерного реза f_1 . Эквивалентом центральных контактов

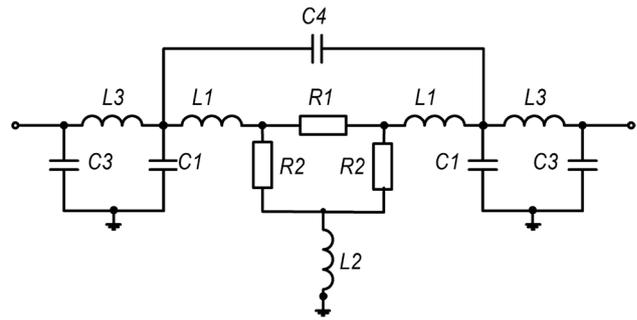


Рис. 9. Эквивалентная схема аттенуатора

выступает ФНЧ, образованный индуктивностью L_1 и емкостями C_1 и C_2 . Емкость C_4 представляет собой краевую емкость между торцами центральных контактов. Паразитная индуктивность L_3 определяется заземляющей перемычкой.

В ходе численного моделирования сеточными методами, реализованными в САПР СВЧ-устройств Ansoft HFSSv15 [6], было установлено, что на частотные характеристики низкодецибелльных аттенуаторов наибольшее влияние оказывает паразитная емкость на землю C_3 (см. рис. 9). При повышении емкости отмечается увеличение затухания в области высоких частот. Подрезка контакта высокоомной пленки приводит к возникновению дополнительной эквивалентной емкости параллельного шлейфа, представляющего собой отрезок линии из резистивного материала. С ростом частоты эквивалентная емкость увеличивается, что приводит к существенному сужению полосы рабочих частот аттенуатора.

Лазерная подгонка низкоомной резистивной пленки приводит к увеличению индуктивности L_2 , что также снижает верхнюю рабочую частоту устройства.

На рис. 10 представлены графики частотной зависимости величины ослабления для однодецибелльных аттенуаторов с различными вариантами юстировки резистивных пленок. Из графиков видно, что подрезка высокоомной резистивной пленки практически в два раза снижает верхнюю рабочую частоту, в отличие от лазерной подгонки низкоомной резистивной пленки при одинаковых значениях относительных величин лазерного реза.

Неравномерность ослабления α и КСВн в частотной полосе 10 ГГц для разработанных низкодецибелльных аттенуаторов приведена в табл. 2. Минимальная неравномерность ослабления α_{\min} достигается при отсутствии лазерной подгонки, т. е. при максимальных значениях поверхност-

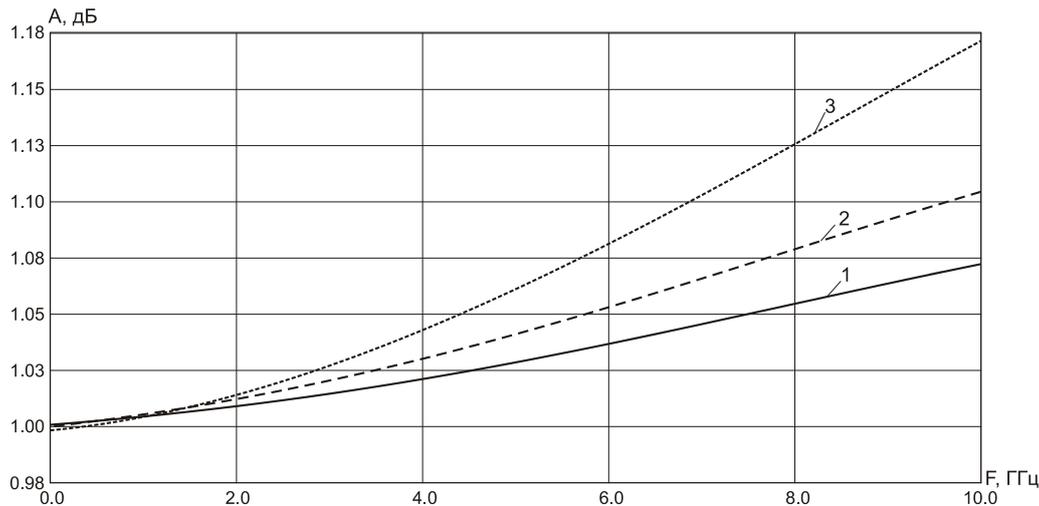


Рис. 10. Частотная зависимость ослабления аттенюатора с параметрами $a = b = d = 0,5$ мм, $c = 0,3$ мм: 1 — без лазерной подгонки ($\rho_1 = 5,8$ Ом/□, $\rho_2 = 720$ Ом/□); 2 — с лазерной подгонкой по низкоомной пленке ($\rho_1 = 3,8$ Ом/□, $\rho_2 = 720$ Ом/□, $f_2 = b/2$); 3 — с подгонкой по высокоомной резистивной пленке ($\rho_1 = 5,8$ Ом/□, $\rho_2 = 400$ Ом/□, $f_1 = 0,35d$)

ных проводимостей резистивных пленок. КСВн и α_{\max} соответствуют случаю максимальной величины лазерного реза. При этом погрешность величины ослабления на нулевой частоте составляла 0,01 дБ от номинального значения.

Заключение

Таким образом, в результате исследований была выявлена зависимость размеров лазерных резов от величин поверхностных сопротивлений пленок при заданном ослаблении. При этом в силу локального нагрева лазерным лучом точность сопротивлений после подгонки по низкоомной резистивной пленке может быть на 0,5 % хуже аппаратной точности. Анализ температурной нестабильности характеристик аттенюатора с положительным и отрицательным температурными коэффициентами поверхностных сопротивлений низкоомной и высокоомной резистивных пленок соответственно показал существенную зависимость результирующего ТКС от величины лазерного реза. При значительной

подрезке низкоомной резистивной пленке с положительным температурным коэффициентом ТКС сопротивления R_1 и тем более ТКС сопротивления R'_1 принимает отрицательные значения. Разнознаковый характер ТКС пленок также негативно сказывается на температурной стабильности характеристик аттенюатора, увеличивая результирующую погрешность ослабления и входного сопротивления в диапазоне рабочих температур устройства.

Высокочастотное моделирование аттенюатора показало, что при одинаковых размерах лазерных резов по низкоомной и высокоомной резистивным пленкам большей величиной частотной неравномерности ослабления и худшим КСВн характеризуются аттенюаторы с большим номиналом ослабления. Кроме того, подрезка высокоомной резистивной пленки вблизи заземляющего контакта существенно влияет на частотные характеристики аттенюатора, тогда как лазерная подгонка низкоомной резистивной пленки оказывает меньшее влияние.

Таблица 1

A, дБ	R_1^0 , Ом	R_2^0 , Ом	R'_1 , Ом	R'_2 , Ом
1	5,77	869,6	5,75	434,8
2	11,61	436,2	11,46	218,1
3	17,61	292,4	17,10	146,2
4	23,85	110,5	22,63	110,5

Таблица 2

Характеристики низкодецибелльных аттенюаторов

A, дБ	ρ_1 , Ом/□	ρ_2 , Ом/□	α_{\min}	α_{\max}	КСВн
1	3,5–5,5	370–720	0,08	0,2	1,3
2	9–11	190–370	0,10	0,3	1,4
4	19–22,5	90–190	0,15	0,4	1,5

Список литературы

1. Садков В.Д., Горячев Ю.А. Расчет тонкопленочной аттенуаторной пластины // Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника. 1977. Вып. 2. С. 13–19.
2. Моругин С.Л., Садков В.Д., Уткин В.Н. Анализ теплового режима и частотных характеристик тонкопленочных аттенуаторов ВЧ- и СВЧ-диапазонов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Радиофизика. 2007. № 6. С. 34–39.
3. Анализ и моделирование сверхширокополосных фиксированных аттенуаторов СВЧ-диапазона / Г.Г. Гошин [и др.] // Доклады ТУСУРа. 2011. № 2 (24). С. 223–226.
4. Чижов А.И. Метод определения элементов матрицы рассеяния СВЧ-четырёхполосников // Антенны. 2007. Вып. 2 (117). С. 55–59.
5. Садков В.Д. Расчет и юстировка тонкопленочных звеньев затухания // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 1977. Вып. 9. С. 115–117.
6. Банков Е.А., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS. М.: Солон, 2004. 208 с.

The design of small sized low level attenuators

V.A. Bazhilov, E.A. Mihalitsyn

The problem of a low level attenuators complex design is concerned here. The analysis consists of direct current calculation, temperature resistive coefficients estimation and high frequency modeling results which take into consideration the laser trimmer effect. There is some information to concern the resistance errors due to the laser heating effect. The DC design procedure is based on using of the partial region method for the trimmed inhomogeneous thin resistive film structure. Distributed structure equivalent resistances which could be measured and controlled are obtained. Moreover, the present study provides an assuming of frequency bandwidth for laser adjusted attenuators with different values of a surface resistance. The proposed numerical model in the paper does not account for the laser beam size, which is much smaller than the dimensions of the resistive film. The profound work deals with the simmetrical resistive structure which is rarely performed in a practice. The present study provides the base information for characteristics and limitations of adjusted low level attenuators for specialists and engineers.

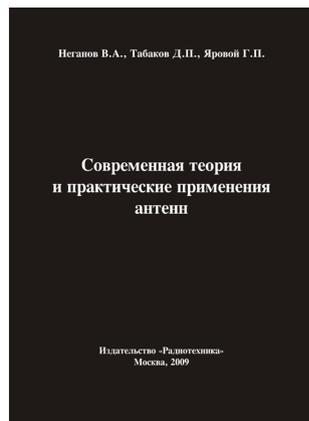
Keywords: low level attenuators, thin resistive films, laser adjustment.

Неганов, В.А.

Современная теория и практические применения антенн: монография / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой; предисловие академика Ю.В. Гуляева; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.

ISBN 978-5-88070-222-0

УДК 621.396.67
ББК 32.845



Рассмотрены основные разделы теории и техники антенн. Освещены вопросы расчета и построения различных типов антенн (от вибраторных до рупорных и антенных решеток, включая фазированные). Основное внимание уделено антеннам СВЧ и расчетам их электромагнитных полей в ближней зоне, т. е. вопросам электромагнитной совместимости.

Принципиальное отличие книги от известных заключается в последовательном применении метода физической регуляризации (самосогласованного метода) к расчету электромагнитного поля антенн, позволяющего осуществлять непрерывный переход с излучающей поверхности антенны к пространству вне ее. С помощью самосогласованного метода получены новые результаты по теории антенн: установлены связь между поверхностной плотностью тока на вибраторной антенне и напряженностью электромагнитного поля, однонаправленный режим излучения для кольцевой (рамочной антенны), режимы стоячих и бегущих волн в цилиндрической спиральной антенне, входное сопротивление практически для всех типов антенн. Теоретический материал подкреплен примерами применения многолучевых антенн.

Предназначено для разработчиков антенно-фидерных устройств, аспирантов и докторантов, занимающихся вопросами проектирования антенных систем различного назначения, студентов радиотехнических специальностей высших учебных заведений.