

УДК 621.372.8

А.Е. Львов, Л.Г. Рудоясова, Г.И. Шишков, В.В. Щербаков

**ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ПОЛОСКОВЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц»  
им. А.П. Горшкова

Описан принцип действия аттенюаторов на полосковых линиях, показана зависимость коэффициента отражения от параметров аттенюаторов, даны технические характеристики аттенюаторов.

*Ключевые слова:* полосковые линии, тонкие резистивные пленки, пластинчатый резистор, ослабление, коэффициент отражения.

**Введение**

Использование тонких (меньше толщины скин-слоя) резистивных пленок в качестве элементов, поглощающих электромагнитную энергию в волноведущих трактах, известно уже достаточно давно [1].

Применение тонких резистивных пленок на плоских диэлектрических основаниях (пластинчатых резисторах), начиная с 1960 года в СССР и позднее за рубежом, в круглых и эллиптических волноводах, явилось прорывом в создании наиболее распространенных устройств СВЧ и КВЧ – широкополосных коаксиальных аттенюаторов, обладающих равномерной амплитудно-частотной характеристикой и высокой степенью согласования с внешними коаксиальными трактами. Такие аттенюаторы работают в диапазоне от постоянного тока до частот, близких к критическим для используемой коаксиальной линии [2].

Волны, распространяющиеся в направляющих структурах (круглых, эллиптических, прямоугольных волноводах) с резистивными пленками, обладают специфическими особенностями: в большинстве случаев у них отсутствуют критические частоты или проявляются они (критические частоты) особым образом, не разделяя области распространяющихся и запредельных волн. При увеличении частоты ( $\omega \rightarrow \infty$ ) у всех типов волн постоянная затухания стремится к нулю, что объясняется увеличением экранирующего действия резистивных пленок, при котором происходит оттеснение от них электрического поля.

Поведение дисперсионных характеристик собственных волн определяется величиной поверхностного сопротивления пленки, параметрами диэлектрического заполнения волновода, характером напыления резистивной пленки [3]. Исследованию поведения дисперсионных характеристик собственных волн в волноводах с тонкими резистивными пленками посвящено достаточно много работ, среди которых [4–11].

В 60-х годах прошлого столетия в Горьковском НИПИ (далее Нижегородском НИПИ «Кварц») была предложена конструкция фиксированного аттенюатора на полосковой линии [12]. Аттенюатор выполнен на основе несимметричной полосковой линии, в разрыв центрального проводника которой включен пластинчатый резистор, имеющий гальванический контакт с центральным проводником и основанием линии. Чаще всего в качестве основания и экрана линии применяются прямоугольные волноводы (рис. 1, а).

Разновидностью полоскового аттенюатора [12] является аттенюатор, предложенный в [13], где пластинчатый резистор размещен вертикально в щели основания линии.

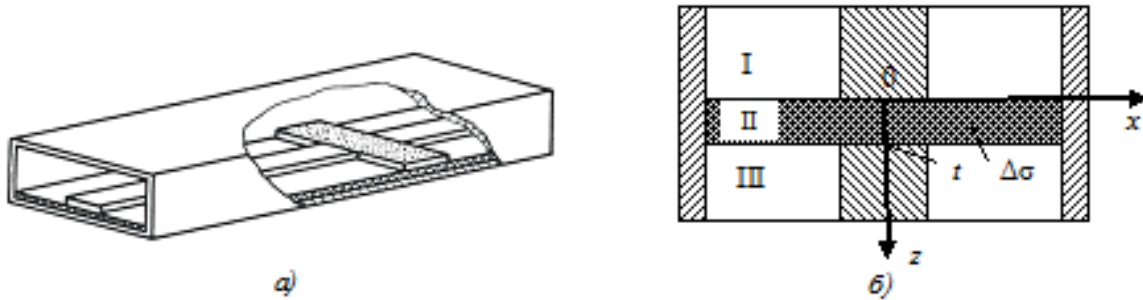


Рис. 1. Схематичное изображение аттенюатора на полосковой линии

Важнейшими техническими характеристиками аттенюаторов являются: величина и равномерность вносимого ими ослабления в диапазоне частот, а также степень согласования с волноведущими трактами.

**1. Дисперсионные характеристики волн двухслойного прямоугольного волновода с резистивной пленкой между слоями**

Базовыми электродинамическими структурами для аттенюаторов на полосковых линиях являются экранированная полосковая линия и двухслойный прямоугольный волновод с резистивной пленкой между слоями (рис. 2, а, б).

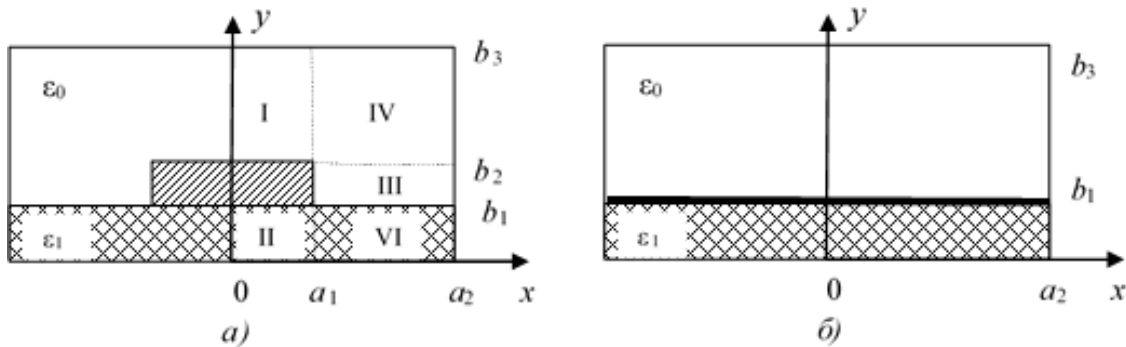


Рис. 2. Поперечные сечения экранированной полосковой линии (а) и двухслойного прямоугольного волновода с резистивной пленкой (б)

Рассмотрим прямоугольный волновод с тонкой резистивной пленкой (рис. 2, б), имеющей поверхностную плотность  $\Delta\sigma$ , где  $\Delta$  и  $\sigma$  – толщина и проводимость резистивной пленки.

Из-за наличия в пленке как продольных, так и поперечных токов поле в волноводе в общем случае является гибридным.

При решении дифракционной задачи поле в волноводе с пленкой представим в виде набора гибридных волн. Запишем продольные компоненты обоих векторов Герца в выделенных областях:

в области I:

$$\begin{aligned} \Pi_{z1}^e &= A_1 \cdot \sin k_x(x - a_2) \cdot \sin k_{y1}y \cdot e^{-i\beta z}, \\ \Pi_{z1}^m &= B_1 \cdot \cos k_x(x - a_2) \cdot \cos k_{y1}y \cdot e^{-i\beta z}; \end{aligned} \tag{1}$$

в области II:

$$\begin{aligned} \Pi_{z2}^e &= A_2 \cdot \sin k_x(x - a_2) \cdot \sin k_{y2}(y - b_3) \cdot e^{-i\beta z}, \\ \Pi_{z2}^m &= B_2 \cdot \cos k_x(x - a_2) \cdot \cos k_{y2}(y - b_3) \cdot e^{-i\beta z}, \end{aligned} \tag{2}$$

где  $k_x = n\pi/2a_2$ ,  $k_{y1} = \sqrt{\varepsilon_1\mu_1\omega^2 - k_x^2 - \beta^2}$ ,  $k_{y2} = \sqrt{\varepsilon_0\mu_0\omega^2 - k_x^2 - \beta^2}$ ,  $\beta = \beta_1 + i\beta_2$  – продольное волновое число.

В соответствии с методом поверхностного тока [14] граничные условия в плоскости пленки при  $y=b_1$  записываются в виде:

$$E_{x1}=E_{x2}, \quad E_{z1}=E_{z2}, \quad H_{x2}-H_{x1}=j_{\text{пов}}, \quad H_{z2}-H_{z1}=-j_{\text{пов}}, \quad (3)$$

где  $j_{\text{пов}}=\Delta\sigma E_{z2}$ ,  $j_{\text{пов}}=\Delta\sigma E_{x2}$ ,  $\sigma$  – удельная проводимость пленки,  $\Delta$  – ее толщина.

Выражая компоненты поля через вектора Герца (1, 2) и подставляя их в граничные условия (3), 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 нетривильности решений системы, получаем дисперсионное уравнение двухслойного прямоугольного волновода с резистивной пленкой между слоями.

Результаты решения дисперсионного уравнения для параметров  $b_1/b_3=0,3$ ,  $a_2/b_3=0,8$  представлены на рис. 3 в виде фазовых характеристик  $\tilde{\beta}_1 = \beta_1/k_0$ , где  $k_0=2\pi b_3/\lambda$ , и характеристик затухания  $\beta_2 b_3$  [8].

Рассматриваемая гибридная волна в двухслойном волноводе без пленки соответствует волне  $LE_{11}$ , поэтому и гибридную волну в волноводе с пленкой можно классифицировать как  $LE_{11}$ . В отличие от обычных волноводов с потерями в стенках, дисперсионные характеристики волны в волноводе с резистивной пленкой имеют плавный характер. При переходе через частоту, соответствующую критической для волновода без резистивной пленки, отсутствует скачок дисперсионных характеристик.

На рис. 3 показаны зависимости фазовых характеристики и характеристик затухания от величины проводимости пленки при диэлектрической проницаемости подложки  $\varepsilon=2$ .

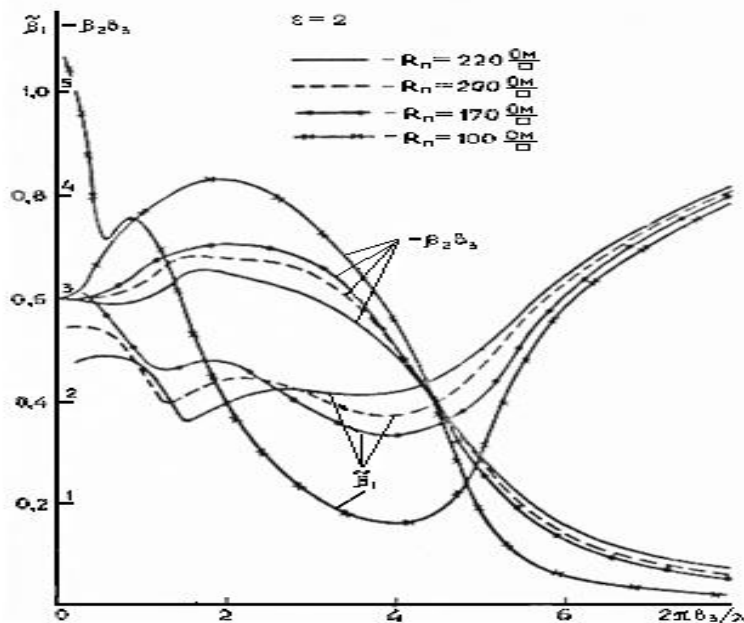


Рис. 3. Зависимость фазовых характеристик и характеристик затухания от величины удельного поверхностного сопротивления пленки

Наибольший интерес при создании аттенуаторов представляет зависимость постоянной затухания от частоты. У волны  $LE_{11}$  она имеет два характерных участка. В пределах значений  $2\pi b_3/\lambda$  от нуля до 3,5 участок кривой относительно пологий, далее начинается резкое

уменьшение затухания, связанное с концентрацией поля в диэлектрике. При  $2\pi b_3/\lambda \approx 4$  кривые с разными удельными поверхностными сопротивлениями пленки  $R_{\Pi}$  ( $R_{\Pi}=1/\Delta\sigma$ ) пересекаются. До этой точки большее затухание наблюдается у волн в волноводе с пленкой, имеющей  $R_{\Pi}=100$  Ом/□. На более высоких частотах затухание больше в волноводе с пленкой меньшей проводимости. Это можно объяснить тем, что на высоких частотах у рассматриваемой волны продольные токи начинают преобладать над поперечными, и в эквивалентной электрической схеме направляющей системы резистивную пленку можно рассматривать как последовательно включенное сопротивление.

Из приведенных графиков видно, что можно подобрать такое  $R_{\Pi}$  пленки, при котором постоянная затухания практически будет мало зависеть от частоты в достаточно широкой полосе частот.

Расчеты, проведенные при различных значениях диэлектрической проницаемости подложки (при удельном поверхностном сопротивлении пленки ( $R_{\Pi}=200$  Ом/□), показали, что величина диэлектрической проницаемости подложки влияет на характеристики затухания лишь на высоких частотах ( $2\pi b_3/\lambda \approx 7$ ).

## 2. Коэффициент отражения полоскового аттенюатора

В качестве возбуждающего устройства (электрода) полоскового аттенюатора используется центральный проводник полосковой линии. Высокую степень согласования (наличие минимального коэффициента отражения) на входе аттенюатора можно расценивать как максимальное возбуждение поля в поглощающей структуре аттенюатора.

Для расчета коэффициента отражения полоскового аттенюатора необходима постановка дифракционной задачи о согласовании полосковой линии с двухслойным волноводом (положение  $z=0$ , рис. 1). Для этого необходимо знание спектров собственных волн полосковой линии и волновода с тонкой резистивной пленкой на диэлектрическом основании. Эта задача была решена в НГТУ им. Р.Е. Алексева.

Результаты расчета приведены на рис. 4, где показана зависимость коэффициента отражения стыка экранированной полосковой линии с поглощающей структурой аттенюатора при различных параметрах резистивной пленки и возбуждающего устройства. Из рис. 4, *a* видно, что частотные зависимости коэффициента отражения в значительной степени определяются шириной возбуждающего электрода (центрального проводника стыкуемой полосковой линии). Выбором ее можно получить достаточно хорошее согласование в широкой полосе частот.

Так, при удельном поверхностном сопротивлении пленки  $R_{\Pi}=200$  Ом/□, параметрах  $b_1/b_3=0,2$ ,  $b_2/b_3=0,21$ ,  $\varepsilon \approx 10$  (для поликора  $\varepsilon=9,6$ ) наилучшее согласование получается при соотношении  $a_1/b_3=0,6$ . При  $R_{\Pi}=100$  Ом/□ (остальные параметры остаются прежними) высокая степень согласования выполняется при  $a_1/b_3=0,6$  (рис. 4, *b*).

На величину коэффициента отражения рассматриваемого стыка влияет толщина возбуждающего электрода. Как показали расчеты (рис. 3, *a*), согласование улучшается при уменьшении толщины электрода.

В значительной мере частотная зависимость коэффициента отражения определяется величиной удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки. Так, переход от  $R_{\Pi}=200$  Ом/□ к  $R_{\Pi}=100$  Ом/□ приводит к значительному общему уменьшению величины коэффициента отражения и к улучшению равномерности согласования в полосе частот.

Проведенные в НИПИ «Кварц» экспериментальные исследования показали, что для обеспечения наилучшего согласования стыка экранированной полосковой линии с двухслойным прямоугольным волноводом с резистивной пленкой между слоями величина удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки должна быть в пределах  $(90 \div 110)$  Ом/□.

Экспериментальные исследования показали, что согласование рассматриваемой структуры улучшается с уменьшением толщины центрального проводника стыкуемой полосковой линии. Наилучшее согласование достигается при соотношении  $(b_2 - b_1)/b_3 \approx 0,03$ , ширине возбуждающего электрода (полоска линии)  $2a_1/b_3 \approx 1,0$  и величине  $R_n = 100 \text{ Ом}/\square$ , что согласуется с теоретическими данными.

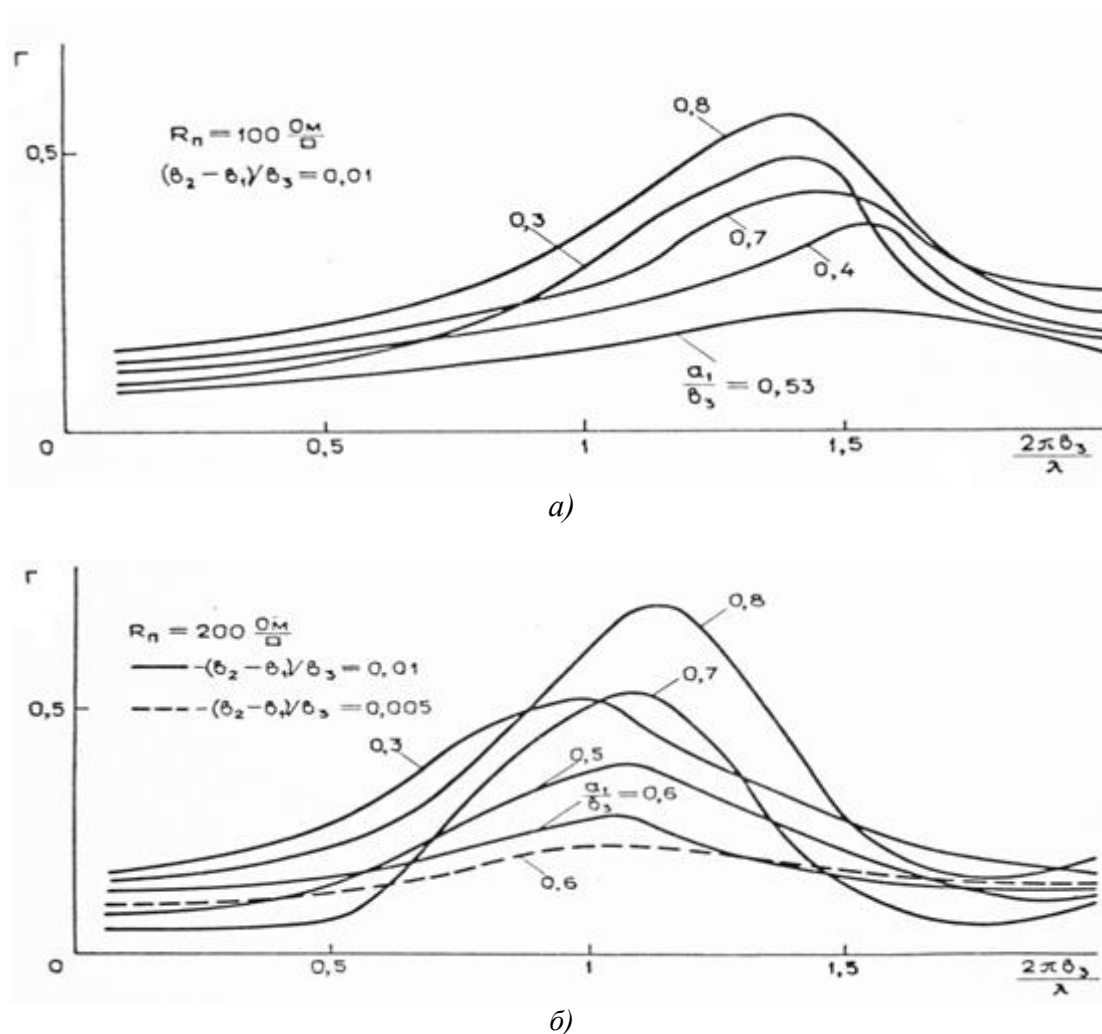


Рис. 4. Результаты решения дифракционной задачи при различных параметрах резистивной пленки и возбуждающего устройства

### 3. Технические характеристики аттенюаторов на полосковых линиях передач

Полосковые аттенюаторы используются в виде самостоятельных устройств совместно с коаксиально-полосковыми переходами в коаксиальных линиях передачи, применяются как ячейки-ослабители в коаксиальных ступенчатых аттенюаторах [15]. Ступенчатые аттенюаторы модели 1068 [16] имеют ослабление 0-110 дБ ступенями 10 дБ с начальными потерями 2,8 дБ в диапазоне от постоянного тока до 18 ГГц, величину КСВН не более 1,8, входную мощность 0,2 Вт, габаритные размеры 138×55×26 мм, коаксиальные разъемы сечением 3,5/1,52 мм.

Аттенюаторы модели 1048 имеют ослабление 0-35 дБ ступенями 5 дБ с начальными потерями 3 дБ в диапазоне от нуля 37,5 ГГц, величину КСВН не более 1,8 в диапазоне до 26,5 ГГц и не более 2,2 в диапазоне до 37,5 ГГц, входную мощность 0,2 Вт, габаритные размеры 110×56×26 мм, коаксиальные разъемы сечением 2,4/1,04 мм.

Аттенюаторы имеют электромеханическое устройство переключения ослабления.

Практически одновременно шли разработки фиксированных аттенюаторов на микрополосковых линиях передачи СВЧ- и КВЧ- диапазонов [17].

Один из первых микрополосковых фиксированных аттенюаторов, разработанных в НИИПИ «Кварц», имел ослабления 3,6,10, и 20 дБ с погрешностью по ослаблению  $\pm 0,5$  дБ и величину КСВН не более 1,4 в диапазоне от постоянного тока до 12 ГГц. В диапазоне до 26 ГГц величина КСВН не более 1,8, погрешность по ослаблению увеличивается и для аттенюаторов с ослаблением 20 дБ достигает 2-4 дБ. Аттенюаторы имели встроенные коаксиально-полосковые переходы на коаксиальные разъемы сечением 3,5/1,52 мм.

Широкое применение микрополосковые аттенюаторы нашли в составе СВЧ- и КВЧ- гибридных интегральных схем для развязки и согласования различных полосковых устройств (смесителей частоты, усилителей, генераторных головок, разветвителей мощности и т.д.).

### Библиографический список

1. **Слущкая, В.В.** Тонкие пленки в технике СВЧ / В.В. Слущкая. – М.: Сов. радио, 1967. – 456 с.
2. **Шишков, Г.И.** Широкополосные коаксиальные аттенюаторы / Г.И. Шишков // Антенны. 2004. Вып. 1(80). С. 18–21.
3. **Раевский, С.Б.** Особенности волн в направляющих структурах с резистивными пленками / С.Б. Раевский, А.Ю. Седаков, Г.И. Шишков // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы XI международной научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2012. С. 199.
4. **Калмык, В.А.** Прямоугольный волновод, перегороденный резистивной пленкой / В.А. Калмык, С.Б. Раевский // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. № 10. С. 2185–2186.
5. **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.
6. **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.
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. **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.
9. **Калмык, В.А.** Фазовые распределения полей в волноводах с резистивной пленкой / В.А. Калмык, Т.В. Кожевникова, С.Б. Раевский // Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. 1988. Т. 31. № 7. С. 25–30.
10. **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.
11. **Иванов, А.Е.** Расчет волнопроводов с резистивными пленками для тонкопленочных СВЧ аттенюаторов / А.Е. Иванов, Г.И. Шишков // Вестник Верхневолжского отделения Академии технологических наук РФ. Сер. Высокие технологии в радиоэлектронике. 1997. Вып. 1. С. 86–90.
12. А.С. 240789 СССР. Фиксированный аттенюатор / Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов // Б.И. 1969. № 13.
13. А.С. 866617 СССР. Фиксированный аттенюатор / Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов, Ю.А. Горячев // Б.И. 1981. № 35.
14. **Раевский, С.Б.** К теории двухслойных волнопроводов с резистивной пленкой между слоями / С.Б. Раевский // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1974. Т. 17. № 11. С. 1703–1706.

15. **Шишков, Г.И.** Широкополосные ступенчатые аттенюаторы // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. 2011. № 2 (87). С. 11–19.
16. Коаксиальные, волноводные и оптические устройства / Каталог. Нижегородский НИПИ «Кварц». – Нижний Новгород, 2014.
17. **Шишков, Г.И.** Исследование аттенюаторов на полосковых линиях, используемых в автоматизированных измерительных приборах / Г.И. Шишков, О.И. Раевская, Ю.А. Горячев // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1981. Вып. 4. С. 72–74.

*Дата поступления  
в редакцию 20.11.2014*

**A.E. Lvov, L.G. Rudoyasova G.I. Shishkov, V.V. Sherbakov**

### **THIN-FILM STRIP ATTENUATORS**

Nizhegorodskiy state technical university n.a. R.E. Alexeev,  
Nizhegorodskiy research instrumentrack institute "Quartz" im. A.P. Gorshkova

**Purpose:** It is described principle of the action attenuator on strip line, is shown dependency of the factor of the reflection from parameter attenuator, are given technical features attenuator.

**Design/methodology/approach:** The Basic researches round, strip and microstrip line with resistive films, were conducted on base of the method of the partial areas with use the method of the surface current.

**Findings:** The Attenuators on strip and microstrip line has found broad using in composition SVH and KVH hybrid integral schemes for uncoupling and coordinations different strip device (the amplifiers, source of the heads, mixers, divisors to powers and etc), as well as in the manner of separate fixed and discrete attenuator in broadband system for measurement frequency and pulsed features radiotechnology device.

**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:** Stupenchatye attenuators to models 1068 have a weakening 0-110 db step 10 db with initial loss 2,8 db within the range of from direct current before 18 GGH, value KSVN not more than 1,8, coaxial connectors by section 3,5/1,52 mm. Attenuators to models 1048 have a weakening 0-35 db step 5 db with initial loss 3 db within the range of from zero 37,5 GGH, value KSVN not bolee 1,8 within the range of before 26,5 GGH and not more than 2,2 within the range of before 37,5 GGH, coaxial connectors by section 2,4/1,04 mm.

Within the range of from direct current before 12 GGH attenuators have small (the order 0,5дБ) frequency dependency weakenings under KSVN not more than 1,4; within the range of before 26 GGH frequency dependency it increases under KSVN not more than 1,8. For attenuator with weakening 20 db this dependency forms before 2-4 db aside weakenings.

*Key words:* strip lines, fine resistive of the film, lamellar resistor, weakening, factor of the reflection.