

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.378.82

Г.И. Шишков

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ФИКСИРОВАННЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описаны принципы действия и конструкции широкополосных высокоточных фиксированных аттенюаторов.

Ключевые слова: фиксированные аттенюаторы, радиотехнические приборы, пластинчатые резисторы.

Введение

В различных областях радиотехники, средствах связи, радиоизмерительной аппаратуре широкое применение нашли различного вида аттенюаторы, предназначенные для изменения уровня электромагнитной энергии в волноведущих трактах.

Активно используются коаксиальные фиксированные аттенюаторы, которые применяются как самостоятельные устройства для калиброванного ослабления сигнала в коаксиальных линиях передачи, так и для согласования и развязки функциональных узлов и блоков в различной радиотехнической аппаратуре.

При создании аттенюаторов на фиксированные значения ослабления используются диссипативные структуры, представляющие собой отрезки волноводов с расположенными в них тонкопленочными резистивными элементами.

1. Фиксированные аттенюаторы на сосредоточенных резисторах

Наиболее простыми по конструкции являются аттенюаторы [1], выполненные в виде отрезка коаксиальной линии с потерями (рис. 1).

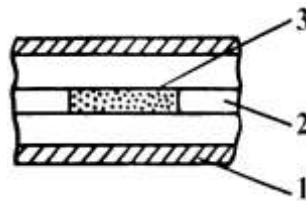


Рис. 1. Аттенюатор в виде коаксиальной линии с потерями:

1 – внешний проводник; 2 – центральный проводник; 3 – диэлектрический стержень с тонкой резистивной пленкой на поверхности

В разрыве центрального проводника коаксиала включен диэлектрический стержень, на поверхность которого нанесен тонкий резистивный слой (пленка). Величина вносимого таким аттенюатором ослабления в коротковолновой части диапазона определяется длиной и величиной сопротивления резистивного слоя:

$$A=4,34 R_1 \frac{l}{Z_0} \text{ дБ},$$

где Z_0 – волновое сопротивление коаксиальной линии; R_1 – погонное сопротивление; l – длина резистивного слоя.

Особенность таких аттенуаторов – зависимость ослабления от частоты, которая при заданном значении погонного сопротивления поглощающего участка определяется соотношением длин резистивного слоя и рабочей длины волны l/λ . На коротких волнах, где $l/\lambda = 3 - 5$, эта зависимость незначительна и возрастает с увеличением длины волны, когда соотношение $l/\lambda \rightarrow 1$. Поэтому на низких частотах (ниже 1 ГГц) применение таких аттенуаторов затруднительно из-за их больших размеров. Несмотря на кажущуюся простоту конструкции, такие аттенуаторы имеют ограниченное использование, особенно при работе с импульсными сигналами, спектр частот которых простирается до постоянного тока.

В диапазоне от постоянного тока до дециметровых длин волн широкое применение нашли коаксиальные аттенуаторы, представляющие собой Т- или П-образные делители напряжения (мощности) на сосредоточенных пленочных резисторах.

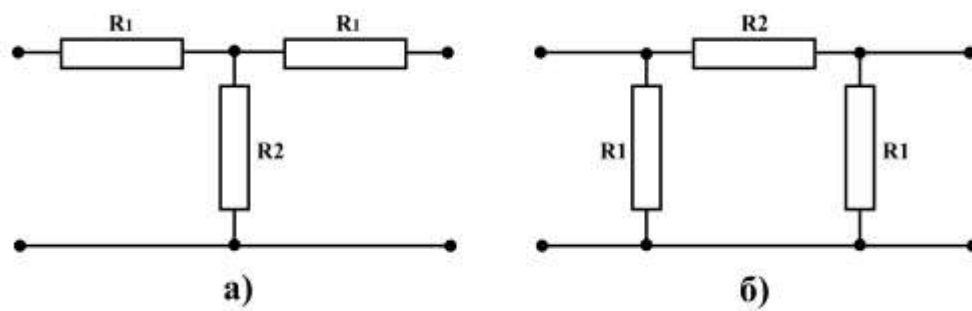


Рис. 2. Электрические схемы аттенуаторов, выполненных по Т- или П-образной схеме на сосредоточенных резисторах

Электрические схемы этих делителей показаны на рис. 2, а, б. Параметры аттенуаторов поддаются строгому инженерному расчету, что особенно важно при проектировании прецизионных аттенуаторов. В низкочастотном диапазоне волн (порядка единиц МГц) такие аттенуаторы могут служить в качестве образцовых мер ослабления.

Общим достоинством аттенуаторов на сосредоточенных резисторах является высокая точность величины вносимого ослабления, достаточно широкий диапазон частот (от постоянного тока до 3–4 ГГц), а на низких частотах (до 1 ГГц) – высокая степень согласования ($K_{СВН} = 1,05 - 1,15$) [2].

Однако на верхнем участке диапазона, где начинают влиять паразитные электрические емкости резисторов, у них имеется существенная зависимость ослабления от частоты и, кроме того, не удается обеспечить удовлетворительное согласование с трактом.

2. Фиксированные аттенуаторы на пластинчатых резисторах

Расширение диапазона частот, создание широкополосных коаксиальных аттенуаторов, минимизация частотной зависимости ослабления, улучшение согласования с трактом потребовали поиска новых электродинамических структур.

В 1960 году при выполнении опытно-конструкторской работы автором данной статьи впервые в мировой практике конструирования коаксиальных аттенуаторов было предложено в качестве их основы использовать новую электродинамическую структуру – отрезок круглого волновода, в диаметральной плоскости перегороденного тонкой резистивной пленкой (рис. 3).

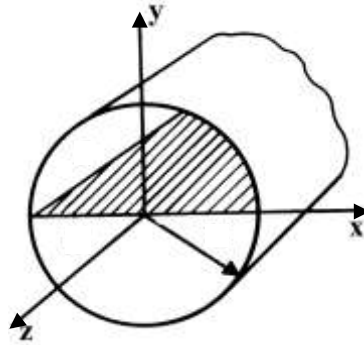


Рис. 3. Круглый волновод с тонкой резистивной пленкой

Реально эта структура представляет собой отрезок коаксиальной линии, в разрыв центрального проводника которой включен пластинчатый резистор (рис. 4), имеющий электрический контакт с корпусом (наружным проводником) линии.

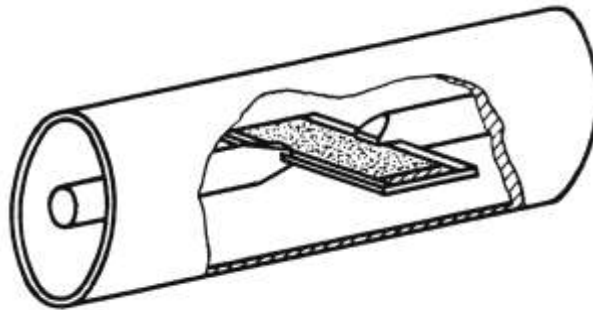


Рис. 4. Атенюатор коаксиальный

Пластинчатый резистор (рис. 5) представляет собой диэлектрическую пластину прямоугольной формы, на одну или обе стороны которой нанесен тонкий слой (меньше толщины скин-слоя) резистивного материала; там же имеются токопроводящие и корпусные контакты. Для точечных центральных контактов величина затухания на единицу длины резистивного слоя $A = 8,68 \frac{\pi}{D}$ дБ/ед. длины, где D – ширина слоя, равная диаметру волновода.

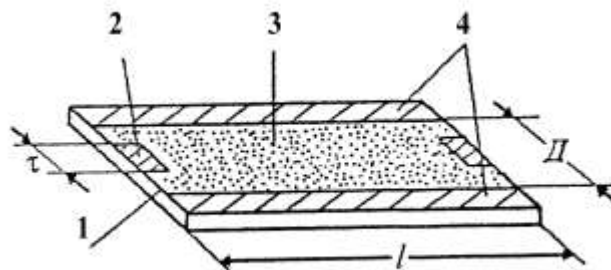


Рис. 5. Пластинчатый резистор С2-20 с односторонним резистивным покрытием:
 1 – диэлектрическая пластина; 2 – центральный контакт; 3 – резистивный слой; 4 – корпусные контакты; τ – ширина центрального контакта; D – ширина резистивного слоя

Эквивалентная схема аттенюатора на пластинчатом резисторе на постоянном токе представляет собой многоступенчатый делитель напряжения (рис. 6).

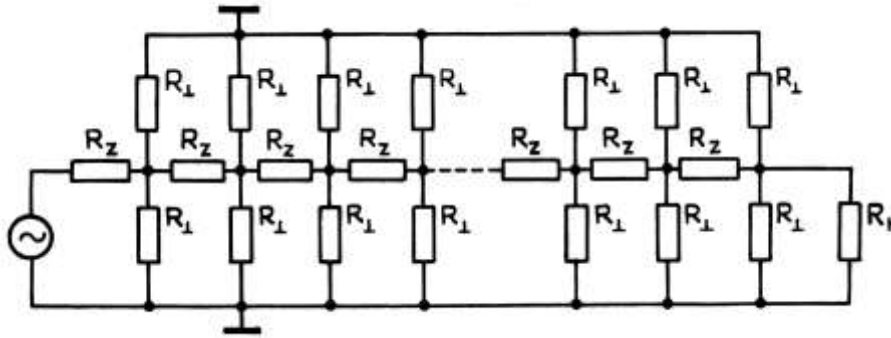


Рис. 6. Эквивалентная электрическая схема аттенюатора на пластинчатом резисторе

Сочетание высоких технических характеристик с относительной простотой конструкции и технологичностью изготовления в массовом производстве сделали такие аттенюаторы весьма перспективными, и они быстро получили широкое распространение в России и за рубежом.

Пластинчатые резисторы, выполненные с величиной удельного поверхностного сопротивления $R_{\Pi} \in [90-120]$ Ом/□, обеспечивали аттенюаторам наименьшую частотную зависимость ослабления. Эта область значений $R_{\Pi} \in [90-120]$ Ом/□ оказалась оптимальной как с точки зрения получения минимального погонного затухания, так и с точки зрения обеспечения максимально равномерного ослабления аттенюаторов в рабочем диапазоне частот, начиная от постоянного тока.

На базе разработанных и серийно освоенных пластинчатых резисторов С2-20 были сконструированы аттенюаторы типа ДО в коаксиальных трактах сечениями 16/4,6 мм (волновое сопротивление 75 Ом), 16/7 мм (волновое сопротивление 50 Ом) в диапазоне от постоянного тока до 3 ГГц и 10/4,34 мм (волновое сопротивление 50 Ом) в диапазоне от постоянного тока до 5 ГГц и налажен их промышленный выпуск.

Аттенюаторы имели номинальные величины ослабления 5, 10, 15, 20 дБ с погрешностью не более ± 2 дБ в диапазоне от постоянного тока до 5 ГГц при допустимой входной мощности 0,5 Вт. Величина КСВН не превышала 1,25.

Дальнейшие исследования позволили создать пластинчатый резистор С6-1 с односторонним резистивным покрытием (рис. 7).

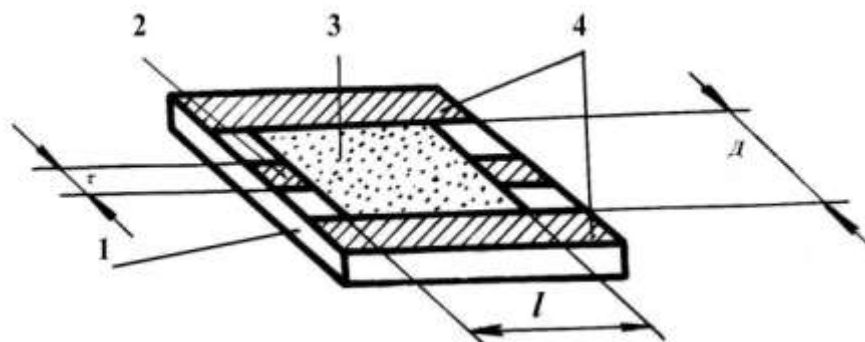


Рис. 7. Пластинчатый резистор С6-1 с односторонним резистивным покрытием:
1 – диэлектрическая пластина; 2 – центральный контакт; 3 – резистивный слой;
4 – корпусные контакты

Конструктивно резистор С6-1 отличается от резистора С2-20 тем, что его центральные контакты примыкают к резистивному слою прямоугольной формы. Такая конфигурация резистивного элемента улучшает частотные свойства аттенюаторов в верхней части диапазона частот и позволяет производить с высокой точностью инженерные расчеты параметров рези-

стором на постоянном токе (длины и ширины резистивного слоя, ширины центральных контактов в зависимости от заданного ослабления).

Характеристики широкополосного аттенюатора (согласование, величина и частотная зависимость ослабления) в основном определяются параметрами резистора (удельным поверхностным сопротивлением, геометрическими размерами).

Однако дополнительно требуются соответствующие изменения и в конструкции волновода в месте расположения пластинчатого резистора. В работе [3] рассматривалась возможность построения аттенюаторов на основе пластинчатых тонкопленочных резисторов, расположенных в эллиптическом экране. Экспериментально было показано, что использование такого экрана и соответствующий выбор параметров его поперечного сечения позволяют расширить (за счет подстройки согласования с коаксиальным трактом в полосе частот) рабочий диапазон частот и уменьшить частотную зависимость ослабления в верхней части диапазона.

На основе резисторов С6-1 были разработаны коаксиальные аттенюаторы Д2-33÷Д2-42 с широкой гаммой величин ослаблений (3, 5, 6, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 дБ) и улучшенными характеристиками в диапазоне от постоянного тока до 5 ГГц (коаксиальный тракт 16/7 мм) [2] (рис. 8). Аттенюаторы серийно выпускались промышленностью.



Рис. 8. Внешний вид одной из конструкций аттенюаторов Д2-33 – Д2-42

Расширение диапазона рабочих частот коаксиальных аттенюаторов до 12–18 ГГц и выше потребовало проведения на электродинамическом уровне исследований неоднородных волноводных структур с резистивными пленками. Это связано с тем, что волновые процессы в них весьма сложны: на характер распространения и взаимодействия волн различных типов существенно влияют параметры как самой пленки, так и системы в целом.

В [4] проведен расчет затухания квази- H_{11} волны в круглом идеально проводящем волноводе с тонкой резистивной пленкой, расположенной в диаметральной плоскости волновода. Получено аналитическое выражение, определяющее зависимость коэффициента затухания от диаметра волновода и сопротивления пленки. Результаты расчетов показали, что при переходе к однородно заполненному волноводу структура поля рассматриваемой волны переходит в структуру поля волны H_{11} .

Структура поля в волноводе с резистивной пленкой в значительной мере определяется величиной удельного поверхностного сопротивления R_{Π} пленки. Затухание, в свою очередь, зависит от структуры поля. При $R_{\Pi} \approx 100 \text{ Ом}/\square$ структура поля оказывается такой, что общая величина тока в пленке имеет минимальное значение, т.е. и коэффициент затухания минимален.

В работе [5] рассмотрен круглый волновод с идеально проводящими стенками, в диаметральной плоскости которого находится диэлектрическая пластина с нанесенными на её поверхности тонкими резистивными пленками. Поперечное сечение волновода изображено на рис. 9. Его радиус – a , толщина диэлектрической пластины – $2b$, удельная поверхностная проводимость пленки – $\Delta\sigma \text{ (Ом}^{-1}\text{)}$, толщина пленки – Δ . Пластина с пленками размещена симметрично относительно диаметральной плоскости волновода.

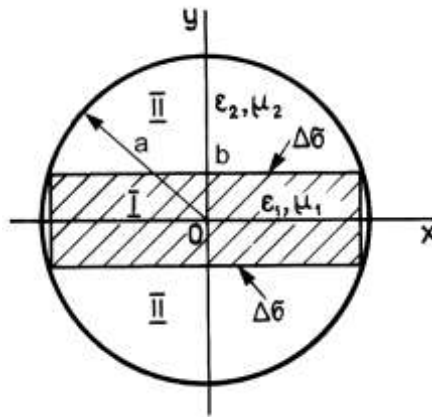


Рис. 9. Круглый волновод с резистивными пленками на диэлектрической подложке

В данной работе исследованы зависимости от частоты фазовой постоянной β_1 и коэффициента затухания β_2 волны квази- H_{11} . Для этого получено дисперсионное уравнение волн в рассматриваемом волноводе, составленное методом частичных областей с применением метода поверхностного тока [6]. Результаты решения уравнения в первом приближении (для β_2) приведены на рис. 10.

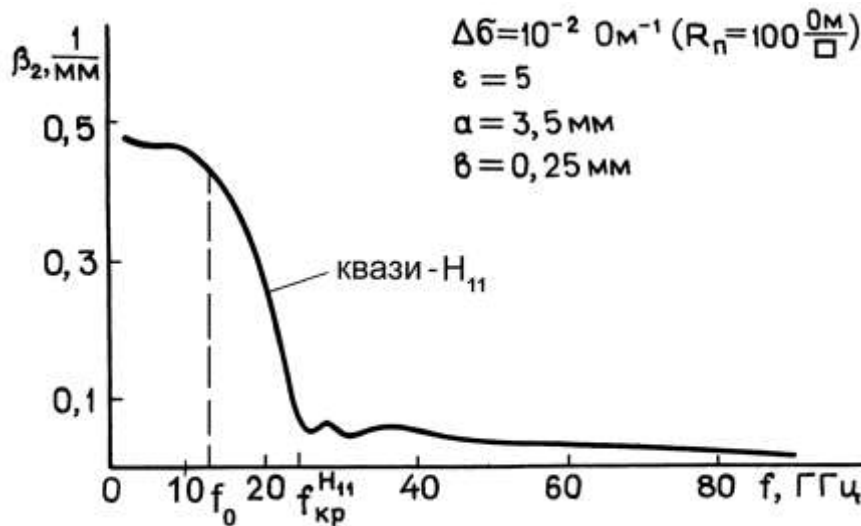


Рис. 10. Зависимость коэффициента затухания β_2 от частоты

Расчет проводился при поверхностном сопротивлении $R_{\Pi} = 100 \text{ Ом}/\square$. Из рисунка видно, что исследуемая волна не имеет критической частоты. Отсутствует скачок коэффициента затухания при переходе через частоту, соответствующую критической частоте полого волновода, а также видно, что с увеличением частоты затухание уменьшается. При этом резкий его спад наблюдается вблизи критической частоты волны H_{11} полого круглого волновода.

Результаты расчета показывают, что рассматриваемый волновод на основной волне является 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.

Из характеристики, представленной на рис. 10, видно, что широкополосный аттенюатор можно создать в диапазоне частот $[0 - f_0]$.

Для оценки применимости предложенной методики расчета коэффициента затухания

при разработке аттенюаторов было проведено сравнение результатов расчета с экспериментом. Измерения коэффициента затухания проводились на аттенюаторах с ослаблением 20, 30 и 40 дБ (сечение коаксиального тракта 7/3,04 мм). Расхождение расчетных и экспериментальных значений составило не более 5 %.

Влияние диэлектрической проницаемости подложки резисторов на коэффициент затухания аттенюаторов теоретически и экспериментально исследовано в работе [7]. Результаты расчета коэффициента затухания волны квази- H_{11} показали, что на низких частотах $f < (2 \div 3)$ ГГц диэлектрик практически не влияет на структуру поля и соответственно на затухание волны. На высоких частотах электромагнитное поле всё более втягивается в диэлектрик и сильнее взаимодействует с пленками. Показано, что влияние диэлектрика начинает сказываться на частотах 10–12 ГГц. Расхождение теоретических и экспериментальных данных составило не более 7 %.

Экспериментальные [3] и теоретические [8] исследования влияния различных неоднородностей волноводного тракта в месте расположения резистивных пленок показали, что применение эллиптических экранов является эффективным для обеспечения постоянного ослабления СВЧ аттенюаторов в широком диапазоне частот. В тех случаях, когда использование металлических экранов конструктивно затруднено, в местах нахождения резистивных пленок применяются так называемые регулировочные металлические винты.

Результаты исследований положены в основу разработки высокоточных широкополосных коаксиальных аттенюаторов.

На основе разработанных пластинчатых резисторов П2-4 с односторонним резистивным покрытием были созданы фиксированные аттенюаторы в диапазоне от постоянного тока до 12,4 ГГц (коаксиальный тракт сечением 7/3,04 мм) с номинальными значениями ослабления 3, 6, 10, 15, 20, 30 дБ, с погрешностью ослабления не более $\pm 0,8$ дБ, КСВН менее 1,5 и мощностью входного сигнала 1 Вт.

С увеличением рабочей частоты становится очевидной целесообразность применения пластинчатых резисторов с двухсторонним резистивным покрытием. В этом случае на высоких частотах уменьшается влияние диэлектрической проницаемости подложки резистора на затухание квази- H_{11} волны.

Были разработаны резисторы типа С6-8, на основе которых созданы аттенюаторы в диапазоне до 18 ГГц (коаксиальный тракт 7/3,04 мм) с номинальными величинами ослабления 3, 6, 10 дБ с погрешностью $\pm 0,6$ дБ и 20, 30 дБ с погрешностью $\pm 1,0$ дБ, КСВН менее 1,5 (рис. 11, 12).



Рис. 11. Внешний вид аттенюаторов в коаксиальном тракте сечением 7/3,04 мм

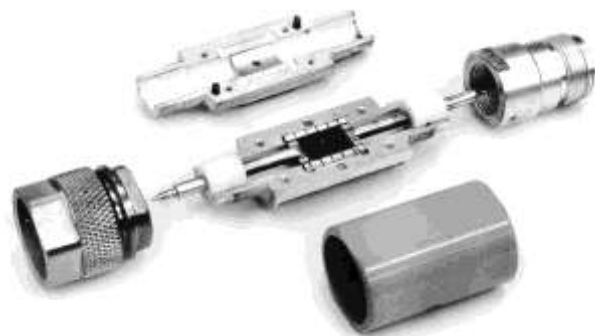


Рис. 12. Узлы аттенюаторов в коаксиальном тракте сечением 7/3,04 мм

С освоением миллиметровых волн были созданы малогабаритные пластинчатые резисторы. Для коаксиальных аттенюаторов сечением 3,5/1,52 мм разработаны малогабаритные пластинчатые резисторы размером 5,5x6,5 мм. Эти резисторы по конструкции аналогичны пластинчатым резисторам П2-4 и предназначены для работы на частотах более 18 ГГц. На

рис. 13 показан общий вид attenuаторов на сечение коаксиального тракта 3,5/1,52 мм и их конструктивное исполнение. Габариты attenuаторов $\varnothing 13 \times 32,6$ мм.



Рис. 13. Внешний вид и узлы attenuатора в коаксиальном тракте сечением 3,5/1,52 мм:
 1, 6 – высокочастотные разъемы корпуса attenuатора; 2, 5 – свинчивающиеся части корпуса attenuатора; 3 – продольный паз, в который вставляется пластинчатый резистор 7 с пружинными контактами 8; 4 – втулка, внутренний диаметр которой равен 3,5 мм; 9 – удлинительное кольцо;
 10 – электрод, надеваемый на центральный проводник резистора

Малогабаритные пластинчатые резисторы (элементы резистивные для коаксиальных attenuаторов) имеют входное (выходное) сопротивление 50 Ом с допуском $\pm(0,5 - 1,5)$ Ом для различных сечений коаксиального тракта; ослабление (на постоянном токе) 3, 6, 10, 20 и 30 дБ с допуском на ослабление $\pm(0,1 - 0,2)$ дБ; входную мощность (0,5 – 1) Вт.

Резисторы выполнены по тонкопленочной технологии на основе структуры резистивный сплав РС 5406 – никель с электролитическим осаждением золота в области контактов на подложках из керамики ВК 100–1 (поликор, $\epsilon = 9,6$).

На базе малогабаритных двухсторонних пластинчатых резисторов сконструированы коаксиальные attenuаторы типа 1016, работающие в диапазоне от постоянного тока до 26 ГГц (коаксиальный тракт сечением 3,5/1,52 мм) и типа 1007 – в диапазоне до 50 ГГц (коаксиальный тракт сечением 2,4/1,04 мм). Номинальные величины ослаблений обоих типов attenuаторов – 3, 6, 10, 20, 30 дБ.

Attenuаторы типа 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.

Attenuаторы типа 1007 имеют погрешность по ослаблению $\pm(0,7 - 3,5)$ дБ в зависимости от величины ослабления и поддиапазона частот и КСВН не более (1,35 – 2,1) в зависимости от частоты [9].

Измерение ослабления до 50 ГГц в разных поддиапазонах частот проводилось на установках ДК1-12, ДК1-15, ДК1-16, ДК1-26 с погрешностью не более $\pm 0,2$ дБ (без учета погрешности из-за рассогласования).

Измерение КСВН в диапазоне до 18 ГГц проводилось на панорамных измерителях КСВН Р2-102, Р2-103, Р2-104 и в диапазоне от 18 до 50 ГГц – на волноводных измерителях КСВН Р2-65, Р2-66, Р2-68 с коаксиально-волноводными переходами. Погрешность измерения КСВН не превышала 15 % от измеряемой величины.

В системе «коаксиальный тракт-диссипативная волноведущая структура» в качестве последней бывает целесообразным применение экранированной полосковой линии с резистивной пленкой [10,11]. Применение в коаксиальных трактах attenuаторов на основе плосковых линий обусловлено тем, что размещение пластинчатого резистора непосредственно на металлическом основании увеличивает рассеиваемую мощность сигнала не менее чем в 2–3 раза.

Базовой структурой для attenuаторов рассматриваемого типа является экранированная полосковая линия и двухслойный прямоугольный волновод с резистивной пленкой между слоями (рис. 14).

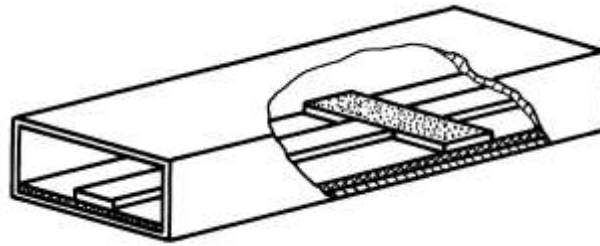


Рис. 14. Двухслойный прямоугольный волновод с резистивной пленкой между слоями

В разрыв центрального проводника несимметричной полосковой линии вставляется тонкая резистивная пленка на диэлектрическом основании, имеющая по краям гальванический контакт с экраном. Теоретические основы аттенуаторов на полосковых линиях были заложены в работах [12, 13, 14, 15]. Проведенные расчеты спектров собственных волн полосковой линии и двухслойного волновода позволили сформулировать дифракционную задачу о согласовании полосковой линии с двухслойным волноводом, содержащим резистивную пленку, к которой сводится расчет возбуждающего устройства аттенуатора.

Результаты проведенных исследований использованы при разработке ячеек-ослабителей фиксированных полосковых аттенуаторов, которые нашли применение в составе гибридных СВЧ интегральных схем для развязки и согласования различных полосковых устройств. Полосковые ячейки-ослабители также используются в виде самостоятельных фиксированных и ступенчатых аттенуаторов с коаксиальными входами (выходами) [16, 17].

Дальнейшее улучшение характеристик аттенуаторов на пластинчатых резисторах связано в основном с изменением конфигурации резистивной пленки, повышением равномерности резистивного слоя (для пластинчатых резисторов со сплошной резистивной пленкой), уменьшением переходного сопротивления между резистивной пленкой и контактами резистора, совершенствованием возбуждающих электродов аттенуаторов.

3. Формирователи импульсов

На базе широкополосных фиксированных коаксиальных аттенуаторов были разработаны формирователи импульсов, предназначенные для получения импульсов с пикосекундными фронтами [18].

Конструктивно формирователь импульсов (рис. 15) содержит: корпус; центральные проводники коаксиальной линии; пластинчатый резистор; конденсатор, изготовленный из металлических пластин, соединенных с центральным проводником; диэлектрический регулировочный винт. Коэффициент передачи такого делителя, выполненного на пластинчатом резисторе, имеет, как известно, плоскую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) в широкой полосе частот. Для коррекции АЧХ в области верхних частот предложено использовать емкость конденсатора. Емкость между пластинами шунтирует распределенный резистор. Если на вход такой цепи подать импульс с экспоненциальным фронтом с постоянной времени RC , на выходе получается импульс с амплитудой в K раз меньшей, и в $\frac{K+1}{2}$ раз меньшим фронтом (K – коэффициент деления делителя).

На рис. 16 показан внешний вид формирователя импульсов на диоде с накоплением заряда (ДНЗ), в котором применено описанное ранее корректирующее устройство с $K = 3$ (ослабление 10 дБ). В результате из импульса с фронтом 120 пс, сформированного диодом КД524А, получен импульс с фронтом 50 пс. Формирователь применен в качестве источника зондирующих импульсов в стробоскопическом рефлектометре типа «Сток» с полосой до 18 ГГц. Внешний вид рефлектометра показан на рис. 17.

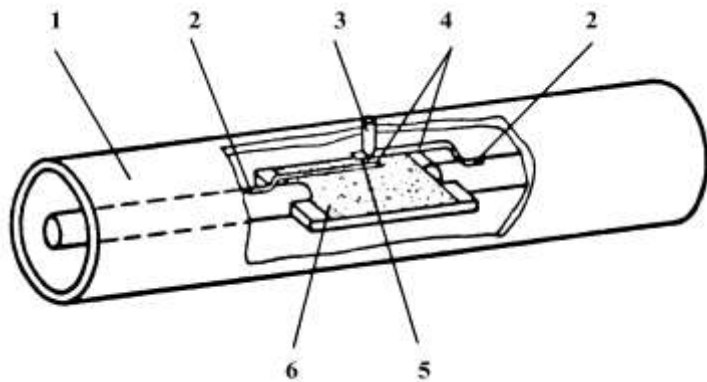


Рис. 15. Конструкция формирователя импульсов:
 1 – корпус; 2 – центральные проводники коаксиального тракта;
 3 – диэлектрический регулировочный винт; 4 – регулировочные проводники;
 5 – конденсатор, выполненный из металлических пластин; 6 – пластинчатый резистор



Рис. 16. Внешний вид формирователя импульсов на туннельном диоде



Рис. 17. Внешний вид рефлектометра



Рис. 18. Внешний вид формирователя на туннельном диоде

В формирователе (рис. 18) на туннельном диоде типа ИИ308К, который создает фронт около 50 пс, коэффициент делителя составляет $K = 2$.

В результате на выходе получен импульс с фронтом около 30 пс. Такой формирователь применяется в поверочных службах предприятий для проверки переходной характеристики стробосциллографов с полосой до 10 ГГц ($\tau_{пер} \leq 35$ пс), а также в качестве источника зондирующих импульсов в стробоскопических рефлектометрах.

Библиографический список

1. **Шишков, Г.И.** Анализ схемотехнических решений и конструкций коаксиальных аттенюаторов, используемых в радиоизмерительной аппаратуре/ Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов, Ю.А. Горячев // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1981. Вып. 1. С. 52.
2. **Бунтилов, В.М.** Комплекты фиксированных коаксиальных аттенюаторов Д2-26÷Д2-42 / В.М. Бунтилов, Г.И. Шишков, В.И. Окомельков // Обмен опытом в радиопромышленности. 1971. Вып. 1. С. 84.
3. **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.
4. **Шишков, Г.И.** Расчет круглого волновода с резистивными пленками / Г.И. Шишков // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1983. Вып. 2. С. 52–60.
5. **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.
6. **Раевский, С.Б.** К теории двухслойных волноводов с резистивной пленкой между слоями // Изв. высш. учебн. заведений. Радиофизика. 1974. Т. XVII. Вып. 11. С. 74–79.
7. **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.
8. **Белов, Ю.Г.** Двухслойный экранированный эллиптический волновод с резистивной пленкой / Ю.Г. Белов [и др.] // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1982. Вып. 2. С. 39–45.
9. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы: монография / под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006. – 208 с.
10. А.С. 240789 (СССР). Фиксированный аттенюатор / Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов // Б.И. 1969. № 13.
11. А.С. 866617 (СССР). Фиксированный аттенюатор / Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов, Ю.А. Горячев // Б.И. 1981. № 35.
12. **Аржанов, С.Н.** Алгоритм для расчета экранированных полосковых линий / С.Н. Аржанов, С.А. Маркова, С.Б. Раевский, В.Я. Сморгонский // Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. 1979. Т. 22. № 9. С. 23–28.
13. **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.
14. **Горячев, Ю.А.** Анализ тонкопленочных резистивных элементов/ Ю.А. Горячев, Г.И. Шишков // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1981. Вып. 6. С. 52–57.
15. **Калмык, В.А.** Прямоугольный волновод с анизотропной резистивной пленкой/ В.А. Калмык, С.Б. Раевский, Г.И. Шишков // Изв. высш. уч. заведений. Сер. Радиоэлектроника. 1989. Т. 32. № 7. С. 78–79.
16. **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.
17. А.С. 327866 СССР. Ступенчатый аттенюатор / В.М. Бунтилов, Ю.А. Горячев, В.И. Моталин, И.М. Рубцов, Г.И. Шишков // Б.И. 1972. № 16.
18. А.С. 892683 СССР. Формирователь импульсов / В.М. Бунтилов, Е.Н. Буторин, Б.В. Писарев, Г.И. Шишков // Б.И. 1981. № 47.

Дата поступления
в редакцию 28.01.2011

G.I. Shishkov

WIDEBAND FIXED ATTENUATORS

The principle of operation of wideband precision fixed attenuators and their design are described.

Key words: fixed attenuators, radio instruments, lamellar resistors.