

Василий Горбачев
Виктор Кочемасов, к. т. н.
Сергей Хорев

Аттенюаторы.

Часть 1

Историки утверждают, что единственным египетским богом, не имевшим человеческого облика, был бог Солнца Атон (Aten), изображавшийся в виде солнца, чьи лучи заканчивались кистями рук. Есть знаменитое фото египетского артефакта, на котором фараон Эхнатон («полезный для Атона») поклоняется этому богу. Много лет исследователей занимает вопрос: что фараон держит в руках? Безвестный любитель истории, знакомый с проблематикой регулирования мощности, предположил, что правитель держит в руках сосуды с кремом от солнца, который ослабляет (attenuate!) слишком жаркие в это время года лучи египетского бога [1]. Да, возможно для истории как для науки это слишком смело, но, если вспомнить, что в главном храме Атона не было крыши, вполне логично предположить, что даже «родственник» Атона Эхнатон мог страдать от своего «создателя». Так благодаря древнеегипетскому божеству и смелому отраслевому юмористу можем считать крем от загара первым поглощающим аттенюатором в истории человечества, известным с XIII века до нашей эры.

Общие сведения

Кроме термина «аттенюатор» в отечественной профильной документации используются термины «ослабитель» и «поглотитель».

При решении конкретных задач в радиотехнике часто возникает потребность в уменьшении мощности сигнала, проходящего через устройство. Эту задачу решают устройства, получившие название «аттенюаторы». Большая советская энциклопедия [2] определяет аттенюаторы следующим образом: «Аттенюатор (от франц. *attenuer* — «смягчить», «ослабить») — устройство для плавного, ступенчатого или фиксированного понижения электрического напряжения, силы

тока, мощности электрических или электромагнитных колебаний. В отличие от реостата и потенциометра, сопротивление между входными зажимами аттенюатора не меняется в процессе регулировки (при условии, что сопротивление между выходными зажимами постоянно), при каждом измерении известно вносимое им ослабление. Аттенюатор изготавливают как отдельное устройство или встраивают в измерительные и другие приборы. Различают развязывающие аттенюаторы, некалиброванные или с малой точностью установки ослабления, и измерительные аттенюаторы с высокой точностью установки ослабления».

Исходя из приведенного определения, аттенюатором может считаться любое устройство, ослабляющее электрический сигнал (одну из его характеристик). В том числе, как это отмечено во введении, и мазь от загара, которая имеет полное право называться аттенюатором, поскольку уменьшает мощность проходящего через нее солнечного излучения. Подобное определение сильно затрудняет какую-либо классификацию аттенюаторов ввиду их огромного многообразия. Тем не менее в определении выделены два основных класса данных устройств — развязывающие и измерительные. Это связано не только с точностью установки степени ослабления сигнала, но и с типом носителя электромагнитного взаимодействия — волной или частицей. В примере, описанном во введении, носителем сигнала является электромагнитная волна в форме фотона, кванта электромагнитного излучения.

Различие в типах носителей электромагнитного взаимодействия приводит к еще одному важному моменту — к различиям в понимании мощности электромагнитного сигнала для носителей типа «частица», например электрона, и носителей типа «волна», например электромагнитного поля. Это различие проявляется

в так называемом дуализме электрона — условиях, когда электрон ведет себя как частица, и условиях, когда электрон ведет себя как волна. Мощность сигнала для электрона-частицы определяется в общем случае как произведение протекающего тока на напряжение, приложенное к электрической цепи, и на сдвиг фаз между током и напряжением:

$$P = U_0 I_0 + \sum U_n I_n \cos \varphi_n$$

где U_0 и I_0 — постоянные составляющие; U_n , I_n — средние квадратичные значения гармоник напряжения и тока; φ_n — сдвиг фаз между напряжением и током для гармоник.

В радиофизике, когда электрон проявляется в виде волны, чаще применяется понятие плотности энергии электромагнитного поля, но, используя уравнения Максвелла, ее можно пересчитать в мощность. И плотность энергии, и мощность электромагнитного поля являются величинами интегральными в определенном объеме пространства, но в самом общем виде плотность энергии можно представить следующим образом:

$$U = \varepsilon_0 E^2 / 2 + B^2 / \mu_0 2,$$

где E — напряженность электрического поля; B — магнитная индукция; ε_0 и μ_0 — диэлектрическая и магнитная постоянные среды.

Носители типа «частица» являются основными для радиотехники, а носители типа волна — для радиофизики. В принципе, радиотехника и радиофизика различаются диапазоном рабочих радиочастот. Разделение это достаточно условно, но принято считать, что частоты до 300 МГц относятся к диапазону радиочастот и, соответственно, к радиотехнике, а частоты выше 300 МГц — к диапазону СВЧ и КВЧ и, соответственно, к радиофизике. Эта граница по частоте показывает, на каких



Рис. 1. Изображение египетского фараона Эхнатона, поклоняющегося Атону

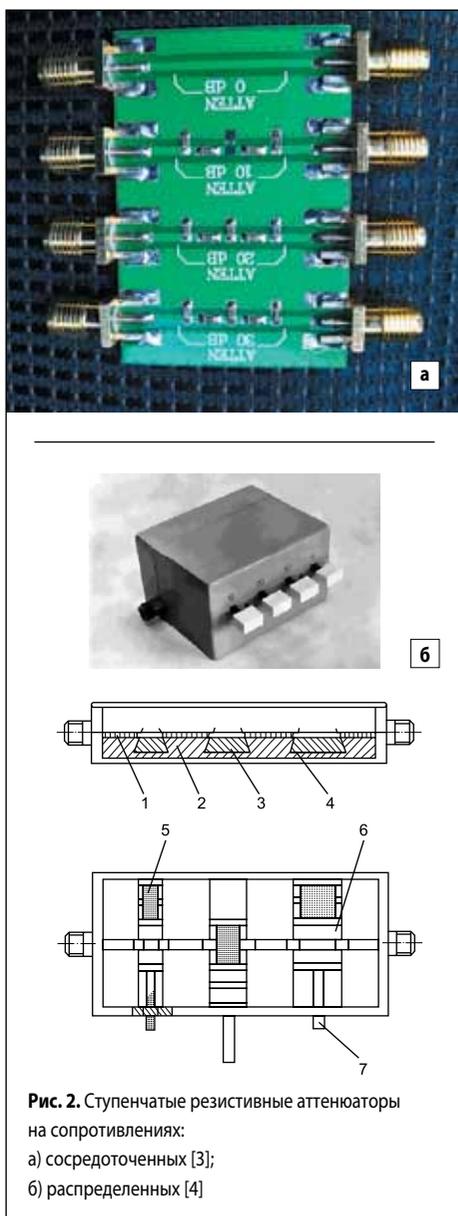


Рис. 2. Ступенчатые резистивные аттенюаторы на сопротивлениях:
а) сосредоточенных [3];
б) распределенных [4]

частотах нужно применять радиотехническую схемотехнику, а на каких — радиофизическую, волноводную. Различие радиотехники и радиофизики следует учитывать при анализе конкретных конструкций того или иного изделия. В частности, диапазон 300–500 МГц можно считать переходным диапазоном между схемотехникой радиотехнической и радиофизической. На частоте 400 МГц хорошо работают детекторные или усилительные каскады, собранные на сосредоточенных элементах. Но для высокочувствительных устройств, имеющих чувствительность выше 10^{-9} Вт/Гц, применение сосредоточенных элементов приводит к росту собственных шумов каскадов и, соответственно, снижению общей чувствительности устройства. В этом случае необходимо использовать микрополосковую топологию, применять малошумящие компоненты и специальные схемы для компенсации собственных радиотемпературных шумов каскадов.

Казалось бы, между ступенчатыми резистивными аттенюаторами, изображенными на рис. 2а,б (не считая конструктивных особенностей), принципиальной разницы нет. Но на самом деле это не так.

В аттенюаторе на рис. 2а для изменения мощности проходящего сигнала применяются активные сопротивления в микрополосковом исполнении, что вполне логично. При этом нужно иметь в виду, что полезный сигнал распространяется по поверхности топологии, похожей на полосковые линии. В этом случае применение сосредоточенных сопротивлений оправдано.

В аттенюаторе на рис. 2б полезный сигнал распространяется внутри микрополосковой линии, в материал диэлектрика которой включены распределенные поглощающие материалы, выполняющие роль распределенных сопротивлений. Это не сопротивления в чистом виде, а поглощающие вставки, уменьшающие плотность энергии поля за счет поглощения в материале.

Кроме того, для аттенюатора на рис. 2б важными параметрами являются не только собственно уменьшение мощности, но и дополнительные параметры, связанные с другими характеристиками волны, приводящими к паразитным искажениям сигнала — это появление паразитных гармоник, искажающих спектр сигнала; рассеивание на рассогласованиях волновых сопротивлений; изменении типа волны; изменении поляризации волны и тому подобное. Вот почему при выборе аттенюатора для СВЧ-диапазона следует обращать внимание не только на коэффициент подавления (уменьшение мощности), но и на топологию конструкции и соответствие правилам радиофизической схемотехники.

Одной из важнейших особенностей СВЧ-схемотехники является необходимость как можно более точного согласования волновых сопротивлений волнопроводящей линии и подключенных к ней устройств. При полном согласовании волновых сопротивлений волна распространяется в так называемом режиме *бегущей волны*. В этом режиме энергия волны полностью и без потерь (искажений) попадает из линии в нагрузку. В случае полного рассогласования волновых сопротивлений наступает режим *стоячей волны*, когда волна от нагрузки (или скачка волнового сопротивления) полностью отражается в линию. Оба этих режима являются предельными, поскольку полного согласования добиться крайне сложно, а режим стоячей волны образуется в случае короткого замыкания проводящей линии. На практике

чаще всего образуется так называемый *смешанный режим*, когда в линии одновременно присутствуют и прямая, и обратная (отраженная) волна. Смещение обеих волн приводит к целому ряду эффектов, влияющих не только на плотность энергии (мощность сигнала), но и на целый ряд других, не менее важных параметров сигнала. К их числу можно отнести:

- наложение сигналов, приводящее к появлению гармоник высших порядков, искажающих исходный спектр сигнала;
- уменьшение мощности сигнала, поступающего в нагрузку, и связанное с этим снижение предельного значения передаваемой мощности из-за возможного электрического пробоя в тракте;
- так называемый уход спектра, связанный с взаимным подавлением центральной несущей частоты;
- фазовый дребезг, связанный с несовпадением фаз прямой и отраженной сигналов.

Для большинства СВЧ-устройств вполне достаточно подобных эффектов, чтобы задуматься о правильном выборе пассивных устройств (в том числе аттенюаторов) в конечном изделии. Но в высокочувствительных устройствах, например СВЧ-радиометрах, этого не достаточно. В частности, необходимо знать соотношение сигнал/шум в аттенюаторе и разьемах, через которые он включается в схему в высокочувствительных устройствах.

Для того чтобы избежать возможных искажений полезного сигнала, необходимо обращать внимание на конструкцию и топологию аттенюатора. В настоящее время производители стараются хранить свои технологические секреты, но понимание физики распространения волн в передающих линиях позволяет качественно оценить, учитывает ли производитель эти особенности в своих изделиях. Например, для СВЧ-цепей, имеющих несколько выходов, обязательным условием правильного согласования по волновому сопротивлению становится наличие согласующих каскадов между передающей линией и всеми выводами. На практике это приводит к увеличению размеров устройства, и если производитель в качестве преимущества заявляет о небольших его размерах, значит, он не включил в свое изделие согласующих цепей. Или сделал их максимально дешевыми и не качественными. Большинство согласующих каскадов в СВЧ-диапазоне строится на основе

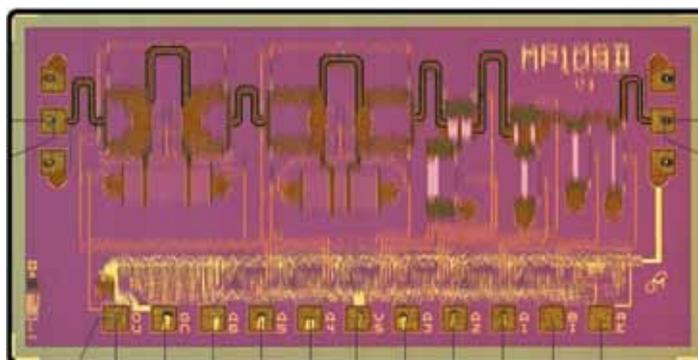
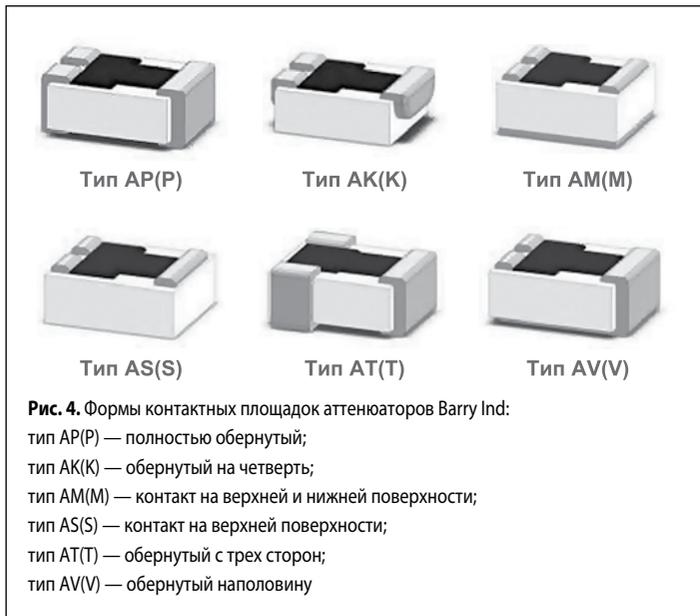


Рис. 3. Топология аттенюатора MP109D

Таблица 1. Типоразмеры и типы контактных площадок

Размер (EIA)	0405	0705	0904	0905	1005	1007	1612	2010	2525	2335	3725	3737
Тип контакта	P, K, T, V	P, M, S, T	M, S, T, V	M, S	P, M, S	P	P, M, S	T	S, T, V	V	V	V



четвертьволновых шлейфов, что предоставляет возможность, исходя из заявленного рабочего диапазона частот, оценить качество согласования волновых сопротивлений. Уменьшение геометрических размеров согласующих каскадов возможно за счет использования диэлектриков с высоким значением диэлектрической постоянной, что приводит к увеличению прямых потерь мощности сигнала из-за поглощения в диэлектрике. Для понимания схемотехники и особенностей распространения волн в СВЧ-диапазоне рассмотрим в качестве примера дискретный 6-канальный аттенуатор MP109D [5] от АО «НПФ «Микран» (рис. 3).

Приведенный в описании изделия рисунок не дает полного представления о топологии, но согласующие каскады на топологии видны отчетливо (для наглядности оконтурено черным цветом). Видно, что аттенуатор выполнен по микрополосковой технологии и имеет несколько согласующих каскадов для разных частот (о чем говорят размеры каскадов). По рисунку трудно разобрать учтено ли отражение полезного сигнала на 90°-ных изгибах полосковой линии. Но, судя по заявленному диапазону рабочих частот, учтено, а этот диапазон составляет 0,1–14 ГГц. Материал диэлектрика подложки тоже не известен, но, судя по вносимым прямым потерям, это высокочастотная керамика с диэлектрической проницаемостью не ниже 9. Это может быть, например, радиопрозрачный ситалл, имеющий ДП до 11 и тангенс потерь меньше 0,001. Вносимые потери за счет потерь в материале подложки (S_{21}) составляют 5,5.

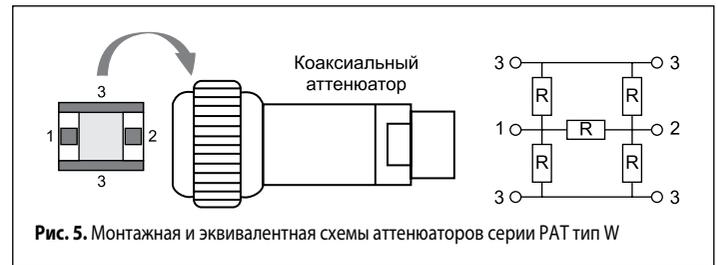
Таким образом, можно с уверенностью заключить, что в данном аттенуаторе возможность появления искажающих полезный сигнал факторов, указанных выше, сведена к минимуму.

Чип-аттенуаторы

Этот тип аттенуаторов по объему выпуска (в штуках) во много раз превышает выпуск коаксиальных и волноводных ослабителей. Отчасти это связано с тем, что два крайних типа аттенуаторов наиболее востребованы в относительно ограниченной области микроволновых измерений, в то время как пассивные чип-аттенуаторы не только применяются в приемопередающих трактах радиоустройств, но и являются комплектующими при производстве ослабителей как с коаксиальными соединителями, так и волноводных.

Технологические и технические вопросы изготовления подложек и резистивных слоев чип-аттенуаторов практически полностью совпа-

* О понятии «прецизионный аттенуатор». Термин этот не имеет устоявшегося определения и применяется производителем ситуационно и по своему усмотрению. Количественное определение прецизионности не сформулировано. При рассмотрении чип-аттенуаторов его используют чаще всего в случаях, когда номинал значения резистивного компонента формируется лазерной резкой. Типы лазерного тримминга и точности процесса рассмотрены в [6]. Забегая вперед, отметим также, что применительно к коаксиальным и волноводным аттенуаторам понятие «прецизионный» используется в основном, когда речь идет о переменных ослабителях обоих типов, если они оснащены микрометрической или подобной системой позиционирования поглощающего элемента аттенуатора.



дают с таковыми же для чип-резисторов и достаточно подробно описаны в материале [6]. Существенным и понятным отличием резисторов от аттенуаторов является форма контактных площадок. Наиболее полный набор дизайнов контактов ослабителей имеет продуктовая линейка компании Barry Industries (рис. 4).

Отметим здесь что, несмотря на такое обилие дизайнов терминалов, все снабженные ими компоненты имеют только два варианта установки: либо на поверхность платы (SMD), либо в вырезы платы.

Аттенуаторы Barry Industries выпускаются в 12 типоразмерах. В таблице 1 представлено соответствие между форм-фактором и типом контактной площадки.

Кроме представленных на рис. 4 форм терминалов, которые присутствуют с теми или иными нюансами практически у всех производителей чип-ослабителей, существует несколько специфических технических решений формы компонента. Например, фирма Susumu выпускает серию прецизионных аттенуаторов* (серия PAT тип W) для производства ослабителей с коаксиальными соединителями (рис. 5).

Предполагается, что центральный проводник коаксиального канала припаивается к сигнальным (средним) терминалам аттенуатора (номера 1, 2 на рис. 5), внешний проводник к заземляющим контактам (контакты 3 на рис. 5). В серии три корпуса с размерами 4,2×3 мм (PAT 3042); 5,6×4,5 мм (PAT 4556) и 6×3 мм (PAT3060H). У каждого корпуса своя форма контактных площадок. Все параметры серии PAT даны в частотном диапазоне DC–10 ГГц (PAT3060H — 6 ГГц), при этом надо заметить, что в фирменной документации измеренные значения КСВ и ослабления представлены только до 3 ГГц. Диапазон мощности серии составляет 0,25–5 Вт. Наихудший КСВ — 1,3. Ослабления от 0 до –20 дБ.

В России похожие элементы производит АО «ОНИИП» (г. Омск). Поглощающие элементы для волноводных ослабителей, подобные чип-аттенуаторам, выпускают также фирмы EMC Technology и RF Labs.

Маломощные аттенуаторы на основе GaAs-процесса

Кроме уже рассмотренных технологий производства пассивных компонентов сопротивления [6], в текущем десятилетии этого века заметен интерес исследователей и производителей к технологиям изготовления пассивных компонентов в едином технологическом процессе с активными. Если раньше такая технология применялась в основном при изготовлении монолитных интегральных схем, или МИС (англ. MMIC), то сейчас таким же образом производятся и отдельные пассивные компоненты или наборы компонентов. Эта технология хорошо «ложится» на производство аттенуаторов, поскольку они представляют собой именно такой набор. В бескорпусном исполнении данный компонент чаще всего обозначается термином Die («кристалл»), и может встречаться обозначение MMIC.

Еще одним достоинством технологии считается стабильная повторяемость параметров изделий. В основном речь идет о кремниевом и арсенид-галлиевом (GaAs) процессах, из которых наиболее часто используется второй. Сравнительные результаты экспериментальных работ по использованию двух техпроцессов представлены в материалах [7, 8]. Так, в работе [7] поясняются преимущества арсенид-галлиевого процесса. В отличие от кремния, здесь применяются металлизированные переходные отверстия. Использование таких отверстий для заземления контактных площадок значительно снижает паразитную индуктивность (до десятков пГн). Кроме того, опять-таки в отличие от кремния, где

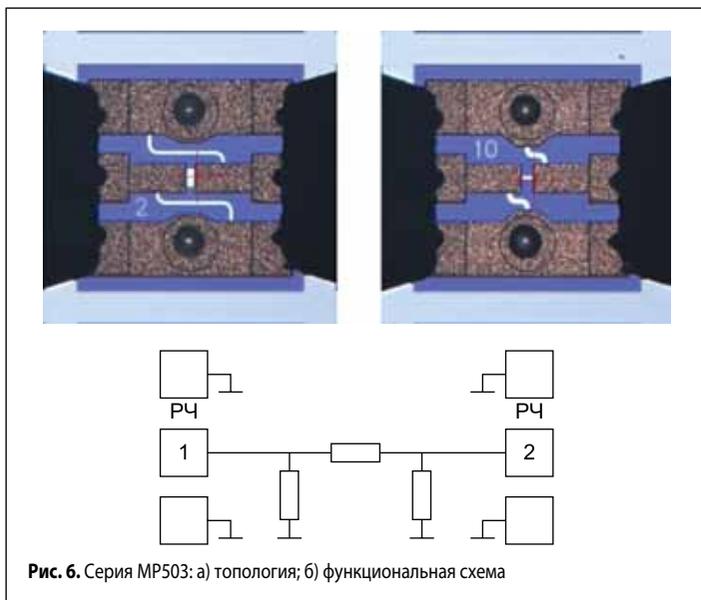


Рис. 6. Серия MP503: а) топология; б) функциональная схема

резисторы производятся диффузионным методом, в арсенид-галлиевом техпроцессе резисторы формируются из тонких пленок нитрида тантала. В общем случае это позволяет утилизировать бóльшую входную мощность при сравнимых размерах компонента. Так, предельно допустимый ток на единицу ширины резистивного материала в случае кремния составляет 0,5 мА/мкм, а для арсенид-галлия — 1 мА/мкм.

Практическим примером применения технологии является отечественная МИС резистивных фиксированных аттенюаторов серии MP503 (АО «НИИПП», г. Томск) [14]. Серия содержит пять номиналов ослабления: 0, 2, 3, 6, 10 дБ в частотном диапазоне 0–50 ГГц. Максимальная входная мощность 0,2 Вт. Размеры кристалла 0,65×0,65×0,1 мм. На рис. 6 приведены топологии и функциональная схема аттенюаторов на 2 и 10 дБ, на рис. 7 — вносимые и обратные потери.

Для сравнения можно рассмотреть арсенид-галлиевый аттенюатор EWA65xxxx фирмы Endwave Corp. (Gigortix), данные о котором приведены в [10]. В отличие от MP503, в EWA65 использована Т-схема ослабителя. Известно, что при одинаковых ослаблениях Т-схема имеет меньшие номиналы резисторов по сравнению с П-схемой. В результате у резисторов меньшие размеры и, соответственно, более высокая граничная частота (105 ГГц) и несколько меньшие размеры кристалла 0,5×0,5×0,1 мм у EWA65. Также EWA65 имеет сравнимые с отечественным кристаллом обратные потери в 15 дБ и вдвое меньшую мощность 0,1 Вт, что объясняется более высокой граничной частотой и меньшей площадью кристалла.

Есть примеры и более мощных аттенюаторов в таком форм-факторе. Например, фирма Mini-Circuits производит серию KAT-D MMIC-ослабителей на арсениде галлия на мощность 1,7 Вт [11]. Размеры кристалла у этого изделия 0,75×0,7×0,1 мм. Заявлена линейка ослаблений 0–10 дБ с шагом 1 дБ и далее 12, 15, 20 и 30 дБ в частотном диапазоне 0–43,5 ГГц. Во всей полосе КСВ 1.2. Обычно такие и подобные (рис. 6) кристаллы оформляются в корпус с шестью терминалами, что однозначно определяет способ монтажа (рис. 8).

Один из вопросов, возникающий при сравнении аттенюатора KAT-D с двумя предыдущими моделями, каким образом при сравнимых габаритах корпуса кристалла KAT-D на ~20% больше, чем у MP503) поглощаемая мощность повышена практически на порядок. Кроме, конечно же, материала собственно резистивной пленки, не обозначенного производителем, возможный ответ содержится в описании изделия, где указано, что кристалл ослабителя имеет сплошную заземляющую поверхность, охватывающую как четыре терминала верхней поверхности корпуса, так и всю нижнюю сторону. Таким образом, можно отметить, что сигнальные терминалы аттенюатора относятся к типу AS по классификации Barry (Single-Sided), в то время как заземление имеет конструкцию типа AP (Full Wraparound). Тем не менее в документации производителя заземляющая поверхность описана как Single, Contiguous Ground Plane («единая непрерывная заземляющая поверхность»), что еще раз подчеркивает некоторую условность классификаций форм кон-

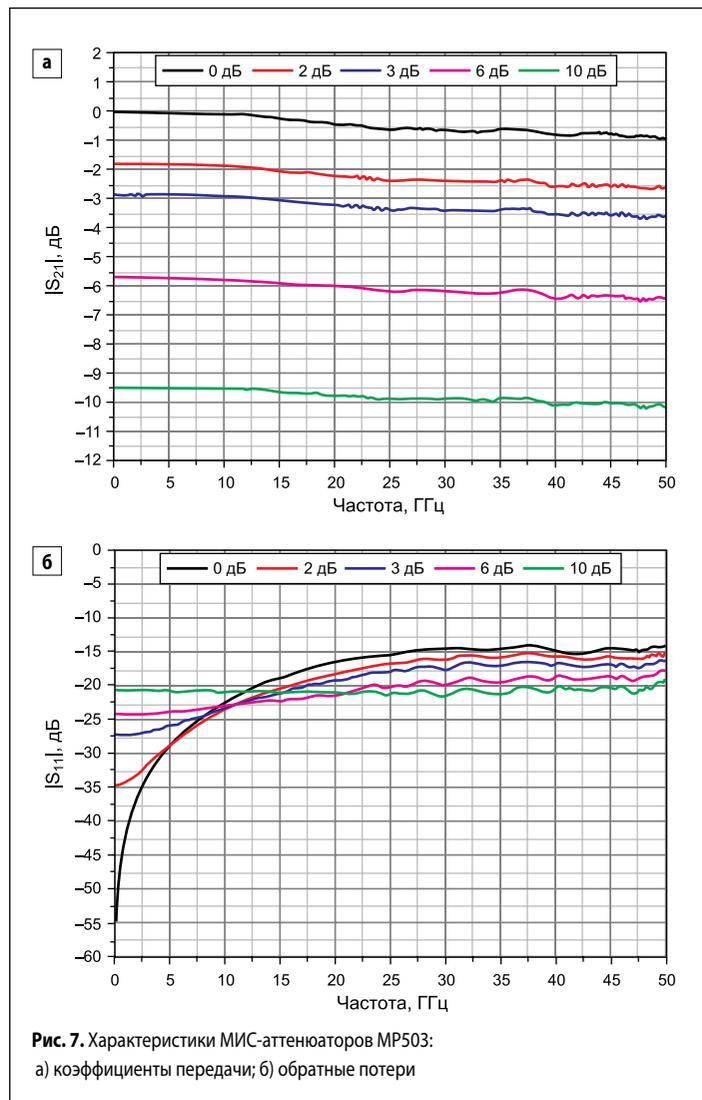


Рис. 7. Характеристики МИС-аттенюаторов MP503: а) коэффициенты передачи; б) обратные потери

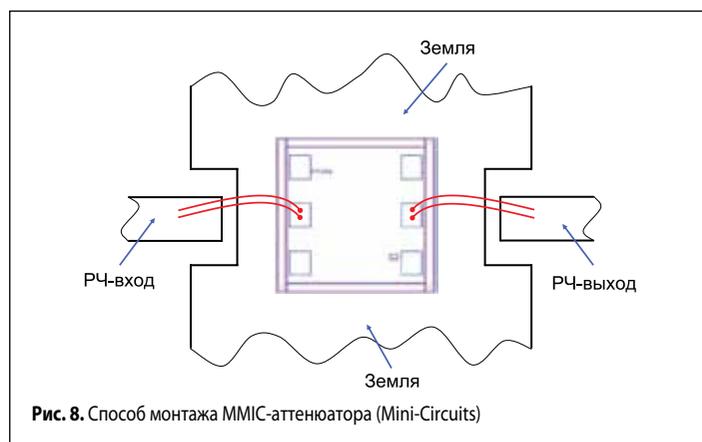


Рис. 8. Способ монтажа MMIC-аттенюатора (Mini-Circuits)

тактных площадок. Такая конструкция заземления подразумевает установку аттенюатора в вырез платы на несущую поверхность, выполняющую роль заземления и теплоотвода. Поскольку Mini-Circuits выпускает тестовые платы с этими аттенюаторами, конструкция платы позволяет увидеть способ установки ослабителя (рис. 9).

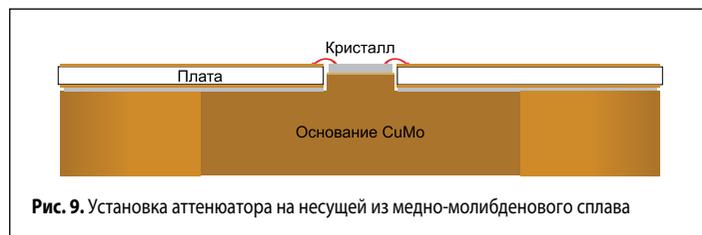


Рис. 9. Установка аттенюатора на несущей из медно-молибденового сплава

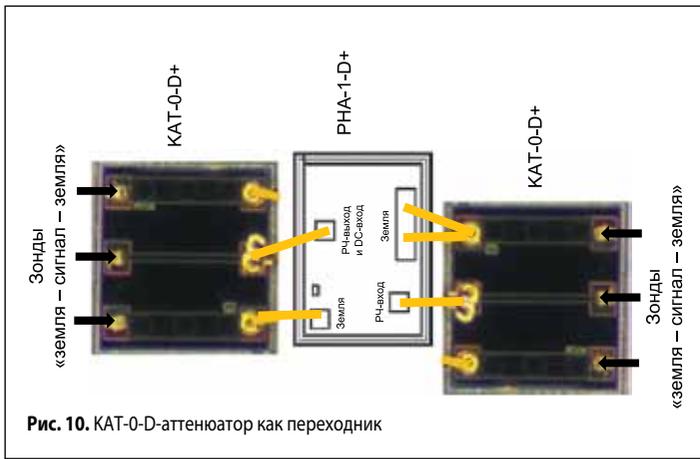


Рис. 10. KAT-0-D-аттенюатор как переходник

Специалисты Mini-Circuits рекомендуют оригинальный способ применения входящего в серию KAT аттенюатора KAT-0-D с ослаблением 0 дБ (линия без потерь). Дело в том, что у большинства микроволновых компонентов контактные площадки сконструированы таким образом, что каждый сигнальный терминал имеет с двух сторон «землянные» контакты (рис. 6, 8). При измерении параметров этих компонентов используются пробники с соответствующей конфигурацией контактных ламелей. Тем не менее существует достаточное количество компонентов, у которых компоновка контактов «земля-сигнал-земля» отсутствует в основном для экономии места на кристалле, и невозможность подключения стандартных микроволновых пробников значительно затрудняет измерение характеристик таких компонентов. В документе [12] предлагается способ применения аттенюатора с нулевым ослаблением — как переходника между измеряемым компонентом и пробником (рис. 10).

В приведенном примере измерительные пробники подключаются к кристаллу усилителя RHA-1-D через переходные ослабители 0 дБ.

Маломощные LTCC-аттенюаторы

Еще одна одноранговая, как и МИС, технология низкотемпературной совместно обжигаемой керамики — LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic), интенсивно развивающаяся с начала текущего столетия. Предтечей ее была высокотемпературная (HTCC) технология, применяемая при производстве многослойных керамических печатных плат, в объеме которых могли размещаться проводники из вольфрама и молибдена и некоторые пассивные компоненты. HTCC-технология основана на обжиге гранул оксида алюминия (Al₂O₃) при температуре ≥+1500 °С. Впоследствии в керамический порошок стали добавлять специальное стекло, и температура обжига снизилась до +850 °С. Сейчас к LTCC относят керамики, получаемые при температуре не более +1000 °С. Снижение температуры обжига позволило применять в качестве проводников серебро, золото и платину. В Сети, в том числе в ее русскоязычном сегменте, имеется обширный материал для желающих разобраться в тонкостях технологии. Здесь приведем лишь несколько базовых моментов. LTCC-технология позволила получить керамику, стоимость которой сравнима с FR-4, при этом частотные свойства близки к керамике из оксида алюминия. Низкотемпературная керамика имеет хорошие защитные свойства от агрессивных факторов внешней среды и позволяет создавать в объеме материала все виды пассивных компонентов и межсоединений. Материал широко используется в потребительской, автомобильной, военной и аэрокосмической электронике, в том числе ВЧ и СВЧ до 100 ГГц.

LTCC-технология применяется и для производства аттенюаторов, интегрированных в керамику. Так, компания Anaren Ceramics выпускает серию LTCC-аттенюаторов на частоты до 18 ГГц и мощность до 0,125 Вт. Серия помещается в четыре корпуса с разной степенью «обернутости». Также используется несколько типов контактных площадок, в том числе золотые под разварку микропроволоками и на основе сплавов платина-золото и палладий-серебро для пайки и проводящего клея. Частотные характеристики серии представлены на рис. 11.

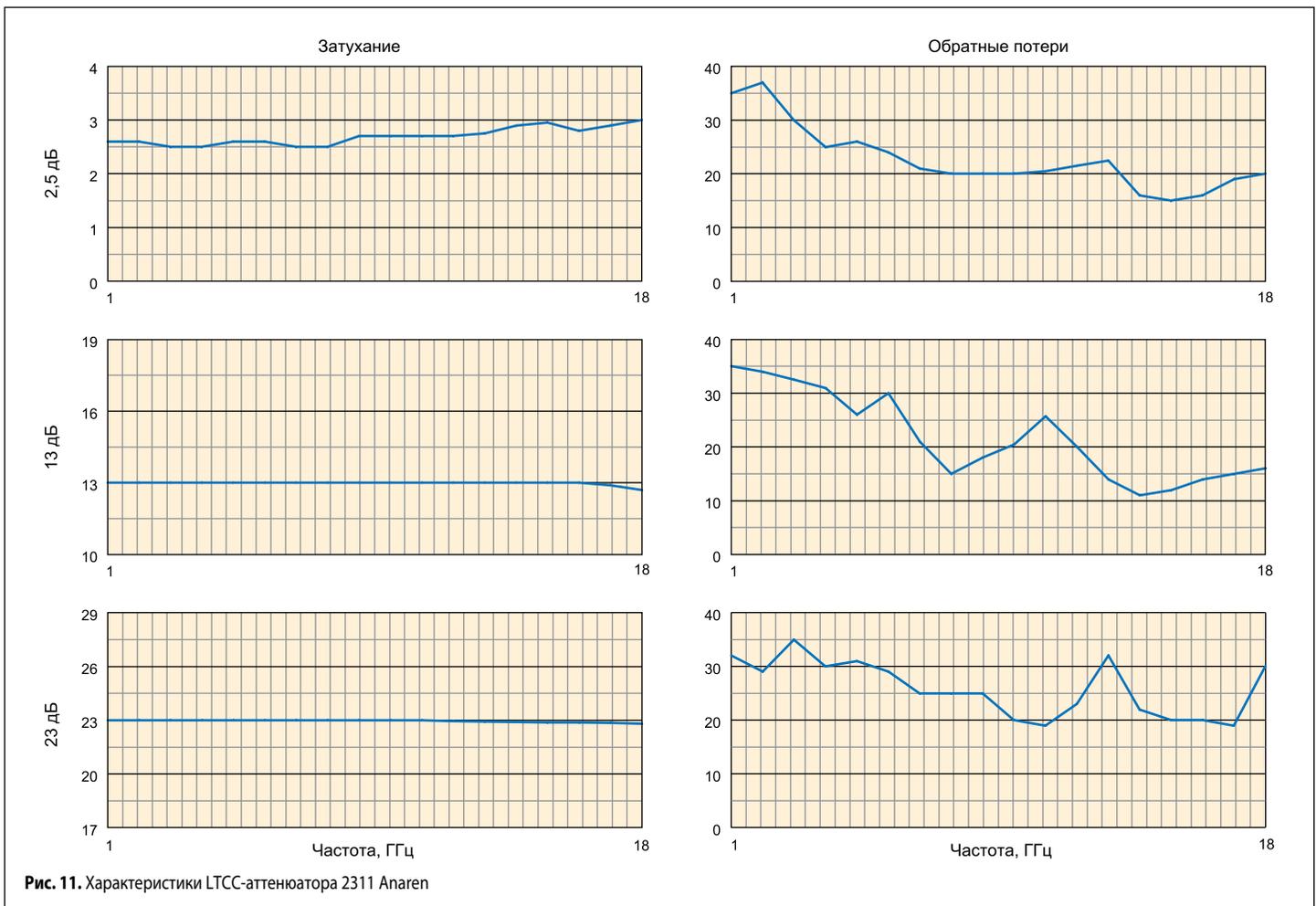


Рис. 11. Характеристики LTCC-аттенюатора 2311 Anaren



Рис. 12. Атеннуатор RCAT-серии

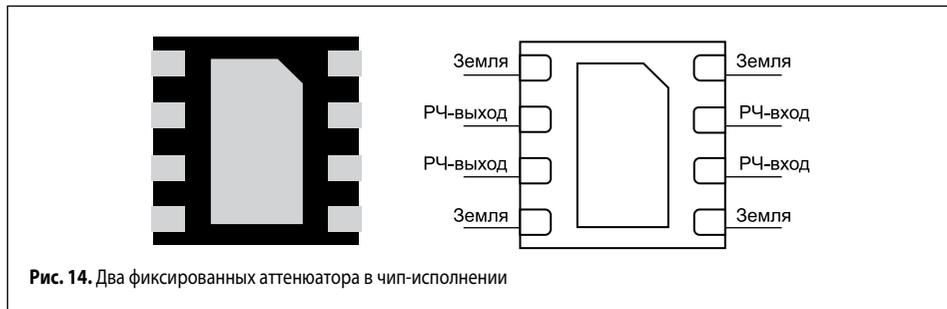


Рис. 14. Два фиксированных аттеннуатора в чип-исполнении

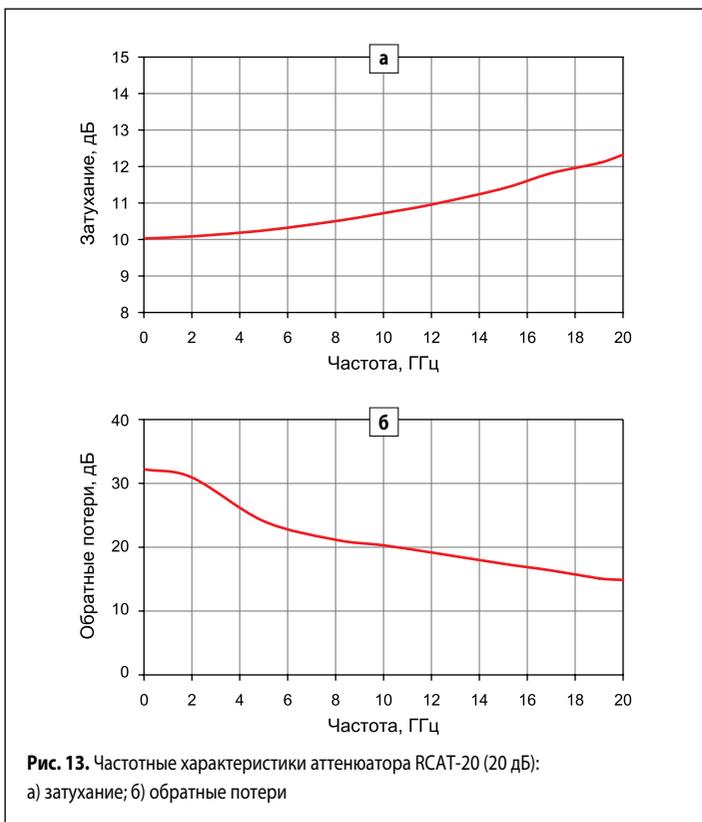


Рис. 13. Частотные характеристики аттеннуатора RCAT-20 (20 дБ): а) затухание; б) обратные потери

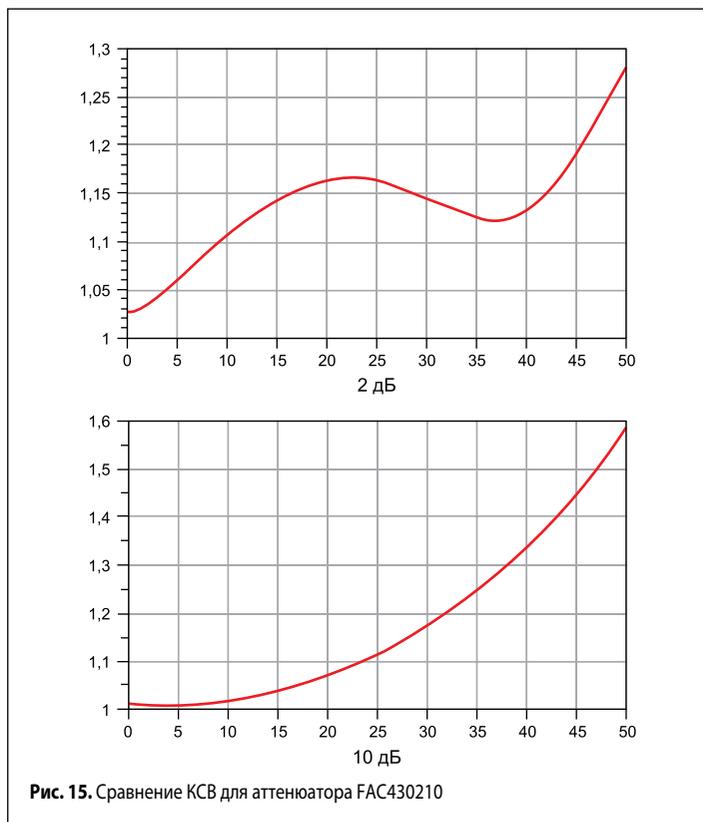


Рис. 15. Сравнение КСВ для аттеннуатора FAC430210

Максимальные размеры компонента 2,3×1,1 мм (2311 EIA). В руководстве по эксплуатации Anapen не указан постоянный цифробуквенный префикс названия серии аттеннуаторов, а только 16 переменных полей, каждое из которых может принимать различные значения в зависимости от параметров компонента [13].

Еще один продукт, созданный с помощью LTCC-технологии, представлен компанией Mini-Circuits. Это 2-Вт серия чип-аттеннуаторов RCAT — тонкопленочный ослабитель, в котором резистивный компонент образован в объеме керамики. Герметичное финишное покрытие аттеннуатора выполняется в азотной атмосфере. Контактные площадки золотые, покрыты серебряно-цинковым припоем. Частотный диапазон DC–20 ГГц. Стег ослаблений: 0–10, 12, 15, 20, 30 дБ. На рис. 12 представлен внешний вид аттеннуатора, а на рис. 13 — характеристики.

Размеры компонента 2,25×2,25×1,1 мм. В данных производителя не указано граничное значение температуры, при котором мощность перестает быть номинальной, но при этом отмечается, что на верхней границе температурного диапазона (–55...+125 °С) поглощаемая мощность равна 0,33 Вт.

Маломощные чип-аттеннуаторы с особенностями конструкции

Среди огромного количества маломощных чип-аттеннуаторов имеются модели, либо обладающие некоторыми специфическими особенностями, либо нечасто встречающиеся в производственных линейках компаний микроволновой отрасли. Рассмотрим некоторые из них.

Как уже отмечалось, возможности GaAs-технологии позволяют создавать и более сложные изделия. Так, компания Yantel (Китай) выпускает серию сдвоенных аттеннуаторов в чип (Die) исполнении. Серия запакована в 8-выводной корпус размером 2×2×0,75 мм (рис. 14).

В серии представлено девять изделий для диапазона 0–43,5 ГГц. Среди них есть чипы с ослабителями как одинакового, так и разного номинала. На следующем рисунке показано сравнение зависимости КСВ от частоты для чипа FAC430210, содержащего аттеннуаторы на 2 и 10 дБ (рис. 15).

Серия работает с мощностями сигнала до 2 Вт. Производителем заявлена область применения: 5G, измерения, радиолокация, связь, безопасность. Кроме уже представленного аттеннуатора в серию FAC входят ослабители со следующими парами номиналов: 1-2, 1-3, 1-4, 1-10, 2-4, 2-6, 2-8, 3-6, 7-7, 10-10, 12-12 дБ.

В производственной линейке компании Yantel есть еще один аттеннуатор, который относится к типу пассивных маломощных ослабителей для поверхностного монтажа. Его некоторая особенность состоит в том, что это переменный аттеннуатор с ручным дискретным управлением (серия VAD) и с ручным плавнопеременным управлением (серия VAC). Подобные конструкции встречаются нечасто, а потому посвящать им отдельный раздел



Рис. 16. DIP-корпуса серии VAD

не имеет смысла. В представлении производителя такой attenuator является заменой (видимо, на каком-то этапе разработки прототипа) цифрового attenuatora. Это связано с тем, что его легче закрепить и настроить. На рис. 16 показаны все виды корпусов серии VAD.

Как видно, в серии предусмотрены корпуса как с вертикальным, так и с боковым расположением движка, в том числе и с терминалами для поверхностного монтажа. Верхняя граничная частота для VAD составляет 2,5 ГГц, мощность — 0,125 Вт. Система настройки attenuatora позволяет задать шесть положений ослабления и рассчитана на 60 6-шаговых циклов регулировки (всего 360). Размеры корпуса 10×11×6 мм.

Серия VAC изготовлена по тонкопленочной технологии и поставляется только в DIP-корпусах (рис. 17).

Эта серия работает до 2 ГГц на мощностях до 1 Вт. Узел вращения позволяет регулировать ослабление в диапазоне 0–15 дБ и рассчитан на 500 циклов настройки. Размеры корпуса 9,5×10×5 мм.

На рис. 18 представлены зависимости ослабления и КСВ от частоты для двух произвольно выбранных attenuatorов серий VAD и VAC.

Еще один чип-attenuator с расширенными возможностями предлагает компания AVX (Кюсега). Эта фирма не входит в число флагманов по выпуску attenuatorов, но является признанным лидером на рынке немагнитных компонентов. Так, в ее производственной линейке имеется немагнитный чип-attenuator серии AT, форм-фактора 0603 (EIA), с золотыми контактными площадками (рис. 19).

Для реализации немагнитных свойств компонента производитель предлагает монтаж посредством проводящего эпоксидного клея. При этом конструкция корпуса полностью совместима с системами высокоскоростного автоматизированного монтажа. Attenuator имеет тонкопленочную конструкцию из нитрида тантала на подложке из нитрида алюминия и работает в диапазоне 0–20 ГГц. Набор ослаблений 0–10 дБ

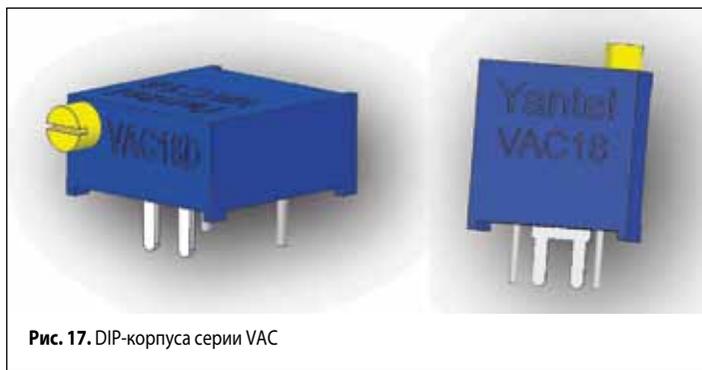


Рис. 17. DIP-корпуса серии VAC

через 1 дБ. Мощность 1 Вт при ослаблениях до 7 дБ и 0,75 Вт более 7 дБ. Типичный КСВ в полосе 1,25. Компонент рассчитан на установку в копланарные и микрополосковые линии передачи.

Завершая раздел о чип-attenuatorах для специальных применений, можно отметить изделие, которое производит фирма Aritech. Это низкотемпературный крио-чип-attenuator для применения в квантовых компьютерах и рассчитанный на работу при температуре от 4 °мК до +150 °С. Производятся две серии: ССААW — 18 ГГц и ССААF — 8 ГГц. Обе выполнены на подложке из нитрида алюминия и имеют одинаковые размеры 1,91×1,52×0,25 мм. и набор ослаблений 0–20 дБ. Более высокочастотная серия имеет мощность до 4 Вт и КСВ не хуже 1,5, менее высокочастотная соответственно до 5 Вт и КСВ 1,35. Также серии имеют несколько различающийся дизайн контактных площадок («обернутости»).

В таблице 2 приведены некоторые фирмы, производящие маломощные чип-attenuatorы.

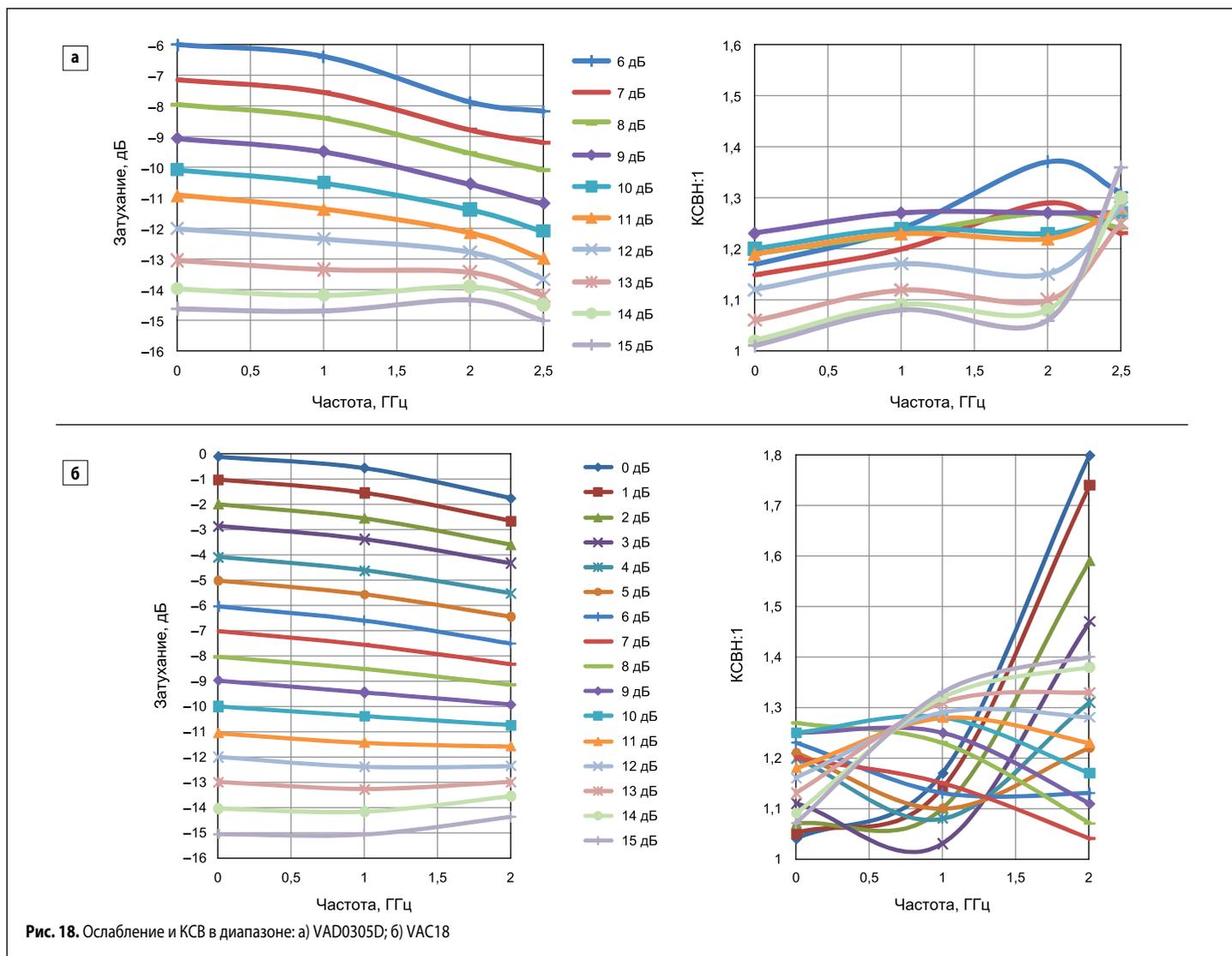


Рис. 18. Ослабление и КСВ в диапазоне: а) VAD0305D; б) VAC18

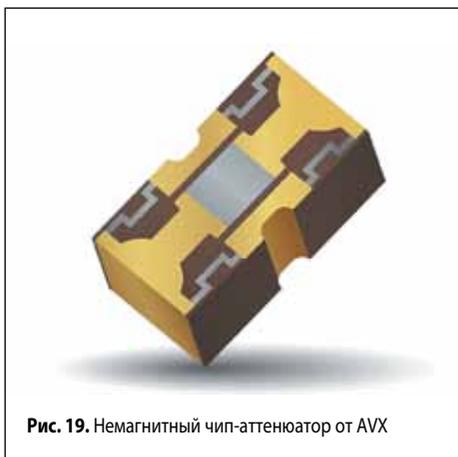


Рис. 19. Немагнитный чип-аттенуатор от AVX

Таблица 2. Маломощные чип-аттенуаторы (до 2 Вт)

Фирма	Модель/Серия	Рабочая частота, ГГц	Ослабления, дБ	КСВ, не хуже	P _{вх} , Вт	Размеры, мм
Hittite (Analog Devices)	HMC65x	DC-50	0,15; 2; 3; 4; 6; 10; 15; 20	1,36	0,3	0,42×0,45×0,1
TriQuint (Qorvo)	TGL4201	DC-40	0; 2; 3; 6; 10	1,36	0,1	0,5×0,5×0,1
Alpha Ind.	ATN3580	DC-40	1-10; 12; 15; 20; 30; 40	1,35	1	0,71×0,76×0,25
Susumu	ATS	DC-30	0-10	-	0,1	2×1,2×0,4
Yantel	FAC26xx	DC-26,5	1; 2; 3; 6; 10	1,4	0,2	1,52×1,9×0,28
Piconics	T124	DC-20	1-20	2	1	3,8×3,05
SemiGen	SFAP	DC-20	0-30	1,3	2	0,75×0,75
Mini-Systems Inc.	MSAT-5, MSAT-6, MSAT-7	DC-20	1-24	1,5	2	3,8×3,1×0,64
Bowei	BFAxxMA	DC-18	0,15; 1-10; 15,2	1,35	0,1	1,91×1,52×0,3
Richardson Electronics	PCA	12,4	1-20	1,5	1,5	3,8×3,2
SV Microwave	FA865	DC-4,2	1-10; 12; 15; 20; 22; 25	1,25	1	3,8×3,8
Metuchen Capacitors Inc.	RAC10 IA	DC-3	0,5-20	1,3	0,1	1×1×0,35

Мощные чип-аттенуаторы

Надо сразу отметить, что у производителей чип- и СМД-чипослабителей небольшой выбор способов увеличения мощности своих изделий. Речь, прежде всего, идет о постоянной мощности рассеяния (CW). Попробуем перечислить эти способы.

- Применение более теплопроводной подложки. Наглядный пример этого видим в производственной линейке компании Yantel. Так, ее серия 6-ГГц толстопленочных аттенуаторов FAC06 выпускается на трех подложках. При этом при изготовлении компонента на подложке из оксида алюминия (Al₂O₃ — Alumina) он рассеивает мощность 2 Вт. Напомним, что теплопроводность оксида алюминия — 36 Вт/м·К. Этот же аттенуатор, выполненный на подложке из нитрида алюминия (AlN) или оксида бериллия (BeO), рассеивает уже 5 Вт. Соответствующие значения теплопроводности для нитрида алюминия 170–190 Вт/м·К и для оксида бериллия 210–260 Вт/м·К.
- Размер кристалла. Опять обращаемся к изделиям Yantel. Тонкопленочная серия FAC18 (18 ГГц) с золотыми контактными площадками и обернутым (wrap) «земляным» терминалом рассеивает 0,2 Вт при размере кристалла 1,52×1,9×0,41 мм. Эта же серия, но с размером кристалла 3,1×3,68×0,41 мм рассеивает уже 2 Вт. Отметим, что толщина кристалла в обеих конфигурациях одинакова — 0,41 мм.
- Форма контактных площадок. Точнее степень «обернутости». В качестве примера уже приводилось сравнение двух арсенид-галлиевых аттенуаторов от фирм Endwave (EVA65) и Mini-Circuits (KAT-D). При практически одинаковой площади кристалла они имеют почти десятикратное отличие в поглощаемой мощности. При этом второй от первого отличается наличием полнообернутого «земляного» терминала. Еще раз надо подчеркнуть, что не все десять крат, конечно же, обеспечиваются формой контактной площадки.
- Тип и химический состав резистивного вещества. Понятно, что толстопленочные и тонкопленочные поглотители будут иметь разные возможности по утилизации мощности, так же как и, впрочем, химически разные резистивные составы. Обзор большого массива информации на эту тему показывает, что в документации производителей чаще всего встречаются два типа резистивного вещества. Это нитрид тантала и еще один «резистор» с названием «проприетарный». Понятно, что речь идет о веществе, формулу которого производитель не разглашает. Также понятно, что к параметрам, составляющим коммерческую тайну, относятся и особенности вещества, позволяющие рассеивать большую мощность.
- Агрегирование чип-аттенуатора с теплоотводящими элементами в виде фланцев или подобных им конструкций. Происходящее при этом увеличение габаритов аттенуаторов, однозначно связанное с повышением теплоотвода, приводит к значительному снижению верхней граничной частоты работы аттенуатора. Одна из основных причин такого снижения — возрастание паразитной емкости резистивного элемента на «землю». Большинство современных мощных чип-аттенуаторов производится на подложках из оксида бериллия или нитрида алюминия. Поэтому частотные характеристики приборов, связанные с указанной емкостью, определяются диэлектрическими константами соответствующих керамик (BeO — 6,7, AlN — 9).

Повышение верхней граничной частоты и мощности аттенуатора возможно при использовании подложки из химического алмаза, имеющего в разы большую теплопроводность (1000–1600 Вт/м·К) и при этом меньшую диэлектрическую проницаемость (5,6). Единственной на данный момент фирмой, серийно производящей такие аттенуаторы, является EMC Technology RF Labs со своей серией CA0505D [15], в которой имеются корпуса типа «чип», «чип с выводами» и «чип, закрепленный на фланце».

Если продолжить перечисление топовых моделей аттенуаторов, при том что верхнюю позицию по частоте займет CA0505D от EMC (26,5 ГГц), самые выдающиеся параметры по мощности имеет фланцевая модель 2018 года от Barry Industries — A3000-1000-1X, рассчитанная на входную мощность до 1000 Вт. Справедливости ради необходимо отметить, что в линейке Barry имеются модели до 3000 Вт, но на малые величины ослаблений (не более 2 дБ) и на частоты до 2 ГГц. При этом A3000-1000 работает в частотном диапазоне до 4,3 ГГц и имеет ослабление 30 дБ. Это толстопленочный аттенуатор на подложке из оксида бериллия, имеющий соответствующий своей мощности дизайн (рис. 20).

При работе СВЧ-устройств, имеющих в своем составе мощные аттенуаторы, приходится учитывать зависимость ослабления от частоты. Детальный анализ этой зависимости приведен в руководстве от компании Barry Industries [14]. Начать надо с того, что само значение номинала поглощающего резистора, настраиваемого посредством лазерного триммирования, измеряется на постоянном токе и может отличаться от значения при поглощении микроволновой мощности. Более того, у аттенуаторов П-схемы при увеличении ослабления происходит изменение (в процентном соотношении) между мощностью, поглощаемой последовательным резистором (она уменьшается), и мощностью, поглощаемой входным шунтирующим резистором (она увеличивается). Все это приводит к тому, что у графиков зависимости ослабления от частоты будет разный наклон для разных ослаблений (рис. 21).

Еще одна проблема мощных фланцевых и выводных аттенуаторов — контроль температуры изделия. Для работоспособности и вре-

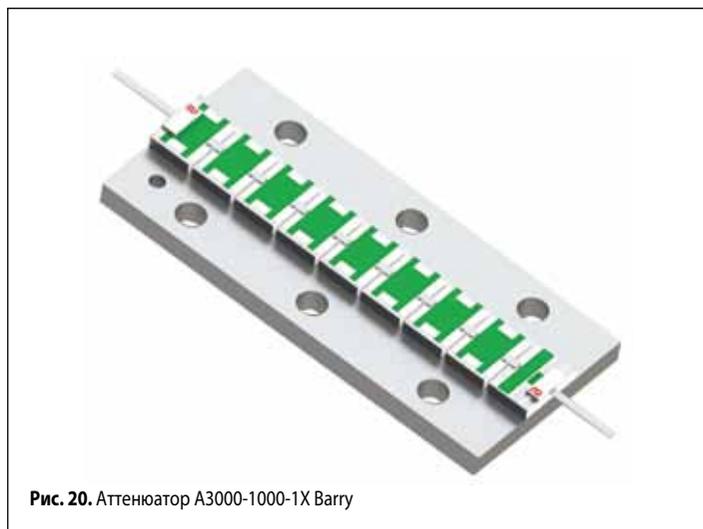


Рис. 20. Аттенуатор A3000-1000-1X Barry

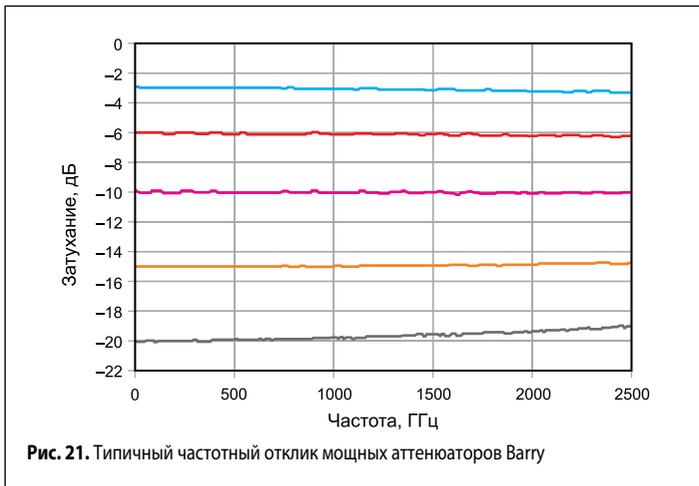


Рис. 21. Типичный частотный отклик мощных аттенуаторов Varu

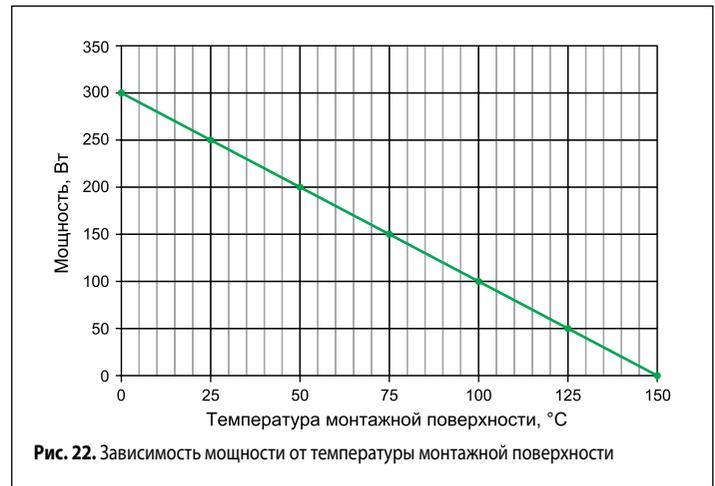


Рис. 22. Зависимость мощности от температуры монтажной поверхности

мени жизни аттенуатора важна температура резистивного элемента, в то время как методы контроля в основном ориентированы на температуру монтажной поверхности. В технической документации некоторых компаний, производящих аттенуаторы (например, American Technical Ceramics (ATC), AVX), встречается график зависимости утилизируемой мощности от температуры монтажной поверхности, построенный с учетом температуры резистивного элемента [15]. График стал итогом работы по исследованию 20- и 30-дБ аттенуаторов при отсутствии искусственной вентиляции. Мощный фланцевый аттенуатор закреплялся на массивном медном основании, служившем термостатом, который фиксировался на определенной температуре. Далее через закрепленный аттенуатор пропусклась мощность, которая возрастала до тех пор, пока температура резистивного элемента не достигала предельной в +150 °С. После этого мощность фиксировалась и удерживалась 100 ч. Критерием качества аттенуатора считалось изменение ослабления в течение этого цикла не более чем на 0,2 дБ (рис. 22).

По результатам серии исследований был создан график, который сделан в предположении одномерного распространения температуры при нагревании прибора. Формула этого процесса следующая:

$$T = T_M + (P \times R),$$

где T — усредненная по площади температура резистивной пленки (максимум +150 °С); T_M — температура монтажной поверхности, которая считается изотермой; R — термическое сопротивление между монтажной поверхностью и резистивной пленкой ~0,5 °С/Вт; P — мощность, Вт.

Например, если зафиксировать температуру медного термостата на 0 °С, то нагрев резистивной пленки аттенуатора до +150 °С произойдет при поглощении 300 Вт мощности. Впрочем, в сообщении утверждается, что экспериментальная проверка аналитического выражения производилась только в одной точке: +100 °С и 100 Вт.

Ну и наконец, еще одно, присущее мощным аттенуаторам явление — пассивная интермодуляция. Более подробно о причинах и способах противодействия в разделе об аттенуаторах с коаксиальным соединителем. Здесь отметим только, что среди мощных чип-аттенуаторов существуют модели с пониженным уровнем пассивной интермодуляции (LowPIM). Так, фирма EMC Technology производит изделие 33P7024F во фланцевом исполнении. Это тонкопленочный

ослабитель на подложке из нитрида алюминия, рассчитанный на диапазон DC–2,7 ГГц и мощность до 100 Вт. Ряд ослаблений 1–20, 30 дБ, наихудший КСВ — 1,3. Максимальное значение пассивной интермодуляции на уровне 108 дБн. Получено двухчастотным методом 2×43 дБм в диапазоне 1,9 ГГц. О том, какими средствами достигается подавление пассивной интермодуляции, производитель не сообщает.

В таблице 3 приведены некоторые производители мощных чип-аттенуаторов и их продукция.

Литература

1. www.microwaves101.com/encyclopedias/attenuators
2. www.niv.ru/doc/encyclopedia/bse/f/c/slovar-192-102.htm#zag-6077
3. www.epanorama.net/blog/2017/08/05/dc-4-0ghz-rf-fixed-attenuator/
4. Шишков Г. И. Широкополосные ступенчатые аттенуаторы // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. 2011. № 2 (87).
5. Микран. MP109D, V01.0005.
6. Горбачев В., Кочемасов В. Резисторы — основные типы и характеристики. Части 1–4 // Электроника НТБ. 2021. № 5–8.
7. Савченко Е. М., Гладких М. В., Першин А. Д., Пронин А. А. Результаты проектирования и исследования СВЧ МИС-аттенуаторов с фиксированным коэффициентом ослабления. Материалы Международной научно-технической конференции, 1–5 декабря 2014. М.: МИРЭА, 2014.
8. Савченко Е. М., Гладких М. В., Першин А. Д., Пронин А. А. Пассивные СВЧ-аттенуаторы фиксированного номинала на основе кремния и арсенида галлия. Материалы Международной научно-технической конференции, 2–6 декабря 2013, ОАО «НПП “Пульсар”», Москва.
9. www.mmhc.nipp.ru/datasheet/MP503.pdf
10. Кочемасов В., Белов Л. Фиксированные аттенуаторы: производители и характеристики. Часть 1 // Электроника НТБ. 2017. № 6.
11. www.minicircuits.com/pdfs/KAT-10-D+.pdf
12. www.minicircuits.com/app/AN70-033.pdf
13. Ceramics Design Guide. Anaren. www.application-notes.digchip.com/291/291-49478.pdf
14. High Power Attenuator Performance Over Frequency. www.barryind.com/pdf/Attenuator_Performance_Over_Frequency.pdf
15. High Power Resistive Products. www.rfs.kyocera-avx.com/userFiles/uploads/products/attenuators/pdfs/resistive_products.pdf

Таблица 3. Мощные чип-аттенуаторы (свыше 2 Вт)

Фирма	Модель/Серия	Рабочая частота, ГГц	Ослабления, дБ	КСВ, не хуже	P _в , Вт	Размеры чипа, мм	Примечание
Yantel	FAC06xx	DC–6	1, 2, 3, 6, 10	1,3	5	3,1×3,68×0,41	Чип
Triangle Corp.	PPA-20xx	DC–4	1–20	1,5	20	13,8×6,35×4	Размеры с полуфланцем
Barry	H05Z-3000J99-00C36-x	DC–3	30	1,35	40	5,85×8,8×1,026	Выводной
RF Techniques	2ZZ40xxx	DC–2	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 14, 20, 30	1,35	40	6,35×6,36×2,24	Температурный диапазон до +250 °С
Inmet/ Anatech	PPA50	DC–1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 20, 30	–	50	24,8×9,52×4,32	Размеры с фланцем
Johanson	AF100B03004	DC–3,5	30	1,25	100	12,8×20,3×3,5	Фланцевый
Innovative Power Products	IPP-AB206-20	DC–2,5	20	1,25	100	5,71×8,89	Фланцевый
AVX	FA10975P-xxDBFBK	DC–3	1, 2, 3, 6, 9, 10, 17, 20, 30	1,55	150	10,16×9,53×5,76	Фланцевый
ATC	LA1	DC–3	1, 2, 3, 6, 9, 10, 17, 20, 30	1,55	150	10,16×9,53×2,03	Выводной