

S.Grigo (<https://www.grigo-shf.de>):

"Опыт и результаты при разработке электронно-управляемого СВЧ-аттенюатора рефлекторного типа"

1. Введение

СВЧ-аттенюаторы рефлекторного типа (рис.1) редко находим в литературе. Это не удивляет, думая о том, что нужны 3дб-ответвитель с хорошей изоляцией (на порте 4) и синхронно регулируемое согласование на портах 2 и 3 (от открытого входа до отличного согласования). (Хотим достичь, примерно, затухание 20дб, то нужно, по крайней мере, такое же согласование на этих портах и недостатки ответвителя ещё ухудшают ситуацию.) Электронное регулируемое согласование можно достичь с помощью диодов переключающего типа (PIN-Diode) с растяжной характеристикой СВЧ-сопротивления (R_s) в диапазоне от ∞ до 50ом. В таких диодах сегодня проблемы нет, а во всём другом да.

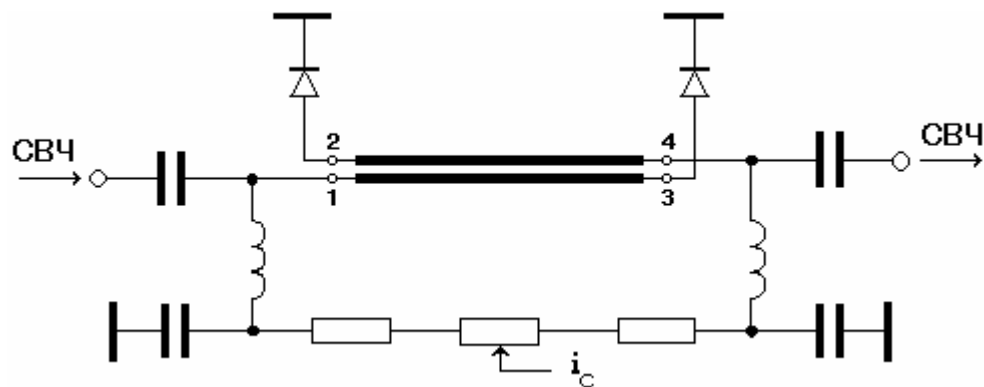


Рис.1

Факт малого места, которое этот аттенюатор для себя требует, делает его очень интересным для всякого пользования в микроминиатюризации приборов СВЧ, особенно в монтажно-ИС-технике (Chip and Wire Technique). Кроме того, он "обещает" низкое "нулевое" затухание. И есть ещё преимущество в том, что характеристика управления аттенюатора относительно прямолинейная (см. рис.6).

Можно назвать два примера из техники радиорелейных станций (PPC): для регулировки маломощного входного усилителя (LNA) (см. Пр.1 в дополнении) и для стабилизации по температуре выходной мощности гетеродина (примерно на выходе кварцевого-стабилизированного генератора с диэлектрическим резонатором (DRVCO) (см. Пр. 2).

Узлы PPC должны быть широкополосные, ведь хотят производить их сразу для целых "семи" PPC, но актуальное пользование будет узкополосное (только для тех каналов конкретной станции). Этот факт упрощает задачу. Свойство, что тот аттенюатор меняет направление регулировки, если превышает ток управления (i_c) величину, соответствующую 50ом, не смущает нас. При современной электронике легко ограничить величины i_c .

2. Рассматривание свойств аттенюатора и проблем допустимых разбросов

Простые оценки [1] показали, что цель, достичь максимального затухания 25дб, реальна при условиях, что меры коррекций предусматриваются. Это достаточно для

выше названных примеров.

Чтобы получить широкополосный узел (цель при представленном аттенуаторе была полоса частоты 5.6 .. 8.5 ГГц), стоит для выбора только ответвитель встречно-штыревого типа ("Lange-Coupler"). Но изоляция этого ответвителя, как у всех на основе связанных линий, реагирует чувствительно на отлучения фазовой скорости волн типа even и odd. Знакомо, что при ответвителях из простых связанных линий этот эффект можно компенсировать с помощью малых ёмкостей между портами 1-2 и 3-4. Эта возможность, как показали расчёты САПР [2], тоже есть при Lange-Coupler (см. рис.2).

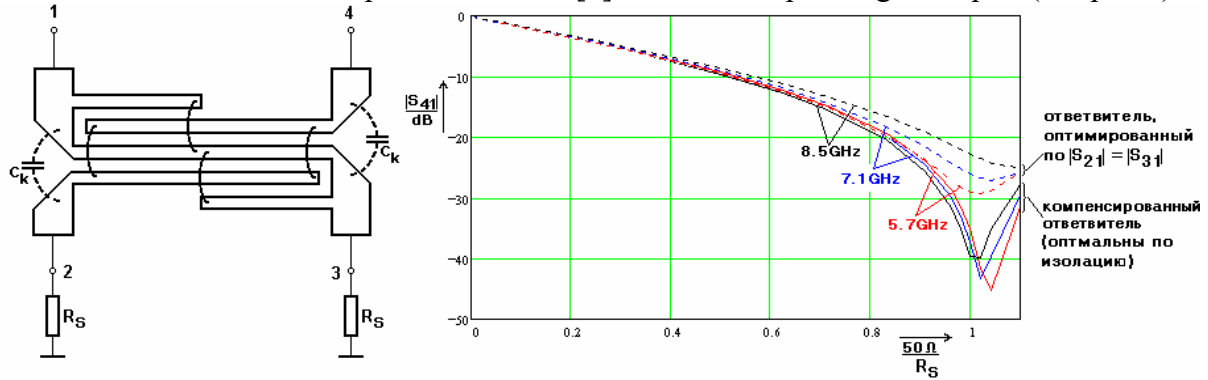


Рис.2

Но тот эффект не можно точно рассчитать, потому что не возможно предусматривать действие проводников микросварки (Bondig Wire). Экспериментальные проверки тут необходимы. По мнению автора, форма присоединения, что показана на рис.4 лучше, потому, что там уже действует маленькая коригирующая ёмкость. (Такая модель Lange-Coupler предусмотрена в САПР [3]. Этой системой получили в практике быстро хороший ответвитель.) А можно даже специально предусматривать элементы для компенсации (см. Пр.4 в дополнении). Вообще надо сказать: размеры ответвителя, оптимизированные на максимальной изоляции в середине частотной полосы (макс. $|S_{41}|$) отличаются от тех, которые оптимизированы на равных связях ($|S_{21}| = |S_{31}|$). Верхняя граница кривой **В** (рис.3) подкрепляет наше мнение, что цель, достичь максимального затухания 25дб по полосы частоты, реальна.

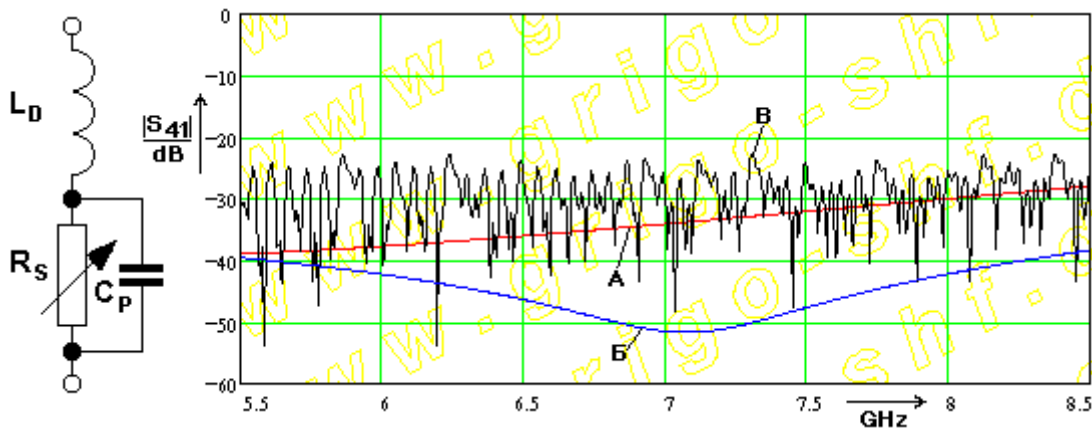


Рис.3

Выбранный PIN-диод имеет (по каталогу) ёмкость $C_p = 0.07$ пФ. Вместе с проводником микросварки ($L_D = 0.2 .. 0.3$ нГн) получаем максимальное затухание только около 22дб. Значит, надо согласовать индуктивность проводника. Это состояние будем в дальнейшем называть "оптимальный диод". (Если интересно: на Пр. 3 показан, как

пример, ход импеданса хорошо компенсированного диода, зависимость от i_c .)

Рис.3 показывает максимальные величины $|S_{41}|$ на полосе частоты. Кривая **A** при оптимальном по связи ответвителе (цель оптимизации: $|S_{21}| = |S_{31}|$), **B** при компенсированном ответвителе на максимальную изоляцию в середине полосы, а кривая **B** выражает результаты при отклонении точности травления схемы на $\Delta w = -\Delta s = \pm 5 \mu\text{мкм}$, отклонение оптимальной индуктивности $\Delta L_D = \pm 0.1 \text{нГн}$ и $\Delta C_p = \pm 0.1 \text{пф}$. (Расчёты были проведены системой [2]. Для 25mil- Al_2O_3 - подложки требуется для ответвителя примерно ширина "пальцев" $w = 50 \mu\text{мкм}$ и щелей $s = 48 \mu\text{мкм}$.) "Случайность" отклонения изображаем, считая по очень малым шагам частоты (f) и "модулируем" параметры w , s , C_p и L_D через полосы отклонения с разными периодами.

3. Реальный пример

Рис.4 показывает выбранную схему:

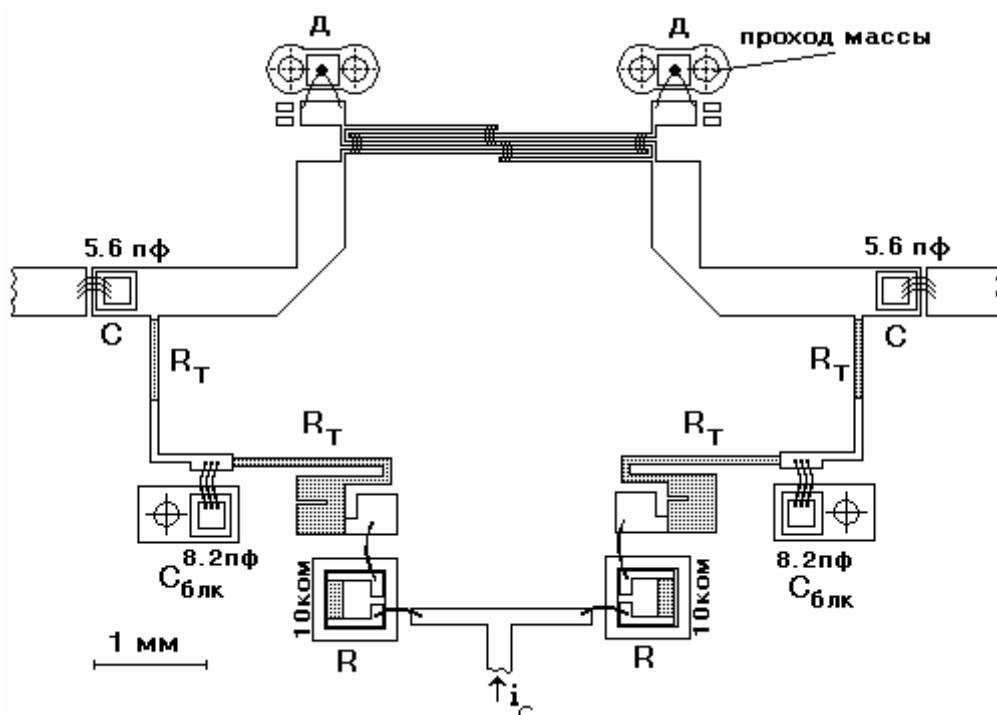


Рис.4

Каждый из двух PIN-диодов (**Д**) соединён с ответвителем двумя проводниками (17.5мкм золото). Диаметр и длина проводников должны быть экспериментально испытаны. Настраивать конкретный диод можно так, что двигают проводники больше или меньше близко друг к другу или соединяют добавочные ёмкостные площадки. Как видно, пользуются конденсаторы и сопротивления как ИС-элементы, которые с помощью проводящего клея укреплены на схеме. Диоды и блок-конденсаторы ($C_{\text{блк}}$) наклеенные на площадки, соединёны с массой через металлизированные отверстия. Сопротивление к каждому диоду [ИС- (R) + тонкослойные сопротивления (R_T)] соответствует 12ком. Это нужно, чтобы каждый диод был независимый от другого со своей U - I -характеристикой.

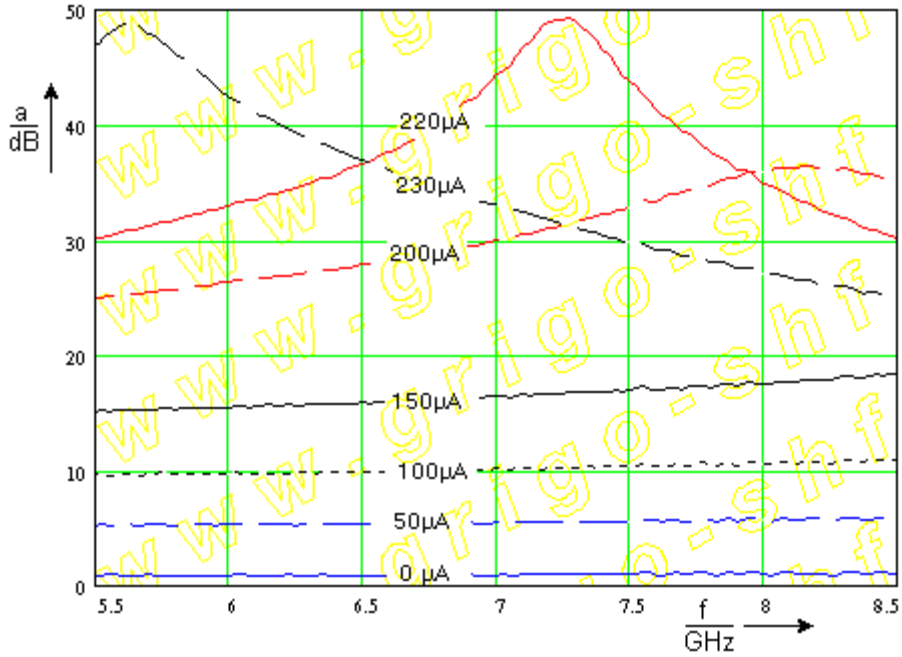


Рис.5

Рис.5 показывает результаты, полученные в практике. При хорошей компенсации (коррекции) диодов получаем ясный максимум затухания (a), достаточно выше 25дб, который при повышении тока движется от высоких до низких частот. Рис.6 показывает характеристики управления при трёх частотах зависящие от напряжения u_c . Потому что i_c очень низкий ($<1\text{mA}$) и сопротивление высокое, можно говорить об управлении и по току (i_c) или и по напряжению (u_c), как нужно. (Только при u_c , кривые не начинаются при нуле, а при "открывающем" напряжении диода.) "Нулевое" затухание у всех испытанных экземпляров лежит между 1 .. 1.2 дб. К вопросу симметрирования, как это предусматривается с помощью потенциометра на Рис.1, надо сказать, что таким образом прежде всего улучшается согласование (S_{11}). Если требуются величины согласования как -20дб или лучше, то это нужно. Нам были -15дб достаточно и могли выпускать потенциометр.

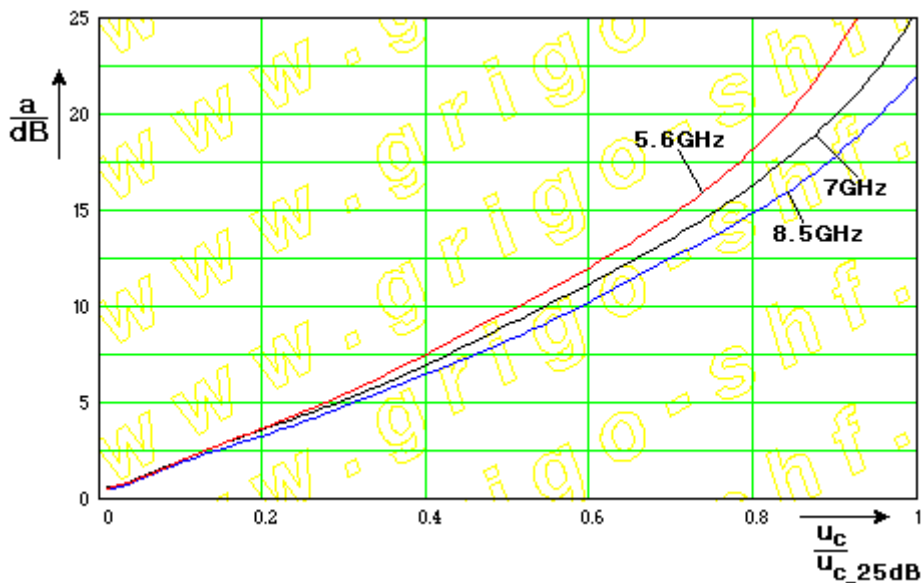


Рис.6

характеристики управления при разных частотах

4. Свойства в температуре

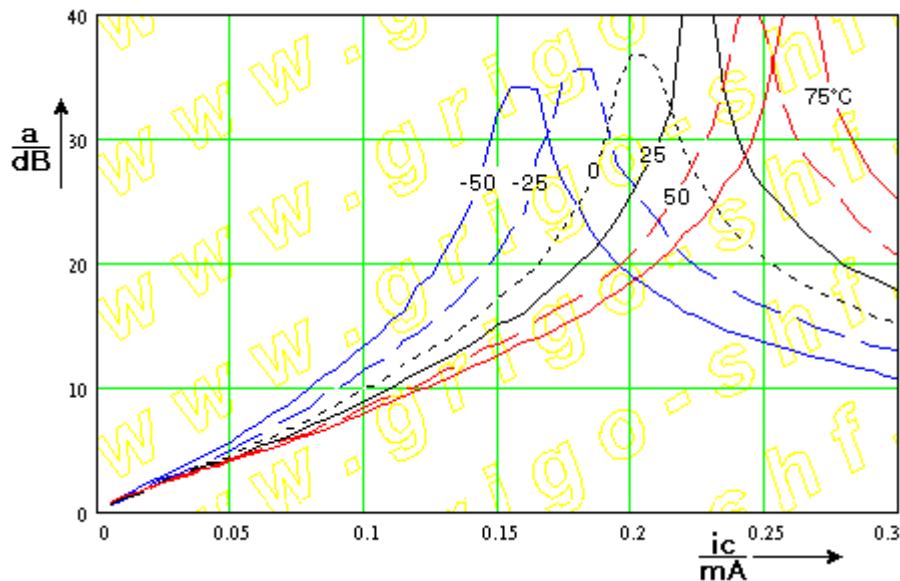


Рис.7

Интересны для практического пользования, конечно, свойства аттенюатора в температуре. Рис.7 показывает характеристики управления в диапазоне температуры $\vartheta = -50 \dots +75^\circ\text{C}$ при средне полосы частоты. (Негладкости кривых resultируются из образа их измерения: с помощью спектруманализатора с разрешающей способностью 10дб/см, автоматически управляемым компьютером.)

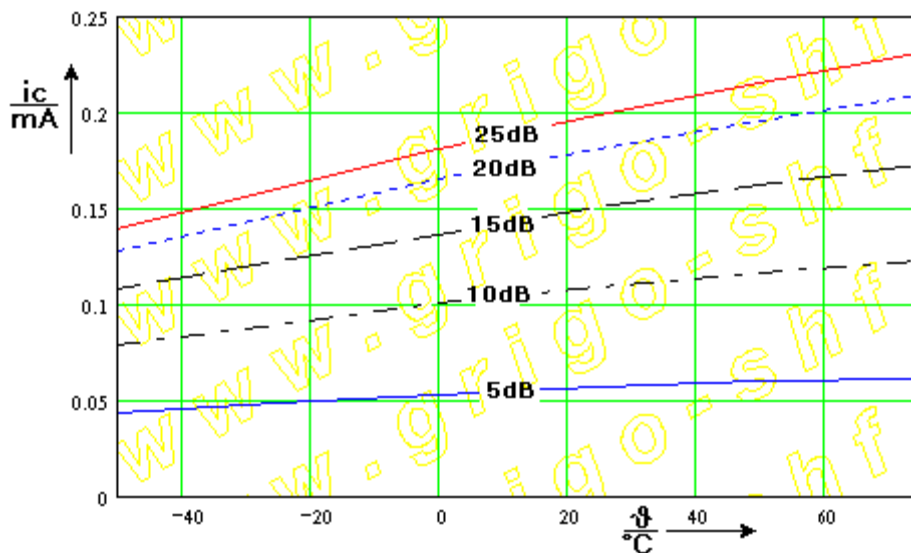


Рис.8

Если наложим "разрезы" на эти диаграммы и изображаем зависимость определенного затухания от температуры (рис.8), то видно, что линейная компенсация, наверное, достаточна. Надо заметить, что температурный ход ведёт себя наоборот, в сравнении с усилителем. (У усилителя понижается усиление при повышении температуры, тут затухание падает [при постоянном токе], значит "усиление" растёт.)

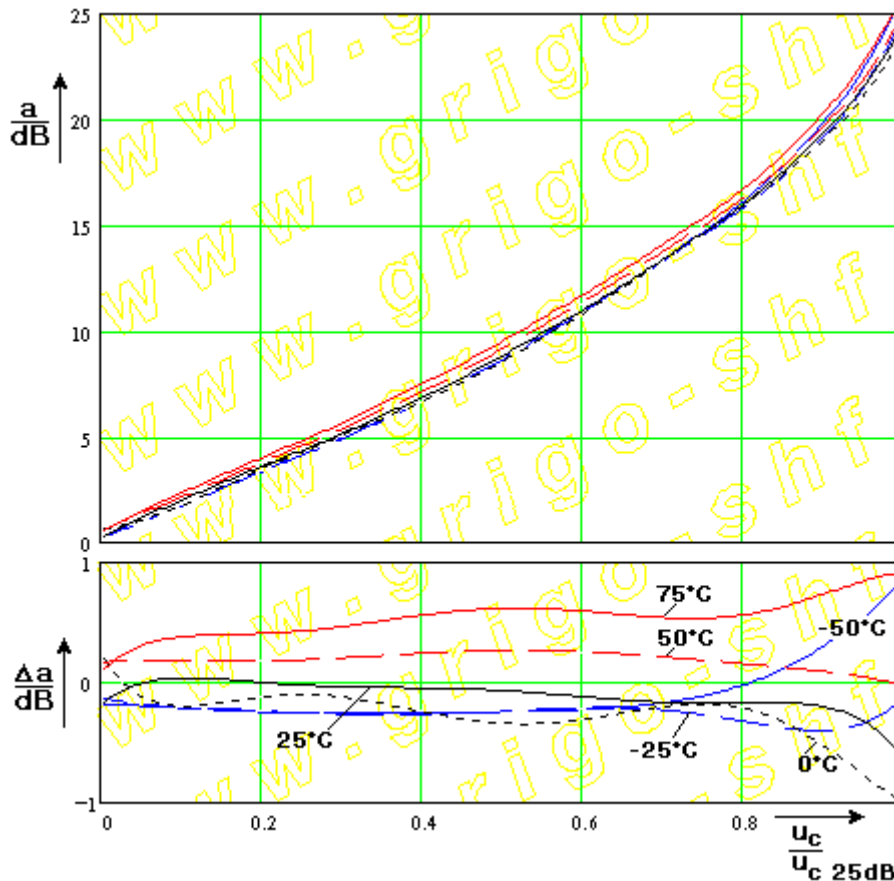


Рис.9

рассчитанные характеристики (на основе тех на рис.7), компенсированного аттенюатора в диапазоне температуры $-50 \dots +75^\circ\text{C}$ ($V_1 = 0.00415/^\circ\text{C}$)

Теоретически проводится компенсация по формуле

$$i_c = \text{фкт}(u_c, \vartheta) = (V_1 \cdot \vartheta + 1) \cdot V_0 \cdot u_c$$

При этом: u_c = входное напряжение преобразователя ток/напряжение, V_1 , V_0 = константы. Рис.9 показывает результат такой компенсации. (С современными операционными усилителями + измерительным элементом температуры такую задачу не трудно решать.) В практике можно получить этим путём точность характеристики управления $\pm 1.5\text{дб}$ до затухания 20дб в диапазоне температуры $-40 \dots +65^\circ\text{C}$.

5. Максимальная входная мощность

Максимальная входная мощность ($P_{\text{вх}}$) аттенюатора зависит от максимально разрешенной рабочей температуры диодов, т.е. также от термического сопротивления диодов и проводящего клея, но и от максимально допустимого напряжения. Интересные в этой статье диоды предусмотрены примерно для максимальной мощности рассеяния 250 мВт и максимального напряжения $40 \dots 150\text{В}$. Рис.10 показывает распределение СВЧ-мощностей ($P_{\text{д}}$) и –напряжения ($U_{\text{д}}$) на диоды на портах 2 и 3. Быстро можно расценить, что напряжение не будет критерием для максимально разрешенной $P_{\text{вх}}$. При минимальном затухании на каждом диоде наложены около $50\% P_{\text{вх}}$. Отличия зависят от расширения "глаза" связи (между кривыми S_{21} и S_{31}).

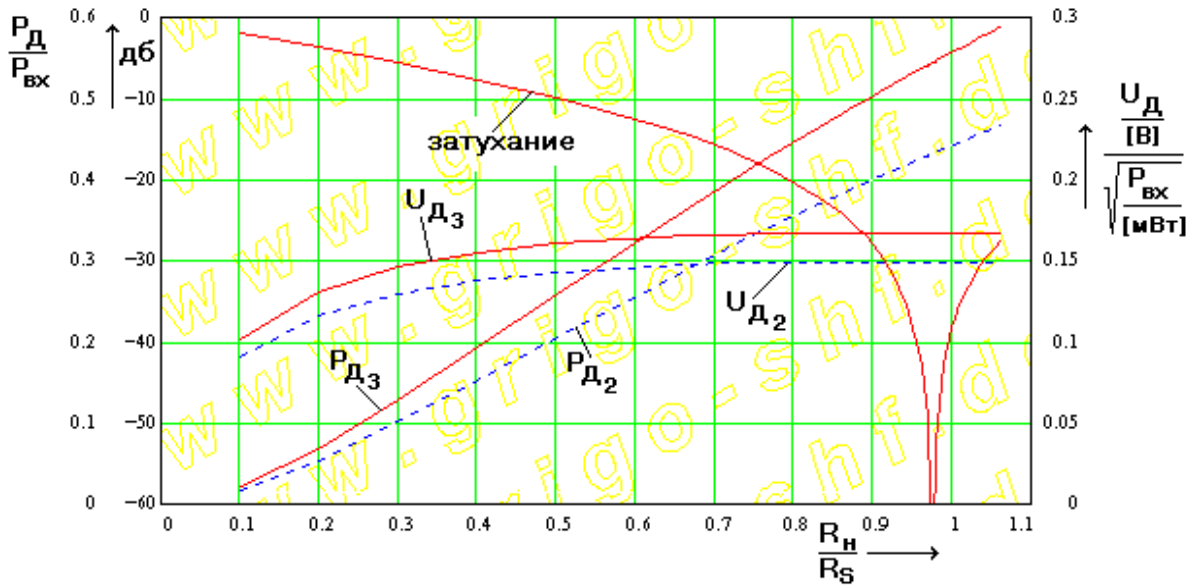


Рис.10

Затухание, СВЧ-мощности и -напряжения на диодах зависят от нормированного на 50ом сопротивления диодов (R_s) при средней частоте и оптимально согласованных диодов

6. Резюме

В статье информируют об опыте, проблемах и результатах при разработке СВЧ-аттенюатора рефлекторного типа. Его преимущества в миниатюрности и относительно прямолинейности характеристики управления. Если по каким-то причинам предусмотрены пользование качественной подложки, как Al_2O_3 -керамика, и контурная высокоточность, то, если аттенюатор нужен и если другие условия выполнены (частота ниже 10 ГГц, максимально затребованное затухание < 25 дб и мощность ниже 100мВт), могу только рекомендовать этот тип. Но можно и представить его как отдельная гибридная ИС в пригодном корпусе, интегрированная в более грубые микрополосовых схемах. Размеры такого ИС зависли бы, прежде всего, от частоты. Для диапазона, как в этой статье, могли быть они 15 x 10 мм.

Но надо напоминать о том, что хорошие результаты достигаются только путём согласования PIN-диодов.

Показано, что можно в пути линейной температурной компенсации тока управления, поразместимой в усилителе управления, достичь повторимости характеристики на ± 1.5 дб в диапазоне температуры $-50 \dots +75^\circ C$.

В конце, на основе достигнутого опыта, хочу предложить более элегантный Layout аттенюатора, где предусмотрены больше возможностей согласования диодов (см. Пр.4).

7. Ссылки

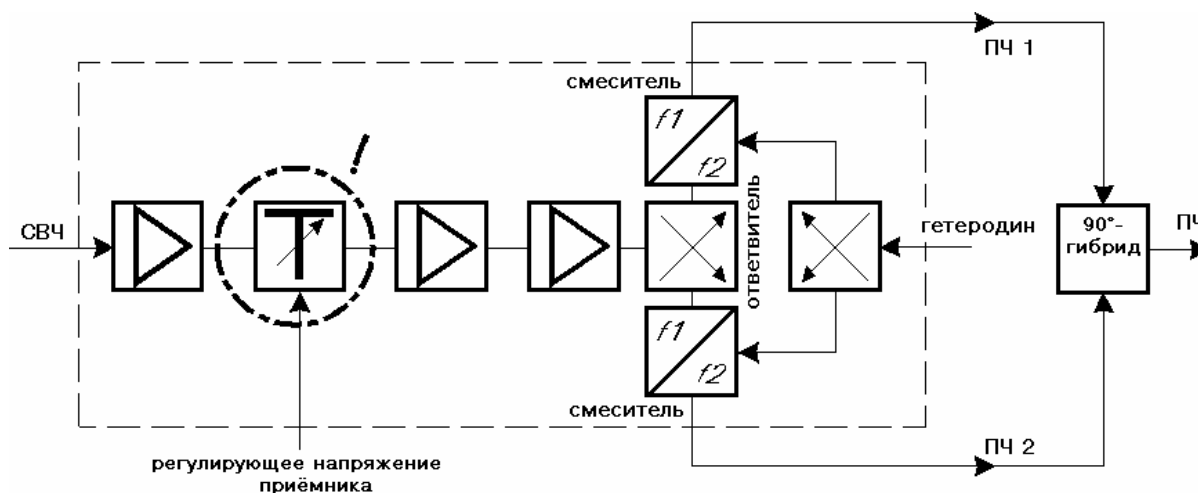
- [1] <https://www.grigo-shf.de>: предложения - учебный пакет "фильтры СВЧ" - "Рассмотрения на эквивалентную схему $\lambda/4$ -отрезки связанных линии" (http://www.grigo-shf.de/ПАКЕТ_FR.ZIP файл "L4Modell.html")
- [2] САПР "ММІСAD" версия 1.12, фирмы Optotec
- [3] САПР "Harmonica" версия 5.0, фирмы Supercompact

8. Приложение

Пр. 1: Регулирование входного узла РРС

В случае, когда хотим получить приёмник для РРС с малой взаимной модуляцией до относительно высоких входных сигналов, то надо управлять уже близко у входа, значит в маломощном входном усилителе (LNA). Пр.1 показывает блок-схему приёмника (трёхступенчатый усилитель, после первого каскада - PIN-аттенюатор, в конце: смеситель одной боковой полосы, который собирается из двух балансных смесительных ИС и двух ответвителей [первый типа "Lange" и второй типа "Wilkinson"]). Таким образом, если имеем диапазон регулировки 0 .. -20дБ, получаем примерно при уровне входного сигнала до -15дБм улучшение коэффициента взаимной модуляции третьего порядка (IM_3) на -30дБ.

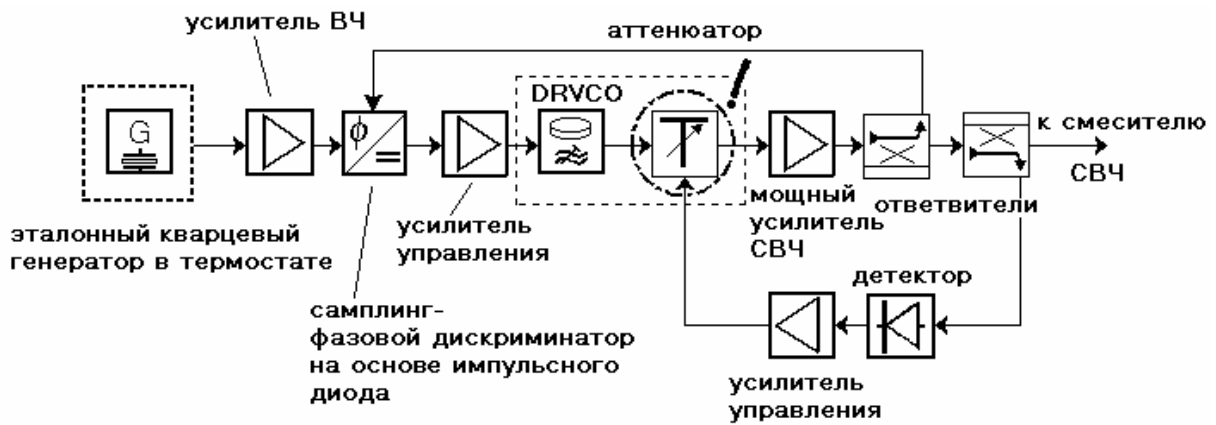
Если предусмотрено, построить тот приёмник на основе монтажно-ИС-технике (Chip and Wire Technique) на площади нескольких см², то хороший ответвитель у нас уже должен быть "в наборе" и факт малого места, который выше представленный аттенюатор для себя требует, делает его очень интересным. Кроме того, он "обещает" низкое "нулевое" затухание, которое нужно для маломощного приёма сигналов низкого уровня.



Пр. 1

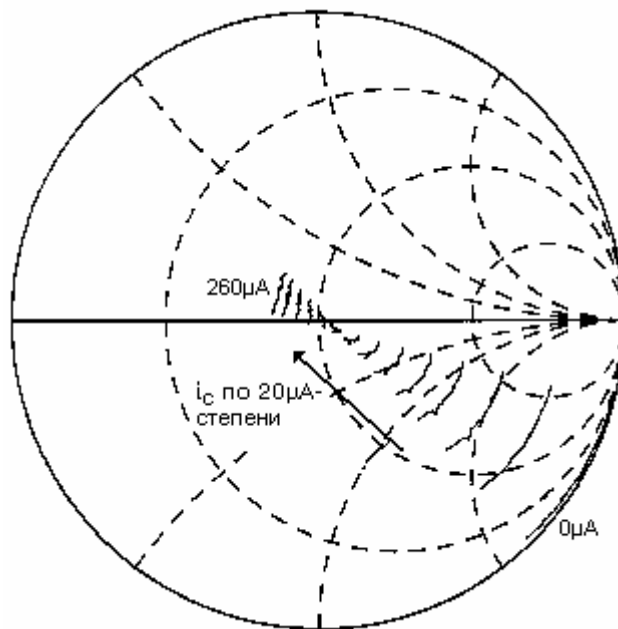
Пр. 2: Температурная стабилизация СВЧ-мощности гетеродина

Пр.2 показывает блок-схему примера. В РРС важна постоянность мощности не только для хорошей работы смесителей, но важнее ещё, в данном примере, для работы фарсового дискриминатора, который нужен для стабилизации частоты и для понижения фазового шума.



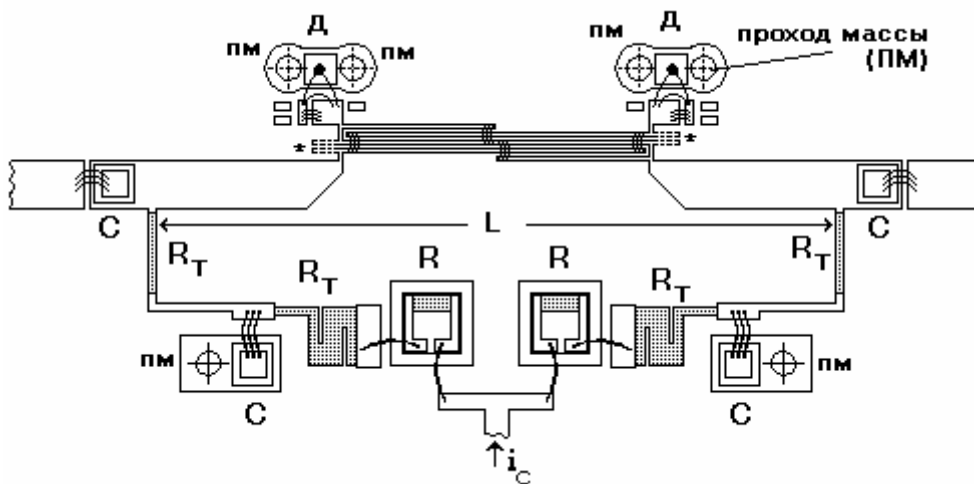
Пр. 2

Пр. 3: Характеристики хорошо компенсированного диода



Пр. 3

Пр. 4: Предложение более элегантной схемы аттенюатора



Пр. 4

На Пр.4 дано предложение более элегантного Layout аттенюатора, где предусмотрены лучшие возможности согласования диодов, чем на рис.4.

Геометрия ответвителя тут конструктивно удобнее, так что возможна ещё большая миниатюризация. Той же цели служит также более узкое расположение элементов подключения тока управления. Это имеет "свою цену" в том, что кроме расчетов хорошей модели ответвителя на САПР надо ещё один раз экспериментально оптимизировать его, именно определить длину "ушек" для повышения изоляции ответвителя (*). Их длина (около 1мм или меньше) зависит, кроме прочего, от числа и диаметра проводников микросварки при ответвителе. Оптимальную длину надо один раз определить и потом соответственно корригировать фотошаблон схемы. (При этой экспериментальной схеме, конечно, надо реализовать ту же геометрию линии подключения к ответвителю, как они потом планированы, но не так, как они удобны для измерительного устройства.)

Согласование диодов на оптимальную компенсацию предусмотрено путём отрывания проводников микросварки или добавления емкости соединением малоплощадной металлизации.

Надо ещё сказать, что есть оптимальное место присоединения элементов управления. При правильном выборе длины L неоднородности, вызванные ими, частично компенсируются друг другом и улучшают S_{11} .