

## **СВЧ ГИС десятиваттного трёхразрядного аттенюатора для выходного каскада усилителя мощности С-диапазона**

**Аболдуев И. М., Вальд-Перлов В. М., Гарбер Г. З., Зубков А. М.,  
Красильников В. Д., Миннебаев В. М., Малеев С. А.**

*Разработана двухкаскадная СВЧ гибридная интегральная схема (ГИС) аттенюатора. Начальные потери ГИС не превышают 1 дБ. Управляемое дополнительное ослабление меняется от 1 до 7 дБ через 1 дБ. При входной мощности 10 Вт перегрев активной области управляющих р-і-п диодов относительно обратной стороны подложки ГИС не превышает 40 К, а максимальный перегрев резисторов 90 К. Р-і-п диоды открываются током 100 мА, запираются напряжением -50 В.*

### **Введение**

В ряде случаев к выходному каскаду мощного усилителя предъявляются противоречивые требования: с одной стороны, его выходная мощность должна быть стабильной в широком диапазоне температур и при изменении мощности предусилителя; с другой стороны, она должна управляться. Для решения этой задачи:

- используется режим насыщения для транзисторов выходного каскада усилителя;
- после выходного каскада включается управляемый аттенюатор.

В данной работе выходная мощность усилителя  $P_{\text{Вых}} = 10$  Вт в диапазоне частот 3.9 - 4.2 ГГц. Регулировка выходной мощности усилителя осуществлялась с помощью двухкаскадной ГИС управляемого аттенюатора.

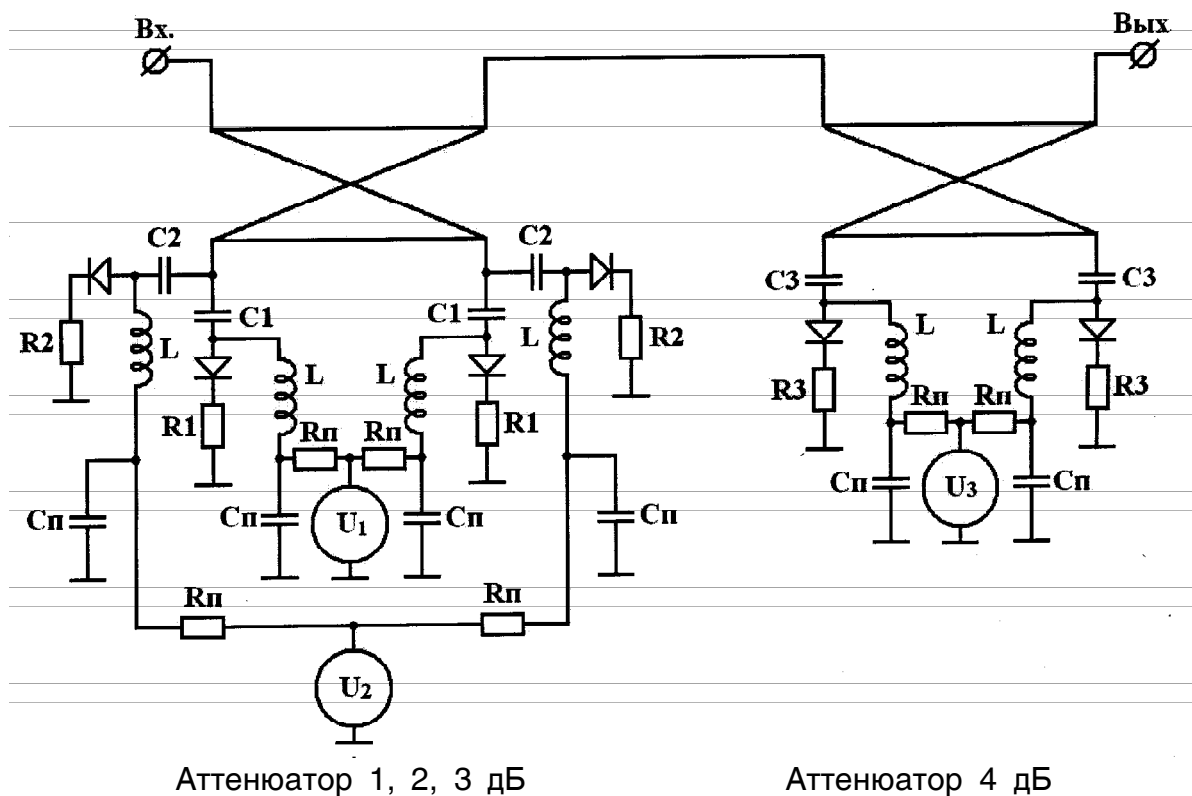
### **Разработка ГИС аттенюатора**

Для ГИС аттенюатора выбрана схема поглощающего типа с использованием квадратурных мостов. В два выходных плеча моста через р-і-п диоды включаются заземлённые тонкоплёночные резисторы (см. рис. 1). Чтобы уменьшить начальные потери аттенюатора, между квадратурным мостом и управляющими диодами размещаются конденсаторы, повышающие добротность нагрузки. Ёмкости конденсаторов и сопротивления нагрузочных резисторов оптимизировались в системе Microwave Office для известных значений ёмкости запёртых р-і-п диодов и заданного затухания при открытых диодах в требуемом диапазоне частот. В реализованной топологии ГИС аттенюаторов конденсаторы выполнены на связанных микрополосковых линиях. Физический смысл использования конденсаторов можно видеть, рассматривая коэффициент отражения от ветви аттенюатора при запёртом р-і-п диоде.

В идеальном случае модуль коэффициента отражения должен равняться единице, тогда начальные потери аттенюатора определялись бы только потерями в квадратурных мостах. В реальной схеме без применения конденсаторов коэффициент отражения от запёртой ветви аттенюатора составляет 0.88 (точки HWC0 на рис. 2). Это соответствует потерям 1.08 дБ в каждой ветви аттенюатора. Включение конденсатора с оптимальной ёмкостью существенно приближает коэффициент отражения к единице (точки HCO для сосредоточенного конденсатора и HCD0 для распределённого). На том же рисунке показан коэффициент отражения от ветви аттенюатора при открытом р-і-п диоде

(точки HC1), когда обеспечивается заданное затухание. В реализованных ГИС двухкаскадного аттенюатора начальные потери равны 0.8 - 1 дБ.

Анализ работы аттенюатора с помощью системы Microwave Office показал, что при входной мощности 10 Вт максимальная амплитуда СВЧ тока в открытом р-и-п диоде может достигать 1 А, а амплитуда напряжения на запертом диоде 40 В. Для управления р-и-п диодами была выбрана величина запирающего напряжения, равная -50 В. Оставался открытым вопрос о величине тока, отпирающего диод.



Аттенюатор 1, 2, 3 дБ

Аттенюатор 4 дБ

Рис. 1.

Принципиальная электрическая схема СВЧ ГИС аттенюатора

В ГИС используются GaAs р-и-п диоды. Для определения величины управляющего постоянного тока были исследованы зависимости остаточного сопротивления р-и-п диодов от амплитуды СВЧ тока при различных значениях управляющего тока. Использовались программы DIPIND и TCAD [1, 2]. На рис. 3 показана такая зависимость для управляющего тока, равного 100 мА. Видно, что заметное увеличение остаточного сопротивления р-и-п диода начинается при амплитуде СВЧ тока, близкой к 1.5 А. Следовательно, величина управляющего тока, равная 100 мА, достаточна для заданного уровня выходной СВЧ мощности усилителя.

На финишном этапе проектирования ГИС проводился электромагнитный анализ и «настройка» схемы в системе Sonnet Suite. Эта система предназначена для анализа пассивных СВЧ полосковых узлов, поэтому при анализе работы ГИС с открытыми и закрытыми р-и-п диодами использовались простейшие эквивалентные схемы диода – рис. 4а и 4б соответственно. Последовательное сопротивление потерь использованных р-и-п диодов  $R_s$  составляет 0.12 Ом, остаточное сопротивление открытых диодов  $R_i < 0.1$  Ом (рис. 3).

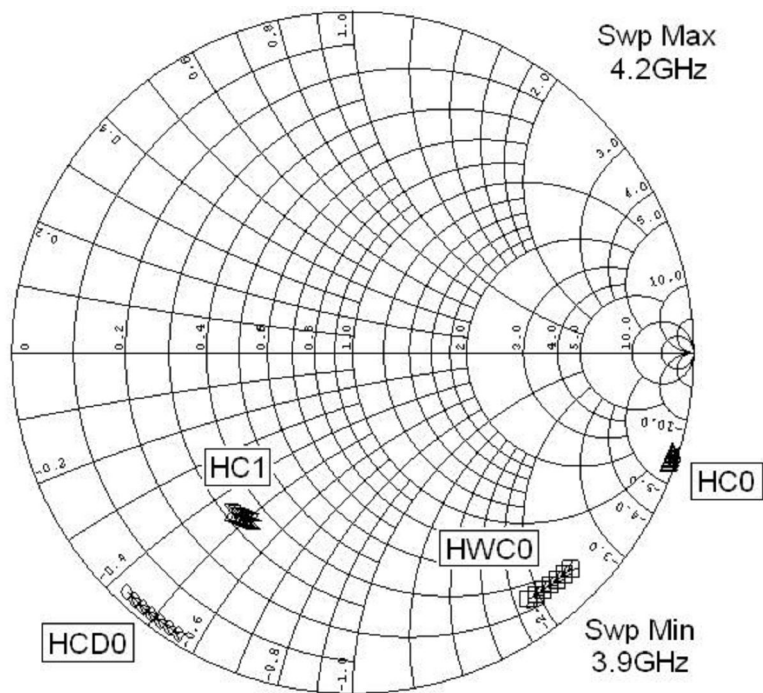


Рис. 2.

Коэффициенты отражения от поглощающей ветви аттенюатора:  
 HWC0, HC0, HCD0 - p-i-n диод заперт, HC1 - открыт, HWC0 - без последовательно включённого конденсатора, HC0 - включён сосредоточенный конденсатор, HCD0, HC1 - включён распределённый конденсатор

GaAs p-i-n диод  
 $w=3$  мкм, диаметр 80 мкм,  $f=4$  GHz

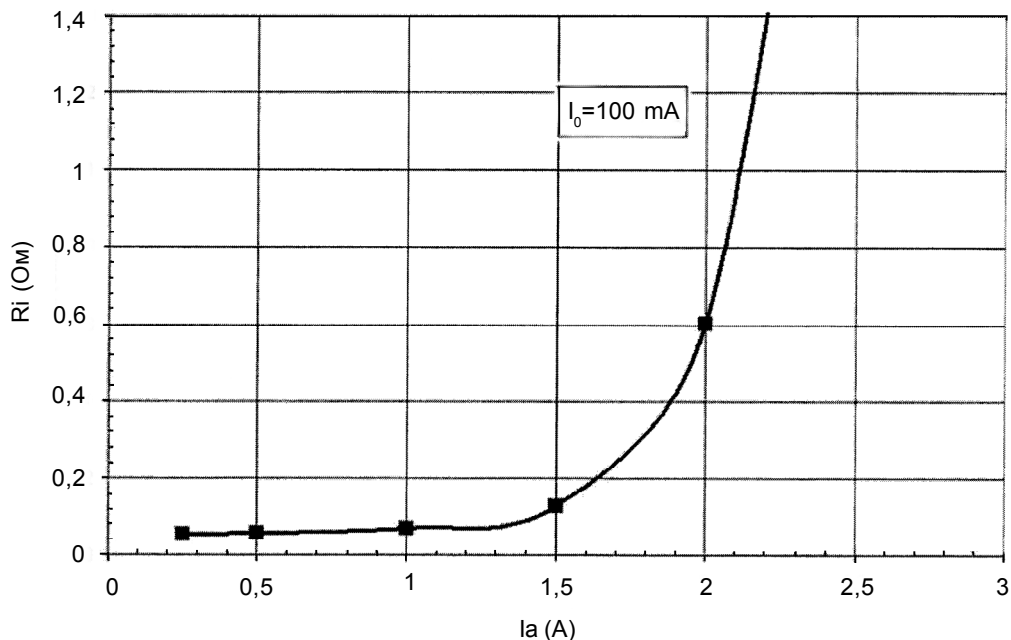


Рис. 3.

Зависимость остаточного сопротивления GaAs p-i-n диода от амплитуды СВЧ тока при постоянном токе, открывающем диод, равном  $I_0 = 100$  мА

СВЧ ГИС аттенюаторов изготовлены на поликоровых платах толщиной 1 мм. В качестве квадратурных мостов использовались мосты Ланге. Аттенюатор состоит из двух каскадов. Первый каскад обеспечивает управляемое изменение коэффициента передачи аттенюатора на 1, 2 или 3 дБ. Второй каскад при открытых р-і-п диодах изменяет коэффициент передачи еще на 4 дБ. На рис. 5 показаны рассчитанные и измеренные значения дополнительного вносимого затухания при включении различных ступеней аттенюатора. Видно, что максимальная неравномерность затухания в заданной полосе частот составляет 1 дБ и определяется четырёхдецибельным каскадом ГИС.

Поскольку ГИС должна работать при подаче на её вход большой мощности, проводились тепловые расчёты для определения перегрева относительно основания, на котором монтируется ГИС. Поглощаемая аттенюатором мощность рассеивается р-і-п диодами и резисторами.

Р-і-п диоды монтируются на золочёные площадки, созданные на поверхности поликоровой платы. И использованные р-і-п диоды имеют золотой интегральный теплоотвод, находящийся под нижним і-п<sup>+</sup> переходом на расстоянии 5 мкм. Тепловые расчёты показывают, что при подаче на вход ГИС аттенюатора СВЧ мощности, равной 10 Вт, перегрев активной области р-і-п диодов не превышает 40 К.

Прежде чем проводить тепловые расчёты тонкоплёночных резисторов, применённых в ГИС, была оценена неравномерность плотности протекающего через них СВЧ тока с помощью программы Sonnet Suite. В наихудшем случае она составляет ±11.4% (четырёхдецибельный каскад). Максимальный перегрев резисторов не превышает 90К.

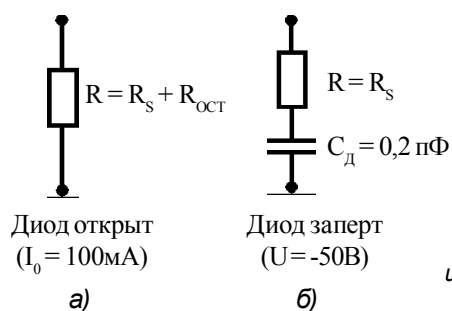


Рис. 4.  
 Эквивалентные схемы р-і-п диодов,  
 использованные при электромагнитном анализе работы  
 СВЧ ГИС аттенюатора

## Заключение

1. При проектировании СВЧ ГИС аттенюатора использован комплекс программных инструментов, позволивших проводить схемотехническую оптимизацию ГИС, физическое моделирование работы р-і-п диодов, электродинамический анализ работы ГИС, тепловые расчёты.

2. Последовательное включение распределённых конденсаторов в каждую из поглощающих ветвей позволило снизить начальные потери ГИС трехразрядного аттенюатора до 0.8 – 1 дБ.

3. Применение GaAs р-і-п диодов с интегральным теплоотводом обеспечивает допустимый тепловой режим их работы и минимальное паразитное сопротивление.

4. Измеренные значения дополнительного затухания при включении ступеней ГИС аттенюатора хорошо согласуются с расчётными данными.

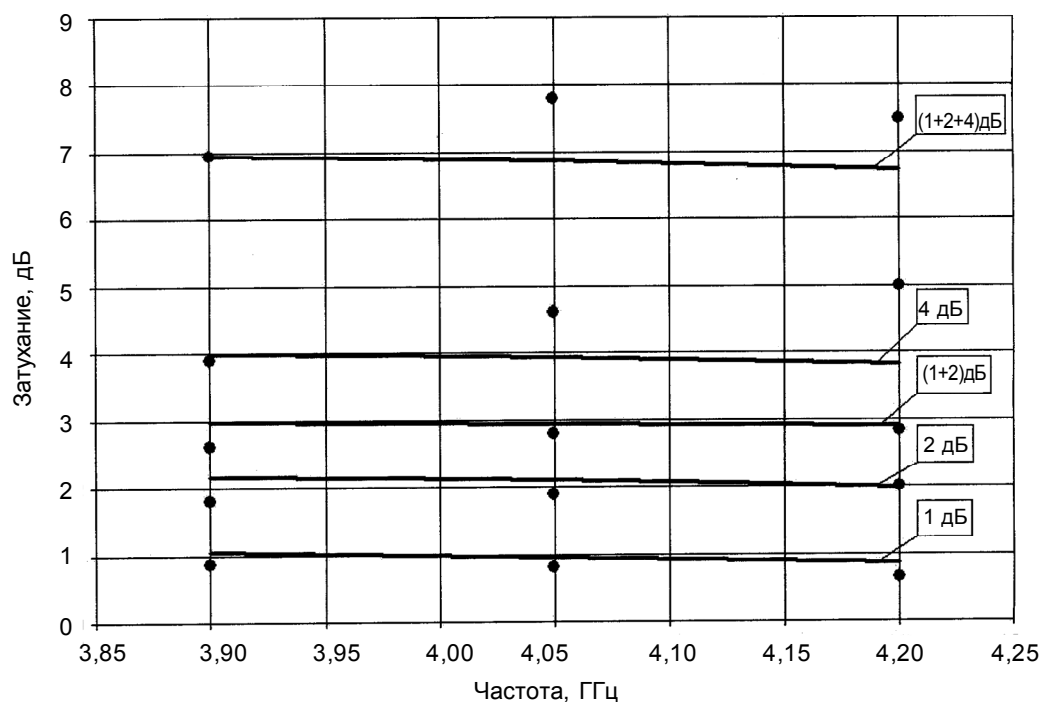


Рис. 5.

Рассчитанные и измеренные величины дополнительного затухания при включении ступеней аттенюатора: ● - экспериментальные точки

## Литература

1. Гарбер Г. З. Программа моделирования GaAs p-i-n диодов (DIPIND) – авторское свидетельство № 2007612558 с приоритетом от 26 апреля 2007 г.
2. Зубков А. М., Гарбер Г. З., Малеев С. А. Методика проектирования GaAs p-i-n диодов с помощью САПР TCAD. – Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы, 2008, вып. 1, с. 3-8.