

**МОНОЛИТНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА МАЛОШУМЯЩЕГО  
УСИЛИТЕЛЯ ДИАПАЗОНА 8-12 ГГц НА ОСНОВЕ  
GaAs РНЕМТ-ТЕХНОЛОГИИ**

*В.С. Арыков, А.А. Баров, А.В. Кондратенко*

Представлены результаты разработки монолитной интегральной схемы СВЧ малошумящего усилителя, выполненной на основе 0,25 мкм GaAs рНЕМТ-технологии ЗАО «НПФ «Микран». Полоса рабочих частот 8–12 ГГц, коэффициент усиления 27 дБ, коэффициент шума не более 2 дБ, возвратные потери по входу и выходу не менее 10 дБ, однополярное напряжение питания 5 В, ток потребления 45 мА.

**Ключевые слова:** СВЧ, монолитная интегральная схема, малошумящий усилитель, полевой транзистор с высокой подвижностью электронов, коэффициент усиления, коэффициент шума, измерение параметров на пластине.

Одним из приоритетных направлений ЗАО «НПФ «Микран» являются разработка и производство монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ-диапазона. Данное направление призвано удовлетворить собственные потребности в современной элементной базе, а также предложить некоторые функциональные компоненты сторонним заказчикам. В статье представлены результаты разработки малошумящего усилителя (МШУ) X-диапазона частот, предназначенного для применения в составе приемопередающей аппаратуры, производимой НПФ «Микран» [1].

Среди публикаций в последнее время появились первые работы, посвященные созданию GaAs МШУ, выполненных на основе отечественных гетероструктурных технологий [2–4]. Авторы данной работы ни в коем случае не претендуют на какое-либо место в хронологии отечественных работ по созданию МШУ X-диапазона, а просто представляют полученные результаты как этап систематизации и документирования полученного опыта в данном направлении.

Расчет усилителя проводился согласно методике совмещенного согласования [5]. МИС содержит три каскада на полевых транзисторах с высокой подвижностью электронов (рНЕМТ) с интегрированными цепями согласования, коррекции амплитудно-частотной характеристики, а также ввода и блокировки питания. Эквивалентная схема МШУ приведена на рис. 1.

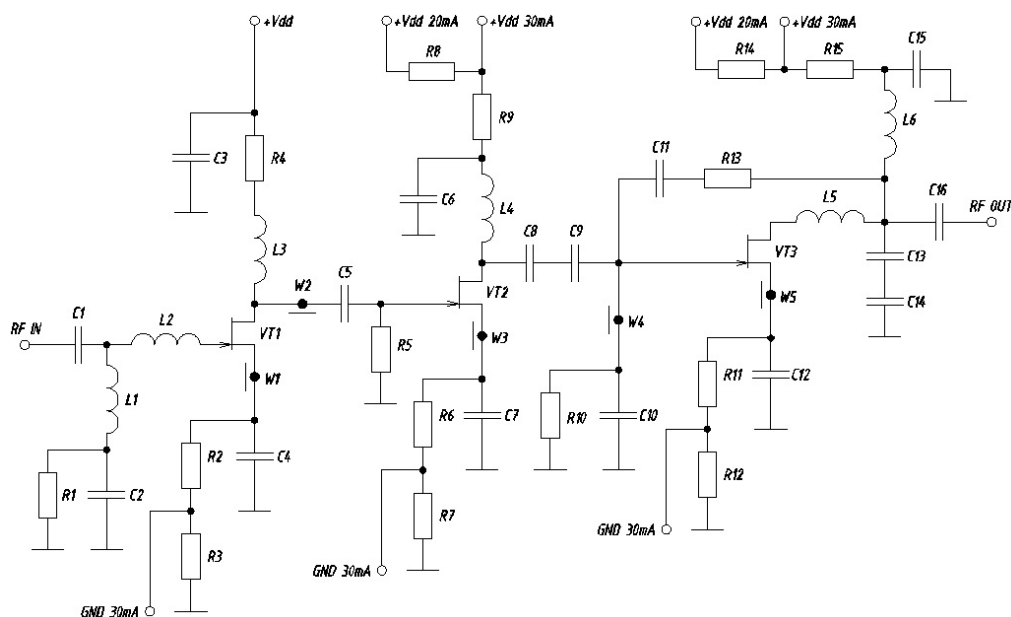


Рис. 1. Эквивалентная схема МШУ

В первом и втором каскадах применено классическое решение – последовательная обратная связь в виде высокоомного отрезка линии передачи в истоке транзистора. В первом каскаде величина обратной связи выбиралась исходя из реализации устойчивости и сближения условия оптимального согласования по шуму и условия комплексно-сопряженного согласования на входе транзистора. Во втором каскаде величина обратной связи выбиралась тоже исходя из реализации устойчивости, а также трансформации входного сопротивления транзистора второго каскада для возможности реализации согласующей цепи между первым и вторым каскадом с минимальным количеством элементов. Выбор параллельной резистивной обратной связи в третьем каскаде обусловлен требованиями обеспечения равномерного коэффициента усиления в рабочем диапазоне частот, а также согласования выхода МИС с трактом СВЧ. Для организации требуемого режима по постоянному току во всех каскадах используется схема автосмещения. Фотография кристалла МИС МШУ на пластине представлена на рис. 2, размер  $2,5 \times 1,5 \times 0,1$  мкм.

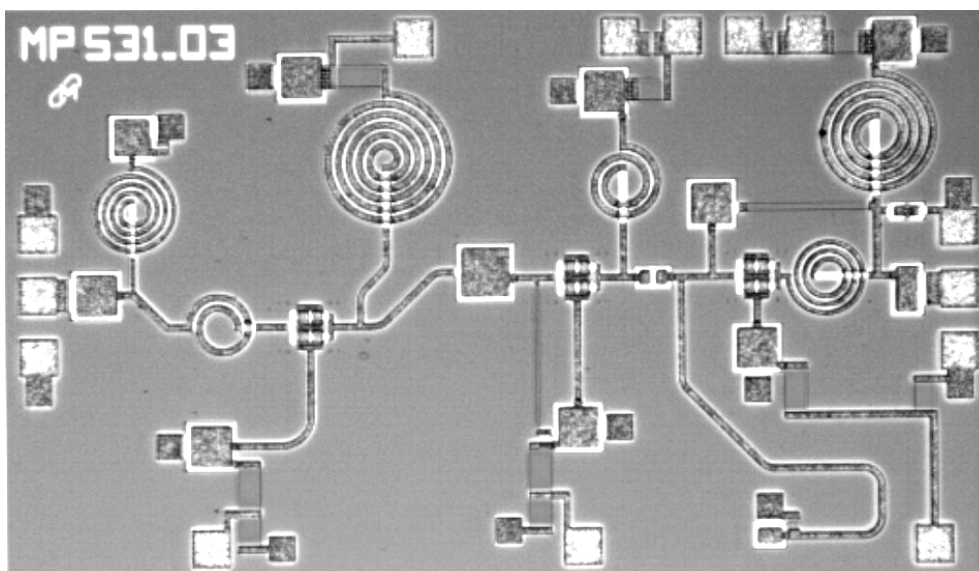


Рис. 2. Топология МИС МШУ

Работа по созданию МИС включала в себя три итерации. В качестве базового материала для изготовления МИС использовались гетероструктуры на основе GaAs с двойным дельта-легированием, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Первоначально кристаллы были изготовлены на технологической линии МИС ЗАО «НПФ «Микран» с использованием контактной ультрафиолетовой фотолитографии, позволяющей получать длину затвора 0,35 мкм. Данный этап можно характеризовать низкой повторяемостью основных параметров МИС (коэффициент усиления, коэффициент шума) от кристалла к кристаллу на пластине, а также реализованным коэффициентом шума порядка 3 дБ.

Заложенные схемные решения позволили провести оптимизацию конструкции гетероструктуры, а также уменьшить длину затворов транзисторов, прорисовка которых выполнялась методом электронно-лучевой литографии на установке Raith-150<sup>TWO</sup>. Изменение конструкции гетероструктуры, а также переход к Т-образной форме затвора с длиной основания 0,25 мкм позволили в рабочей полосе частот увеличить коэффициент усиления на 6 дБ при увеличении тока потребления всего на 20%, а также реализовать коэффициент шума не более 2 дБ, что удовлетворяет требованиям технического задания [1].

В процессе третьей итерации были скорректированы номиналы тонкопленочных резисторов цепей автосмещения для снижения суммарного тока потребления (требование главного конструктора аппаратуры первоочередного применения МИС). Кроме того, была проведена оптимизация конструкции транзистора с целью повышения пробивных напряжений. Это позволило включить данную МИС в перспективную работу по интеграции МШУ, высокочастотных усилителей, а также управляющих схем коммутационного типа (аттенюатор, фазовращатель и переключатели) на одном кристалле.

Измерение радиочастотных характеристик производилось непосредственно на пластине с помощью зондовой станции CASCADE Summit 11000, векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVA 40 и анализатора спектра Agilent E4448A (оборудование лаборатории НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУРа). Резуль-

тирующие экспериментальные частотные характеристики МИС МШУ представлены на рис. 3.

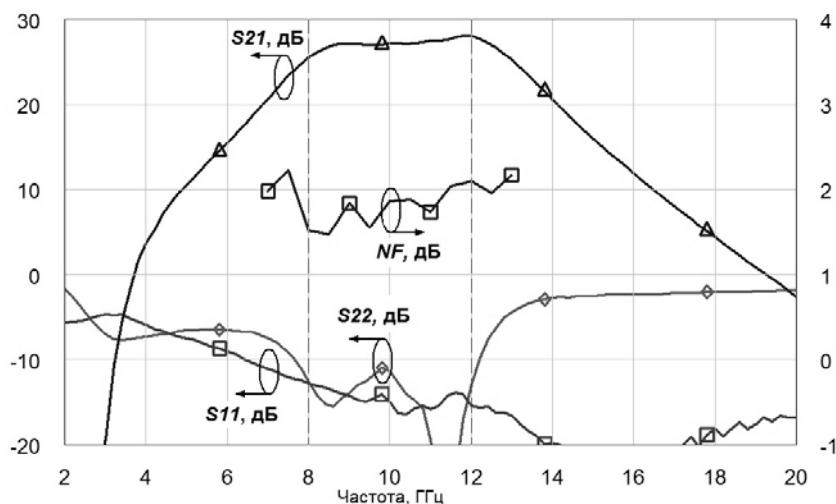


Рис. 3. Экспериментальные частотные характеристики МИС МШУ

Основные электрические параметры разработанного устройства представлены в таблице.

#### Основные электрические параметры усилителя

Наименование параметра	Значение
Диапазон рабочих частот, ГГц	8–12
Коэффициент усиления (КУ), дБ	27±1
Коэффициент шума, дБ, не более	2
Возвратные потери по входу / выходу, дБ, не менее	10
Выходная мощность при сжатии КУ на 1 дБ, дБм, не менее	12
Типовое значение тока потребления при питании 5 В, мА	45

#### Заключение

Разработана и изготовлена МИС малошумящего усилителя X-диапазона на основе GaAs pHEMT-технологии с параметрами на уровне современных аналогов. В настоящее время ведется подготовка к серийному производству данной микросхемы.

Отработанная методология проектирования, а также технология производства позволяют создавать более высокочастотные МИС. В свою очередь реализация малошумящего усилителя на основе транзисторов с достаточно высоким пробивным напряжением (не менее 14 В в триодном включении) позволила транслировать полученные наработки на перспективную работу по созданию системы на кристалле, которая включает в себя как МШУ, так и высокочастотные усилители.

#### Литература

1. Арыков В.С. GaAs pHEMT МИС малошумящего усилителя X-диапазона / В.С. Арыков, А.А. Баров, А.В. Кондратенко // Сб. трудов 21-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2011. Т. 1. С. 159–160.

2. Крутов А.В. Монолитные малошумящие усилители X-диапазона / А.В. Крутов, А.С. Ребров // Сб. трудов 16-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2006. Т. 1. С. 183–184.
3. Мокеров В.Г. Разработка комплекта монолитных малошумящих усилителей X-диапазона на основе 0,15 мкм GaAs pHEMT-технологии / В.Г. Мокеров, Л.И. Бабак, Ю.В. Федоров и др. // Доклады ТУСУРа. 2010. № 2 (22). С. 105–117.
4. Ющенко А.Ю. Исследование характеристик МШУ X-диапазона с защитой по входу / А.Ю. Ющенко, Г.И. Айзенштат, В.Г. Божков и др. // Сб. трудов 21-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2011. Т. 1. С. 161–162.
5. Текшев В.Б. Двухтранзисторный СВЧ-усилитель с минимальным коэффициентом шума и согласованным входом и выходом // Общие вопросы радиоэлектроники. 1990. Вып. 15. С. 16–23.