

# МИС СВЧ широкополосного усилителя с положительным наклоном амплитудно-частотной характеристики

А.В. Груша, А.В. Крутов, А.С. Ребров

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** в данной работе представлены результаты проектирования и экспериментальные характеристики широкополосного усилителя в диапазоне частот от 2 ГГц до 18 ГГц, выполненного по технологии GaAs рНЕМТ 0,15 мкм. Особенностью усилителя является положительный наклон амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в двухкаскадной схеме, который удалось получить за счет применения конденсаторов над отверстиями в цепи истока транзисторов и схемотехнических решений. Кристалл имеет малые габаритные размеры 1,26 мм × 0,92 мм.

**Ключевые слова:** GaAs, рНЕМТ, усилитель, положительный наклон АЧХ, МИС СВЧ, конденсатор над отверстием

## 1. Введение

Современные широкополосные системы требуют низкую неравномерность коэффициента усиления (КУ) в рабочей полосе частот. У большинства элементов, входящих в тракт, коэффициент передачи снижается с ростом частоты. Выравнивание коэффициента передачи такой системы является сложной задачей. Классическим способом снизить неравномерность коэффициента передачи тракта можно, используя пассивный эквалайзер, что приводит к ряду проблем. Таких как внесение дополнительных потерь и шумов, увеличение габаритов [1]. Поэтому особой популярностью пользуются монолитные интегральные схемы сверхвысоких частот (МИС СВЧ) широкополосных усилителей с положительным наклоном АЧХ. Традиционно для получения такого вида АЧХ усилитель строят по каскадной схеме [2,3] или с распределенным усилением [4]. В данной работе представлена реализация МИС СВЧ двухкаскадного усилителя с положительным наклоном амплитудно-частотной характеристики в диапазоне частот 2-18 ГГц.

## 2. Описание конструкции

Чтобы обеспечить положительный наклон АЧХ, и комплекс СВЧ параметров в диапазоне частот от 2 ГГц до 18 ГГц были применены конструктивные и схемотехнические решения. Принципиальным конструктивным элементом является конденсатор над заземляющими отверстиями [5], который применяется в цепи заземления истока транзисторов. Расположение заземляющего отверстия в непосредственной близости к истоку транзистора позволяет уменьшить индуктивность заземления, изменив тем самым оптимальное согласование в верхней части диапазона. Это в свою очередь приводит к увеличению общего коэффициента усиления на ~0,7 дБ на каскад.

Усилитель состоит из двух каскадов с общим истоком охваченных отрицательной обратной связью, с автосмещением (рисунок 1). Для получения требуемой выходной мощности ширина транзистора VT2 выбрана в два раза больше ширины транзистора VT1 первого каскада. Высокоомный резистор R3 обеспечивает подачу нулевого смещения на затворы обоих транзисторов и не влияет на КСВН входа. Дальнейший

выбор принципиальной схемы и оптимизация элементов согласования проводилась с цепями автосмещения, состоящими из токозадающих резисторов R4, R5 и конденсаторов над отверстиями C5, C6. Удельный рабочий ток схемы 100-150 мА/мм.

Номинал индуктивностей L5, L6 выбран для обеспечения работы усилителя от 2 ГГц, дальнейшее увеличение индуктивностей приведет к увеличению их емкостных составляющих и окажет влияние на верхнюю границу рабочего диапазона частот. Верхняя граничная частота определяется на входе согласующей цепью L1, C1, межкаскадной согласующей цепью L2, C2, L3 и на выходе индуктивностью L4. Окончательная форма амплитудно-частотной характеристики в схеме формируется резисторами обратной связи R1, R2.

Заземление конденсаторов в цепях питания через резисторы R6, R7 позволяет снизить резонансный подъем коэффициента усиления в нижней части частотного диапазона и повысить устойчивость схемы.

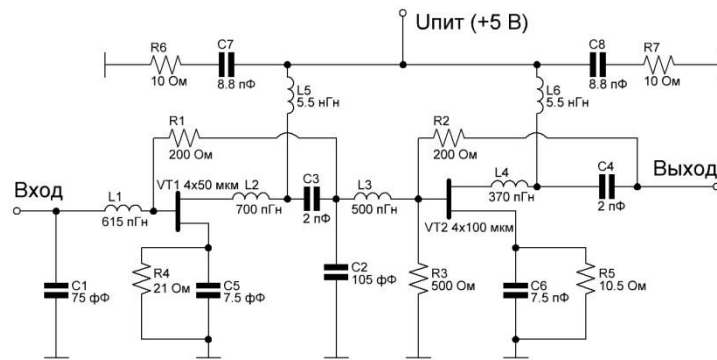


Рисунок 1. Принципиальная схема широкополосного усилителя

Усилитель выполнен в виде МИС СВЧ на арсениде галлия с размерной обработкой 0,15 мкм, на гетероструктуре ПМГС-Д01. Гетероструктура и сам кристалл усилителя изготовлены в АО «НПП «Исток» им. Шокина». В качестве активного элемента использованы нормально открытые гетероструктурные транзисторы с барьером Шоттки (pHEMT) с металлизацией затвора Ti-Pt-Au T-образной формы. Удельное сопротивление NiCr резисторов 40 Ом/□, удельная емкость МДМ конденсаторов 200 пФ/мм<sup>2</sup>. Топология МИС СВЧ усилителя показана на рисунке 2. Размеры кристалла 1,26 мм × 0,92 мм.

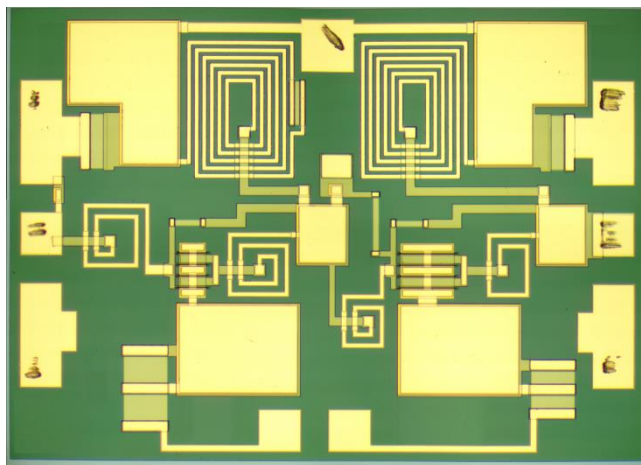


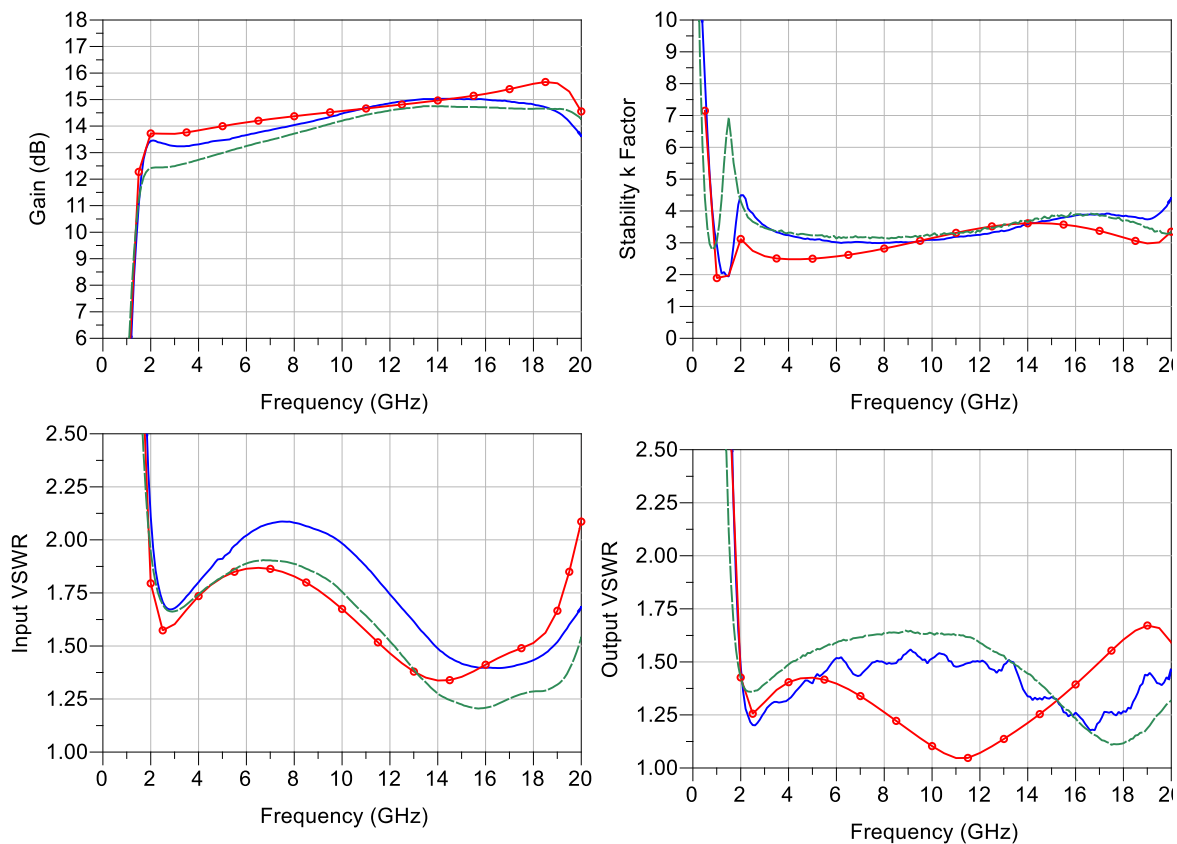
Рисунок 2. Микрофотография кристалла широкополосного усилителя

### 3. Моделирование и экспериментальные результаты

Моделирование проводили с использованием САПР Advanced Design System. Модель транзистора — ЕЕНЕМТ. Расчет проводили с учетом золотых разварочных проволочек длиной 400 мкм и диаметром 20 мкм на входе и выходе усилителя.

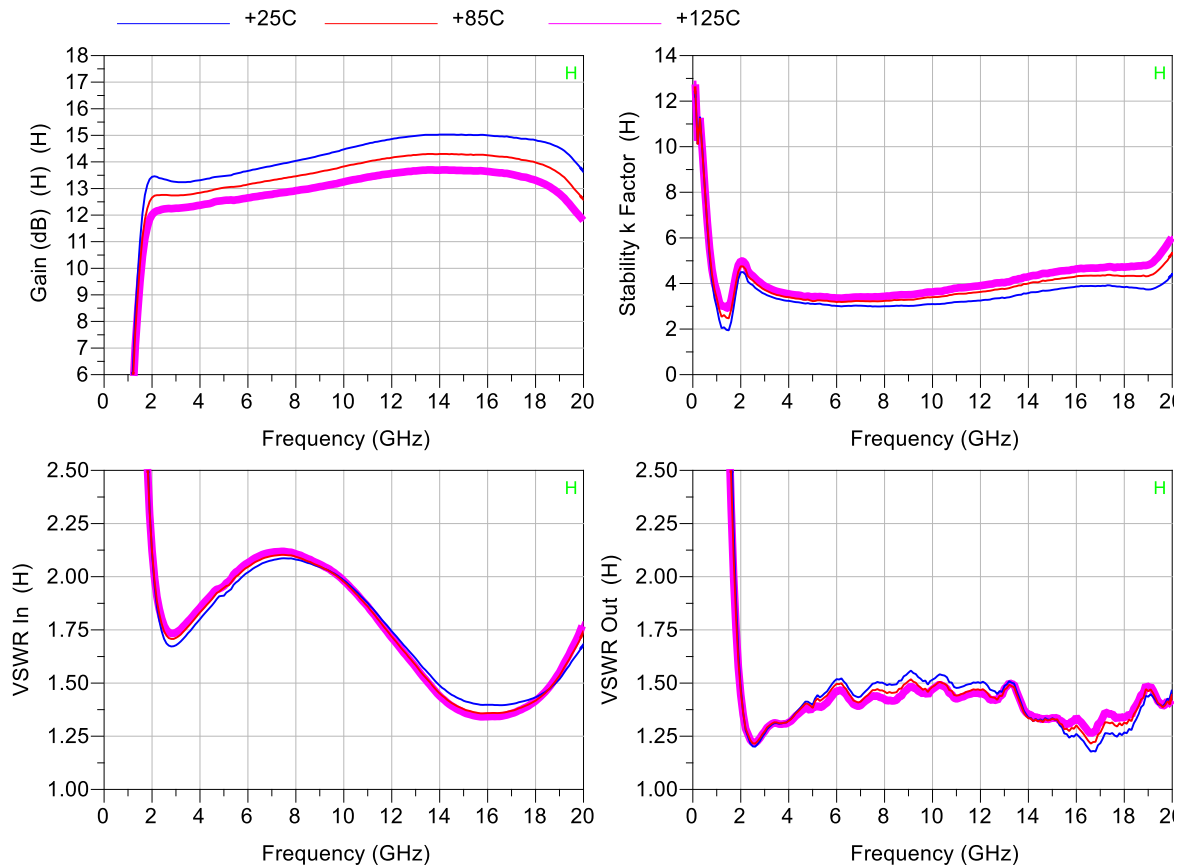
На рисунке 3 представлены расчетные и измеренные амплитудно-частотные характеристики МИС СВЧ усилителя. Измерения проводили на пластине и на отдельных кристаллах, смонтированных на металлическое основание с блокировочным конденсатором в цепи питания, с помощью зондовой станции SUMMITT 12000В и векторного анализатора цепей N5244А.

В расчете положительный наклон АЧХ — 2 дБ, в измерениях на пластине получили разброс наклона АЧХ от 1,5 дБ до 2,2 дБ. Разварочные проволочки не учитываются в измерениях на пластине, поэтому КСВН входа имеет подъем в середине диапазона до 2,2. Напряжение питания +5 В, потребления тока в режиме покоя 75 мА.



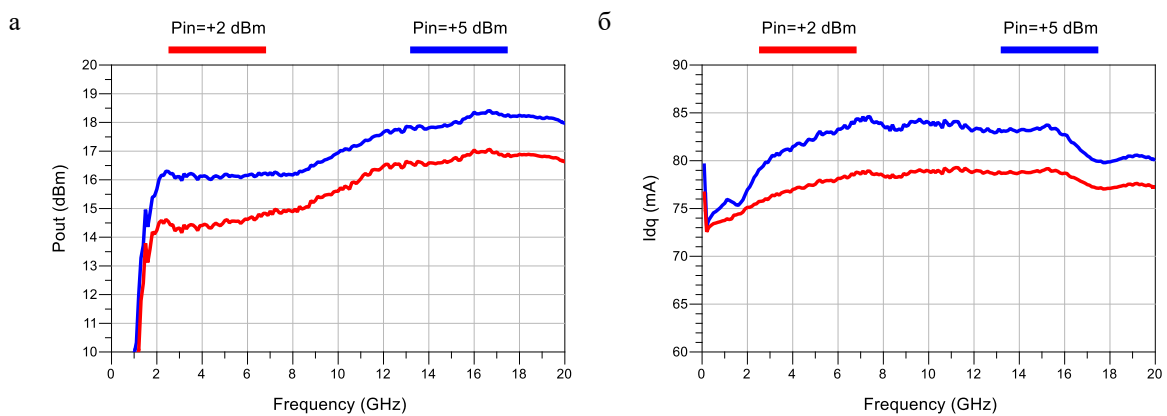
**Рисунок 3.** Сравнение расчетных амплитудно частотных-характеристик с измеренными. (красная линия — расчет, синяя — измерения на пластине, зеленая — измерения сборки)

Измерения на пластине малосигнальных S-параметров при температурах +85°C и +125°C показаны на рисунке 4. При температуре +85°C, коэффициент усиления снизился на 0,85 дБ, при температуре +125°C – на 1,4 дБ. Соответственно, падение коэффициента усиления при повышении температуры составляет 0,007 дБ/°С/каскад. Этот результат является типичным для технологии GaAs pHEMT. На КСВН входа и выхода изменение температуры не оказывает сильного влияния.



**Рисунок 4.** Зондовые измерения S-параметров и коэффициента устойчивости в диапазоне температур

На рисунке 5а показана выходная мощность усилителя в зависимости от частоты. При мощности на входе 2 дБм, коэффициент усиления уменьшается на 1 дБ, мощность на выходе находится в пределах от 14 дБм до 17 дБм, в зависимости от частоты. Выходная мощность насыщения, при входной мощности +5 дБм, изменяется от 16 дБм до 18,2 дБм. Зависимость потребления тока под действием входной мощности показана на рисунке 5б. Ток потребления не превышает 90 мА, при использовании в режиме насыщения.



**Рисунок 5.** а) Зависимость выходной мощности от частоты. б) ток потребления под воздействием входной мощности. (красная линия — при компрессии КУ на 1дБ, синяя — при насыщении)

В таблице 1 проведено сравнение электрических и габаритных параметров разработанного усилителя с аналогами.

**Таблица 1.** Сравнение электрических параметров усилителей

| Параметры                          | APCAP 2020<br>[6]       | CMD240<br>Qorvo [7]     | FMA3058<br>RFMD [3]     | Данная работа   |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| Рабочий диапазон частот, ГГц       | 2,0-20,0                | 0,1-22,0                | 2,0-20,0                | 2,0-18,0        |
| Коэффициент усиления, дБ           | 14,0-17,0               | 15,0-17,0               | 13,7-15,8               | 12,5-14,5       |
| КСВН входа                         | <1,7                    | <1,4                    | <1,7                    | <2,0            |
| КСВН выхода                        | <1,7                    | <1,7                    | <2,0                    | <1,7            |
| Мощность P <sub>1dB</sub> , дБм    | 16-18,5                 | 17-19,5                 | 16-18,5                 | 14-17           |
| Мощность P <sub>SAT</sub> , дБм    | -                       | 21-23                   | -                       | 16-18,2         |
| Площадь кристалла, мм <sup>2</sup> | 3,92                    | 3,38                    | 4,68                    | 1,16            |
| Напряжение питания, В              | +5                      | +5/-0,6                 | +5                      | +5              |
| Потребление тока, мА               | 110                     | 105                     | 80                      | 75              |
| Наклон АЧХ                         | положительный           | положительный           | положительный           | положительный   |
| Технология                         | 0,15 um pHEMT           | 0,15 um pHEMT           | 0,25 um pHEMT           | 0,15 um pHEMT   |
| Тип усилителя                      | распределенное усиление | распределенное усиление | распределенное усиление | с общим истоком |

### 3. Заключение

В работе показана реализация двухкаскадного усилителя с положительным наклоном АЧХ по технологии GaAs pHEMT 0,15 мкм АО «НПП «Исток» им. Шокина». Приведены расчетные и измеренные электрические параметры усилителя. Полученные параметры сравнимы с зарубежными аналогами. Разработанный кристалл усилителя имеет площадь в ~ 3 раза меньше, чем аналоги.

#### Список литературы

1. Realizing the SWaP-C Benefits of Designing with Positive Gain Slope MMIC Amplifiers // Tech Brief Custom MMIC // <https://www.qorvo.com/products/d/da007763>.
2. Benoit Mallet-Guy, et al. A new LNA wide band structure for MMIC applications // 40th Europe Microwave Conference. – 2010. – С. 533-536.
3. FMA3058 datasheet // <http://www.bdtic.com/datasheet/RFMD/FMA3058.pdf>.
4. Груша А.В. Крутов А. В., Ребров А. С. Широкополосный усилитель-корректор АЧХ. // 2018 28th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2018). Sevastopol, 2018, С.77-81.
5. Груша А.В. Крутов А. В., Ребров А. С. Конструктивно-технологические особенности конденсатора с заземляющими отверстиями в МИС СВЧ. // 2019 29th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2019). Sevastopol, 2019.
6. X. Tan, L. Xue, M. Tang, X. Dou and H. Zhou, "2 – 20 GHz Ultra-Wideband Distributed Low Noise Amplifier," 2020 9th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Xiamen, China, 2020, С. 1-2.
7. CMD240 datasheet // <https://www.qorvo.com/products/d/da007530>.