

Маломощный усилитель С-Ку диапазона частот

К.В. Дудинов, А.М. Темнов, А.С. Ефимов, Е.Ю. Днестранская, А.Е. Луняков, С.А. Полевич

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: в данной работе представлены результаты разработки маломощного усилителя (МШУ) С-Ку диапазона частот. Схема реализована в двух видах исполнения – монолитная интегральная схема (МИС) и МИС в корпусе для поверхностного монтажа (SMD). МИС изготовлена по технологии GaAs рHEMT с длиной затвора 0.1 мкм. Коэффициент усиления МИС МШУ в диапазоне 6 – 18 ГГц превышает 20 дБ при коэффициенте шума менее 2 дБ. МШУ в SMD-корпусе в диапазоне 7 – 14 ГГц имеет коэффициент усиления более 18 дБ и коэффициент шума менее 2 дБ. Согласование схемы по входу и выходу достигнуто на уровне ниже -10 дБ в заданных диапазонах частот. Габаритные размеры МИС – 1.5×1.1 мм, МИС в SMD-корпусе – 4×4 мм.

Ключевые слова: маломощный усилитель, рHEMT, арсенид галлия, монолитная интегральная схема, СВЧ, коэффициент шума, корпусирование

1. Введение

В приемных системах средств связи, в том числе бортовых и наземных радиолокационных станций одним из важных элементов является МШУ. Разработка широкополосного маломощного усилителя с низким коэффициентом шума и хорошим согласованием по входу и выходу является актуальной задачей в связи с повышающимися требованиями к электронной компонентной базе СВЧ.

В данной работе представлены результаты разработки широкополосного маломощного усилителя С-Ку диапазона частот, реализованного в двух видах исполнения - кристалл МИС; - схема в металлокерамическом корпусе SMD.

2. Конструкция маломощного усилителя

Коэффициент шума ($K_{ш}$) в зависимости от нормализованного импеданса источника ($Y_{г}$) определяется как [1]:

$$K_{ш} = 10 \cdot \log \left(F_{мин} + \frac{R_{ш}}{\text{real}(Y_{г})} \cdot |Y_{г} - Y_{г.опт}|^2 \right) \quad (1)$$

где $F_{мин}$ – минимальный шум-фактор при $Y_{г} = Y_{г.опт}$, $Y_{г.опт}$ – нормализованная оптимальная проводимость источника, когда $K_{ш} = K_{ш.мин} = 10 \cdot \log(F_{мин})$, $R_{ш}$ – нормализованное эквивалентное шумовое сопротивление (параметр, определяющий скорость относительного изменения $K_{ш}$ при рассогласовании). Используя отношения $Y_{г} = Y_0 \cdot \frac{1-\Gamma_{г}}{1+\Gamma_{г}}$ и $Y_{г.опт} = Y_0 \cdot \frac{1-\Gamma_{г.опт}}{1+\Gamma_{г.опт}}$ получаем:

$$K_{ш} = 10 \cdot \log \left(F_{мин} + \frac{4 \cdot R_{ш} \cdot |\Gamma_{г} - \Gamma_{г.опт}|^2}{(1 - |\Gamma_{г}|^2) \cdot (1 + \Gamma_{г.опт})^2} \right) \quad (2)$$

Обеспечение широкополосного согласования в совокупности с низким коэффициентом шума требует уменьшения зависимости $\Gamma_{г.опт}$ от частоты и его близость к нулю при сохранении приемлемого $K_{ш.мин}$. Применение каскодной схемы включения транзисторов и параллельной и последовательной обратных связей в первом каскаде позволяет обеспечить малый коэффициент шума в более широком диапазоне частот.

Принципиальная схема маломощного усилителя представлена на рисунке 1.

Схема реализована на технологической линейке GaAs pHEMT с длиной затвора 0.1 мкм, реализованной в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Схема МШУ представляет собой двухкаскадный усилитель. Первый каскад состоит из двух транзисторов VT1 и VT2, с общей шириной затвора 300 и 200 мкм соответственно. Транзистор VT1 включен по схеме с общим истоком. Транзистор VT2 включен по схеме с общим затвором и вместе с первым транзистором образуют каскодное включение. Каскодное включение транзисторов расширяет рабочую полосу частот, повышает выходной импеданс, что упрощает согласование по выходу, повышает коэффициент усиления. Применение параллельной и последовательной обратных связей в первом каскаде позволяет обеспечить безусловную стабильность каскада, коррекцию амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и уменьшить зависимость $\Gamma_{г.опт}$ от частоты. Выбор ширины затвора транзисторов и согласование каскада определяется необходимостью достижения наименьшего коэффициента шума в полосе частот и обеспечения входного согласования МШУ. Второй каскад, являющийся выходным, состоит из одного транзистора VT3 с общей шириной затвора 200 мкм, включенного по схеме с общим истоком. Для коррекции АЧХ, согласования МШУ по выходу и стабильности каскада применены параллельная и последовательная обратные связи.

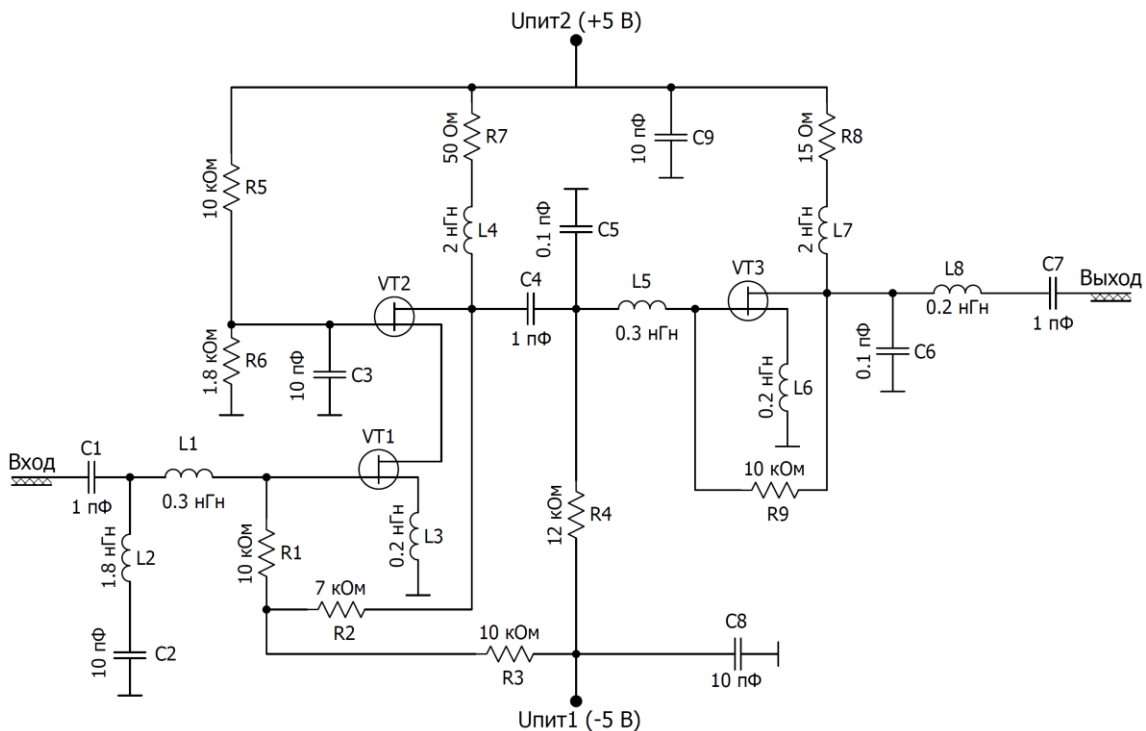


Рисунок 1. Принципиальная электрическая схема малошумящего усилителя

Габаритные размеры кристалла – 1.5×1.1×0.1 мм. МИС МШУ согласован для работы в 50-омном тракте и как отдельный кристалл, так и как кристалл, смонтированный в корпус SMD.

МШУ в корпусе SMD помимо МИС имеет дополнительные элементы. Межкристалльные соединения сделаны с помощью золотых проволок толщиной 20 мкм. В цепи отрицательного питания добавлен блокирующий конденсатор номиналом 100 пФ, выполненный по кремниевой тонкопленочной технологии. В цепи положительного питания добавлен стабилитрон с целью защиты схемы от повышенных напряжений, который так же выполнен по кремниевой тонкопленочной технологии. Кристалл 50-омной линии передачи использован в сборке схемы для минимизации длины соединительных проволок.

3. Экспериментальные результаты

Электрические параметры МИС МШУ были измерены на пластине при помощи зондовой станции. МШУ в SMD-корпусе измерялись как на зондовой станции, так в специально разработанной тестовой оснастке. Фотография малошумящего усилителя в корпусе SMD представлена на рисунке 2(г). Измерения проводились при напряжениях питания +5 В и -5 В. Ток потребления составляет порядка 85 мА.

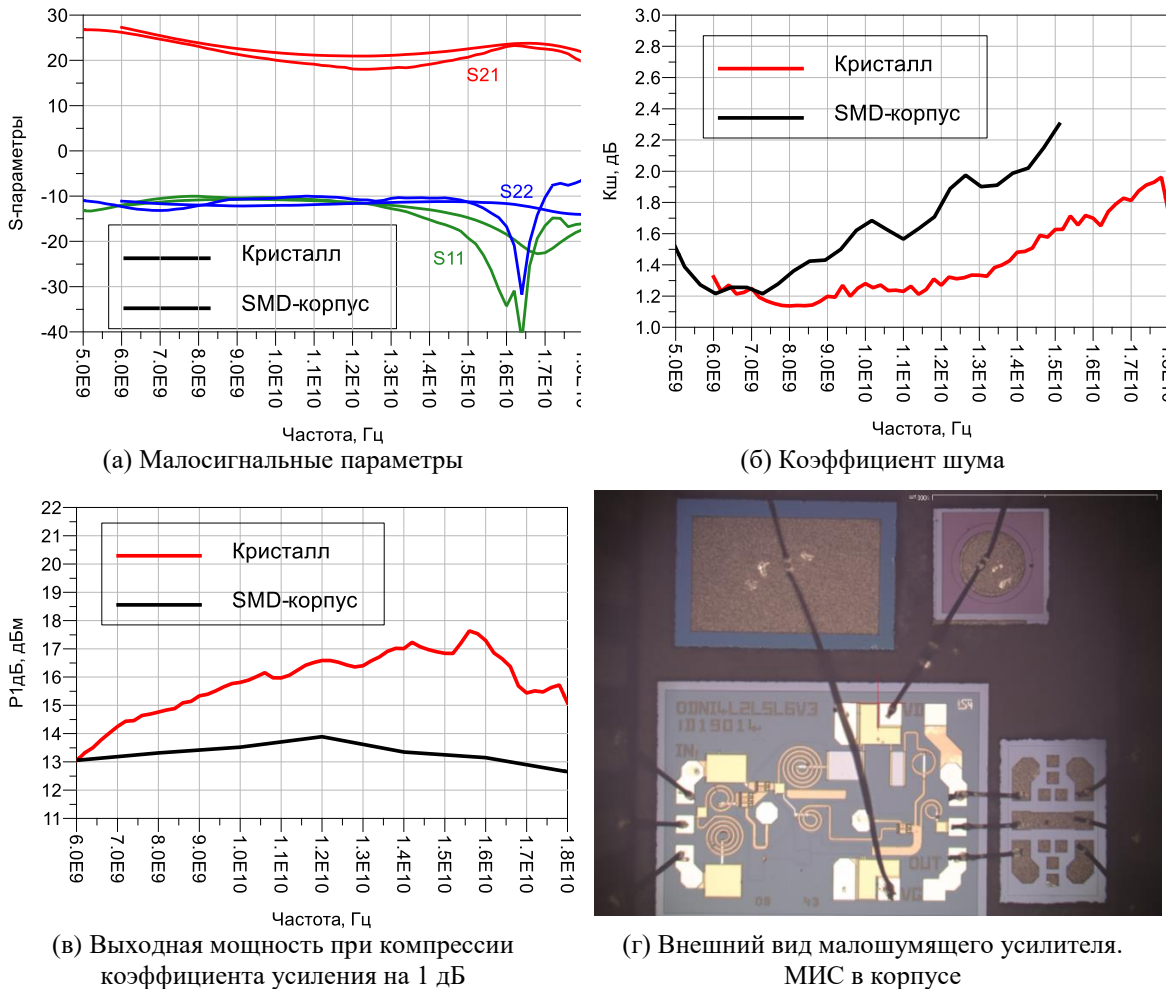


Рисунок 2. Электрические параметры МШУ и внешний вид

Результаты измерений малосигнальных параметров разработанных схем представлены на рисунке 2(а). Коэффициент усиления МИС МШУ в полосе частот 6–18 ГГц превышает 20 дБ, МШУ в SMD-корпусе в полосе частот 7 – 14 ГГц превышает 18 дБ. Согласование по входу и выходу МШУ менее -10 дБ в двух типах исполнения в заявленных диапазонах частот. Зависимость коэффициента шума от частоты приведена на рисунке 2(б). Кристалл МШУ в диапазоне частот 6 – 18 ГГц имеет коэффициент шума не более 2 дБ, при этом в диапазоне 6 – 14 ГГц он не превышает 1.5 дБ. МШУ в SMD-корпусе имеет коэффициент шума менее 2 дБ в диапазоне частот 7 – 14 ГГц. Зависимость выходной мощности при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ от частоты приведена на рисунке 2(в). Выходная мощность при компрессии коэффициента усиления 1 дБ выше 13 дБм в диапазоне частот 6 – 17 ГГц в двух типах исполнения МШУ.

Поскольку разработанные изделия предназначены для использования в аппаратуре космического применения, к ним предъявлены повышенные требования по надёжности и стойкости к внешним воздействиям. Соответствие этим требованиям подтверждено экспериментально в ходе предварительных и государственных

испытаний опытных образцов:

- испытания на безотказность в форсированных режимах показали, что гамма-процентная наработка до отказа изделия при $\gamma=95\%$ и температуре окружающей среды до $+65^\circ\text{C}$ составляет не менее 150 000 ч в пределах срока службы 25 лет;

- стойкость к воздействию механических, климатических факторов и специальных сред соответствует группе унифицированного исполнения 6У по ГОСТ РВ 20.39.414.1;

- стойкость к воздействию специальных факторов превышает требования группы 4У ГОСТ РВ 20.39.414.2, при этом временная потеря работоспособности не более 10 мкс; воздействие космических частиц с ЛПЭ до $60 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ не вызывает отказов изделия.

Обобщение полученных результатов и ранее опубликованных данных либо коммерчески выпускаемых МШУ приведены в таблице 1. Описанные в данной работе МШУ по совокупности параметров имеют сравнимые характеристики с зарубежными аналогами.

Таблица 1. Сравнение электрических характеристик разработанной схемы и аналогов

Параметр	НМС564	CMD328	QPA	НМС	ММА	[7]	Данная работа (МИС)	Данная работа (SMD)
	LC4 [2]	[3]	2609D [4]	516 [5]	044AA [6]			
Рабочий диапазон частот, ГГц	7–14	6–18	7–14	7–17	6–18	7–14	6–18	7–14
K_u , дБ	16	25.5	26	19	21	26	20	18
$K_{ш}$, дБ	2.1	1.9	1.2	3	2.3	1.6	2	2
КСВН _{вх/вых}	1.5/1.6	2/1.4	1.6/1.8	3/1.8	1.7/1.7	2/1.7	1.8/1.8	1.9/2
$P_{1дБ}$, дБм	13	11.5	17	11.5	16	13	13	13
Ток потребления, мА	52	52	120	65	100	60	85	85
Исполнение	SMD	МИС	МИС	МИС	МИС	МИС	МИС	SMD
Напряжение питания, В	+3	+3	+3.5	+3.5	+4	1.5/-0.3	+5/-5	+5/-5

4. Заключение

В работе были представлены результаты разработки малошумящего усилителя С – K_u диапазона частот. МШУ реализован в двух исполнениях – кристалл МИС; - схема в металлокерамическом корпусе SMD. МИС МШУ изготовлен по технологии GaAs рНЕМТ с длиной затвора 0.1 мкм, реализованной в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

МИС МШУ в рабочей полосе частот 6 – 18 ГГц имеет коэффициент усиления свыше 20 дБ при КСВН по входу и выходу менее 2. Коэффициент шума не превышает 2 дБ. МШУ в SMD-корпусе в диапазоне частот 7 – 14 ГГц имеет коэффициент усиления более 18 дБ при коэффициенте шума менее 2 дБ.

Список литературы

1. Алмазов-Долженко, К. И. Коэффициент шума и его измерение на СВЧ / К. И. Алмазов-Долженко; Под ред. Н. Д. Девяткова. - М. : Науч. мир, 2000. - 239 с., с.32-38.
2. НМС564LC4, – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc564lc4.pdf> (дата обращения 05.04.2021).
3. CMD328, – URL: <https://www.qorvo.com/products/p/CMD328> (дата обращения 05.04.2021).
4. QPA2609D, – URL: <https://www.qorvo.com/products/p/QPA2609D> (дата обращения 05.04.2021).

5. HMC516, – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc516chips.pdf> (дата обращения 05.04.2021).
6. MMA044AA, – URL: <https://www.microsemi.com/existing-parts/parts/137227#overview> (дата обращения 05.04.2021).
7. Peng, Y. Y., Lu, K. J., & Sui, W. Q. (2010). A 7- to 14-GHz GaAs pHEMT LNA with 1.1 dB noise figure and 26 dB gain. *Microwave and Optical Technology Letters*, 52(11), 2615–2617.