

GaAs pHEMT монолитные интегральные схемы усилителей мощности 26-38 ГГц

А.С. Ефимов, А.М. Емельянов, Е.А. Кривоногова, С.Д. Зинкин, А.В. Груша

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Аннотация: в докладе представлены результаты разработки двух типов монолитных интегральных схем широкополосных усилителей мощности Ka-диапазона. Технологический процесс изготовления разработанных схем реализован в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Усилитель первого типа (М4221333-8) обеспечивает коэффициент усиления более 17,5 дБ в диапазоне частот 26-38 ГГц, выходная мощность превышает 25,4 дБм при КПД свыше 19 %. Усилитель второго типа (М4221333-9) в диапазоне частот 26-38 ГГц имеет коэффициент усиления более 17 дБ, выходная мощность более 28,4 дБм при КПД свыше 19%. Показана возможность импортозамещения схем ведущих зарубежных фирм.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, усилитель мощности, Ka-диапазон, GaAs, полевой транзистор с затвором Шоттки.

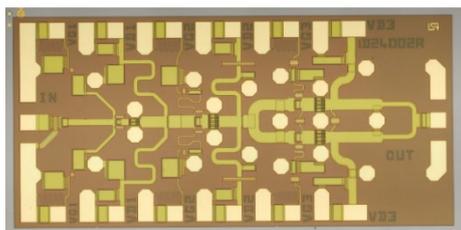
1. Введение

За рубежом выпускается ряд монолитных интегральных схем (МИС) усилителей мощности Ka-диапазона, обеспечивающих вариативность при построении радиоэлектронной аппаратуры миллиметрового диапазона длин волн [1-4]. В России номенклатура МИС усилителей мощности крайне ограничена [5-6], не обеспечивает возможность импортозамещения, особенно с учётом повышающегося уровня электрических параметров GaAs МИС усилителей мощности Ka-диапазона [7-10].

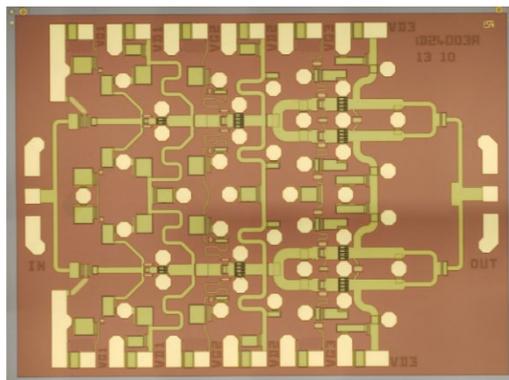
В данном докладе описаны результаты проектирования МИС СВЧ двух типов усилителей Ka-диапазона. В качестве активных элементов применены GaAs полевые транзисторы с затвором Шоттки на основе псевдоморфных гетероструктур с каналом InGaAs (GaAs pHEMT) и длиной затвора 0,13 мкм. Технологический процесс изготовления разработанных МИС СВЧ реализован в АО «НПП «Исток» им. Шокина.

2. Технология изготовления и проектирование МИС СВЧ

Разработанные МИС СВЧ широкополосных усилителей мощности Ka-диапазона частот выполнены на базе технологического процесса GaAs pHEMT с длиной затвора 0,13 мкм, реализованного в АО «НПП «Исток» им. Шокина», обеспечивающего создание двух уровней металлизации, воздушных мостов, двух типов конденсаторов (50 и 400 пФ/мм²), тонкопленочных металлических резисторов (40 Ом/□), меза-резисторов (100 Ом/□) и сквозных металлизированных отверстий. Толщина диэлектрической подложки GaAs – 100 мкм. Разрабатывались два типа МИС СВЧ. Первый тип, с выходной мощностью более 300 мВт, и второй, с выходной мощностью более 500 мВт. Для достижения целевых уровней мощности, первый тип усилителя является базовой ячейкой для второго типа МИС СВЧ. Схема усилителя первого типа включает три усилительных каскада. Общая периферия затвора выходного каскада составляет 800 мкм (2×8×50 мкм), предварительного – 400 мкм (8×50 мкм), входного – 200 мкм (4×50 мкм). Контактные площадки питания расположены симметрично по обе стороны кристалла. Фотографии изготовленных МИС усилителей представлены на рис. 1. Габаритные размеры МИС первого типа – 2,8×1,4 мм², второго – 3,2×2,4 мм².



(a)



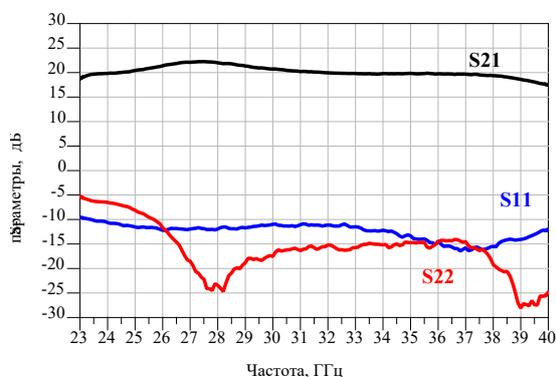
(б)

Рисунок 1. Фотографии МИС усилителей Ка-диапазона первого (а) и второго (б) типов

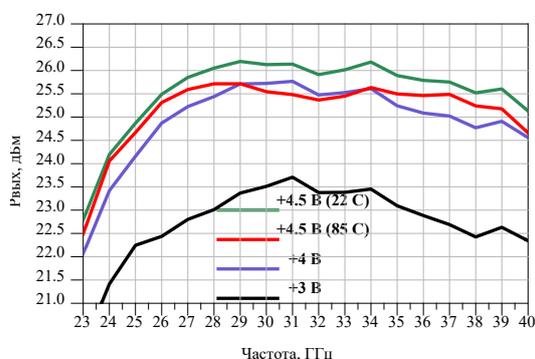
3. Экспериментальные результаты

Измерения изготовленных МИС усилителей были проведены на пластине сплошным контролем. Импеданс нагрузки 50 Ом. После резки пластины отдельные отобранные кристаллы измерены в сборке с вспомогательными кристаллами подачи питания. Режим питания при измерении электрических параметров – непрерывный. Типовой рабочий режим усилителей составляет 4,5 В, 330 мА и 660 мА для МИС первого и второго типов соответственно.

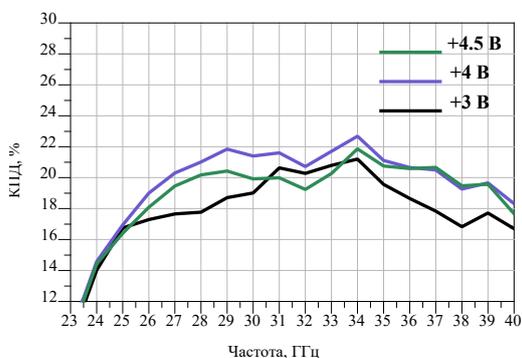
Результаты измерений электрических параметров МИС первого типа (M421333-8) представлены на рис. 2. Для измерений выходной мощности, КПД и тока потребления уровень входной мощности составляет 12 дБм.



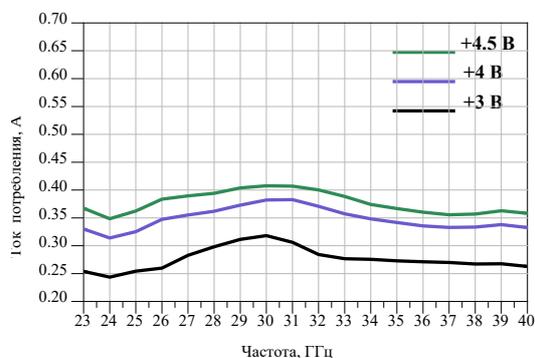
(a) Малосигнальные S-параметры



(б) Выходная мощность



(в) КПД



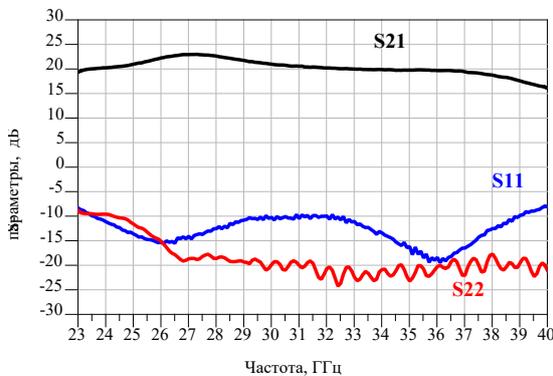
(г) Ток потребления

Рисунок 2. Электрические параметры МИС усилителя первого типа (M421333-8)

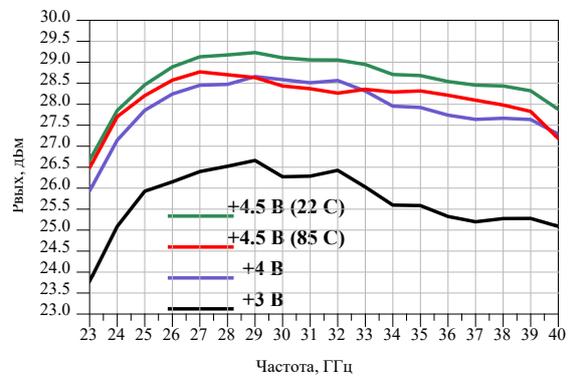
При температуре окружающей среды +22 °С коэффициент усиления МИС первого типа превышает 17,5 дБ в диапазоне частот 26-38 ГГц, КСВН входа и выхода менее 2. Выходная мощность насыщения МИС первого типа превышает 25,5 дБм при КПД свыше 19 % в диапазоне частот 26-38 ГГц. Выходная мощность при повышенной температуре окружающей среды, +85 °С, превышает 25,2 дБм.

Результаты измерений электрических параметров МИС второго типа (М421333-9) представлены на рис. 3. Для измерений выходной мощности, КПД и тока потребления уровень входной мощности составляет 15 дБм. При температуре +22 °С коэффициент усиления МИС первого типа превышает 17 дБ в диапазоне частот 26-38 ГГц, КСВН входа и выхода менее 2. Выходная мощность насыщения МИС второго типа превышает 28,4 дБм при КПД свыше 19 % в указанном диапазоне частот. Выходная мощность при повышенной температуре окружающей среды, +85 °С, превышает 27,9 дБм.

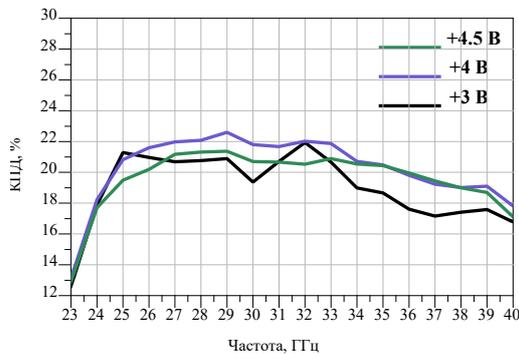
Снижение выходной мощности для представленных усилителей составляет 0,005-0,008 дБ/°С.



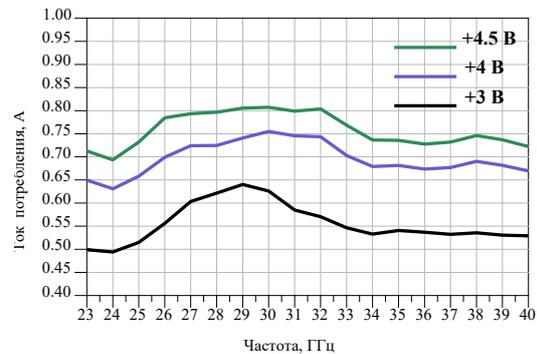
(а) Малосигнальные S-параметры



(б) Выходная мощность



(в) КПД



(г) Ток потребления

Рисунок 3. Электрические параметры МИС усилителя второго типа (М421333-9)

В табл. 1 приведены параметры современных МИС усилителей мощности Ка-диапазона частот с уровнем выходной мощности близким к разработанным МИС. Разработанные МИС широкополосных усилителей обеспечивают мировой уровень достижений в разработке МИС усилителей Ка-диапазона. Достигнутые характеристики усилителей обеспечивают возможность применения разработанных МИС СВЧ как при новых разработках, так и с целью импортозамещения в современных системах радиоэлектронной аппаратуры, измерительного оборудования, широкополосных систем связи и радиолокации миллиметрового диапазона длин волн.

Таблица 1. Сравнительная таблица МИС усилителей Ка-диапазона

Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{вых}}$, дБм	K_u , дБ	КПД, %	Ток стока, А	Напряжение стока, В	Технология реализации	Габаритные размеры, мм×мм ²	Ссылка
26-38	>25.4	>17.5	>19	<0.4	4.5	0.13 μm GaAs pHEMT	2.8×1.4	M421333-8 (Данная работа)
26-38	>28.4	>17	>19	<0.8	4.5	0.13 μm GaAs pHEMT	3.2×2.4	M421333-9 (Данная работа)
26-38	>27	>25	>16	<0.8	5	0.15 μm GaAs pHEMT	2.74×1.49	MM3054 [1]
28-38	>26.5	>23	>12	<0.17	20	0.15 μm GaN on SiC	1.65×0.67	QPA2225D [2]
27-31	>27	>25	>18	<0.5	5.5	GaAs pHEMT	2.18×1.0	MAAP-011341-DIE[3]
20-42	>28	>14	>8	<1.2	5	GaAs pHEMT	2.75×1.8	ADPA7002 [4]
26-30	>28	>17	>13	<1	6	0.25 μm GaAs pHEMT	3.5×2.5	MP560 [5-6]
19-32	>24	>13	>26	<0.25	5	0.15 μm GaAs pHEMT	2×1	[7]
26-34	>22	>13	>30	<0.13	6	0.15 μm GaAs pHEMT	2.1×1.4	[8]
26-31	>27	>13	>22	<0.35	12	0.15 μm GaAs pHEMT	1.6×1.3	[9]
24-38	>23.5	>15	>21	<0.25	5	0.15 μm GaAs pHEMT	2×1	[10]
24-32	>28.5	>15	>27	<0.5	5	0.15 μm GaAs pHEMT	2.4×1.1	[10]

3. Заключение

Представлены результаты разработки двух МИС широкополосных усилителей мощности Ка-диапазона, изготовленных по технологическому процессу 0,13 мкм GaAs pHEMT, реализованному в АО «НПП «Исток» им. Шокина». МИС первого типа обеспечивает коэффициент усиления более 17,5 дБ в диапазоне частот 26-38 ГГц, выходная мощность превышает 25,5 дБм при КПД свыше 19 %. МИС второго типа имеет коэффициент усиления более 17 дБ, выходная мощность более 28,4 дБм при КПД свыше 19% в диапазоне частот 26-38 ГГц.

Список литературы

1. Техническое описание MM3054. URL: <https://millermmic.com/product/amplifiers/powerAmplifiers/MM3054> (дата обращения 20.01.2025)
2. Техническое описание QPA2225D. URL: <https://www.qorvo.com/products/p/QPA2225D> (дата обращения 21.01.2025)
3. Техническое описание MAAP-011341-DIE. URL: <https://www.macom.com/products/product-detail/MAAP-011341-DIE> (дата обращения 21.01.2025).

4. Техническое описание ADPA7002. URL: <https://www.analog.com/en/products/adpa7002.html> (дата обращения 21.01.2025).
5. Е. В. Ерофеев, Д. А. Шишкин, В. В. Курикалов и др. Разработка СВЧ монолитных интегральных схем миллиметрового диапазона на основе GaAs для применения в современных информационнокоммуникационных системах нового поколения (5G) // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-1. – С. 321-324. – DOI 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.321.324.
6. Техническое описание MP560. URL: https://www.micran.ru/upload/iblock/e6a/mtossh2ndfvj80b04ujq2wiskw9etm12/MP560_V01.0004.pdf (дата обращения 31.01.2025).
7. В. -W. Huang, Z. -H. Fu and K. -Y. Lin, "A Millimeter-Wave Ultra-Wide Band Power Amplifier in 0.15- μ m GaAs pHEMT for 5G Communication," 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Yokohama, Japan, 2022, pp. 97-99, doi: 10.23919/APMC55665.2022.10000027.
8. D. P. Nguyen, X. -T. Tran, N. L. K. Nguyen, P. T. Nguyen and A. -V. Pham, "A Wideband High Efficiency Ka-Band MMIC Power Amplifier for 5G Wireless Communications," 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Sapporo, Japan, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISCAS.2019.8702092.
9. D. P. Nguyen and A. -V. Pham, "An Ultra Compact Watt-Level Ka-Band Stacked-FET Power Amplifier," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 26, no. 7, pp. 516-518, July 2016, doi: 10.1109/LMWC.2016.2574831.
10. Z. -H. Fu, M. -X. Li, T. -G. Ma, C. -S. Wu and K. -Y. Lin, "Millimeter-Wave GaAs Ultra-Wideband Medium Power Amplifier and Broadband High-Power Power Amplifier for 5G/6G Applications," in IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, vol. 14, no. 1, pp. 111-121, March 2024, doi: 10.1109/JETCAS.2024.3356010.