

Александр Кабанов
radiant@ranet.ru

Комплект МИС СВЧ

для приемопередающих модулей 8-мм диапазона длин волн

В работе показаны характеристики серийных GaAs-кристаллов усилителя мощности, маломощного усилителя и активного умножителя на 4, предназначенных для применения в приеме-передающих трактах 8-мм диапазона длин волн с общей герметизацией. Приборы разработаны по технологии 0,15 мкм GaAs pHEMT компанией АО «Радиант-ЭК» с целью развития ЭКБ в России и импортозамещения.

Введение

Ка-диапазон известен тем что, имеет высокое атмосферное поглощение и короткую длину волны, что позволяет на небольших расстояниях проводить измерения сверхвысокого разрешения при небольших массогабаритных размерах радаров. Поэтому данный диапазон используется в таких системах, как управление воздушным движением, радиорелейная связь, терминалы спутниковой связи, РЛС, АФАР, автомобильные системы и т. д. Структурные схемы некоторых из возможных применений показаны на рис. 1.

В работе представлены конструкции серийных МИС СВЧ-усилителя мощности (УМ), маломощного усилителя (МШУ) и активного умно-

жителя на 4 для применения в составе как выше указанных, так и других приемопередающих модулей 8-мм диапазона длин волн, с общей герметизацией.

Описание конструкции модуля m421442 усилителя мощности

Усилитель мощности 8-мм диапазона длин волн — модуль СВЧ M421442 реализован по технологии 0,15 мкм GaAs pHEMT на 100-мкм подложке (предельная частота усиления по току 90 ГГц, рабочее напряжение 6 В, максимальный ток стока 600 мА/мм, пробивное напряжение сток-затвор 16 В, крутизна 460 мС/мм). Структурная схема представлена на рис. 2. УМ состоит из двух идентичных каналов, объединенных

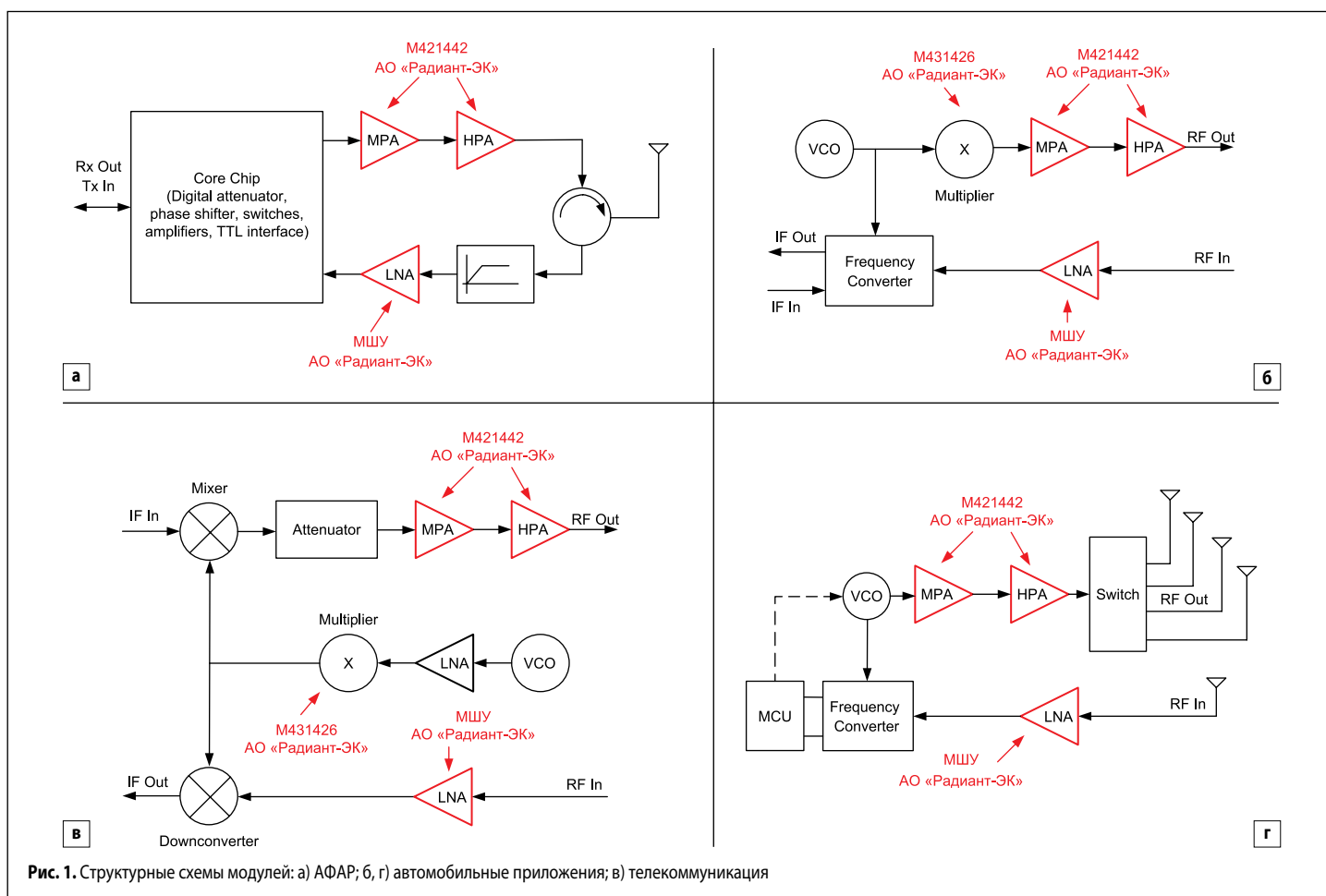


Рис. 1. Структурные схемы модулей: а) АФАР; б, в) автомобильные приложения; в) телекоммуникация

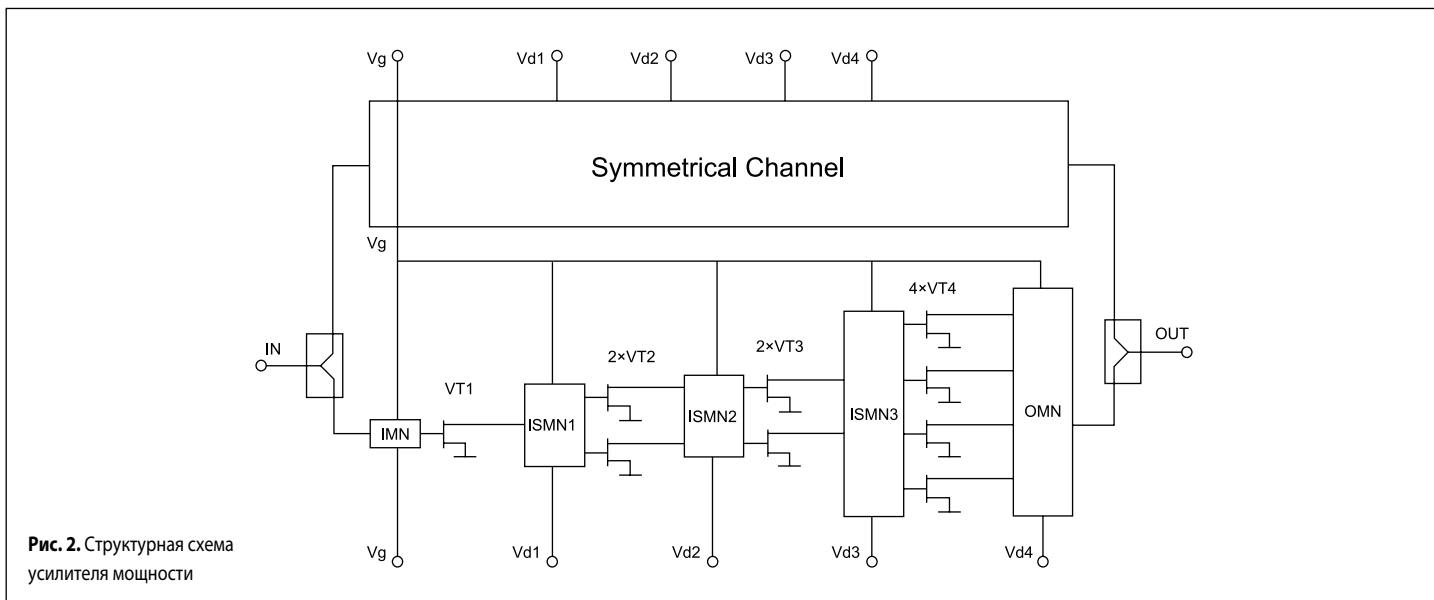


Рис. 2. Структурная схема усилителя мощности

по входу/выходу синфазными делителем/сумматором. Канал построен по линейной 4-каскадной схеме. Напряжение питания по затвору общее. Питание по стоку не объединено, и его необходимо подавать с двух сторон кристалла на каждый каскад. Выходной каскад реализован на транзисторах размером 10×75 мкм с общей шириной затворов в канале 3 мм. Выходная согласующая цепь реализована параллельным сумматором типа «шина». Применены схемотехнические решения для обеспечения безусловной устойчивости каскадов и снижения разбаланса между транзисторами.

На рис. 3 показана фотография кристалла усилителя мощности, смонтированного на металлическое основание, с фильтрующими конденсаторами по питанию. Габаритные размеры кристалла $2,87 \times 2,56$ мм.

Зондовые измерения СВЧ-характеристик выполнены в импульсном режиме со следующими параметрами: длительность импульса 5 мкс,

период 250 мкс. Напряжение сток-исток модулировалось, напряжение смещения затвора было постоянным.

На рис. 4 показаны малосигнальные S-параметры при входной мощности -20 дБм, напряжение на стоках $+6$ В, напряжение на затворе $-0,9$ В, ток покоя $I_{dq} = 1,2$ А. В диапазоне частот 30–40 ГГц коэффициент усиления находится в пределах 22–26 дБ, КСВН по входу и выходу не более 2,5.

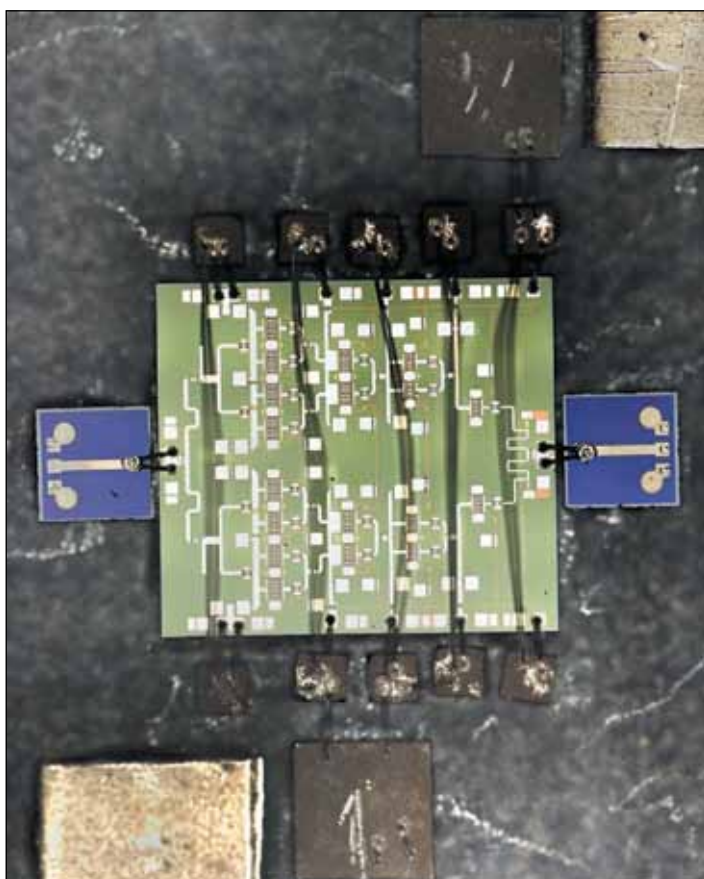


Рис. 3. Смонтированный кристалл усилителя мощности

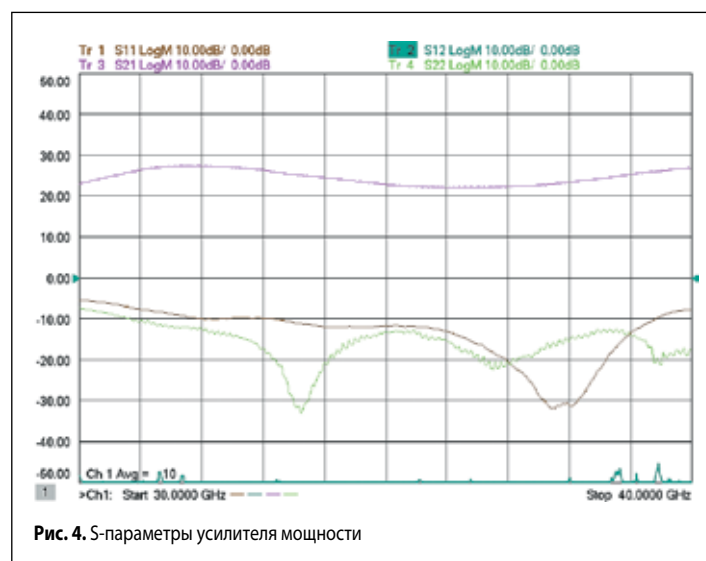


Рис. 4. S-параметры усилителя мощности

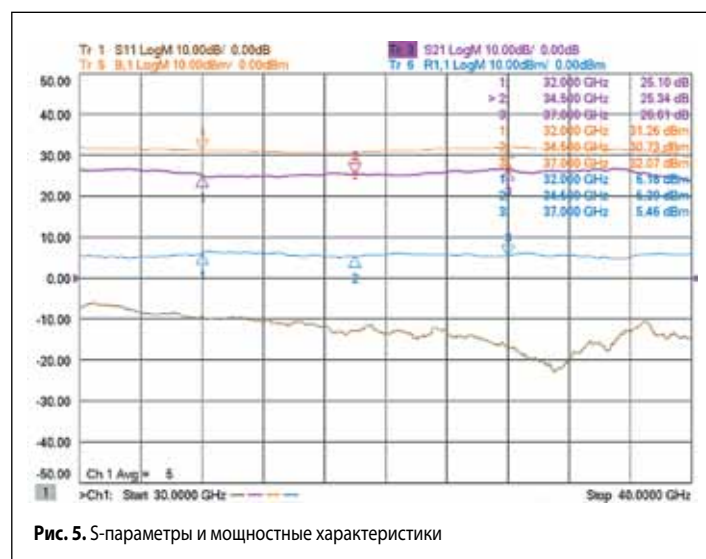


Рис. 5. S-параметры и мощностные характеристики

Таблица 1. Сравнение параметров усилителей

Параметр	M421442AO «Радиант-ЭК»	HMC1029 Analog Device [1]	TGA4516 Qorvo [2]	TGA2575 Qorvo [3]
Диапазон частот, ГГц	32-37 (30-40)	29-37 (32-37)	30-40 (32-37)	32-38
Коэффициент усиления, дБ	22-27	22-25	14-20 (17-20)	16-20
КСВН входа/выхода	2/2 3/2	1,4/1,5	5/4 (3,8/3,8)	1,6/1,6
Выходная мощность P1dB, Вт	1,19-1,61 (1-1,61)	0,98-2 (1,41-2)	1,78-2,51 (1,95-2,51) ¹	1,29-3,31
Мощность потребления, Вт	9-15	8,5	9	-
Площадь кристалла, мм ²	7,35	8	6,5	22,3

Примечание. 1. Мощность насыщения.

На рис. 5 приведены частотные зависимости коэффициента усиления, возвратные потери по входу, мощность на входе (Tr 5) и выходе (Tr 6) усилителя. Режим измерений: входная мощность 5–6 дБм, напряжение на стоках +6 В, напряжение на затворе –0,4 В, ток потребления 2,5 А. В диапазоне частот 30–40 ГГц выходная мощность при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ (P1dB) находится в пределах 1–1,61 Вт, коэффициент усиления 25–26,6 дБ, возвратные потери по входу не более 3. В диапазоне частот 32–40 ГГц КСВН не более 2, выходная мощность P1dB составляет 1,19–1,61 Вт. Расчетное значение теплового сопротивления кристалла для непрерывного режима равно 8,5 °C/W при температуре канала +150 °C.

В табл. 1 представлено сравнение кристалла усилителя мощности с зарубежными аналогами.

Описание конструкции модуля м431426: умножитель частоты на 4

Активный умножитель на 4 — модуль СВЧ М431426 реализован на технологии 0,15 мкм GaAs pHEMT на 100-мкм подложке (предельная частота усиления по току 85 ГГц, рабочее напряжение 5 В, максимальный ток стока 500 мА/мм, пробивное напряжение сток-затвор 8 В, крутизна 580 мС/мм).

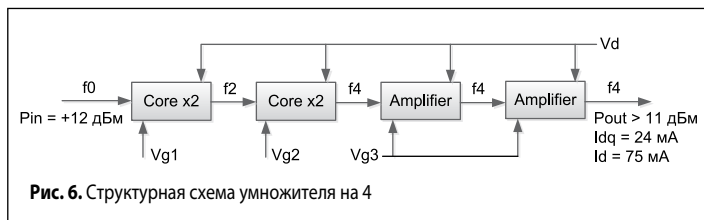


Рис. 6. Структурная схема умножителя на 4

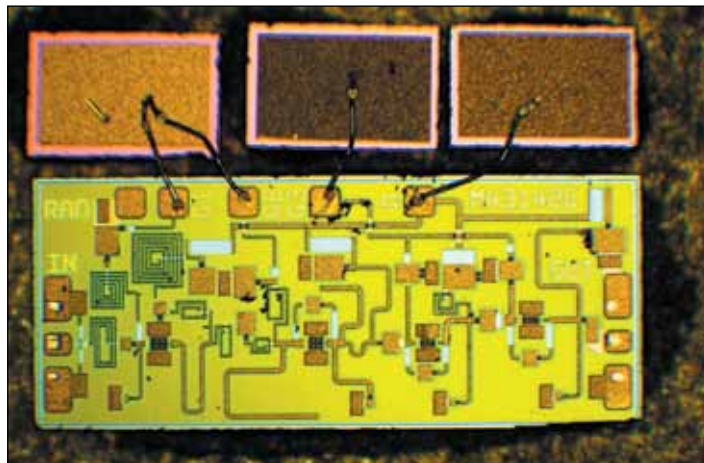


Рис. 7. Смонтированный активный умножитель на 4

МИС СВЧ умножителя предназначен для умножения спектра входного сигнала в диапазоне частот 8–10 ГГц в выходной диапазон частот 32–40 ГГц, при номинальной входной мощности сигнала +12 дБм.

Данный проект завершился в 2022 году. На этапе разработки стоял выбор структуры построения умножителя. Чтобы реализовать требуемые параметры, был проведен анализ единичной ячейки умножения на 2. Анализ работы транзистора в режиме умножения заключался

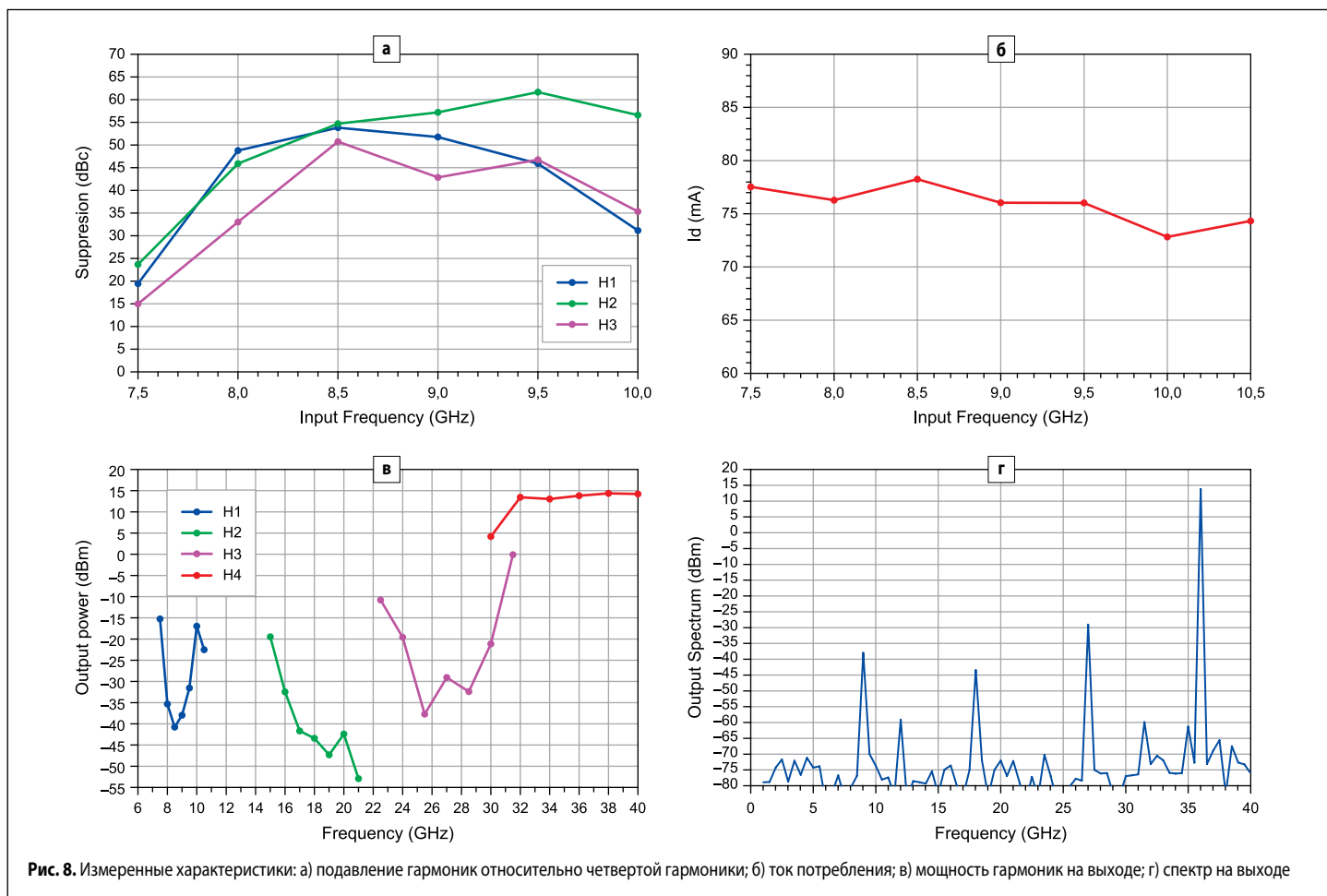


Рис. 8. Измеренные характеристики: а) подавление гармоник относительно четвертой гармоники; б) ток потребления; в) мощность гармоник на выходе; г) спектр на выходе

Таблица 2. Сравнение параметров умножителей на 4

Параметр	M431426 АО «Радиянт-ЭК»	SNX2092a UMS [4]	MM4004 Miller MMIC [5]	[6] Fujitsu
Диапазон входной частоты, ГГц	8–10	9–10 (8–10)	8,5–9	8–10
Диапазон выходной частоты, ГГц	32–40	36–40 (32–40)	34–36	32–40
Входная мощность, дБм	12	12	1	4,5
Выходная мощность, дБм	13–14,3	9–11 (2–11)	16–18,3	8–20
Подавление 1-й гармоники, дБм	3–53	34–39 (17–39)	-	39–59
Подавление 2-й гармоники, дБм	45–61	27–37 (17–37)	-	19–40
Подавление 3-й гармоники, дБм	33–50	14–21	-	40–75
Мощность потребления, мВт	280	280	-	1596
Площадь кристалла, мм ²	2,32	2,24	6,6	2,76

Примечание. 1. Относительно четвертой гармоники.

в нахождении оптимальных значений напряжений на стоке и затворе и определении требуемой мощности накачки для достижения минимального коэффициента преобразования. На основе этого была выбрана следующая структурная схема (рис. 6) — покаскадное умножение на 2 с последующими двумя каскадами усиления.

Применены схемотехнические решения для обеспечения безусловной устойчивости как каскадов умножения, так и каскадов усиления. Ширины транзисторов в каскадах усиления выбраны с учетом работы в режиме насыщения. Рабочий ток покоя каскадов умножения составляет 16 мА/мм, каскадов усиления — 100 мА/мм.

На рис. 7 показана фотография кристалла умножителя, подготовленного для зондовых измерений. Кристалл смонтирован на металлическое основание, с фильтрующими конденсаторами по питанию. Габаритные размеры кристалла составляют 2,32×1 мм.

Результаты измерений, проведенных на данной сборке, показаны на рис. 8. Измерения проводили в следующем режиме: входная мощность +12 дБм, напряжения на затворах $V_{g1} = V_{g2} = -0,8$ В, $V_{g3} = -0,4$ В и напряжение на стоке $V_d = +3,5$ В. В этом режиме ток потребления в покое 24 мА, в режиме большого сигнала не превышает 80 мА (рис. 8б). Выходная мощность в диапазоне выходных частот 32–40 ГГц составляет 13–14,3 дБм (рис. 8в). В диапазоне входных частот 8–10 ГГц подавление гармоник в выходном спектре относительно четвертой гармоники составляет: для первой гармоники в пределах 31–53 дБ, для второй — в пределах 45–61 дБ, для третьей — в пределах 33–50 дБ (рис. 8а). На рис. 8г показан спектр сигнала на выходе умножителя для входной частоты 9 ГГц.

В табл. 2 дается сравнение умножителя M431426 с зарубежными аналогами.

Описание конструкции малошумящего усилителя в Ка-диапазоне

Малошумящий усилитель реализован на той же технологии, что и умножитель на 4. Структурная схема кристалла МШУ показана на рис. 9. Усилитель состоит из трех каскадов с последовательно-параллельным питанием и цепями автосмещения. Данное решение позволяет снизить ток потребления и расширить применимость усилителя, так как требуется одно положительное напряжение питания. Для обеспечения минимума коэффициента шума и устойчивости схемы, в первом каскаде применена последовательная обратная связь. Ширины транзисторов в каскадах усиления выбраны с учетом работы в режиме насыщения. Режим транзисторов по току 100 мА/мм. Габаритные размеры кристалла составляют 2×1 мм.

На рис. 10 представлена фотография кристалла МШУ, подготовленного для зондовых измерений. Кристалл смонтирован на металлическое основание, с фильтрующим конденсатором по питанию.

Результаты зондовых измерений МШУ, проведенные на данной сборке показаны на рис. 11. Режим измерений: входная мощность –20 дБ, напряжение питания +5 В, температура окружающей среды +25 °С. Прибор в диапазоне частот функционирования 20–40 ГГц имеет коэффициент усиления 23–26 дБ (рис. 11б), возвратные потери по выходу не более –8 дБ (рис. 11а). Выходная мощность составила 10–12 дБм, при входной мощности –9 дБм (рис. 11б). Возвратные потери по входу в рабочем диа-

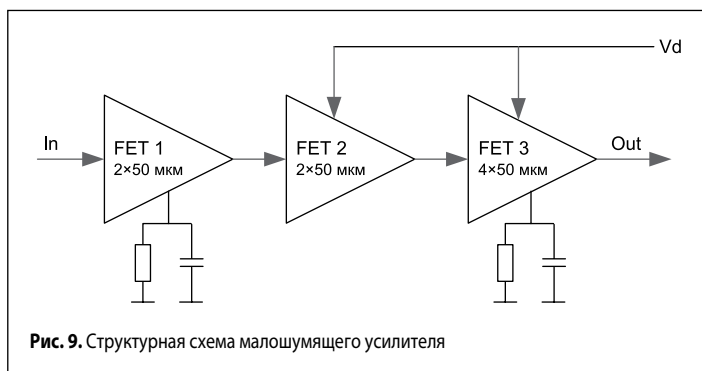


Рис. 9. Структурная схема малошумящего усилителя

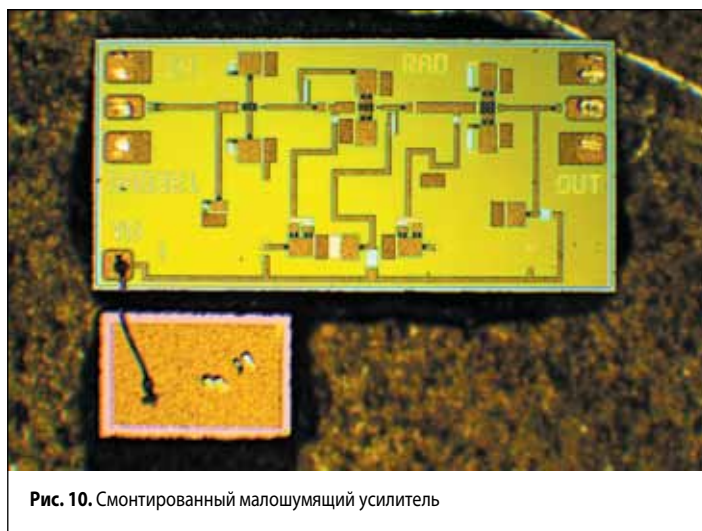


Рис. 10. Смонтированный малошумящий усилитель

Таблица 3. Сравнение параметров малошумящих усилителей

Параметр	Диапазон частот, ГГц	Коэффициент усиления, дБ	Коэффициент шума, дБ	КСВН входа/выхода	Выходная мощность, дБм	Мощность потребления, мВт	Площадь кристалла, мм ²
Данная работа АО «Радиянт-ЭК»	20–40 (32–37)	22–26 (24–26)	2,5–4 (2,3–2,6)	5/2,5 (3/2,2)	10–12,5 (11,5–12,5)	100–170	2
XL1000-BD Macom [7]	20–40 (32–37)	16–23 (17,5–19)	1,9–4 (1,9–2,3)	3/3 (1,5/1,5)	10–11,5 (10–11)	105–250	2
CMD299 Qorvo [8]	18–40 (32–37)	14–17	3,5–4,2 (3,5–3,8)	2/2,5	2–8 (7–8)	991	2,99
HMC1040 Analog Device [9]	20–44 (32–37)	19–26 (22–24)	2–5,5 (2–2,2)	5/1,5 (2/1,5)	12–15,5 (14,5–15)	163–198	1,94
CY2260UH/C1 Ommic [10]	24–44 (32–37)	25,5–26,5 (25,5)	1,2–2,1 (1,5–1,8)	1,7/2 (1,5–1,4)	4–7 (6,5–7)	771	5,04
MMLO18 Miller MMIC [11]	20–40 (32–37)	19–22 (21–22)	3,2–4 (3,3–3,5)	2,5/1,5	7–10 (7–8,5)	114–189	2,6
ASL1030 Aelius [12]	18–40 (32–37)	19–23 (21–21,5)	2–3,7 (2–3,5)	5/3 (5/1,5)	6–11,5 (10,5–11,5)	138–220	2,21

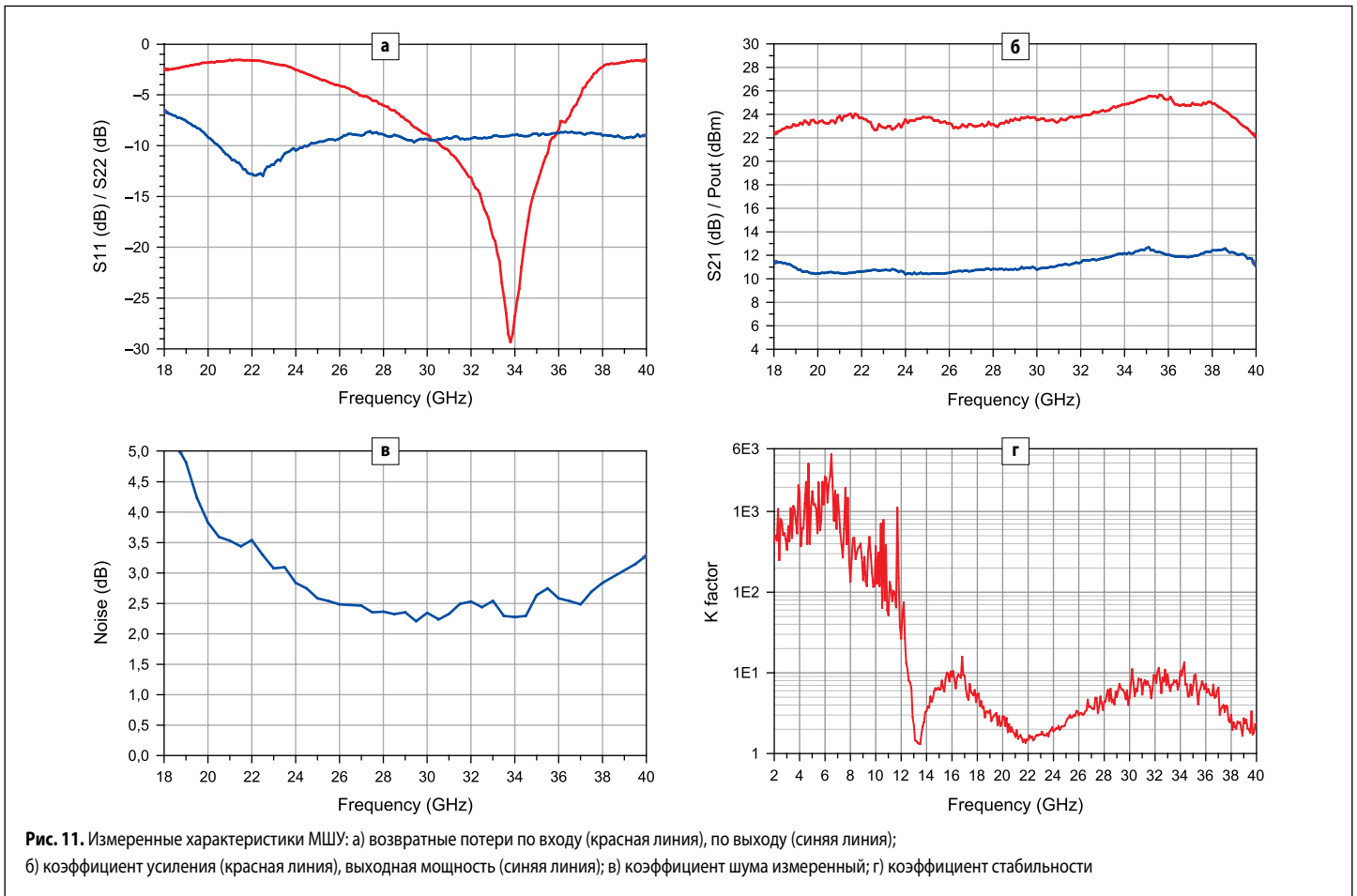
Примечание. 1. Двухполярное питание. 2. Технология 0,07 мкм GaAs mHEMT.

пазоне 32–37 ГГц не более –6 дБ, коэффициент шума не более 2,3–2,8 дБ (рис. 11в). Ток потребления 34 мА. Измерения коэффициента усиления при температуре столка +85 °С показало снижение на 1 дБ. На рис. 11г отображен график устойчивости усилителя по критерию k-фактора, минимальное значение 1,5.

В табл. 3 дается сравнение разработанной МИС СВЧ МШУ с зарубежными аналогами.

Заключение

В статье показаны характеристики разработанных серийных приборов, предназначенных для применения в составе герметизированных приемо-передающих модулей в Ка-диапазоне частот. Требуемые параметры кристаллов были получены с первой итерации. Сравнение с зарубежными аналогами показало, что достигнутые значения находятся на одном уровне. Компания АО «Радиянт-ЭК» может провести разработку приборов по техническому заданию заказчика.



В табл. 4–6 показаны параметры приборов при температуре окружающей среды +25 °С, согласно техническим условиям, для поставки потребителю, категория качества «ОТК».

Литература

1. Datasheet HMC1029 Analog Devices.
2. Datasheet TGA4516 Qorvo. <https://www.qorvo.com/products/d/da004525>

Таблица 4. Модуль СВЧ M421442 усилитель мощности АБУК.434810.040 ТУ

Наименование параметра, единица измерения	Норма параметра	
	не менее	не более
Рабочий диапазон частот, ГГц	32	37
Коэффициент усиления, дБ	19	-
Выходная мощность насыщения, Вт	1,5	-
КСВН вход/выход	-	2
Ток потребления, мА	-	1600
Гамма-процентная наработка до отказа, при $\gamma = 90\%$, тыс. ч	50	-
Температура среды при эксплуатации, °С	-55	+85

Примечание. При напряжении питания на стоке +6 В.

Таблица 5. Модуль СВЧ M431426 активный умножитель на 4 АБУК.434840.003 ТУ

Наименование параметра, единица измерения	Норма параметра		
	не менее	номинал	не более
Диапазон входной частоты, ГГц	8	-	10
Диапазон выходной частоты, ГГц	32	-	40
Выходная мощность, мВт	9	11	-
КСВН вход/выход	-	-	2
Ток потребления, мА	-	80	130
Гамма-процентная наработка до отказа, при $\gamma = 90\%$, тыс. ч	50	-	-
Температура среды при эксплуатации, °С	-50	-	+85

Примечание. При напряжении на затворах Vg12 -0,8 В, Vg3 -0,4 В, напряжении на стоках Vd +3,5 В, входной мощность +12 дБм.

3. Datasheet TGA2575 Qorvo. <https://www.qorvo.com/products/d/da004116>
4. Datasheet CHX2092a United Monolithic Semiconductors.
5. Datasheet MM4004 Miller MMIC. https://www.millermmic.com/pdf/mmic_freqmultiplier/MM4004.pdf
6. Kamoza K., Bos T. A., Camargo E. A highly integrated Ka-band MMIC quadrupler. 2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IEEE Cat. No.04CH37535), Fort Worth, TX, USA, 2004, Vol. 1. DOI: 10.1109/MWSYM.2004.1335835
7. Datasheet XL1000-BD Macom. <https://cdn.macom.com/datasheets/XL1000-BD.pdf>
8. Datasheet CMD299 Qorvo. <https://www.qorvo.com/products/d/da007693>
9. Datasheet HMC1040 Analog Devices.
10. Datasheet CY2260UH/C1 Macom. https://www.ommic.com/datasheets/OMMIC_DATASHEET_LNA_CGY2260UH-C1.pdf
11. Datasheet MML018 Miller MMIC. https://millermmic.com/pdf/mmic_amplifier/MML018.pdf
12. Datasheet ASL1030 Aelius. https://www.aeliussemi.com/admin/uploads/751870572ASL1030_Rev1.0%20Mar%202018.pdf

Таблица 6. Модуль малошумящего СВЧ-усилителя в Ка-диапазоне

Наименование параметра, единица измерения	Норма параметра	
	не менее	не более
Рабочий диапазон частот, ГГц	20	40
Рабочий поддиапазон частот, ГГц	32	37
Коэффициент усиления, дБ	18	-
Коэффициент шума в рабочем поддиапазоне частот, дБ	-	3
Выходная мощность, дБм	9	-
КСВН вход/выход в рабочем поддиапазоне частот	-	3
Ток потребления, мА	-	40
Гамма-процентная наработка до отказа, при $\gamma = 90\%$, тыс. ч	50	-
Температура среды при эксплуатации, °С	-50	+85

Примечание. При напряжении питания +5 В.