

УДК 621.375.4

Д.Л. Гнатюк, Ю.В. Федоров, Г.Б. Галиев, Р.Р. Галиев, М.Ю. Щербакова

Монолитные интегральные схемы маломощных усилителей КВЧ-диапазона на GaAs рНЕМТ-гетероструктурах

Представлены результаты разработки монолитных интегральных схем (МИС) маломощного усилителя (МШУ) КВЧ-диапазона. Для обеспечения работы усилителя без цепей смещения затвора ($V_{gs} = 0$ В) и одновременного достижения требуемых СВЧ-параметров была проведена оптимизация AlGaAs/InGaAs/GaAs рНЕМТ-гетероструктуры с односторонним δ -Si-легированием на подложке GaAs. Разработанная технология изготовления рНЕМТ с грибообразными затворами длиной менее 0,1 мкм позволила создать базовые транзисторы с F_t до 75 ГГц и F_{max} до 180 ГГц. Проведены исследования по оптимизации их топологии для МШУ КВЧ-диапазона. Разработаны нелинейная и шумовая модели для базовых транзисторов. Они были использованы для проектирования схемы и топологии усилителя в средах Microwave Office и Advanced Design System. Изготовленные МИС трехкаскадных МШУ имеют в диапазоне частот 37–44 ГГц коэффициент усиления до 20 дБ при коэффициенте шума 2,5–3,3 дБ. Напряжение питания усилителей 2 В, потребляемый ток не более 60 мА. Размеры кристалла – 1,25×1,1 мм². Разработанные усилители по своим параметрам находятся на уровне серийно выпускаемых зарубежных образцов.

Ключевые слова: МИС СВЧ, маломощный усилитель, Ka-Band, рНЕМТ.

Введение. В настоящее время СВЧ монолитные интегральные схемы (МИС) получили широкое распространение во всем мире благодаря ряду преимуществ над своими гибридными аналогами. С ростом частоты преимущества СВЧ МИС становятся все более значимыми, позволяя сокращать массогабаритные характеристики оборудования, снижать себестоимость производства, повышать разрешающую способность антенн и т.д. Большое внимание в мире уделяется крайне высокочастотному (КВЧ) диапазону, в котором развиваются системы как военного, так и гражданского назначения (например, радиолокаторы, системы наведения и прицеливания, спутниковая связь, радиоастрономия, радиосвязь, медицинское оборудование), и в частности, Ka-диапазону, охватывающему частоты 26,5–40 ГГц. Благодаря низкому поглощению в атмосфере этот частотный диапазон является привлекательным для многих областей применения [1, 2].

Маломощный усилитель (МШУ) является основой входного тракта любой приемопередающей системы. В Институте СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН, г. Москва) впервые в России был разработан и изготовлен монолитный маломощный усилитель КВЧ-диапазона (МШУ КВЧ), не уступающий зарубежным аналогам.

Гетероструктура

В работе использовались рНЕМТ-гетероструктуры, выращенные методом МЛЭ на полупроводниковых подложках GaAs. Для получения большой подвижности электронов в канале при не слишком большой их концентрации (что необходимо для маломощных СВЧ-приборов) была проведена оптимизация рНЕМТ-гетероструктуры с односторонним δ -Si-легированием. Результат этой оптимизации показан на рис. 1. При измерении электрофизических параметров гетероструктуры методом эффекта Холла на специально выращенных образцах-спутниках были получены значения подвижности и концентрации 2D-электронного газа $\mu_e=7400$ см²/В·с, $n_s=1,4 \times 10^{12}$ см⁻² при $T=300$ К и $\mu_e=25500$ см²/В·с, $n_s=1,87 \times 10^{12}$ см⁻² при $T=77$ К.

Технология. Для формирования рисунка мезаизоляции, омических контактов, пассивации диэлектриком первого металла и слоев для гальванического осаждения металла применялась техника фотолитографии. Грибообразные затворы и переходные затворные площадки изготавливались с помощью электронно-лучевой литографии на установке Raith150-Two с размером луча около 1,6 нм и энергией 30 кэВ.

Для электронно-лучевого экспонирования использовалась трехслойная система резистов ПММА950/ПМГИ/ПММА950. Вначале производилось первое экспонирование верхней части затвора («шляпы») в виде линии шириной 0,8 мкм. Далее проявлялись два верхних слоя, сначала в растворе МИБК:ИПС 1:1, затем в проявителе А101 для ПМГИ.

δ -Si →	N+ GaAs 70 Å
	----- AlGaAs 260 Å
	GaAs (3 монослоя) Al _{0,2} Ga _{0,8} As (спейсер) 35 Å
	GaAs (3 монослоя)
	In _{0,18} Ga _{0,82} As 120 Å
	GaAs (буфер) 0,5 мкм
	Полуизолирующая GaAs(100) подложка

Рис. 1. Схема оптимизированной Р-НЕМТ гетероструктуры с односторонним δ -Si легированием

Базовые транзисторы. С использованием данной технологии были изготовлены транзисторы 2×30 мкм с грибообразным затвором длиной около 75 нм (рис. 2).

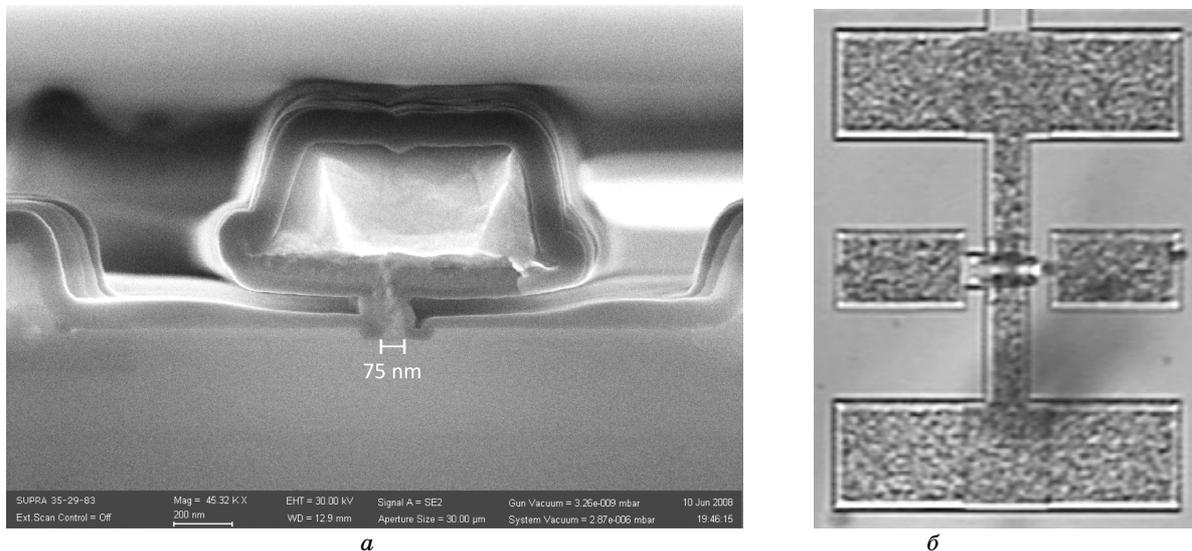


Рис. 2. Поперечное сечение грибообразного затвора длиной 75 нм (а) и внешний вид базового тестового транзистора 2×30 мкм (б)

После изготовления измерялись ВАХ и S -параметры транзисторов на частотах до 67 ГГц. Типичные значения предельных частот усиления по току F_t и по мощности F_{\max} транзисторов после деэбеддинга контактных площадок при напряжении $V_{gs} = 0$ В на затворе составили порядка 65–75 и 160–180 ГГц соответственно, что позволило использовать эти транзисторы в усилителях диапазона КВЧ.

На основе данных измерений была разработана нелинейная модель *Fujii* для расчета вольт-амперных характеристик и выходной мощности МШУ, а также линейная шумовая модель Поспешальского для оценки коэффициента шума.

Разработка принципиальной схемы и топологии усилителя

Усилитель содержит три каскада (рис. 3). Питание по стоку было выполнено от общей контактной площадки через согласующие цепи, а смещение по затвору для упрощения топологии не использовалось. Рабочая точка транзисторов ($V_{gs} = 0$ В) задавалась посредством оптимизации параметров гетероструктуры.

В первых двух каскадах усилителя для повышения усиления и снижения коэффициента шума были применены транзисторы 2×30 мкм с высоким значением предельной частоты усиления по мощности F_{\max} . В выходном каскаде для обеспечения необходимой выходной мощности были применены транзисторы 4×30 мкм.

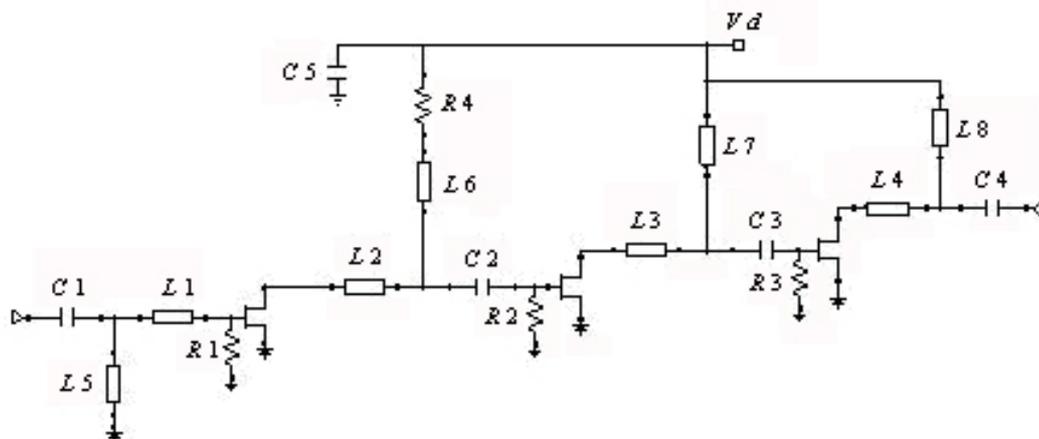


Рис. 3. Принципиальная схема малошумящего усилителя

Было разработано 2 варианта топологии усилителя, отличающихся цепями согласования по входу. Фотографии обоих вариантов усилителя после изготовления приведены на рис. 4, размер кристалла составляет $1,25 \times 1,1$ мм². Напряжение питания усилителей 2 В, потребляемый ток – не более 60 мА. Результаты моделирования характеристик МШУ КВЧ приведены на рис. 5, 6.

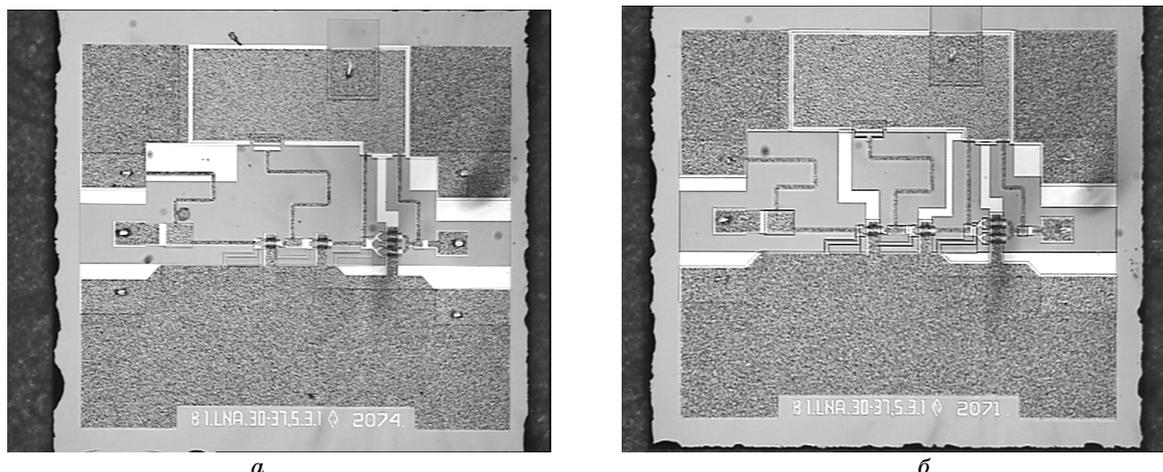


Рис. 4. Фотографии кристаллов малошумящего усилителя: а – тип 1; б – тип 2

Исследование СВЧ-характеристик и шумовых параметров изготовленных усилителей. После утонения пластины, изготовления сквозных отверстий и металлизации с обратной стороны были проведены измерения S -параметров имеющихся на пластине тестовых транзисторов. При этом выяснилось, что величина F_t транзисторов 2×30 мкм после деэбеддинга контактных площадок достигает 84,3 ГГц, а величина F_{max} – 241 ГГц, что выше, чем у транзисторов, взятых за основу при расчетах.

Далее были проведены подробные исследования сигнальных и шумовых характеристик МШУ КВЧ при помощи зондовых измерений на пластине вплоть до частоты 67 ГГц. Измеренные частотные характеристики усилителей показаны на рис. 5, 6.

Как можно видеть, усилители имеют схожие характеристики. Лучшая равномерность АЧХ имеет место для усилителей типа 1, однако у них меньше коэффициент усиления. Усилители типа 1 обеспечивают также более широкополосное согласование по входу, чем усилители типа 2, за счет разных значений входных согласующих индуктивностей. Уровень согласования по выходу усилителей примерно одинаков. Оба типа усилителей являются безусловно устойчивыми.

Исследование коэффициента шума полученных образцов выполнялось зондовым методом непосредственно на пластине в диапазоне частот от 26,5 до 40 ГГц. Типичные зависимости коэффициента шума усилителей показаны на рис. 5, в и 6, в, а на рис. 7 приведено их сравнение.

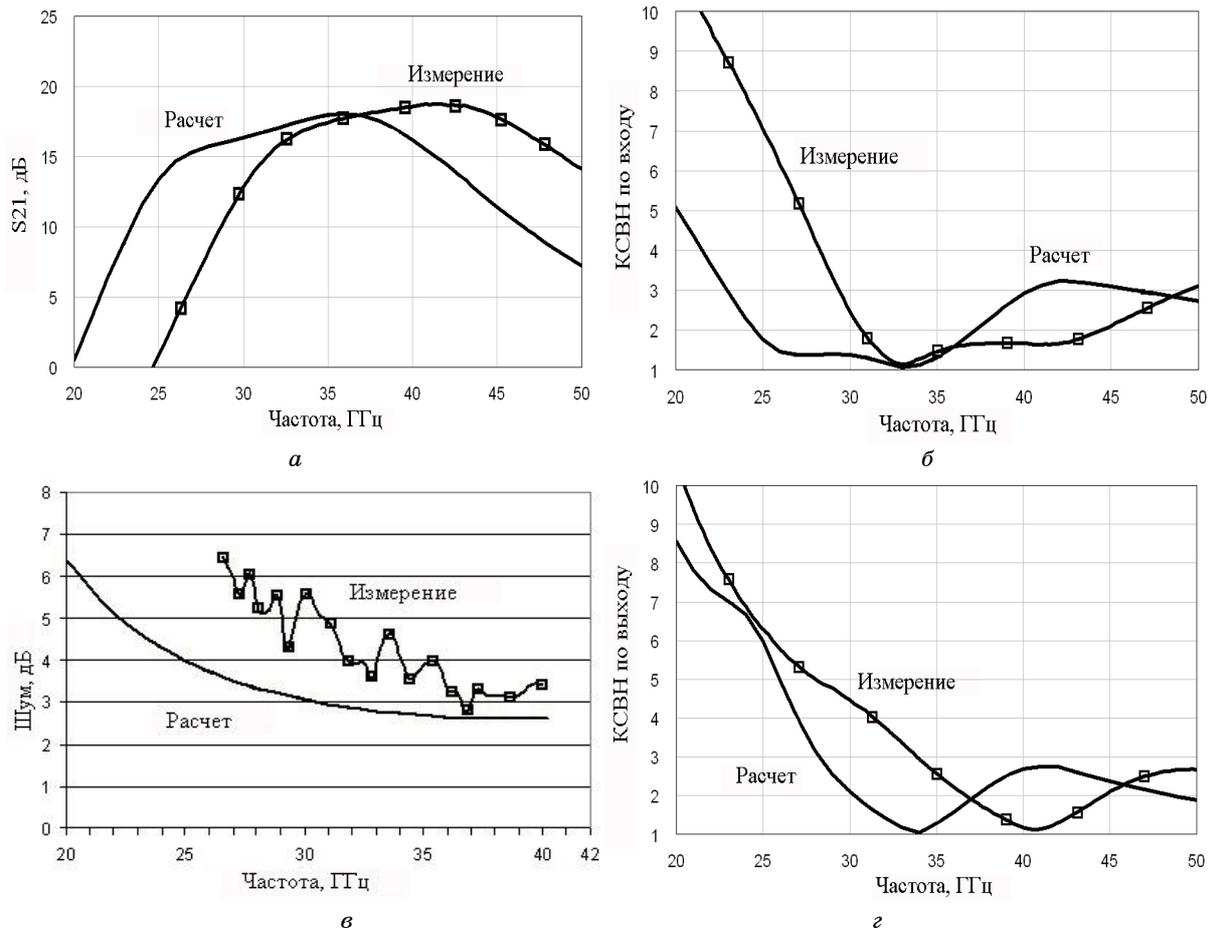


Рис. 5. Расчетные и измеренные характеристики усилителей типа 1:
 а – коэффициент усиления; б – КСВН по входу; в – коэффициент шума; з – КСВН по выходу

Как видно, шумовые характеристики усилителей существенно отличаются. Коэффициент шума усилителей типа 1 максимален в низкочастотной области исследованного диапазона и монотонно убывает, достигая минимума в районе рабочей полосы частот. Типичное значение коэффициента шума находится на уровне немного выше 3 дБ. Усилители типа 2 имеют большую равномерность коэффициента шума во всем исследованном частотном диапазоне. По-видимому, небольшое рассогласование по входу привело к более оптимальному согласованию по шумам. При этом типичные значения коэффициента шума в полосе частот 34–40 ГГц лежат в пределах от 2,5 до 3,3 дБ. Неравномерность коэффициента шума в полосе частот, почти равной октаве, составляет всего 1 дБ.

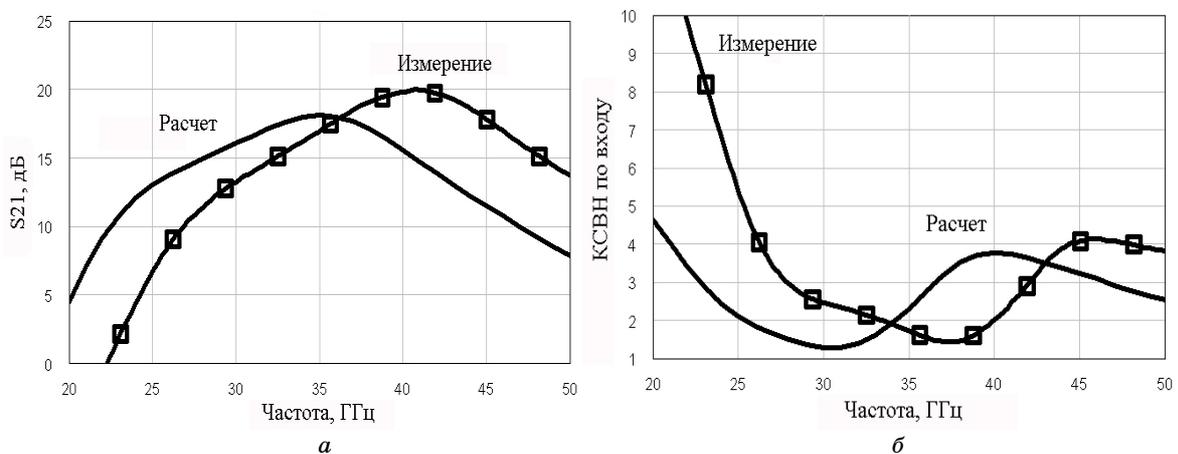


Рис. 6 (начало). Расчетные и измеренные характеристики усилителей типа 2:
 а – коэффициент усиления; б – КСВН по входу

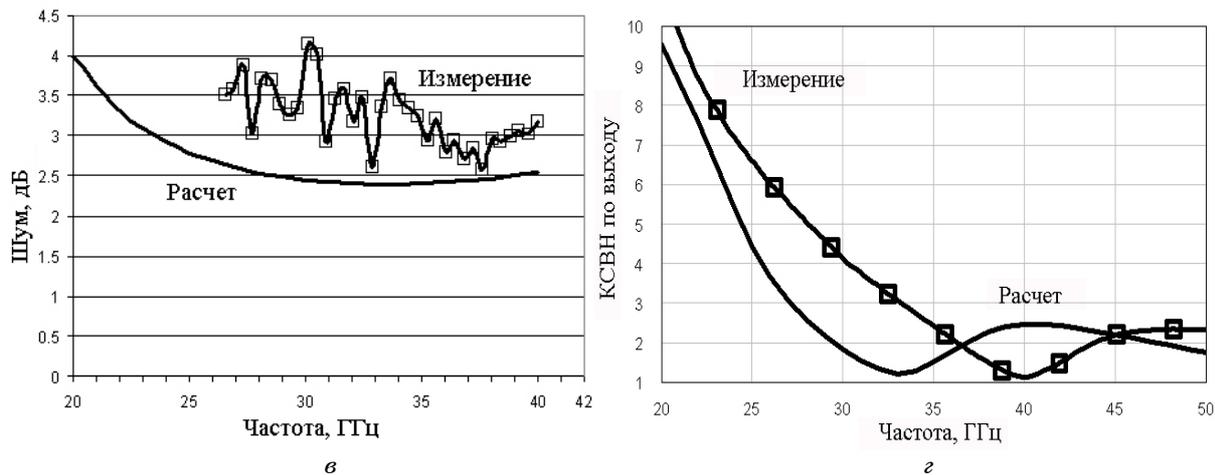


Рис. 6 (продолжение). Расчетные и измеренные характеристики усилителей типа 2: ϵ – коэффициент шума; z – КСВН по выходу

Из рис. 5 и 6 видно, что измеренные характеристики достаточно неплохо согласуются с результатами расчета, однако наблюдается их характерное смещение примерно на величину 6 ГГц в сторону больших частот. Данный факт, возможно, может быть объяснен тем, что фактически изготовленные на пластине транзисторы, как было отмечено ранее, оказались более высокочастотными, чем транзисторы, использованные при разработке моделей. Кроме того, не исключаются систематические погрешности в расчетах. Данный вопрос требует проведения специальных исследований в дальнейшем.

Нами были собраны данные по ряду МШУ Ка-диапазона, серийно выпускаемых ведущими мировыми производителями, и проведено сравнение с нашими усилителями. Результаты в виде перечня основных параметров представлены в таблице. Видно, что разработанные в ИСВЧПЭ РАН усилители имеют характеристики на уровне серийно выпускаемых зарубежных аналогов.

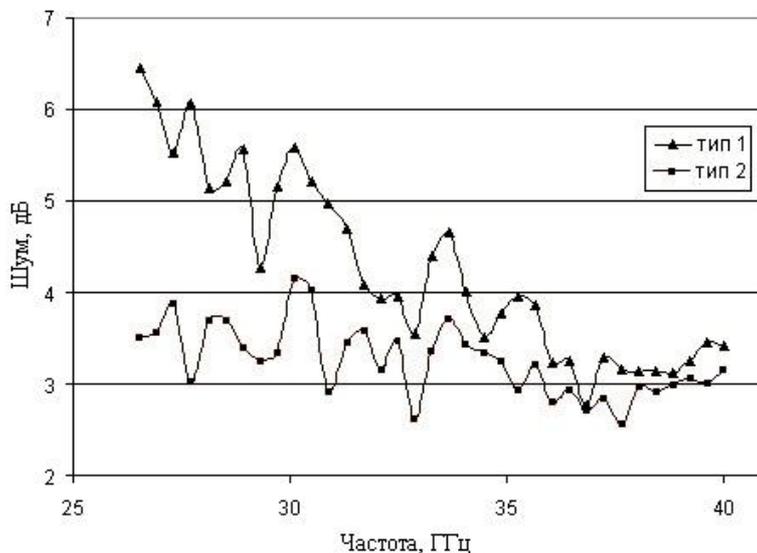


Рис. 7. Сравнение коэффициентов шума усилителей типа 1 и 2

Характеристики МШУ КВЧ различных производителей

Образец	Диапазон, ГГц	Усиление, дБ	Шум, дБ	S11, дБ	S22, дБ	Питание	Размер, мм ²
1	2	3	4	5	6	7	8
Triquint TGA4507-EPU [3]	28-36	20-25	2,1-2,3	-6 ... -10	-6 ... -23	3 В, 60 мА	1,86×0,85
Triquint TGA4508-EPU [4]	30-42	20-21	2,7-3,2	-6 ... -12	-15 ... -27	3 В, 40 мА	1,7×0,8

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
Hittite HMC-ALH369 [5]	24–40	18–27	1,4–2,2	–10 ... –20	–13 ... –30	5 В, 66 мА	2,1×1,37
Hittite HMC-ALH376 [6]	35–45	16–20	1,6–2,2	–10 ... –23	–17 ... –20	4 В, 87 мА	2,7×1,44
Hittite HMC-566 [7]	29–36	19–23	2,5–3	–13 ... –24	–8 ... –10	3 В, 80 мА	2,54×0,98
Hittite HMC-C027 [8]	29–36	20–22	2,5–3	–10 ... –26	–6 ... –10	3 В, 80 мА	HMC-566 в корпусе
Avago Technologies AMMC-6241 [9]	26–43	17–22	2,6–3,3	–10 ... –14	–17 ... –25	3 В, 60 мА	1,9×0,8
ИСВЧПЭ РАН	37–44	18–20	2,5–3,3 (34–40 ГГц)	–10 ... –12	–10 ... –25	2 В, 60 мА	1,25×1,1

Заключение

В данной работе на основе оптимизированных Р-НЕМТ гетероструктур на подложках GaAs и разработанной технологии электронно-лучевой литографии, обеспечивающей длину затвора L_g менее 0,1 мкм, были разработаны, изготовлены и исследованы два варианта МИС маломощных усилителей КВЧ-диапазона. В диапазоне 37–44 ГГц усилители демонстрируют коэффициент усиления 18–20 дБ при напряжении питания 2 В и токе 60 мА, коэффициент шума 2,5–3,3 дБ (34–40 ГГц), хорошее согласование по входу и выходу. Размер кристалла составляет всего 1,25×1,1 мм². Данные усилители могут быть использованы также и на более низких частотах, начиная с 30 ГГц.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии в ИСВЧПЭ РАН адекватных методов проектирования СВЧ-устройств и зрелой технологии производства, позволяющих разрабатывать и изготавливать МШУ КВЧ на уровне зарубежных аналогов для использования в различных областях науки и техники.

В настоящее время в институте ведутся активные работы по усовершенствованию МШУ КВЧ-диапазона для достижения более высоких СВЧ-параметров.

Литература

1. A GaAs MMIC LNA for Military and Commercial Applications from 29 to 36 GHz, Military Microwaves [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hittite.com/literature/june-06-microwave.html>, свободный (дата обращения: 15.11.2010).
2. Joseph F. White. High Frequency Techniques: An Introduction to RF and Microwave Engineering. – N.Y.: Wiley-IEEE Press, 2004.
3. TriQuint Semiconductor, TGA4507, Ka Band Low Noise Amplifier, Product Information [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.triquint.com/prodserv/more_info/proddisp.aspx?prod_id=TGA4507, свободный (дата обращения: 15.11.2010).
4. TriQuint Semiconductor, TGA4508, Ka Band Low Noise Amplifier, Product Information [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.triquint.com/prodserv/more_info/proddisp.aspx?prod_id=TGA4508, свободный (дата обращения: 15.11.2010).
5. Northrop Grumman, ALH369, 24–40 GHz Low Noise Amplifier, Product Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://hittite.advante.ru/catalog/2/5/258.html>, свободный (дата обращения: 15.11.2010).
6. Hittite Microwave Corporation, HMC-ALH376, 24 – 40 GHz Low Noise Amplifier, Product Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://hittite.advante.ru/catalog/2/5/259.html>, свободный (дата обращения: 15.11.2010).
7. Hittite Microwave Corporation, HMC-566, 29 – 36 GHz GaAs PHEMT MMIC Low Noise Amplifier, Product Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://hittite.advante.ru/catalog/2/5/231.html>, свободный (дата обращения: 15.11.2010).
8. Hittite Microwave Corporation, HMC-C027, 29 – 36 GHz Low Noise Amplifier Module, Product Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://hittite.advante.ru/catalog/2/5/268.html>, свободный (дата обращения: 15.11.2010).
9. Avago Technologies, AMMC-6241, 26 – 43 GHz Low Noise Amplifier, Product Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.avagotech.com/pages/en/rf_microwave/amplifiers/low_noise_amplifiers/ammc-6241/, свободный (дата обращения: 15.11.2010).

Гнатюк Дмитрий Леонидович

мл. научн. сотрудник Института СВЧ полупроводниковой электроники РАН
(ИСВЧПЭ РАН, г. Москва)
Тел.: +7 (499) 123-62-22
Эл. почта: dgnatyuk@yandex.ru

Федоров Юрий Владимирович

Заведующий лабораторией ИСВЧПЭ РАН
Тел.: +7 (499) 123-74-66
Эл. почта: yuraf2002@mail.ru

Галиев Галиб Бариевич

Д-р ф.-м.н., заведующий лабораторией ИСВЧПЭ РАН
Эл. почта: galiev_galib@mail.ru

Галиев Ринат Радифович

мл. научн. сотрудник ИСВЧПЭ РАН
Тел.: +7 (499) 123-74-66

Щербакова Марина Юрьевна

научн. сотрудник ИСВЧПЭ РАН
Тел.: +7 (499) 123-74-66

D.L. Gnatyuk, Yu.V. Fedorov, G.B. Galiev, R.R. Galiev, M.Yu. Scherbakova
Ka-band MMIC low noise amplifiers on GaAs pHEMT heterostructures

Ka-band MMIC LNA development results are presented. A single sided δ -Si doped Al-GaAs/InGaAs/GaAs P-HEMT heterostructure was optimized to provide zero gate bias operation and achieve the required microwave characteristics. The developed 75 nm gate process has allowed to manufacture base transistors with F_t and F_{max} up to 75 and 180 GHz, respectively. The investigations connected with the transistor topology optimized for Ka-Band low-noise amplifiers were performed. Non-linear and noise models of the base transistors were developed. The LNA circuitry and topology were designed with the use of Microwave Office and ADS CAD software. The manufactured 3-stage MMIC LNAs have 18–20 dB gain and 2,5–3,3 dB noise figure within range of 37 to 44 GHz, with supply voltage of 2 V and supply current of 60 mA. Chip size is 1,25×1,1 mm². The designed MMIC LNAs have competitive performance compared to commercially available foreign analogues.

Keywords: MMIC, LNA, Ka-Band, pHEMT.