

Монолитные интегральные схемы широкополосных усилителей мощности Ka-диапазона на основе GaAs рНЕМТ

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

АО «НПП "Исток" им. Шокина», Фрязино, Россия

[✉] asefimov@istokmw.ru

Аннотация

Введение. Монолитные интегральные схемы (МИС) усилителей мощности Ka-диапазона – неотъемлемая составляющая множества систем радиоэлектронной аппаратуры. Сферы применения включают радиолокацию, 5G-связь, измерительное оборудование. Разработка МИС усилителей Ka-диапазона и повышение их электрических характеристик является актуальной задачей.

Цель работы. Разработка двух типов МИС широкополосных усилителей мощности Ka-диапазона на основе технологического процесса GaAs рНЕМТ с длиной затвора 0.13 мкм.

Материалы и методы. В качестве базовой ячейки построения усилителей выбран транзистор 8 × 50 мкм. Первый тип усилителя включает 3 каскада, общая периферия затвора выходного каскада составляет 0.8 мм. Второй тип усилителя реализован в виде параллельного включения усилителя первого типа, реализуя синфазное деление и суммирование мощности по входу и выходу соответственно. Два типа МИС спроектированы на базе реализованного в АО «НПП "Исток" им. Шокина» технологического процесса GaAs рНЕМТ с длиной затвора 0.13 мкм. Проведены зондовые измерения S-параметров и выходной мощности как на уровне пластины, так и МИС в сборке. Режим питания непрерывный.

Результаты. Выходная мощность насыщения МИС первого типа превышает 25.5 дБм при КПД более 19 % в диапазоне частот 26...38 ГГц, а МИС второго типа – более 28.4 дБм. Коэффициент усиления превышает 17.5 и 17 дБ для МИС усилителя первого и второго типов соответственно.

Заключение. Изложены результаты разработки двух типов монолитных интегральных схем широкополосных усилителей мощности Ka-диапазона частот. Схемы реализованы на базе технологического процесса GaAs рНЕМТ с длиной затвора 0.13 мкм. Представленные МИС по совокупности выходных параметров обеспечивают мировой уровень достижений в разработке МИС усилителей Ka-диапазона.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, GaAs, рНЕМТ, миллиметровый диапазон длин волн, Ka-диапазон, усилитель мощности

Для цитирования: Монолитные интегральные схемы широкополосных усилителей мощности Ka-диапазона на основе GaAs рНЕМТ / А. С. Ефимов, А. М. Емельянов, Е. А. Кривоногова, С. Д. Зинкин, А. В. Груша // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 5. С. 83–93.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-5-83-93

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 25.03.2025; принята к публикации после рецензирования 25.07.2025; опубликована онлайн 28.11.2025



Ka-band GaAs pHEMT Wideband Power Amplifier MMICs

Alexander S. Efimov✉, Artem M. Emelianov,
Evgeniya A. Krivonogova, Sergey D. Zinkin, Alexander V. Grusha
JSC «RPC "Istok" n. a. Shokin», Fryazino, Russia
✉ asefimov@istokmw.ru

Abstract

Introduction. Ka-band power amplifier MMICs are essential components of many electronic systems. Their application area covers radar, 5G communication, and test equipment. The design of a reliable power amplifier with high-performance characteristics is a challenging task.

Aim. Design of two types millimeter-wave wideband power amplifier (PA) MMICs by using 0.13 μm GaAs pseudomorphic high-electron mobility transistor (pHEMT) technology process.

Materials and methods. A cell unit measuring $8 \times 50 \mu\text{m}$ was used in the design of both amplifiers. The first PA MMIC included three stages, with the overall gate periphery of the third stage being 0.8 mm. The second PA MMIC was realized as a parallel combining of the first PA structure, using Wilkinson combiners. The two types of MMICs were fabricated through 0.13 μm GaAs pHEMT technology, realized at the Istok NPP. RF testing was carried out both on wafer and in assembly to measure S parameters and power characteristics under CW test conditions and different ambient temperature.

Results. The first PA MMIC demonstrates a saturated output power of more than 25.5 dBm with an associated PAE above 19 % in the 26...38 GHz frequency band. The saturated output power of the second PA MMIC exceeds 28.4 dBm with more than 19 % PAE over the 26...38 GHz band. The circuits show a gain of 17.5 and 17 dB for the first and second PA MMICs, respectively.

Conclusion. Two types of millimeter-wave wideband PA MMICs were fabricated using 0.13 μm GaAs pHEMT technology. The designed PA MMICs represent devices with a wideband small-signal and power performance, which makes them suitable for wideband wireless communication, radar, and test equipment applications.

Keywords: MMIC, GaAs, pHEMT, millimeter wave, Ka-band, power amplifier

For citation: Efimov A. S., Emelianov A. M., Krivonogova E. A., Zinkin S. D., Grusha A. V. Ka-band GaAs pHEMT Wideband Power Amplifier MMICs. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 5, pp. 83–93.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-5-83-93

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 25.03.2025; accepted 25.07.2025; published online 28.11.2025

Введение. Монолитные интегральные схемы (МИС) усилителей мощности Ка-диапазона – неотъемлемая составляющая множества систем радиоэлектронной аппаратуры. Сферы применения включают радиолокацию, 5G-связь, измерительное оборудование. Такие параметры МИС усилителей, как выходная мощность, диапазон рабочих частот и коэффициент полезного действия (КПД), оказывают решающее влияние на целый ряд характеристик радиоэлектронных модулей.

На текущий момент для освоения и улучшения параметров МИС в миллиметровом диапазоне длин волн активно развиваются техно-

логии широкозонных полупроводников, ведется разработка схем на их основе. Несмотря на то, что основной фокус внимания направлен на развитие схем на основе GaN-технологий, МИС-усилители на GaAs и InP являются неотъемлемой частью современной и перспективной электронной компонентной базы миллиметрового диапазона из-за линейности выходного сигнала и используемых уровней питающих напряжений [1]. Имеется ряд публикаций, показывающих актуальность повышения электрических характеристик усилителей и демонстрирующих современный уровень разработки GaAs МИС усилителей Ка-диапазона [2–5].

В данной статье описаны результаты проектирования МИС СВЧ двух типов усилителей Ка-диапазона. В качестве активных элементов применены GaAs полевые транзисторы с затвором Шотки на основе псевдоморфных гетероструктур с каналом InGaAs (GaAs pHEMT) и длиной затвора 0.13 мкм. Усилитель выполнен на подложке GaAs толщиной 100 мкм. Технологический процесс изготовления разработанных МИС СВЧ реализован в АО «НПП "Исток" им. Шокина». Представлены конструкция, технология изготовления, результаты измерений и сравнение со схемами ведущих зарубежных компаний.

Технология МИС СВЧ и базовая ячейка транзистора. Представленные результаты разработки МИС СВЧ широкополосных усилителей мощности Ка-диапазона частот получены 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/□), мезарезисторов (100 Ом/□) и сквозных металлизированных отверстий. Толщина диэлектрической подложки GaAs – 100 мкм. Типичные низкочастотные характеристики транзистора, реализованного по данному процессу, следующие: ток насыщения – 0.6 А/мм, крутизна – 520 мСм/мм, напряжение отсечки – –1 В. Пробивное напряжение сток-исток более 10 В. Высокочастотные характеристики транзистора с размерами 4 × 50 мкм, полученные методом Load Pull на частотах 12 и 36 ГГц, представлены в табл. 1. Выход-

Табл. 1. Мощностные характеристики транзистора 4 × 50 мкм GaAs pHEMT

Tab. 1. Power performance of 4 × 50 μm GaAs pHEMT

Параметр	12 ГГц	36 ГГц
Выходная мощность, Вт	0.12	0.1
Удельная выходная мощность, Вт/мм	0.6	0.5
КПД, %	53	32
Операционное усиление, дБ	15.7	6.8
Напряжение сток-исток, В	4.5	4.5
Ток покоя, мА/мм	160	160

ная мощность на 36 ГГц составляет 0.5 Вт/мм при операционном коэффициенте усиления по мощности 6.8 дБ, напряжение питания сток-исток – 4.5 В.

В описываемой работе базовой ячейкой является транзистор с общей шириной затвора 400 мкм, состоящий из 8 затворных пальцев по 50 мкм длиной каждый. Внутренние "островки" истока соединены с внешними заземляющими электродами посредством воздушных мостов. Фотографии транзисторов 4 × 50 мкм и 8 × 50 мкм представлены на рис. 1.

Проектирование МИС СВЧ. Цель описываемой работы – создать ряд МИС широкополосных усилителей мощности Ка-диапазона. Разработка проводилась с применением масштабируемой малосигнальной модели [6] и тестовой нелинейной модели транзистора с учетом результатов измерений базовой ячейки методом Load Pull.

Разрабатывались 2 типа МИС СВЧ: первый – с выходной мощностью более 300 мВт, а второй – более 500 мВт. В связи с заданными целевыми уровнями мощности первый тип усилителя выбран за "основной", параллельное суммирование которых обеспечит выходную мощность второй МИС СВЧ. На основе данных

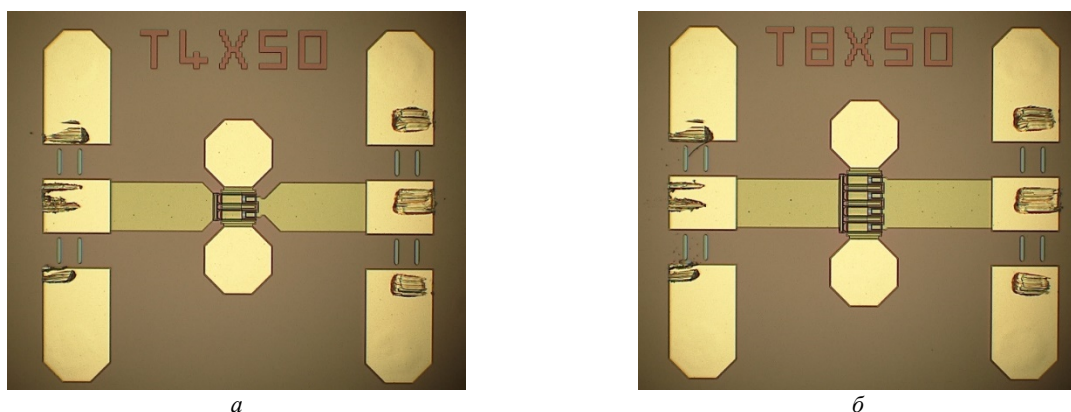


Рис. 1. Фотографии тестовых транзисторов 4 × 50 мкм (а) и 8 × 50 мкм (б) с подводящими микрополосковыми линиями и зондами СВЧ

Fig. 1. Photographs of 4 × 50 μm (a) and 8 × 50 μm (b) test cells with microstrip lines and G-S-G pads

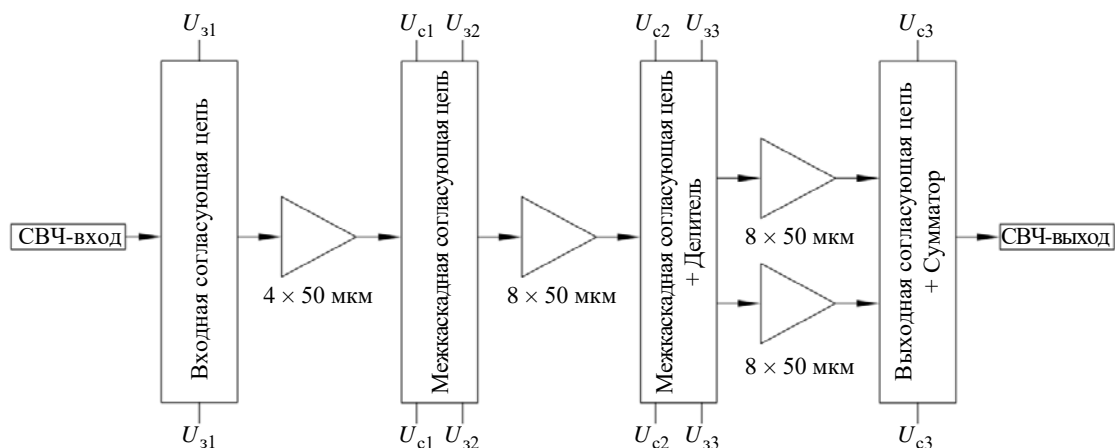


Рис. 2. Структурная схема МИС СВЧ первого типа

Fig. 2. Block-scheme of the first PA MMIC

выходных характеристик транзисторов, полученных как при моделировании предварительной нелинейной модели, так и при измерениях методом Load Pull, составлен баланс мощности. Структурная схема первой МИС СВЧ (рис. 2) включает 3 усилительных каскада. Общая периферия затвора выходного каскада составляет 800 мкм ($2 \times 8 \times 50$ мкм), предварительного – 400 мкм (8×50 мкм), входного – 200 мкм (4×50 мкм).

Соответствующее соотношение общей периферии каскадов выбрано на основе требуемой выходной мощности, потребляемой мощности, коэффициента усиления, с учетом потерь в межкаскадных согласующих цепях, а также для минимизации вариации типоразмеров ячеек транзисторов с целью упрощения контроля разработки нелинейной модели GaAs pHEMT 0.13 мкм транзистора.

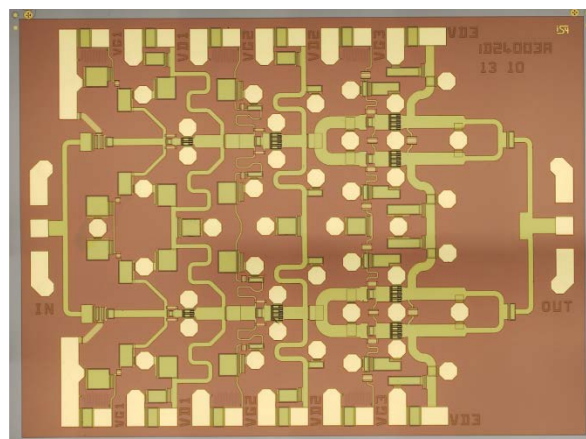
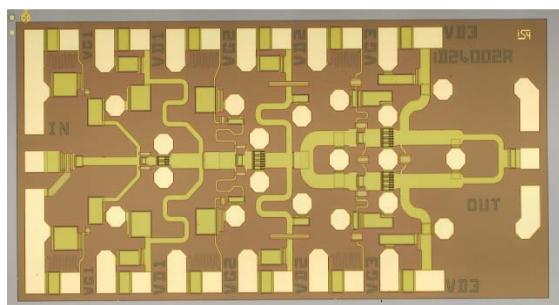
Выходной каскад включает цепи подачи питания, состоящие из четвертьволновых отрезков линий с блокировочными конденсаторами, повышающей Г-образной согласующей цепи, сумматора, объединяющего выходную мощность с двух транзисторов, и развязывающего конденсатора. Проектирование топологии выходной согласующей цепи было нацелено на достижение идентичной нагрузки двух транзисторов.

Предварительный каскад усиления включает цепи подачи питания по стоку и смещения по затвору, развязывающие конденсаторы, трансформирующие-согласующие цепи. Во второй межкаскадной цепи присутствует делитель мощности. Трансформирующие-согласующие цепи служат для согласования входов и вы-

ходов транзисторов между собой, корректировки требуемой амплитудно-частотной характеристики, обеспечения безусловной стабильности усилителя. Особое внимание при проектировании широкополосных усилителей стоит уделить подавлению высокого усиления на низких частотах для повышения стабильности схемы. Перед каждым транзистором в затворной цепи применена RC-цепь, которая существенно снижает усиление каскада на низких частотах, что повышает устойчивость усилителя.

Входной каскад состоит из цепи подачи смещения по затвору первого каскада, трансформирующей-согласующей цепи, аттенюатора 2 дБ и развязывающего конденсатора. Аттенюатор необходим для обеспечения требуемого уровня согласования в полосе частот 24...38 ГГц.

В мощных усилителях применяются каскады из четного числа параллельно включенных транзисторов. Каждый транзистор имеет отличия в электрических характеристиках в связи с технологическим разбросом изготовления. Асимметрия электрических характеристик создает условия для возникновения возбуждения нечетной моды из-за разного уровня напряжений СВЧ-сигнала на электродах транзисторов. Для снижения риска возбуждения нечетной моды в цепи с параллельно включенными транзисторами необходимы резисторы. На практике данные резисторы снижают асимметрию между параллельными путями усиления, повышая стабильность и выходную мощность [7, 8]. В выходной каскад представленного усилителя (между двумя транзисторами) включены резисторы 15 Ом в затворную цепь и 20 Ом в стоковую.



а
б
Рис. 3. Фотографии МИС усилителей Ка-диапазона: а – первого; б – второго типов

Fig. 3. Photographs of Ka-band power amplifier MMICs: a – first MMIC; б – second MMIC

Второй тип усилителя реализован в виде параллельного включения двух усилителей первого типа, реализуя синфазное деление и суммирование мощности по входу и выходу соответственно.

Вход и выход МИС усилителей согласованы на нагрузку 50 Ом. Контактные площадки питания расположены симметрично по обе стороны кристалла. Фотографии изготовленных МИС усилителей представлены на рис. 3. Габаритные размеры МИС первого типа – 2.8×1.4 мм, второго – 3.2×2.4 мм.

Результаты измерений. Измерения параметров изготовленных МИС усилителей проводились на пластине сплошным контролем. После резки пластины отдельные отобранные кристаллы измерены в сборке с вспомогательными кристаллами подачи питания. Конструкция сборки аналогична мозаичной гибридно-монолитной интегральной схеме СВЧ [9], что обеспечивает близкое расположение к МИС СВЧ блокировочных конденсаторов номиналом более 100 пФ (в данном случае конденсатор по цепи стока номиналом более 400 пФ, по цепи затвора – более 1000 пФ). К каждому каскаду подведена отдельная цепь делителя напряжения для подачи напряжения смещения. Все измерения проведены с применением многопиновых низкочастотных зондов и СВЧ-зондов конфигурацией G-S-G. Режим питания при измерении электрических параметров – непрерывный. Типовой рабочий режим усилителей составляет 4.5 В, 330 и 660 мА для МИС первого и второго типов соответственно.

Результаты измерений S -параметров МИС

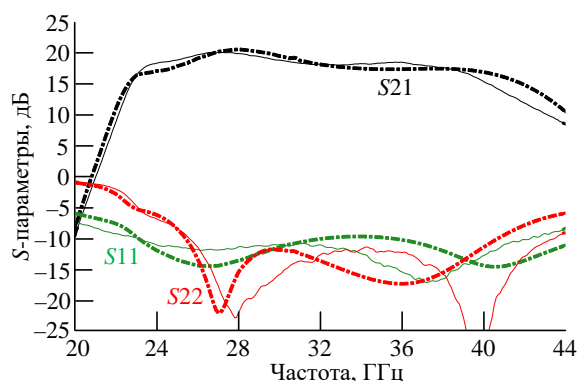


Рис. 4. Графики зависимостей малосигнальных параметров МИС первого типа от частоты. Непрерывные линии – измерения; штрихпунктирные линии – расчет

Fig. 4. Small-signal performance of the first PA MMIC. Solid lines – measurements; dashed lines – simulation

первого типа представлены на рис. 4, МИС второго типа – на рис. 5.

При комнатной температуре коэффициент усиления МИС первого типа превышает 17.5 дБ в диапазоне частот 26...38 ГГц, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) входа и выхода менее 2. МИС второго типа обеспечивает коэффициент усиления более 17 дБ в диапазоне частот 24...38 ГГц при КСВН входа и выхода менее 2. Частотная зависимость коэффициента усиления показана при трех значениях температуры окружающей среды: 22, 85 и -60 °С. Отклонение значений коэффициента усиления от значений при комнатной температуре составляет 1.5 дБ при -60 °С и -1.5 дБ при 85 °С для МИС первого типа (рис. 6), а для МИС второго типа – 1.8 и -1.6 дБ соответственно (рис. 7). Таким образом,

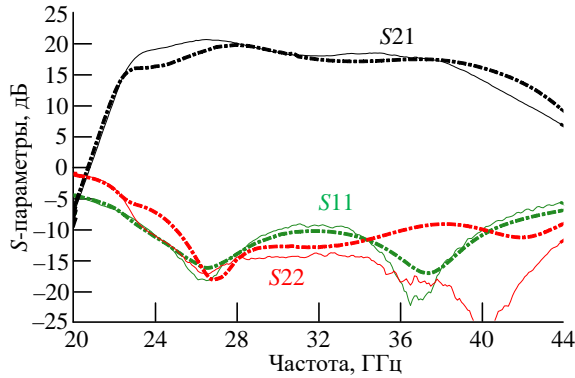


Рис. 5. Графики зависимостей малосигнальных параметров МИС второго типа от частоты. Непрерывные линии – измерения; штрихпунктирные линии – расчет

Fig. 5. Small-signal performance of the second PA MMIC. Solid lines – measurements; dashed lines – simulation

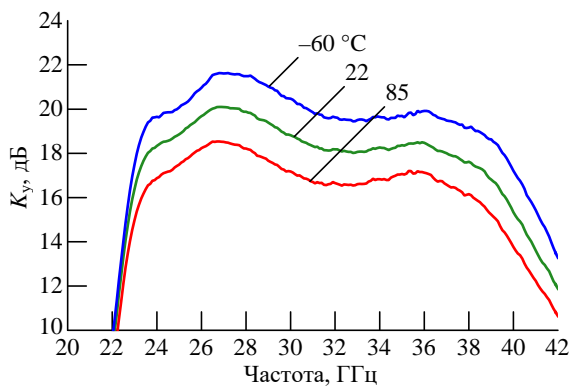


Рис. 6. Графики зависимостей коэффициента усиления МИС первого типа от частоты при разных температурах окружающей среды

Fig. 6. Small-signal gain temperature dependence of the first PA MMIC

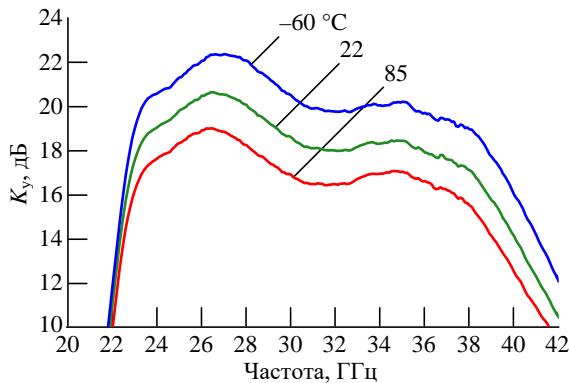


Рис. 7. Графики зависимостей коэффициента усиления МИС второго типа от частоты при разных температурах окружающей среды

Fig. 7. Small-signal gain temperature dependence of the second PA MMIC

изменение коэффициента усиления в зависимости от температуры составляет ориентировочно 0.025 дБ на 1 °С для МИС первого и второго типов. Сравнение измеренных зависимостей

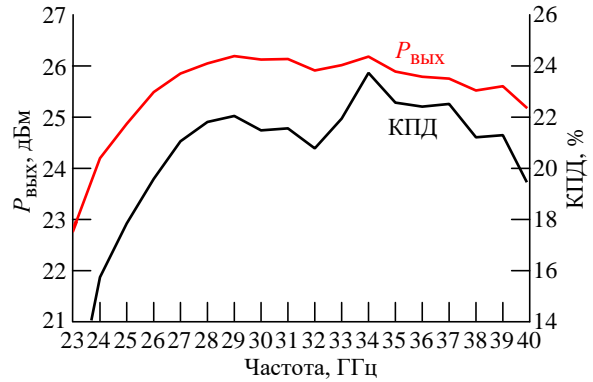


Рис. 8. Графики зависимостей выходной мощности и КПД от частоты МИС первого типа

Fig. 8. Output power and PAE of the first PA MMIC

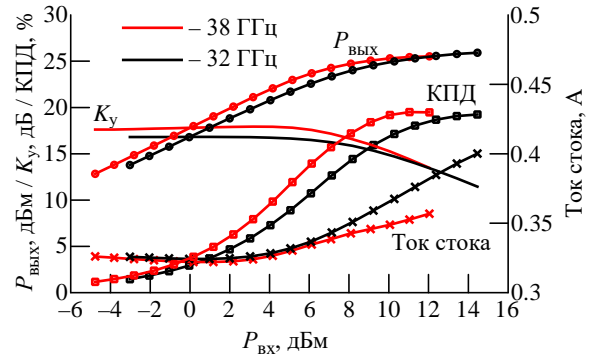


Рис. 9. Графики зависимостей выходной мощности, КПД, K_y и тока стока от входной мощности МИС первого типа

Fig. 9. Output power, PAE, gain and drain current versus input power for the first PA MMIC

малосигнальных параметров МИС первого и второго типов с расчетными данными свидетельствует о снижении верхней границы диапазона частот усиления на 2 ГГц.

Частотные зависимости выходной мощности и КПД в диапазоне частот 23...40 ГГц МИС первого типа представлены на рис. 8, МИС второго типа – на рис. 10. Уровень входной мощности составляет 12 и 15 дБм для МИС первого и второго типов соответственно. Импеданс нагрузки 50 Ом. На рис. 9 представлены зависимости выходной мощности, КПД, коэффициента усиления и тока потребления от входной мощности на частотах 32 ГГц (черная линия) и 38 ГГц (красная линия) для МИС первого типа, на рис. 11 – для МИС второго типа.

Выходная мощность насыщения МИС первого типа превышает 25.5 дБм при КПД свыше 19 % в диапазоне частот 26...38 ГГц. В том же диапазоне МИС второго типа обеспечивает выходную мощность насыщения более 28.4 дБм, а КПД превышает 19 %. В диапазоне частот

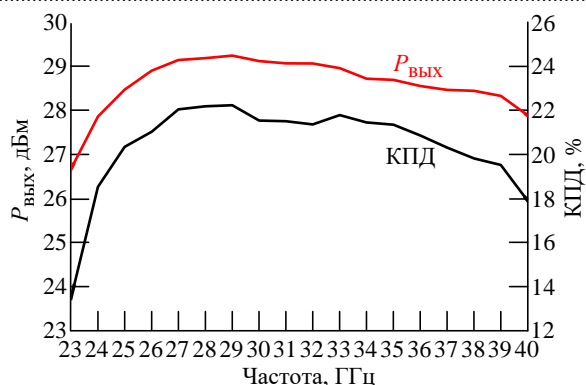


Рис. 10. Графики зависимостей выходной мощности и КПД от частоты МИС второго типа

Fig. 10. Output power and PAE of the second PA MMIC

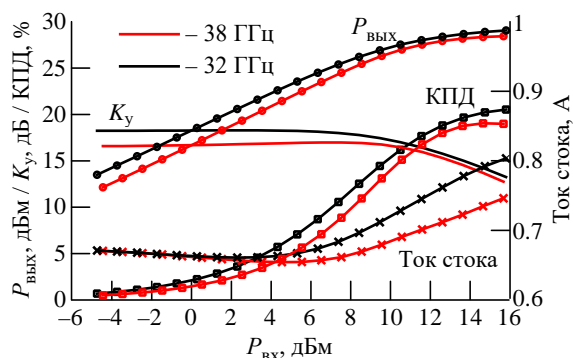


Рис. 11. Графики зависимостей выходной мощности, КПД, K_u и тока стока от входной мощности МИС второго типа

Fig. 11. Output power, PAE, gain and drain current versus input power for the second PA MMIC

24...40 ГГц выходная мощность насыщения МИС первого типа превышает 24 дБм, а МИС второго типа 27.5 дБм, полностью перекрывая Ка-диапазон частот. Характеристики двух усилителей в компрессии плавные, без признаков нестабильности и генерации нечетной моды.

Проведены измерения выходных характеристик усилителей в зависимости от импеданса нагрузки в радиусе КСВН нагрузки равного 2 для импеданса 50 Ом при уровне входной мощности 12 дБм для МИС первого типа и 15 дБм для МИС второго типа. Контуры выходной мощности в зависимости от импеданса нагрузки представлены на рис. 12 для МИС первого типа и на рис. 13 для МИС второго типа.

Максимумы выходной мощности для МИС первого типа на частотах от 26 до 40 ГГц лежат в радиусе КСВН нагрузки равного 2, а предельный уровень выходной мощности превышает 25.8 дБм в диапазоне частот 24...40 ГГц, достигая 26.4 дБм на частотах 26...29 ГГц. Оптимальный импеданс нагрузки МИС второго типа в диапазоне 26...40 ГГц лежит в радиусе КСВН нагрузки равного 2, а максимальная выходная мощность превышает 28.3 дБм в диапазоне 24...40 ГГц, достигая 29.3 дБм на частотах 26...29 ГГц.

В табл. 2 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 по созданию МИС усилителей Ка-диапазона.

Заключение. Представлены результаты разработки двух МИС широкополосных усилителей мощности Ка-диапазона, изготовленных по технологическому процессу 0.13 мкм GaAs рНЕМТ, реализованному в АО «НПП "Исток" им. Шокина». МИС первого типа обеспечивает

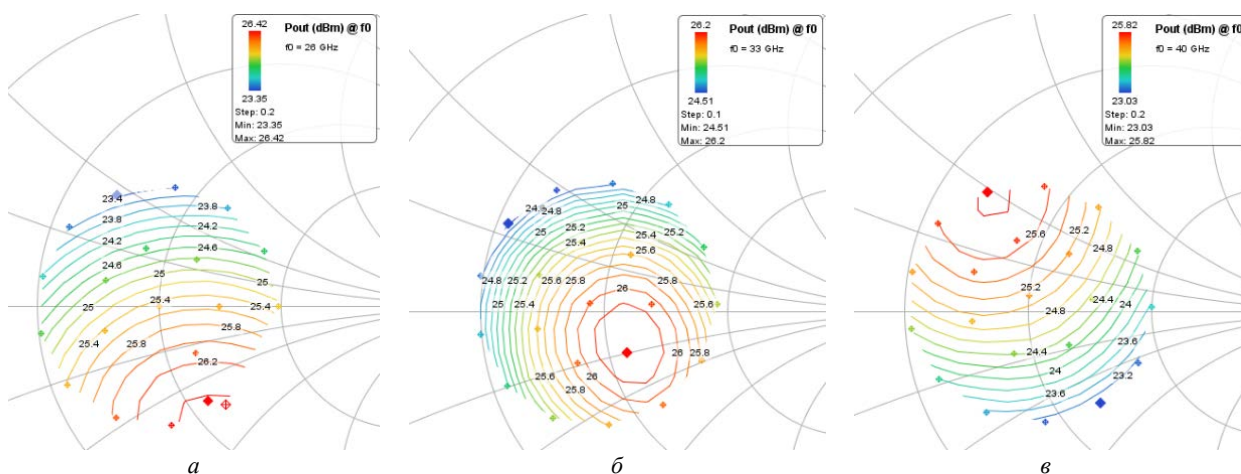


Рис. 12. Контуры выходной мощности МИС первого типа в зависимости от импеданса нагрузки на частотах: а – 26 ГГц; б – 33 ГГц; в – 40 ГГц

Fig. 12. Load-pull power contours for the first PA MMIC at: а – 26 GHz; б – 33 GHz; в – 40 GHz

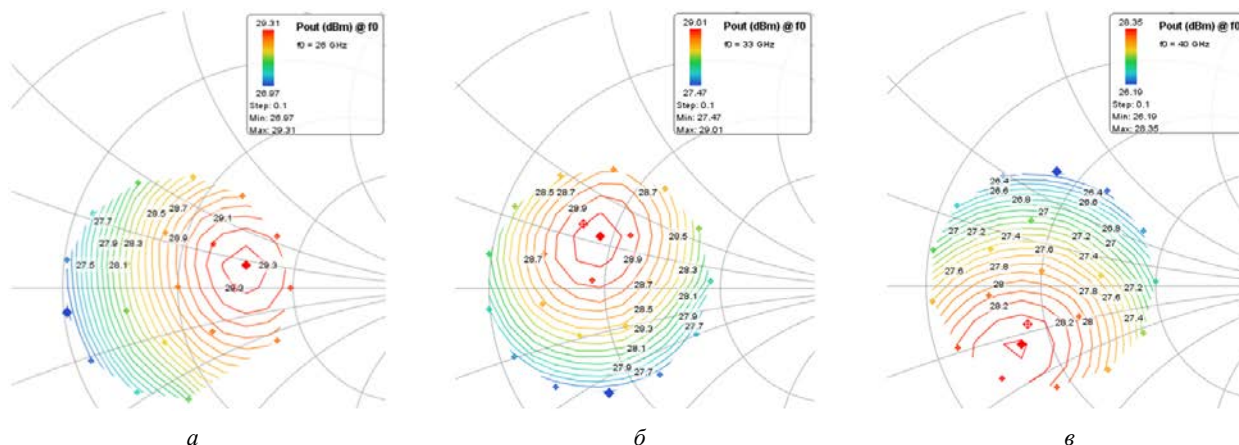


Рис. 13. Контуры выходной мощности МИС второго типа в зависимости от импеданса нагрузки на частотах: *a* – 26 ГГц; *б* – 33 ГГц; *в* – 40 ГГц

Fig.13. Load-pull power contours for the second PA MMIC at: *a* – 26 GHz; *б* – 33 GHz; *в* – 40 GHz

Табл. 2. Основные параметры разработанных, ранее опубликованных и выпускаемых МИС усилителей Ка-диапазона

Tab. 2. Summary of Ka-band power amplifiers MMICs benchmarks

Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{вых}}$, дБм	K_y , дБ	КПД, %	Ток стока, А	Напряжение стока, В	Технология реализации	Габаритные размеры, мм	Ссылка
26...38	> 25.5	> 17.5	> 19	< 0.4	4.5	0.13 GaAs pHEMT	2.8 × 1.4	Данная статья
26...38	> 28.4	> 17	> 19	< 0.8	4.5	0.13 GaAs pHEMT	3.2 × 2.4	Данная статья
19...32	> 24	> 13	> 26	< 0.25	5	0.15 GaAs pHEMT	2 × 1	[2]
26...34	> 22	> 13	> 30	< 0.13	6	0.15 GaAs pHEMT	2.1 × 1.4	[3]
26...31	> 27	> 13	> 22	< 0.35	12	0.15 GaAs pHEMT	1.6 × 1.3	[4]
24...38	> 23.5	> 15	> 21	< 0.25	5	0.15 GaAs pHEMT	2 × 1	[5]
24...32	> 28.5	> 15	> 27	< 0.5	5	0.15 GaAs pHEMT	2.4 × 1.1	[5]
26...38	> 27	> 25	> 16	< 0.8	5	0.15 GaAs pHEMT	2.74 × 1.49	[10]
28...38	> 26.5	> 23	> 12	< 0.17	20	0.15 GaN on SiC	1.65 × 0.67	[11]
27...31	> 27	> 25	> 18	< 0.5	5.5	GaAs pHEMT	2.18 × 1.0	[12]
20...42	> 28	> 14	> 8	< 1.2	5	GaAs pHEMT	2.75 × 1.8	[13]
26...30	> 28	> 17	> 13	< 1	6	0.25 GaAs pHEMT	3.5 × 2.5	[14, 15]

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 в диапазоне частот 26...38 ГГц имеет коэффициент усиления более 17 дБ, выходная мощность более 28.4 при КПД

свыше 19 %. Достигнутые характеристики усилителей позволяют применять разработанные МИС СВЧ в измерительном оборудовании, современных и перспективных широкополосных системах связи и радиолокации миллиметрового диапазона длин волн.

Авторский вклад

Ефимов Александр Сергеевич – разработка МИС усилителей мощности; анализ и обсуждение результатов.

Емельянов Артем Михайлович – измерения МИС усилителей мощности; анализ и обсуждение результатов.

Кривоногова Евгения Александровна – технологическое сопровождение изготовления МИС усилителей мощности; анализ и обсуждение результатов.

Зинкин Сергей Дмитриевич – технологическое сопровождение изготовления МИС усилителей мощности; анализ и обсуждение результатов.

Груша Александр Васильевич – анализ и обсуждение результатов.

Author`s contribution

Alexander S. Efimov, PA MMICs design; analysis and discussion of the results.

Artem M. Emelianov, measurements of the MMIC PAs; analysis and discussion of the results.

Evgeniya A. Krivonogova, manufacturing process technology support, analysis and discussion of the results.

Sergey D. Zinkin, manufacturing process technology support; analysis and discussion of the results.
Alexander V. Grusha, analysis and discussion of the results.

Список литературы

1. A Review of Technologies and Design Techniques of Millimeter-Wave Power Amplifiers / V. Camarchia, R. Quaglia, A. Piacibello, D. P. Nguyen, H. Wang, A.-V. Pham // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 2020. Vol. 68, № 7. P. 2957–2983. doi: 10.1109/TMTT.2020.2989792
2. Huang B.-W., Fu Z.-H., Lin K.-Y. A Millimeter-Wave Ultra-Wide Band Power Amplifier in 0.15- μm GaAs pHEMT for 5G Communication // Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC), Yokohama, Japan, 29 Nov.–02 Dec. 2022. IEEE, 2022. P. 97–99. doi: 10.23919/APMC55665.2022.10000027
3. A Wideband High Efficiency Ka-Band MMIC Power Amplifier for 5G Wireless Communications / D. P. Nguyen, X.-T. Tran, N. L. K. Nguyen, P. T. Nguyen, A.-V. Pham // IEEE Intern. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS), Sapporo, Japan, 26–29 May 2019. IEEE, 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/ISCAS.2019.8702092
4. Nguyen D. P., Pham A.-V. An Ultra Compact Watt-Level Ka-Band Stacked-FET Power Amplifier // IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2016. Vol. 26, № 7. P. 516–518. doi: 10.1109/LMWC.2016.2574831
5. Millimeter-Wave GaAs Ultra-Wideband Medium Power Amplifier and Broadband High-Power Power Amplifier for 5G/6G Applications / Z.-H. Fu, M.-X. Li, T.-G. Ma, C.-S. Wu, K.-Y. Lin // IEEE J. on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. 2024. Vol. 14, № 1. P. 111–121. doi: 10.1109/JETCAS.2024.3356010
6. Разработка масштабируемой малосигнальной модели 0.1 мкм GaAs-pHEMT-транзистора для усилительных применений / И. М. Добуш, К. В. Дудинов, Д. Д. Зыков, А. С. Сальников, А. А. Попов, А. М. Емельянов, Д. С. Брагин, Д. Р. Хайров // Докл. ТУСУР. 2022. Т. 25, № 4. С. 37–47. doi: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-37-47
7. Systematic Approach to the Stabilization of Multitransistor Circuits / N. Ayllon, J.-M. Collantes, A. Anakabe, I. Lizarraga, G. Soubercaze-Pun, S. Forestier // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 2011. Vol. 59, № 8. P. 2073–2082. doi: 10.1109/TMTT.2011.2155667
8. Freitag R. G. A unified analysis of MMIC power amplifier stability // IEEE MTT-S Microwave Symp. Digest, Albuquerque, USA, 01–05 June 1992. IEEE, 1992. P. 297–300. doi: 10.1109/MWSYM.1992.187971
9. Пат. RU 2814895 C1 H03F 3/00. Мозаичный гибридно-монокристалльный многокаскадный усилитель мощности СВЧ / К. В. Дудинов, А. М. Темнов, А. С. Ефимов. Оpubл. 06.03.2024. Бюл. № 7.
10. Техническое описание MM3054. URL: <https://millermmic.com/product/amplifiers/powerAmplifiers/MM3054> (дата обращения 20.01.2025).
11. Техническое описание QPA2225D. URL: <https://www.qorvo.com/products/p/QPA2225D> (дата обращения 21.01.2025).
12. Техническое описание MAAP-011341-DIE. URL: <https://www.macom.com/products/product-detail/MAAP-011341-DIE> (дата обращения 21.01.2025).
13. Техническое описание ADPA7002. URL: <https://www.analog.com/en/products/adpa7002.html> (дата обращения 21.01.2025).
14. Erofeev E. V., Shishkin D. A., Fedin I. V. Development of microwave monolithic integrated circuit of power amplifier 26–30 GHz band for information and communication systems of new generation (5G) // J. of Physics: Conf. Ser. 2019. № 1145. Art. № 012004. doi: 10.1088/1742-6596/1145/1/012004
15. Техническое описание MP560. URL: https://www.micran.ru/upload/iblock/e6a/mtossh2ndfvj80b04ujq2wiskw9etml2/MP560_V01.0004.pdf (дата обращения 31.01.2025).

Информация об авторах

Ефимов Александр Сергеевич – кандидат технических наук (2024), ведущий инженер АО «НПП "Исток" им. Шокина». Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – усилители мощности и маломощные усилители СВЧ; гетерогенная интеграция в микроэлектронике СВЧ. Адрес: АО «НПП "Исток" им. Шокина», ул. Вокзальная, д. 2а, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: asefimov@istokmw.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6792-1096>

Емельянов Артем Михайлович – инженер по специальности "Бытовая радиоэлектронная аппаратура" (2007, Ивановская государственная текстильная академия), ведущий инженер-технолог АО «НПП "Исток" им. Шокина». Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов – автоматизированное тестирование полупроводниковых изделий на пластине. Адрес: АО «НПП "Исток" им. Шокина», ул. Вокзальная, д. 2а, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: amemelianov@istokmw.ru

Кривоногова Евгения Александровна – магистр по направлению "Химия" (2017, Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева), инженер-технолог 1-й категории АО «НПП "Исток" им. Шокина». Сфера научных интересов – физика и технология полупроводниковых приборов; статистическое управление процессами, применение машинного обучения для управления технологическими процессами в микроэлектронике.

Адрес: АО «НПП "Исток" им. Шокина», ул. Вокзальная, д. 2а, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: eakrivonogova@istokmw.ru

Зинкин Сергей Дмитриевич – инженер по специальности "Микроэлектроника и твердотельная электроника" (2013, Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева), инженер-технолог 1-й категории АО «НПП "Исток" им. Шокина». Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов – физика и технология полупроводниковых приборов; статистическое управление процессами; применение машинного обучения для управления технологическими процессами в микроэлектронике.

Адрес: АО «НПП "Исток" им. Шокина», ул. Вокзальная, д. 2а, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: zinkin.sd@phystech.edu

Груша Александр Васильевич – инженер по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2014, Севастопольский государственный университет), ведущий инженер АО «НПП "Исток" им. Шокина». Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – монолитные интегральные схемы СВЧ.

Адрес: АО «НПП "Исток" им. Шокина», ул. Вокзальная, д. 2а, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: avgrusha@istokmw.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5889-4703>

References

1. Camarchia V., Quaglia R., Piacibello A., Nguyen D. P., Wang H., Pham A.-V. A Review of Technologies and Design Techniques of Millimeter-Wave Power Amplifiers. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* 2020, vol. 68, no. 7, pp. 2957–2983. doi: 10.1109/TMTT.2020.2989792
2. Huang B.-W., Fu Z.-H., Lin K.-Y. A Millimeter-Wave Ultra-Wide Band Power Amplifier in 0.15- μm GaAs pHEMT for 5G Communication. *Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC), Yokohama, Japan, 29 Nov.–02 Dec. 2022. IEEE, 2022*, pp. 97–99. doi: 10.23919/APMC55665.2022.10000027
3. Nguyen D. P., Tran X.-T., Nguyen N. L. K., Nguyen P. T., Pham A.-V. A Wideband High Efficiency Ka-Band MMIC Power Amplifier for 5G Wireless Communications. *IEEE Intern. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS), Sapporo, Japan, 26–29 May 2019. IEEE, 2019*, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISCAS.2019.8702092
4. Nguyen D. P., Pham A.-V. An Ultra Compact Watt-Level Ka-Band Stacked-FET Power Amplifier. *IEEE Microwave and Wireless Components Let.* 2016, vol. 26, no. 7, pp. 516–518. doi: 10.1109/LMWC.2016.2574831
5. Fu Z.-H., Li M.-X., Ma T.-G., Wu C.-S., Lin K.-Y. Millimeter-Wave GaAs Ultra-Wideband Medium Power Amplifier and Broadband High-Power Power Amplifier for 5G/6G Applications. *IEEE J. on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems.* 2024, vol. 14, no. 1, pp. 111–121. doi: 10.1109/JETCAS.2024.3356010
6. Dobush I. M., Dudinov K. V., Zykov D. D., Salnikov A. S., Popov A. A., Emelyanov A. M., Bragin D. S., Khayrov D. R. Development of a Scalable Small-Signal 0.1 μm GaAs-pHEMT-Model for Amplifier Applications. *Doklady TUSUR.* 2022, vol. 25, no. 4, pp. 37–47. (In Russ.) doi: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-37-47
7. Ayllon N., Collantes J.-M., Anakabe A., Lizarraga I., Soubercaze-Pun G., Forestier S. Systematic Approach to the Stabilization of Multitransistor Circuits. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* 2011, vol. 59, no. 8, pp. 2073–2082. doi: 10.1109/TMTT.2011.2155667
8. Freitag R. G. A Unified Analysis of MMIC Power Amplifier Stability. *IEEE MTT-S Microwave Symp. Digest, Albuquerque, USA, 01–05 June 1992. IEEE, 1992*, pp. 297–300. doi: 10.1109/MWSYM.1992.187971
9. Dudinov K. V., Temnov A. M., Efimov A. S. *Mozaichnyj gibridno-monolitnyj mnogokaskadnyj usilitel' moshhnosti SVCh* [Mosaic Hybrid-Monolithic Multistage Microwave Power Amplifier]. Pat. RF, no. 2814895, 2024. (In Russ.)
10. MM3054 datasheet. Available at: <https://millermmic.com/product/amplifiers/powerAmplifiers/MM3054> (accessed 20.01.2025)
11. QPA2225D datasheet. Available at: <https://www.qorvo.com/products/p/QPA2225D> (accessed 21.01.2025)
12. MAAP-011341-DIE datasheet. Available at: <https://www.macom.com/products/product-detail/MAAP-011341-DIE> (accessed 21.01.2025)
13. ADPA7002 datasheet. Available at: <https://www.analog.com/en/products/adpa7002.html> (accessed 21.01.2025)
14. Erofeev E. V., Shishkin D. A., Fedin I. V. Development of Microwave Monolithic Integrated Circuit of Power Amplifier 26–30 GHz Band for Information and Communication Systems of New Generation (5G). *J. of Physics: Conf. Ser.* 2019, no. 1145, art. no. 012004. doi: 10.1088/1742-6596/1145/1/012004
15. MP560 datasheet. Available at: https://www.micran.ru/upload/iblock/e6a/mtossh2ndfvj80b04ujq2wiskw9etml2/MP560_V01.0004.pdf (accessed 31.01.2025)

Information about the authors

Alexander S. Efimov, Cand. Sci. (Eng.) (2024), lead engineer at JSC «RPC "Istok" n. a. Shokin». The author of 20 scientific publications. Area of expertise: millimeter-wave power amplifiers and low-noise amplifiers; heterogeneous integration in mm-wave application.

Address: JSC «RPC "Istok" named after Shokin», 2A, Vokzalnaya St., Fryazino 141190, Russia

E-mail: asefimov@istokmw.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6792-1096>

Artem M. Emelianov, Engineer Specializing in Household Electronic Equipment (2007, Ivanovo State Textile Academy), Leading Process Engineer at JSC «RPC "Istok" n. a. Shokin». The author of 10 scientific publications. Area of expertise: on-wafer automated testing of semiconductor products.

Address: JSC «RPC "Istok" named after Shokin», 2A, Vokzalnaya St., Fryazino 141190, Russia

E-mail: amemelianov@istokmw.ru

Evgeniya A. Krivonogova, Master of chemical sciences (2017, National Research Mordovia State University), Process Integration Engineer at JSC «RPC "Istok" n. a. Shokin». Area of expertise: physics and technology of semiconductor devices; statistical process control; application of machine learning in semiconductor manufacturing process control.

Address: JSC «RPC "Istok" n. a. Shokin», 2A, Vokzalnaya St., Fryazino 141190, Russia

E-mail: eakrivonogova@istokmw.ru

Sergey D. Zinkin, Engineer Specializing in Microelectronics and Solid State Electronics (2013, National Research Mordovia State University), process integration engineer at JSC «RPC "Istok" n. a. Shokin». The author of 4 scientific publications. Area of expertise: physics and technology of semiconductor devices; statistical process control; application of machine learning in semiconductor manufacturing process control.

Address: JSC «RPC "Istok" n. a. Shokin», 2A, Vokzalnaya St., Fryazino 141190, Russia

E-mail: zinkin.sd@phystech.edu

Alexander V. Grusha, Engineer Specializing in "Radio-electronic systems and complexes" (2014, Sevastopol State University), Lead Engineer at JSC «RPC "Istok" n. a. Shokin». The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: monolithic microwave/mm-wave integrated circuit.

Address: JSC «RPC "Istok" n. a. Shokin», 2A, Vokzalnaya St., Fryazino 141190, Russia

E-mail: avgrusha@istokmw.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5889-4703>
