

УДК 621.382.8

Создание СВЧ монолитных ИС 5-миллиметрового диапазона для применения в перспективных КС

Ю. В. Федоров, П. П. Мальцев¹, Д. Л. Гнатюк², О. С. Матвеев³,
Д. В. Крапухин, С. А. Гамкрелидзе⁴

^{1,4}д. т. н., проф., ^{2,3}к. т. н.

ФГБУН «Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники»
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)

e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru

Аннотация. В ИСВЧПЭ РАН на основе нитридных гетероструктур разработан комплект монолитных интегральных схем, предназначенный для применения в составе приемопередающих модулей с жесткими ограничениями по массогабаритным характеристикам и потребляемой мощности, повышенными требованиями по стойкости к внешним и специальным факторам, работающих в частотном диапазоне 57–64 ГГц. Приводятся технические и эксплуатационные характеристики указанных изделий. Разработанные монолитные интегральные схемы могут быть использованы в жестких условиях эксплуатации и благодаря широким функциональным возможностям позволяют применять их в системах связи и управления космическими аппаратами.

Ключевые слова: электронная компонентная база, сверхвысокая частота, монолитная интегральная схема, нитридная гетероструктура

Development of Microwave Monolithic Integrated Circuits of 5-mm Wavelength Range for Application in Perspective Space Systems

Yu. V. Fedorov, P. P. Mal'tsev¹, D. L. Gnatyuk², O. S. Matveenko³,
D. V. Krapukhin, S. A. Gamkrelidze⁴

^{1,4}doctor of engineering science, professor, ^{2,3}candidate of engineering science

Federal State Budgetary Scientific Establishment Institute of Super High-frequency Semiconductor Electronics
of the Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS)

e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru

Abstract. IUHFSE RAS has developed on the basis of nitride heterostructures a set of monolithic integrated circuits intended for application in the receiver-transmitter modules with rigid restrictions for the mass-dimensional characteristics and power consumption, and increased requirements to the resistance to the external and special factors, and operating in the frequency range of 57–64 GHz. Technical and operational characteristics of the specified products are presented. The developed monolithic integrated circuits can be used in severe service conditions and, due to their functionalities, they can be applied in the telecommunication systems and for control of the space vehicles.

Keywords: electronic component base, super high frequency, monolithic integrated circuit, nitride heterostructure

Введение

Создание функционально полной номенклатуры изделий электронной компонентной базы (ЭКБ), удовлетворяющей в полной мере требованиям ракетно-космической техники по функциональным параметрам, надежности и радиационной стойкости, является одной из приоритетных проблем, решаемых предприятиями радиоэлектронного комплекса и профильными организациями Российской академии наук.

Эта проблема приобрела особую актуальность в связи с широким использованием в новых образцах космической техники импортной ЭКБ (по некоторым спутниковым системам — до 43 % всей номенклатуры) и жесткой политикой санкций, проводимой странами Запада.

Компоненты сверхвысокочастотной (СВЧ) техники относятся к изделиям ЭКБ, которые с одной стороны определяют тактико-технические и эксплуатационные характеристики современных космических систем, а с другой — практически недоступны на международном рынке для отечественных производителей, поскольку существуют значительные ограничения по их экспорту и действуют строгие запретительные меры по распространению соответствующих технологий.

В перечень основных задач импортозамещения СВЧ ЭКБ входят:

- создание научно-технического задела в области СВЧ-приборов в обеспечение перспективных образцов наземных и бортовых космических систем;
- обеспечение технологической независимости отечественных разработчиков и производителей радиоэлектронной аппаратуры от зарубежных поставщиков ЭКБ, специальных материалов, технологического и контрольно-измерительного оборудования.

Основными направлениями исследований и разработок в области СВЧ техники являются [1]:

- получение оптимизированных гетероструктур на основе нитрида галлия и других широкозонных материалов для мощных СВЧ приборов в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн;
- разработка и внедрение технологий изготовления СВЧ-транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) на основе широкозонных полу-

проводниковых материалов (GaN, SiC, InP, полиалмаз, графен), в том числе крайне высокочастотного (КВЧ) диапазона (60–200 ГГц);

- разработка и внедрение технологий создания многофункциональных однокристалльных СВЧ МИС (типа «система на кристалле»), включающих аналоговые, переключательные и цифровые схемы.

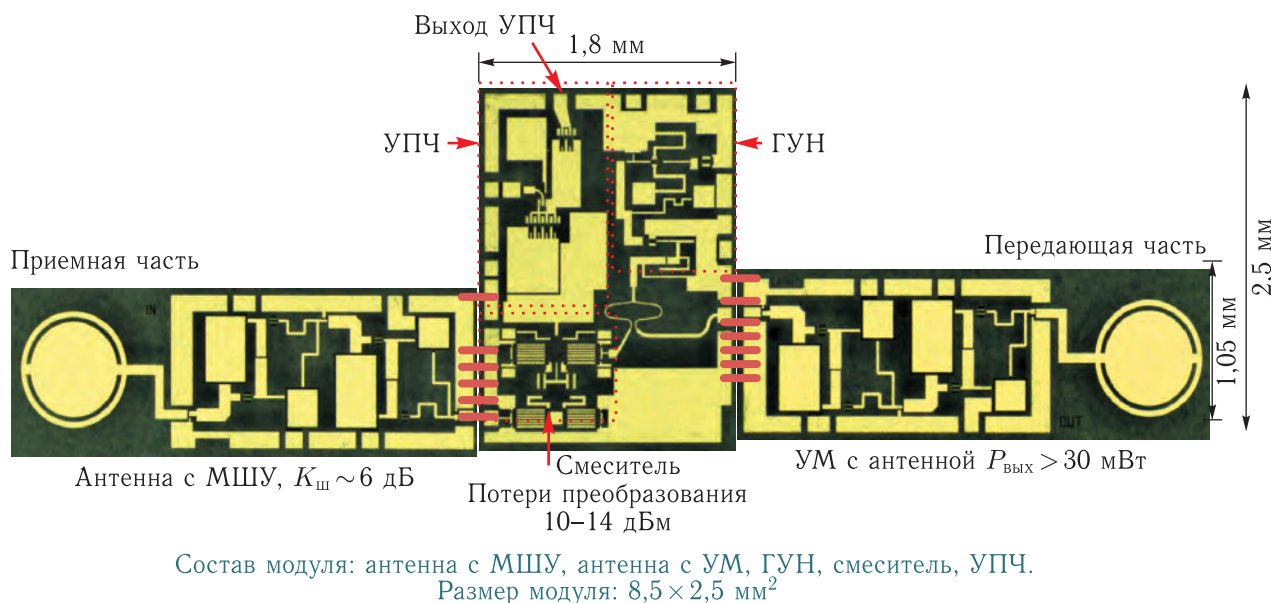
Применение высокоинтегрированных многофункциональных изделий ЭКБ является основой производства перспективных маломассогабаритных космических аппаратов (массой не более 120–150 кг) в качестве ключевых элементов космического сегмента отечественной промышленности. Это связано с главной тенденцией развития космической техники на современном этапе, базирующейся на существенном сокращении затрат на разработку, развертывание и эксплуатацию космических систем путем микроминиатюризации, внедрения нанотехнологий и нанoeлектроники. Создание таких космических аппаратов позволяет производить развертывание орбитальных группировок с помощью сравнительно недорогих ракет-носителей легкого класса, что может привести к снижению затрат на пусковые услуги на 10–15 %.

Поэтому повышение рабочих частот и уровня интеграции при одновременном обеспечении высокой стойкости к внешним и специальным воздействующим факторам становится определяющим трендом развития СВЧ ЭКБ.

Результаты разработки перспективных СВЧ МИС на нитрид-галлиевых гетероструктурах

В настоящее время Федеральным государственным бюджетным учреждением науки «Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники» Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) разработан комплект МИС 5-миллиметрового диапазона длин волн в бескорпусном исполнении (рис. 1).

Разработанный комплект МИС серии 5411 (характеристики кристаллов представлены ниже) включает малoshумящий усилитель (МШУ)



Состав модуля: антенна с МШУ, антенна с УМ, ГУН, смеситель, УПЧ.
Размер модуля: $8,5 \times 2,5$ мм²

Рис. 1. Приемно-передающий модуль для диапазона частот 57–64 ГГц на гетероструктуре AlGaIn/GaN/Сапфир

со встроенной антенной на входе (5411УВ01АН) и без антенны (5411УВ01Н), усилитель мощности (УМ) со встроенной антенной на выходе (5411УВ02АН) и без антенны (5411УВ02Н) и преобразователь сигнала 5411НС01Н (ПС) и предназначен для применения в составе приемопередающих модулей, работающих в частотном диапазоне 57–64 ГГц, с жесткими ограничениями по массогабаритным характеристикам и потребляемой мощности, повышенными требованиями по стойкости к внешним и специальным факторам.

На рис. 2 приведены СВЧ-параметры МШУ, на рис. 3 — СВЧ-параметры УПЧ.

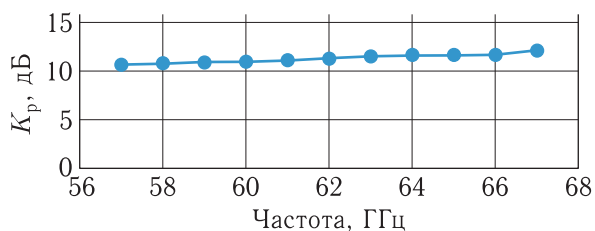


Рис. 2. СВЧ-параметры МШУ

Указанный частотный диапазон 57–64 ГГц обладает следующими преимуществами:

- позволяет работать в широкой полосе частот и обеспечивает скорость передачи данных до 5 Гбит/с и выше;

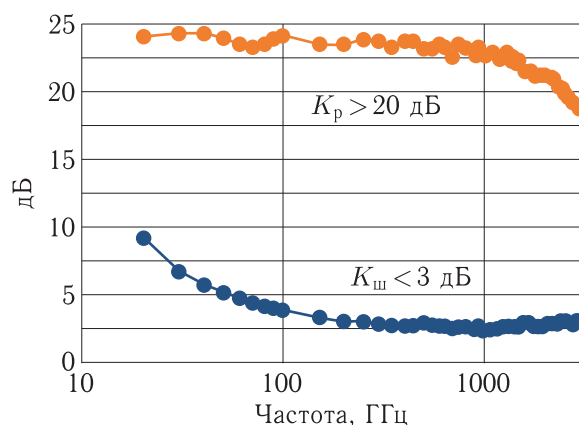


Рис. 3. СВЧ-параметры УПЧ

- характеризуется высокой степенью поглощаемости в атмосфере, что позволяет создавать изолированные каналы связи;

- малая длина волны делает возможной интеграцию антенн и целых антенных решеток на одном кристалле.

В диапазоне 57–64 ГГц возможно создавать приемно-передающие устройства широкополосной помехоустойчивой связи, обеспечивающие высокоскоростную и скрытую передачу данных между электронными абонентами, а также перейти к построению мобильных сетей широкополосной связи 5G [2].

Таблица 1. Технические характеристики комплекта нитрид-галлиевых МИС

| Наименование параметра, единица измерения | Буквенное обозначение параметра | Значение параметра | |
|--|---------------------------------|--------------------|----------------------------|
| | | не менее | не более |
| Рабочий диапазон частот входного сигнала, ГГц нижнее значение частоты верхнее значение частоты | $f_{\text{вх}}$ | 64 | 57 |
| Малошумящий усилитель (МШУ) | | | |
| Коэффициент шума, дБ | $K_{\text{ш}}$ | | 6,5 |
| Коэффициент передачи, дБ | $K_{\text{пер}}$ | 16 | |
| КСВН входа и выхода | $K_{\text{ст}} U_{\text{н}}$ | | 2 |
| Ток потребления, мА | $I_{\text{потр1}}$ | | 100 |
| Размеры МИС МШУ, мм × мм | $S_{\text{мшу}}$ | | $1,15 \times 2,26 \pm 0,1$ |
| Размеры МИС МШУ с антенной, мм × мм* | $S_{\text{мшу2}}$ | | $1,15 \times 3,4 \pm 0,1$ |
| Усилитель мощности (УМ) | | | |
| Коэффициент усиления по мощности, дБ | $K_{\text{р}}$ | 20 | |
| Выходная мощность УМ, мВт | $P_{\text{вых}}$ | 100 | |
| КСВН входа и выхода | $K_{\text{ст}} U_{\text{н}}$ | | 2 |
| Ток потребления, мА | $I_{\text{потр2}}$ | | 200 |
| Размеры МИС УМ, мм × мм* | $S_{\text{ум}}$ | | $1,15 \times 2,26 \pm 0,1$ |
| Размеры МИС УМ с антенной, мм × мм* | $S_{\text{ум2}}$ | | $1,15 \times 3,4 \pm 0,1$ |
| Преобразователь сигнала (ПС) | | | |
| Рабочий диапазон частот выходного сигнала ПЧ, ГГц нижнее значение частоты верхнее значение частоты | $f_{\text{пч}}$ | 2 | 0 |
| Коэффициент преобразования, дБ | $K_{\text{пр}}$ | 0 | 15 |
| КСВН входа и выхода | $K_{\text{ст}} U_{\text{н}}$ | | 2 |
| Ток потребления, мА | $I_{\text{потр3}}$ | | 100 |
| Размеры МИС ПС, мм × мм* | $S_{\text{пс}}$ | | $1,9 \times 2,26 \pm 0,1$ |
| * Размеры МИС указаны с учетом допуска на линию реза | | | |

МИС построены на НЕМТ-транзисторах, формируемых на нитридных гетероструктурах AlGaIn/GaN с подложкой сапфира толщиной 340 мкм с технологическими нормами 110 нм. Следует отметить, что использование нитрид-галлиевых гетероструктур обеспечивает потенциальные преимущества разработанных МИС по сравнению с традиционными изделиями на арсениде галлия, благодаря большой ширине запрещенной зоны нитрида галлия (3,4 эВ), в том числе в части обеспечения более высоких электрической прочности, мощности, стойкости к воздействию внешних и специ-

альных факторов, интеграции элементов на кристалле.

Неслучайно ведущими европейскими организациями в аэрокосмической отрасли нитрид галлиевые гетероструктуры были выбраны в качестве основного технологического направления для создания следующего поколения радиолокационной аппаратуры и ее компонентов, в том числе усилителей высокой мощности и приемо-передающих модулей.

В табл. 1 представлены основные технические характеристики разработанных МИС.

Таблица 2. Параметры стойкости МИС к воздействию механических и климатических факторов

| Наименование внешнего воздействующего фактора | Наименование характеристики фактора, единица измерения | Значение характеристики воздействующего фактора |
|---|---|---|
| Механические факторы | | |
| Механический удар одиночного действия | Пиковое ударное ускорение, м/с^2 (g) | 15 000 (1500)* |
| | Длительность действия, с ударного ускорения, мс | 0,1–2 |
| Климатические факторы | | |
| Повышенная температура среды | Максимальное значение при эксплуатации, $^{\circ}\text{C}$ | +85 |
| Пониженная температура среды | Минимальное значение при эксплуатации, $^{\circ}\text{C}$ | –60 |
| | Минимальное значение при транспортировании и хранении, $^{\circ}\text{C}$ | –60 |

* Требование стойкости к воздействующему фактору предъявляются только по прочности.

Параметры стойкости изделий к воздействию климатических и механических факторов приведены в табл. 2.

Следует отметить, что разработанные МИС выполняют свои функции и сохраняют значения параметров в пределах установленных норм во время и после воздействия специальных факторов 7.И со значениями характеристик 7.И₁–7.И₇, 7.И₁₀, 7.И₁₁ в соответствии с ГОСТ РВ 20.39.414.2 для группы исполнения ЗУ_с.

Приемо-передающий модуль на основе разработанного комплекта МИС имеет две антенны, работающие на передачу и на прием сигнала.

На рис. 4 и 5 приведены расчетные и измеренные диаграммы направленности антенны.

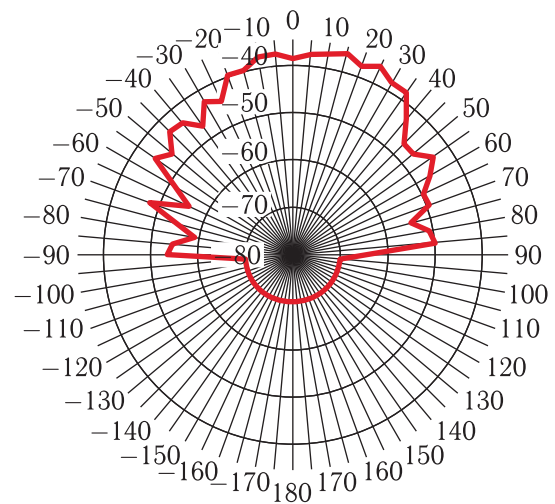


Рис. 5. Диаграмма антенны (измерения)

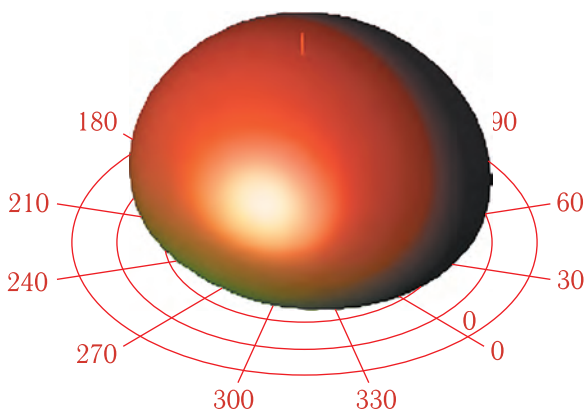


Рис. 4. Диаграмма антенны (расчет)

При этом и передаваемый, и принимаемый сигналы поступают на балансный смеситель, входящий в состав ПС, где происходит вычитание одного сигнала из другого, а их разность поступает на усилитель промежуточной частоты (УПЧ). Данная схема является общей для устройств определения расстояния до цели и скорости движения объекта. Интеграция антенн на один кристалл с усилителями уменьшает потери в тракте, что снижает коэффициент шума в приемном тракте и увеличивает передаваемую мощность передающего тракта. Область излучения антенны находится над кристаллом, максимум излучения перпендикулярен

плоскости кристалла. Генератор, управляемый напряжением (ГУН), обеспечивает перестройку сигнала в диапазоне 2 ГГц за счет управляющего напряжения (при этом начальное значение частоты ГУН лежит в диапазоне 57–64 ГГц) и мощность от 10 до 20 мВт. Диапазон высокочастотного сигнала, поступающего с приемной антенны на смеситель, 57–64 ГГц. Таким образом, подстройка ГУН обеспечивает получение выходного сигнала промежуточной частоты в диапазоне от 0 до 2 ГГц.

Зависимость частоты генерации ГУН от управляющего напряжения и СВЧ-параметры усилителя мощности показаны на рис. 6 и 7.

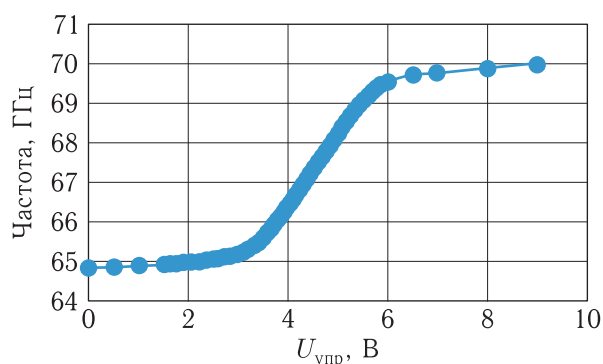


Рис. 6. Зависимость частоты генерации ГУН от управляющего напряжения

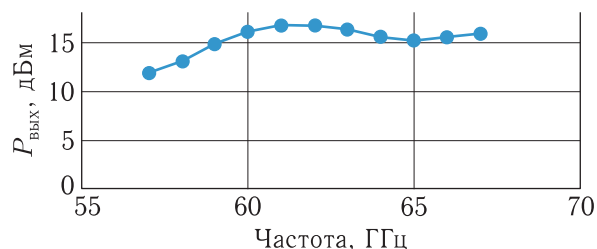


Рис. 7. СВЧ-параметры УМ

Анализ состояния аналогичных разработок СВЧ МИС за рубежом показал, что в этом диапазоне применяют МИС, изготовленные по КМОП или SiGe технологиям на подложках кремния [3,4]. На гетроструктурах AlGaIn/GaN/Al₂O₃ изготавливают только отдельные компоненты (усилители, смесители и т. д.).

Заключение

Разработанная ИСВЧПЭ РАН технология позволяет изготавливать МИС усилителей одновременно с высокой мощностью и низким коэффициентом шума, а также интегрировать на один кристалл все составляющие приемно-передающих устройств: ГУН, смеситель, усилители, антенны.

В дальнейшем при массовом выпуске СВЧ МИС возможен переход на кремниевые подложки для снижения стоимости изделий. ИСВЧПЭ РАН активно проводит исследования по решению проблемы освоения производства нитрид-галлиевых гетероструктур на кремнии.

Разработанные базовая технология и конструктивно-схемотехнические решения стали основой для выполнения последующих работ по созданию перспективной СВЧ ЭКБ в интересах космической техники [5].

Список литературы

1. Мальцев П. П., Шахнович И. В. СВЧ-технологии — основа электроники будущего. Тенденции и рынки // Электроника. Наука, технология, бизнес, 2015, № 8. С. 78–84.
2. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Галиев Р. Р., Михайлович С. В., Гнатюк Д. Л. Нитридные приборы миллиметрового диапазона // Наноиндустрия, 2014, № 3. С. 40–51.
3. Ghaffar F. A. 60 GHz system-on-chip (SoC) with built-in memory and an on-chip antenna // Antennas and Propagation (EuCAP), 2014, 8th European Conference on, p. 531–532.
4. Jian Zhang. Low Noise Amplifier with Integrated Balanced Antenna for 60 GHz Wireless Communications // Antennas and Propagation, 2014, IEEE Transactions on, vol. 62, Issue 6. P. 3407–3411.
5. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Крапучин Д. В., Зуев А. В., Бунегина С. Л. Монолитная интегральная схема усилителя со встроенной антенной для пятимиллиметрового диапазона длин волн // Нано- и микросистемная техника, 2014, № 9. С. 12–15.