

Монолитные СВЧ ИС миллиметрового диапазона на основе нитридных гетероструктур с интегрированными антенными элементами

С.А. Гамкредидзе, П.П. Мальцев, Ю.В. Федоров

*Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
Российской академии наук, г. Москва, Россия*

gamkrelidze@isvch.ru

Развитие приборов на нитриде галлия – приоритетное направление, отражающее мировые тенденции развития СВЧ-электроники. Использование наногетероструктур на основе GaN для создания монолитных интегральных схем (МИС) позволяет реализовать системы, работающие в более широком диапазоне температур, с большими удельной выходной мощностью и КПД по сравнению с приборами на основе кремния и арсенида галлия.

На основе нитридных гетероструктур разработан комплект СВЧ МИС, предназначенный для применения в составе приемо-передающих модулей с жесткими ограничениями по массогабаритным характеристикам и потребляемой мощности, повышенными требованиями по стойкости к внешним факторам, работающих в частотном диапазоне 57–64 ГГц. Приведены технические и эксплуатационные характеристики указанных изделий. Дано краткое описание используемого технологического маршрута и разработанных оригинальных конструкторско-технологических решений. Представлен образец однокристалльного приемо-передающего модуля, способного заменить в аппаратуре 4-5 кристаллов однофункциональных МИС предыдущего поколения.

Технология формирования наногетероструктур на основе GaN позволяет изготавливать МИС усилителей с высокой мощностью и низким коэффициентом шума; интегрировать на одном кристалле все составляющие приемо-передающих модулей. Разработанные МИС могут быть использованы в жестких условиях эксплуатации.

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

Для цитирования: Гамкредидзе С.А., Мальцев П.П., Федоров Ю.В. Монолитные СВЧ ИС миллиметрового диапазона на основе нитридных гетероструктур с интегрированными антенными элементами // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 6. – С. 582–588. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-6-582-588

Monolithic Microwave ICs of mm Range on Basis of Nitride Heterostructures

S.A. Gamkrelidze, P.P. Maltsev, Yu.V. Fedorov

*Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

gamkrelidze@isvch.ru

The development of the devices based on gallium nitride has become the priority direction, reflecting the world trends in the development of the microwave electronics. The use of the nanoheterostructures based on GaN for creating monolithic integrated circuits (MIC) makes it possible to realize the systems operating in a significantly wider range of temperatures, with a higher specific output power and efficiency as compared to the devices based on silicon and gallium arsenide.

On the basis of nitride heterostructures a set of MMIC, intended for application in the receiver-transmitter modules with rigid restrictions for the mass-dimensional characteristics and power consumption, and the increased requirements for the resistance to the external and special factors, and operating in the frequency range of 57–64 GHz has been developed. The technical and operational characteristics of the specified products have been presented. The developed MIC can be used in harsh operating conditions. A brief description of the technological route and of the developed original design and technological solutions has been given. A sample of a single-chip transmitter-receiver module, capable of replacing the equipment 4-5 crystals of single-function MIC of the previous generation has been presented.

The technology of forming nanoheterostructures based on GaN permits to manufacture amplifiers MIC with high power and low noise coefficient, to integrate all components of the receiver-transmitter module on a single crystal.

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

For citation: Gamkrelidze S.A., Maltsev P.P., Fedorov Yu.V. Monolithic microwave ICs of mm range on basis of nitride heterostructures // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – № 6. – P. 582–588 . DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-6-582-588

Введение. Актуальными проблемами исследований и разработок в области СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) являются [1]:

- получение оптимизированных гетероструктур на основе нитрида галлия (GaN) и других широкозонных материалов (SiC, InP, полиалмаз, графен) для мощных СВЧ-приборов в дм-, см- и мм-диапазонах;
- разработка и внедрение технологий изготовления СВЧ-транзисторов и МИС, в том числе КВЧ-диапазона, на основе широкозонных полупроводниковых материалов (60–200 ГГц);
- создание multifunctional СВЧ МИС (вида система на кристалле), включающих аналоговые, переключательные и цифровые схемы.

Приоритетным направлением, отражающим мировые тенденции развития СВЧ-электроники, стало развитие приборов на нитриде галлия.

Использование наногетероструктур на основе GaN для создания МИС позволяет реализовать системы, работающие в более широком диапазоне температур, с большими удельной выходной мощностью и КПД по сравнению с приборами на основе кремния и арсенида галлия. Приборам на основе GaN свойственна высокая радиационная стойкость. Их применение существенно улучшает параметры усилителей, генераторов, модуляторов, преобразователей напряжения и других ключевых элементов широкополосных беспроводных сетей мобильной связи нового поколения 5G, радиодатчиков, малогабаритных твердотельных радаров с фазированными антенными решетками.

Результаты разработки перспективных СВЧ МИС на нитридгаллиевых гетероструктурах. В ИСВЧПЭ РАН на основе нитридных гетероструктур разработан комплект из пяти бескорпусных СВЧ МИС серии 5411, работающих в диапазоне 57–64 ГГц, предназначенных для применения в составе приемо-передающих модулей (ППМ) с жесткими ограничениями по массогабаритным характеристикам и потребляемой мощности, с повышенными требованиями по стойкости к внешним факторам.

Комплект МИС серии 5411 включает в себя малошумящий усилитель со встроенной антенной на входе (5411УВ01АН) и без антенны (5411УВ01Н), усилитель мощности (УМ) со встроенной антенной на выходе (5411УВ02АН) и без антенны (5411УВ02Н), преобразователь сигнала (ПС) 5411НС01Н. Основные характеристики МИС представлены в табл.1.

Интеграция антенных элементов с усилительными схемами на одном кристалле (рис.1) в отечественной практике реализована впервые.

Таблица 1

Технические параметры нитридгаллиевых МИС

Table 1

Technical parameters of gallium nitride MIC

Параметр	Значение	
	не менее	не более
Рабочий диапазон частот входного сигнала $f_{вх}$, ГГц		
нижнее значение	–	57
верхнее значение	64	–
Коэффициент шума МШУ $K_{ш}$, дБ	–	6,5
Коэффициент передачи МШУ $K_{пер}$, дБ	16	–
Ток потребления МШУ $I_{потр1}$, мА	–	100
Коэффициент усиления по мощности УМ K_p , дБ	20	–
Выходная мощность УМ $P_{вых}$, мВт	100	–
Ток потребления УМ $I_{потр2}$, мА	–	200
Рабочий диапазон частот выходного сигнала промежуточной частоты ПС $f_{п.ч}$, ГГц		
нижнее значение	2	0
верхнее значение	–	–
Коэффициент преобразования ПС $K_{пр}$, дБ	0	15
Ток потребления ПС $I_{потр3}$, мА	–	100
КСВН входа и выхода $K_{ст} U_n$	–	2
Питающее напряжение УМ $U_{п. УМ}$, В	15	30
Питающее напряжение МШУ и ПС $U_{п. МШУ}$, В	5	10

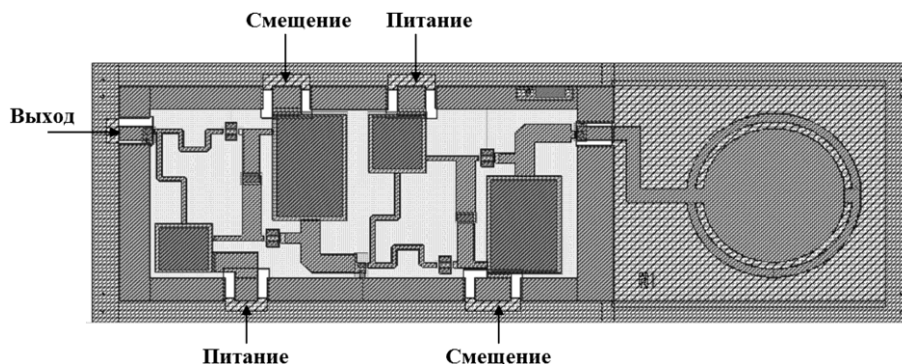


Рис. 1. Топологическая структура малошумящего усилителя для диапазона частот 57–64 ГГц на гетероструктурах AlGaIn/GaN/сапфир

Fig. 1. Topological structure of low-noise amplifier for 57 – 64 GHz frequency range on the AlGaIn/GaN/sapphire heterostructures

Антенный элемент сформирован в виде монополя сложной формы. Размер антенного элемента вместе с подводящим полоском $1,0 \times 0,72$ мм. В полосе частот 57–64 ГГц потери составляют –10 дБ. Диаграмма направленности близка к кардиоидной (излучение перпендикулярно поверхности антенны) [2].

Выбранный для функционирования МИС диапазон частот 57–64 ГГц имеет следующие преимущества:

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

МИС выполнены на 110-нм НЕМТ-транзисторах, формируемых на гетероструктурах AlGaIn/GaN с подложкой сапфира толщиной 340 мкм. С этой целью разработан полный технологический маршрут изготовления МИС, включающий следующие этапы: формирование приборной мезаизоляции; формирование невыпрямляющего (омического) контакта к гетероструктуре; формирование резисторов, нижних обкладок конденсаторов, индуктивностей; формирование выпрямляющего контакта (контакта Шоттки) к гетероструктуре; пассивацию затвора транзистора; формирование конденсаторного диэлектрика, формирование первого уровня металлизации и верхних обкладок конденсаторов; формирование межэлектрических соединений в виде «воздушных мостов»; формирование межэлектрических соединений, обеспечивающих общую землю; шлифовку пластины; резку пластины на кристаллы.

В основу технологического маршрута положены оптимальные конструкторско-технологические решения, включая создание «заземляющей плоскости» – специального фотолака над лицевой поверхностью пластины с изготовленными активными и пассивными СВЧ-элементами поверх слоя полимерного диэлектрика толщиной 10–15 мкм. Заземление элементов осуществляется через отверстия в слое фотолака, одновременно выполняющего роль защитной пассивации [3].

Использование технологии формирования невжигаемых омических контактов к гетероструктуре AlGaIn/GaN/Al₂O₃ позволило отказаться от высокотемпературных процессов обработки. Это дало возможность сохранить высококачественный рельеф контактов для последующих технологических операций, а также получить омические контакты с удельным сопротивлением 0,2 Ом·мм, что является результатом мирового уровня [4].

Разработанные базовая технология и конструктивно-схемотехнические решения стали основой для выполнения последующих работ по созданию перспективных СВЧ-изделий.

В ИСВЧПЭ РАН на основе нитридных гетероструктур выполняются перспективные разработки многофункциональных высокоинтегрированных МИС ППМ, способных заменить в аппаратуре 4-5 кристаллов однофункциональных МИС предыдущего поколения. Топологическая структура кристалла такой МИС ППМ представлена на рис.2. Сигнал гетеродина от генератора, управляемого напряжением (ГУН), через делитель мощности подается на передающую антенну и на балансный смеситель. В смесителе сигналы гетеродина и высокочастотного сигнала с приемной антенны преобразуются в сигнал промежуточной частоты. В табл.2 представлены сравнительные характеристики современных ППМ. Из таблицы видно, что параметры МИС ППМ в целом соответствуют современным зарубежным разработкам.

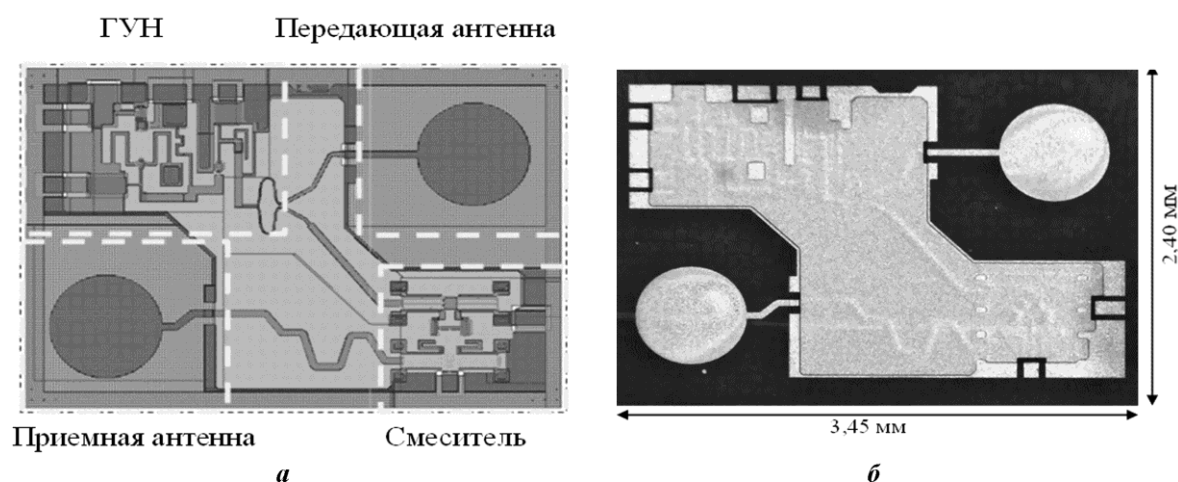


Рис.2. Однокристалльный нитридгаллиевый ППМ со встроенными антеннами для диапазона частот 57–64 ГГц: а – топология ППМ; б – фотография кристалла ППМ
Fig.2. On-chip gallium nitride SRM with built-in antennas for 57 – 64 GHz frequency range: а – SRM topology; б – picture of crystal SRM

Сравнительные характеристики современных ППМ

Таблица 2

Table 2

Comparative characteristics of present SRM

Наименование параметра	ИСВЧПЭ РАН (Россия)	Институт CEA Leti (Франция)	Стэнфордский университет (США)
Технология	Гетероструктуры AlGaIn/GaN/Al ₂ O ₃	КМОП	SiGe
Технологические нормы, нм	110	65	130
Рабочий диапазон частот, ГГц	57–64	60	87,3–97,2
Ток потребления, мА	≤ 70	Нет данных	Нет данных
Излучаемая мощность, мВт	6–0	2,5	20
Девиация частоты ГУН, ГГц	≥ 2	Нет данных	Нет данных
Нелинейность перестройки частоты, %	≤ 8	Нет данных	Нет данных
Габаритные размеры, мм	2,4×3,45	1,9×3,1	1,4×4,4

В ИСВЧПЭ РАН ведутся также разработки МИС для частотного диапазона 85–95 ГГц, разработан трехкаскадный УМ с выходной мощностью до 0,3 Вт.

Заключение. Освоенная в ИСВЧПЭ РАН технология формирования наногетероструктур на основе GaN позволяет изготавливать МИС усилителей при сочетании высокой мощности и низкого коэффициента шума, интегрировать на одном кристалле все составляющиеППМ, включая ГУН, смеситель, усилители, антенны.

В дальнейшем при массовом выпуске нитридгаллиевых СВЧ МИС возможен переход на кремниевые подложки, имеющие достаточно высокую теплопроводность, более удобные для обработки и потенциально более дешевые по сравнению, например, с сапфировыми или карбидкремниевыми подложками.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.607.21.0124, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60715X0124).

Литература

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. Монолитная интегральная схема усилителя со встроенной антенной для пятимиллиметрового диапазона длин волн / **П.П. Мальцев, О.С. Матвеев, Ю.В. Федоров и др.** // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 9. – С. 12–15.
3. Нитридные технологии для освоения миллиметрового диапазона длин волн / **Р.Р. Галиев, Д.Л. Гнатюк, А.В. Зуев и др.** // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 2. – С. 21–32.
4. **Nidhi D.F., Brown S.K., Mishra U.K.** Very low ohmic contact resistance through an AlGaN etch-stop in nitrogen-polar GaN-based high electron mobility transistors // Jpn. J. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 49. – 021005. – P. 3143–3150.

Поступила 07.04.2017 г.; принята к публикации 12.09.2017 г.

Гамкрелидзе Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, директор Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (Россия, 117105, г. Москва, Нагорный пр., д. 7, стр. 5), gamkrelidze@isvch.ru

Мальцев Петр Павлович – доктор технических наук, профессор, научный руководитель Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (Россия, 117105, г. Москва, Нагорный пр., д. 7, стр. 5), заслуженный деятель науки Российской Федерации, iuhfseras2010@yandex.ru

Федоров Юрий Владимирович – главный конструктор-заместитель директора по НИОКР Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (Россия, 117105, г. Москва, Нагорный пр., д. 7, стр. 5), iuhfseras2010@yandex.ru

References

1. Mal'cev P.P., SHahnovich I.V. SVCH-tehnologii – osnova ehlektroniki budushchego. Tendencii i rynki [Microwave technologies - the basis of future electronics. Trends and markets]. *Elektronika. Nauka, tekhnologiya, biznes – Electronics: Science, Technology, Business*, 2015, no. 8, pp. 78 – 84. (in Russian).
2. Mal'cev P.P., Matveenko O.S., Fedorov YU.V., Gnatyuk D.L., Krapuhin D.V., Zuev A.V., Bunegina S.L. Monolitnaya integral'naya skhema usilitelya so vstroennoj antennoj dlya pyatimillimetrovogo diapazona dlin voln [5 mm-wave amplifier monolithic integrated circuit with integrated antenna]. *Nano- i Mikrosistemnaya tekhnika – Nano- and microsystems technology*, 2014, no. 9, pp. 12–15. (in Russian).
3. Galiev R.R., Gnatyuk D.L., Zuev A.V., Krapuhin D.V., Majtama M.V., Matveenko O.S., Mihajlovich S.V., Fedorov Yu.V., Shcherbakova M.Yu. Nitridnye tehnologii dlya osvoeniya millimetrovogo diapazona dlin

voln [Technology for Millimeter wave Application GaN]. *Nano- i Mikrosistemnaya tekhnika – Nano- and microsystems technology*, 2015, no. 2, pp. 21–32. (in Russian).

4. Nidhi D.F., Brown S.K., Mishra U.K. Very low ohmic contact resistance through an AlGa_N etch-stop in nitrogen-polar GaN-based high electron mobility transistors. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2010, 9, 021005, pp. 3143–3150.

Submitted 07.04.2017; accepted 12.09.2017.

Gamkrelidze Sergey A. – Dr. Sci. (Eng), Prof., Director of the Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 117105, Moscow, Nagorny Proezd, 7, bld. 5), gamkrelidze@isvch.ru

Maltsev Pyotr P. – Dr. Sci. (Eng), Prof., scientific Director of the Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences, honored scientist of the Russian Federation (Russia, 117105, Moscow, Nagorny proezd, 7, bld. 5), iuhfseras2010@yandex.ru

Fedorov Yuri V. – chief designer-deputy director for research and development of the Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 117105, Moscow, Nagorny proezd, 7, bld. 5), iuhfseras2010@yandex.ru