

# Приемопередающие МИС на нитриде галлия диапазона 60 ГГц

П.П. Мальцев, Д.Л. Гнатюк, О.С. Матвеев, Б.Г. Путинцев

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

**Аннотация** — В статье представлены результаты разработки и исследований монолитных интегральных схем (МИС), изготовленных по 0,14 мкм GaN НЕМТ технологии на подложках  $Al_2O_3$ , предназначенных для работы в приемопередающих модулях диапазона 60 ГГц. Измерения изготовленных образцов системы на кристалле, включающей ГУН, смеситель и МШУ, продемонстрировали работоспособность в диапазоне 66-69 ГГц. Выходная мощность в передающем тракте составила не менее 10 дБм, диапазон перестройки гетеродина не менее 2 ГГц. Потребляемая мощность МИС составила 520 мВт.

**Ключевые слова** — V-диапазон, GaN, НЕМТ, приемопередающий модуль, система-на-кристалле.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Нитрид галлия - широкозонный полупроводник, позволяющий создавать усилительные каскады с более высокой по сравнению с другими технологиями выходной мощностью, поэтому он наиболее востребован в усилителях мощности. За счет большой ширины запрещенной зоны устройства на GaN обладают более высокими пробивными напряжениями, большей стойкостью к температуре и ионизирующему излучению.

ИСВЧПЭ РАН ведёт работы по освоению технологии проектирования и производства монолитных интегральных схем (МИС) на основе гетероструктур нитрида галлия, используемых в приемопередающих системах [1-4]. В данной работе представлены результаты исследований и разработок приемопередающих систем на кристалле диапазона 60 ГГц. Ширина полосы и помехоустойчивость данного диапазона делают его привлекательным для применения в приложениях сверхширокополосной передачи данных со скоростями более 1 Гб/с, в системах межспутниковой связи, а также в перспективных образцах вооружения. В миллиметровом диапазоне размеры излучателя позволяют интегрировать их на кристалл. Интеграция антенн на кристалле позволяет обеспечить низкий уровень потерь между элементами системы, низкий уровень шумов и большую передаваемую мощность [5], а также снизить производственные издержки по сравнению с реализацией ПППМ в виде микросборки [6].

МИС были реализованы на гетероструктурах  $AlGaIn/GaN$  на подложках  $Al_2O_3$  толщиной 350 мкм. Изготовленные на данных гетероструктурах НЕМТ

транзисторы имеют длину затвора 0,14 мкм и имеют измеренные значения параметров  $F_t$  и  $F_{max}$  без деэмпеддинга контактных площадок 57 ГГц и 130 ГГц, соответственно.

## 2. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МИС

Блок-схема разработанной системы на кристалле приведена на рис. 1. Генератор, управляемый напряжением (ГУН) с буферным усилителем выполняют роль источника сигнала V-диапазона, поступающего на передающую антенну, а также роль гетеродина. В смесителе сигнал гетеродина и принятый сигнал с приемной антенны, усиленный малошумящим усилителем (МШУ) преобразуются в сигнал промежуточной частоты.

На начальном этапе было проведено схемотехническое моделирование элементов системы-на-кристалле, в котором использовались модели транзисторов, построенные на основе измерений S-параметров и вольтамперных характеристик изготовленных ранее тестовых транзисторов.

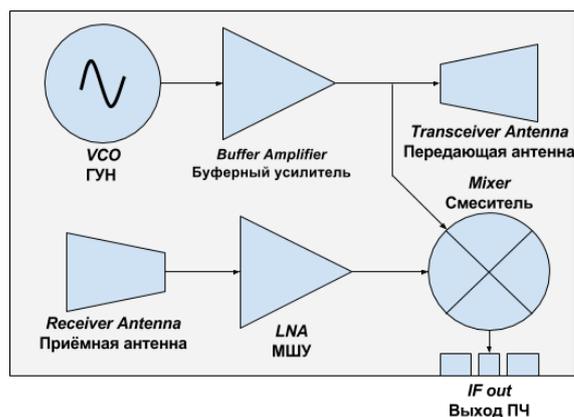


Рис. 1. Блок-схема МИС ПППМ V-диапазона

Принципиальная схема разработанного однокаскадного МШУ показана на рис. 2. Входная и выходная согласующие цепи образованы конденсаторами и микрополосковыми линиями. Согласование входа выполнялось на достижение минимального уровня шума. Коэффициент усиления МШУ 10 дБ, коэффициент шума 6,0-6,5 дБ [7-8].

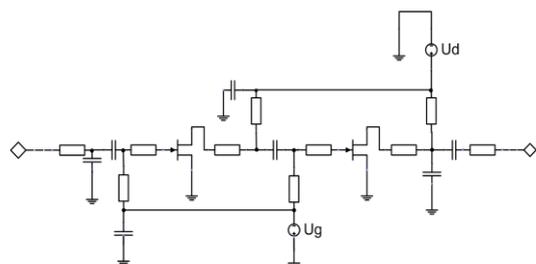


Рис. 2. Принципиальная схема МШУ

В качестве интегрированного в ППМ источника сигнала был реализован ГУН V-диапазона (схема приведена на рис. 3). Микрополосковые линии Ts и Tg, подключенные к истоку и затвору транзистора, вместе с варактором образуют резонансный контур. На стоке образуется отрицательное дифференциальное выходное сопротивление. Частота генерации определяется в основном длиной линий Ts и Tg и емкостями транзистора [9]. Управление частотой генерации осуществляется варактором, в качестве которого используется транзистор в диодном включении - управляющее напряжение меняет емкость затвор-сток. На выход ГУН добавлен однокаскадный буферный усилитель, для устранения влияния вариации цепи нагрузки генератора на частоту и уровень формируемого в ГУН сигнала. Номинал разделительных конденсаторов в цепях питания и смещения выбран достаточно большим, чтобы не оказывать влияния на резонансную частоту. При расчетах схемы использовалась нелинейная модель транзисторов с шириной затвора 100 мкм, построенная на основе результатов измерений тестовых транзисторов [10].

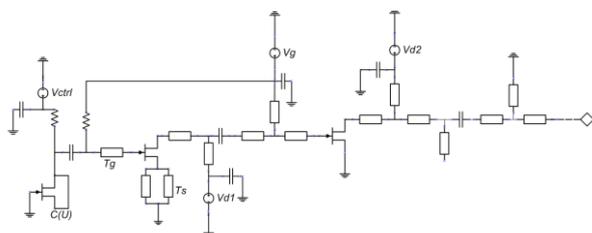


Рис. 3. Принципиальная схема ГУН

Смеситель построен на основе двух балунов Маршанда (принципиальная схема представлена на рис. 4). На входы балунов поступают сигналы с ГУН и антенны – на вход смесителя с ГУН подается сигнал гетеродина (LO), на вход RF – сигнал в диапазоне от 60 до 67 ГГц. На выходе балунов формируются сигналы, смещенные относительно друг друга по фазе на 180°. Выходные сигналы балунов попарно перемножаются в транзисторах, суммируются и подаются на выход (IF). Для достижения необходимой рабочей ширины полосы смесителя балуны Маршанда реализованы в виде семи отрезков связанных микрополосковых линий. Оптимизация параметров схемы проводилась с целью минимизации потерь преобразования в смесителе.

Расчетные потери в балансном смесителе при преобразовании сигнала из диапазона 60-67 ГГц в диапазон 0-5 ГГц не превышают 12 дБ.

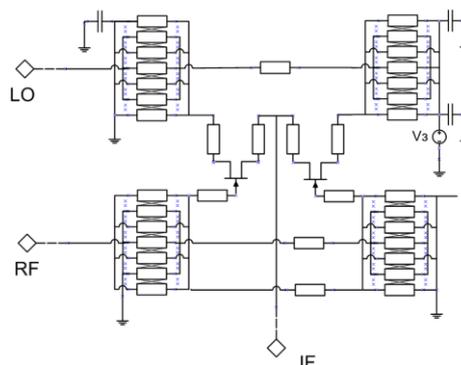


Рис. 4. Принципиальная схема смесителя

По результатам схемотехнического моделирования сосредоточенные элементы схемы были преобразованы в топологический проект в САПР Keysight Advanced Design System (ADS). Для учета взаимного влияния распределенных СВЧ-элементов и оптимизации их геометрических параметров было проведено трехмерное электромагнитное моделирование полученного топологического проекта. В результате на данную МИС получено свидетельство о регистрации топологии интегральной схемы [11].

Изготовление разработанных МИС производилось на технологическом оборудовании ИСВЧПЭ РАН. Травление заземляющих отверстий сквозь сапфировую подложку связано с серьезными технологическими трудностями, поэтому было использовано технологическое решение, заключающееся в создании заземляющей плоскости над слоем полимерного диэлектрика-фотолака, нанесенного на уже изготовленные СВЧ элементы. Таким образом, заземление соответствующих элементов производится через отверстия в слое фотолака, одновременно выполняющего роль защитной пассивации [12].

Фотографии кристаллов МИС ППМ после нанесения слоев фотолака и верхней металлизации представлены на рис. 5. Размеры системы-на-кристалле составляют 4,0x2,4 мм.

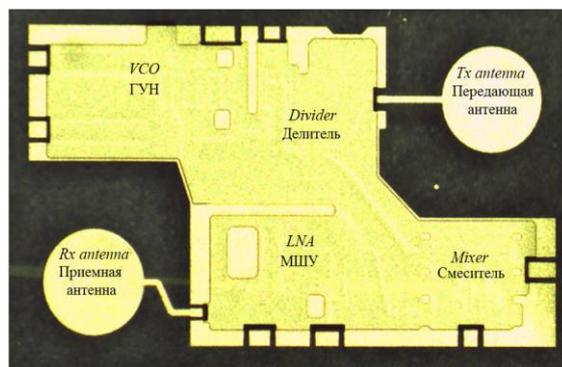


Рис. 5. Топология изготовленных МИС

### III. ИЗМЕРЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИС

В результате измерений нескольких образцов МИС установлено, что выходная мощность в передающем тракте варьируется от 10 до 14 дБм (рис. 6), при этом потребляемая мощность ( $P_{out}$ ) составила 520 мВт при напряжении питания 10 В. Диапазон перестройки частоты ( $F_{gen}$ ) составляет 66,5–69 ГГц при управляющем напряжении ( $U_{ctrl}$ ) от 0 до 10 В (рис. 7).

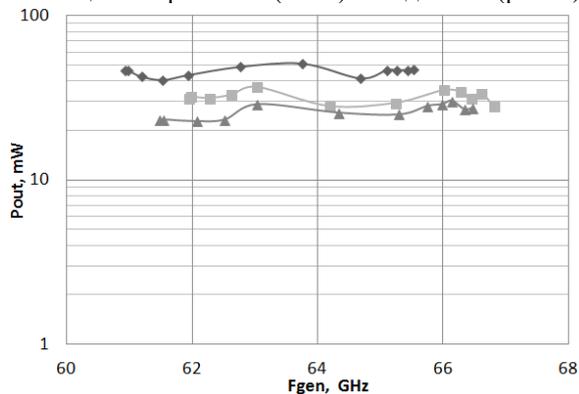


Рис. 6. Зависимость выходной мощности от частоты ГУН

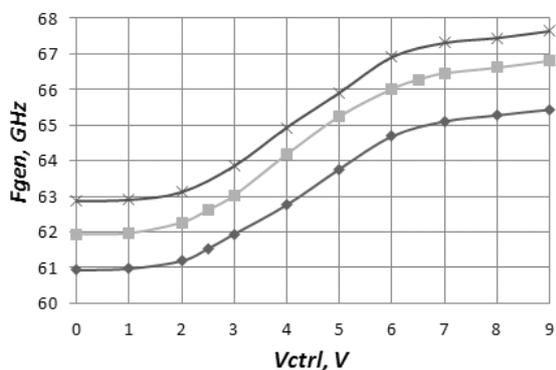


Рис. 7. Зависимость частоты генерации ГУН от управляющего напряжения

Измеренная зависимость частоты генерации от напряжения питания - не хуже 200 МГц/В (при  $U_{упр} = 10$  В). Относительное изменение частоты генерации при изменении температуры от +25 до +55°C в постоянной рабочей точке составляет  $\Delta F/F < 0.3\%$ . Установлено, что можно обеспечить постоянную величину частоты генерации за счет изменения напряжения смещения транзистора. Возможно, что в данном случае именно эффект саморазогрева транзисторов, а не температура окружающей среды, является определяющей причиной изменения частоты генерации ГУН [13]. Потери преобразования смесителя из V-диапазона в сигнал ПЧ 1...4 ГГц составляют -14...-12 дБ при мощности гетеродина 10 дБм.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования разработанной в ИСВЧПЭ РАН компактной МИС приёмопередающего модуля диапазона 60 ГГц в виде системы-на-кристалле с

интеграцией всех элементов приемного и передающего тракта продемонстрировали её работоспособность.

Выходная мощность в передающем тракте составила не менее 10 дБм, диапазон перестройки ГУН - не менее 2 ГГц. Потребляемая мощность МИС составила 520 мВт при напряжении питания 10 В.

В перспективе характеристики МИС могут быть улучшены за счет совершенствования гетероструктур и развития технологии, а стоимость промышленного изготовления существенно снизится при переходе на подложки из полупроводникового кремния.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0087, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60715X0087).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федоров Ю.В., Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Крапухин Д.В., Путинцев Б.Г., Павлов А.Ю., Зуев А.В. МИС усилителей со встроенными антеннами СВЧ-диапазона на наногетероструктурах // Наноиндустрия. 2015. № 3. С. 44-51.
- [2] Мальцев П.П., Матвеев О.С., Фёдоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Крапухин 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.
- [3] Федоров Ю.В., Бугаев А.С., Павлов А.Ю., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Павлов В.Ю., Слаповский Д.Н., Томош К.Н., Енюшкина Е.Н., Галиев Р.Р., Майтама М.В., Зуев А.В., Крапухин Д.В., Гамкрелидзе С.А., Мальцев П.П. Особенности технологии изготовления и разработки СВЧ МИС на основе нитрида галлия для миллиметрового диапазона // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. 2020. № 1 (544). С. 26-45.
- [4] Федоров Ю.В., Бугаев А.С., Гнатюк Д.Л., Павлов А.Ю., Матвеев О.С., Павлов В.Ю., Слаповский Д.Н., Томош К.Н., Енюшкина Е.Н., Галиев Р.Р., Майтама М.В., Зуев А.В., Крапухин Д.В., Гамкрелидзе С.А., Путинцев Б.Г., Мальцев П.П. Макетирование приемо-передающих модулей 5-миллиметрового диапазона длин волн на базе отечественных монокристаллических интегральных схем на нитриде галлия // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21. № 12. С. 702-708.
- [5] Крапухин Д.В. Малошумящие усилители диапазона 60 ГГц. Обзор мировых коммерческих разработок // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 12. С. 759-766.
- [6] Ваньков В.А., Земляничников Н.С., Суханов В.С. Современные технологии и подходы создания миниатюрных приемопередающих модулей // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 6. С. 25-27.
- [7] Мальцев П.П., Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Зуев А.В. Интегральный антенный элемент со встроенным усилителем для диапазона 57-64 ГГц. Свидетельство о государственной регистрации № 2015630131 от 12.12.2015.
- [8] Крапухин Д.В., Мальцев П.П. Монолитная интегральная схема малошумящего усилителя на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 4(13). С. 42-53.

- [9] Jan-Erik Muller, Thomas Grave, Heinz J. Siweris A GaAs HEMT MMIC Chip Set for Automotive Radar Systems Fabricated by Optical Stepper Lithography // IEEE Journal of solid-state circuits. September 1997, vol. 32, no. 9.
- [10] Мальцев П.П., Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Путинцев Б.Г., Зуев А.В. Монолитная интегральная схема ГУН V-диапазона // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 7. С. 645-650.
- [11] Мальцев П.П., Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Крапухин Д.В., Путинцев Б.Г. Интегрированный приемо-передающий модуль для диапазона частот 57-64 ГГц, свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной схемы. № 2016630080 от 12.07.2016.
- [12] Бугаев А.С., Енюшкина Е.Н., Арутюнян С.С., Иванова Н.Е., Глинский И.А., Томош К.Н. Разработка технологии формирования общей земли на активной поверхности монолитной интегральной схемы усилителя мощности на нитридных гетероструктурах // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC - 2015). 2016. Т. 16. № 4. С. 45-48.
- [13] Глинский И.А., Зенченко Н.В. Расчет теплораспределяющего элемента конструкции для мощных СВЧ-транзисторов // Микроэлектроника. 2015. В. 44. № 4. Р. 269.

## GaN Monolithic Integrated Circuits for 60 GHz Transceivers

P.P. Maltsev, D.L. Gnatyuk, O.S. Matveenko, B.G. Putintsev

Institute of ultra-high frequency semiconductor electronics of RAS, Moscow

**Abstract** — This paper presents the results of research and development of the design of a single-chip monolithic microwave integrated circuit (MMIC) manufactured with 0,14 um GaN HEMT technology on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates for 60 GHz Tx/Rx modules. Measurements of the manufactured system-on-chip, which include VCO, mixer and LNA, demonstrate its performance within the tuning range of 66-69 GHz band. The output power in Tx channel was not less than 10 dBm, while the tuning range of the local oscillator (LO) was not less than 2 GHz. Tx/Rx module power consumption is 520 mW at 10 V supply voltage.

**Keywords** — V-band, GaN, HEMT, transceiver, system-on-chip.

### REFERENCES

- [1] Fedorov Ju.V., Mal'cev P.P., Matveenko O.S., Gnatjuk D.L., Krapuhin D.V., Putincev B.G., Pavlov A.Ju., Zuev A.V. MIS usilitelej so vstroennymi antennami SVCh-diapazona na nanogeterostrukturah // Nanoindustrija. 2015. № 3. P. 44-51 (in Russian).
- [2] Mal'cev P.P., Matveenko O.S., Fjodorov Ju.V., Gnatjuk D.L., Krapuhin D.V., Zuev A.V., Bunegina S.L. Monolitnaja integral'naja shema usilitelja so vstroennoj antennoj dlja pjatimillimetrovogo diapazona dlin voln. // Nano- i mikrosistemnaja tehnika. 2014. № 9. P. 12-15 (in Russian).
- [3] Fjodorov Ju.V., Bugaev A.S., Pavlov A.Yu., Gnatjuk D.L. and others Osobennostu tekhnologii izgotovleniya I razrabotki SVCh MIS na osnove nitrida galliya dlya millimetrovogo diapazona // Elektronnaya tekhnika. Seriya 1: SVCh tekhnika. 2020. № 1 (544). P. 26-45 (in Russian)..
- [4] Fjodorov Ju.V., Bugaev A.S., Gnatjuk D.L., Pavlov A.Yu., and others Maketirovanie priemo-peredayushih modulej 5-millimetrovogo diapazona dlin voln na baze otechestvennih monolitnih integralnih shem na nitride galliya // Nano- i mikrosistemnaja tehnika. 2019. Vol. 21. № 12. P. 702-708 (in Russian).
- [5] D.V. Krapuhin, Maloshumjashhie usiliteli diapazona 60 Ggc. Obzor mirovych kommercheskih razrabotok // Nano- i mikrosistemnaja tehnika. 2016. № 12. P. 759-766 (in Russian).
- [6] V.A. Van'kov, N.S. Zemljannikov, V.S. Suhanov. Sovremennye tehnologii i podhody sozdaniya miniatjurnyh priemoperedajushhij modulej // Nano- i mikrosistemnaja tehnika. 2014. № 6. P. 25-27 (in Russian).
- [7] Mal'cev P.P., Fedorov Ju.V., Gnatjuk D.L., Matveenko O.S., Zuev A.V. Integral'nyj antennoj jelement so vstroennym usilitelem dlja diapazona 57-64 GGc, Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2015630131 ot 12.12.2015. (In Russian).
- [8] D.V. Krapuhin, P.P. Mal'cev Monolitnaja integral'naja shema maloshumjashhego usilitelja na nitride gallija dlja diapazona 57-64 GGc // Rossijskij tehnologicheskij zhurnal, 2016. Vol. 4, № 4(13). P. 42-53 (in Russian).
- [9] Jan-Erik Muller, Thomas Grave, Heinz J. Siweris A GaAs HEMT MMIC Chip Set for Automotive Radar Systems Fabricated by Optical Stepper Lithography // IEEE Journal of solid-state circuits. September 1997, vol. 32, no. 9.
- [10] Mal'cev P.P., Fedorov Ju.V., Gnatjuk D.L., Matveenko O.S., Putincev B.G. Monolitnaja integral'naja shema GUN V-diapazona // Nano- i mikrosistemnaja tehnika. 2016, № 7. P. 645-650 (in Russian).
- [11] Mal'cev P.P., Fedorov Ju.V., Gnatjuk D.L., Matveenko O.S., Krapuhin D.V., Putincev B.G. Integrirovannyj priemo-peredajushhij modul' dlja diapazona chastot 57-64 GGc, svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii topologii integral'noj shemy. № 2016630080 ot 12.07.2016. (In Russian).
- [12] Bugaev A.S., Enjushkina E.N., Arutjunjan S.S., Ivanova N.E., Glinskij I.A., Tomosh K.N. Razrabotka tekhnologii formirovanija obshhej zemli na aktivnoj poverhnosti monolitnoj integral'noj shemy usilitelja moshhnosti na nitridnyh geterostrukturah // Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskij konferencii «Fundamental'nye problemy radiojelektroonnogo priborostroenija» (INTERMATIC - 2015). 2016. Vol. 16. № 4. P. 45-48 (in Russian).
- [13] I.A. Glinskii, N.V. Zenchenko. Computer simulation of the heat distribution element for high-power microwave transistors // Russian Microelectronics. 2015. Vol. 44. № 4. P. 269. (In Russian).