

Монолитная интегральная схема малошумящего усилителя X-диапазона на гетероструктуре AlGaIn/AlN/GaN на подложке SiC

С. А. Гамкрелидзе, В. К. Ильков, А. П. Лисицкий, Ю. Н. Савельев

*Разработана конструкция монолитной интегральной схемы (МИС) малошумящего усилителя диапазонов частот 8–12 ГГц. МИС усилителя изготовлена на гетероструктуре AlGaIn/AlN/GaN на подложке SiC. Приведены результаты измерений параметров МИС.**Ключевые слова:* монолитная интегральная схема, малошумящий усилитель, наногетероструктура AlGaIn/AlN/GaN, каскодная схема включения транзисторов.**Ссылка:** Гамкрелидзе С. А., Ильков В. К., Лисицкий А. П., Савельев Ю. Н. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 6. С. 542.**Reference:** S. A. Gamkrelidze, V. K. Ilkov, A. P. Lisitskii, and Yu. N. Saveliev, Usp. Prikl. Fiz. 6 (6), 542 (2018).**Введение**

Создание электронной компонентной базы для обеспечения работоспособности твердотельных электронных систем в экстремальных условиях околоземного пространства или в специальной аппаратуре является чрезвычайно актуальной задачей [1, 2]. При этом большое значение имеет повышение энергетической эффективности монолитных интегральных схем (МИС). Одним из эффективных способов снижения потребляемой мощности МИС является уменьшение количества каскадов усиления (в идеале – до одного) путем повышения коэффициента усиления единичного каскада. В этой связи уникальными возможностями обладает каскодная схема включения транзисторов, которая особенно интересна при использовании нитрид-галлиевой технологии.

Целью данной статьи является представление результатов, полученных в Институте сверхвысо-

кочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) при разработке и исследовании МИС малошумящего усилителя (МШУ) X-диапазона (8–12 ГГц) с каскодным включением транзисторов на гетероструктуре AlGaIn/AlN/GaN с подложкой SiC.

Разработка и изготовление МИС МШУ

В силу небольшого различия параметров кристаллических решеток GaN и SiC гетероструктуры на подложках карбида кремния отличаются лучшим структурным совершенством в сравнении с материалом, выращенном на подложках сапфира. Карбид кремния вследствие высокой теплопроводности подложечного материала (втрое выше чем у подложек кремния), низкого рассогласования решеток, которое составляет 3,5 % против 17 % у кремния или 14 % у сапфира, а также за счет значительно более низкой разницы коэффициентов термического расширения (для SiC она составляет 18 % против 50 % у Si и 35 % у сапфира) является привлекательным материалом для изготовления сверхвысокочастотных (СВЧ) монолитных интегральных схем.

Проектирование усилителя производилось под разработанную в ИСВЧПЭ РАН технологию, заключающуюся в создании заземляющей плоскости над лицевой поверхностью пластины с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ-элементами поверх слоя полимерного диэлектрика с толщиной 10–14 мкм, что позволяет избежать необходимости формирования сквозных отверстий в подложке SiC. Заземление элементов схемы выполняется через отверстия в слое диэлектрика.

Гамкрелидзе Сергей Анатольевич¹, директор ИСВЧПЭ РАН, профессор, д.т.н.

Ильков Владимир Константинович², зав. кафедрой, к.т.н.

Лисицкий Антон Павлович¹, в.н.с., к.т.н.

Савельев Юрий Николаевич³, в.н.с., к.т.н.

¹ ИСВЧПЭ РАН.

Россия, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр. 5.

E-mail: gamkrelidzesa@isvch.ru; liant22@yandex.ru

² РТУ МИРЭА.

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

E-mail: Ilkovmirea@mirea.ru

³ Филиал ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России.

Россия, 129327, Москва, Чукотский проезд, 10.

E-mail: savelievyn@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2018 г.

© Гамкрелидзе С. А., Ильков В. К., Лисицкий А. П., Савельев Ю. Н., 2018

Электрическая схема МИС МШУ показана на рис. 1. В качестве каскодного транзистора применен транзистор с общей периферией затворов 4×100 мкм. Технология изготовления НЕМТ-транзисторов на базе AlGaN/AlN/GaN описана в [3, 4]. Как известно, для работы в классическом режиме (без проявления короткоканальных эффектов) транзисторы должны иметь

аспектное соотношение длины затвора к толщине барьерного слоя в виде $L_g/t_{bar} > 10-15$ [5]. Поскольку использованные нами AlGaN/AlN/GaN-гетероструктуры отечественного производства (ЗАО «Элма-Малахит») на подложке SiC имели толщину барьерного слоя 14,7 нм, то была выбрана длина затворов транзисторов 0,25 мкм, что обеспечило аспектное соотношение на уровне 17.

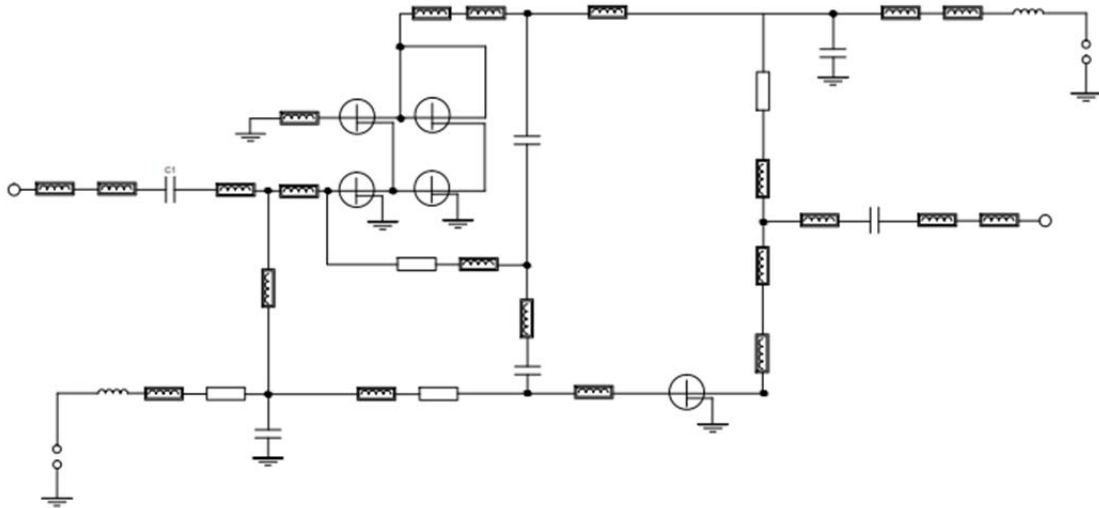


Рис. 1. Электрическая схема МИС МШУ.

При проектировании использовалась линейная шумовая модель транзистора, полученная по результатам измерения малосигнальных S -параметров. При этом тестовые каскодные транзисторы имеют значения параметра предельной частоты усиления по току $F_t = 38$ ГГц без взаимовлияния контактных площадок. Максимально достижимый коэффициент усиления MAG/MSG на частоте 10 ГГц составляет 23 дБ (см. рис. 2) при напряжении питания 10 В и токе потребления не более 50 мА. Коэффициент шума каскодного транзистора на частоте 10 ГГц, измеренный в 50-омном тракте при напряжении питания 10 В, составляет 1,9–2 дБ.

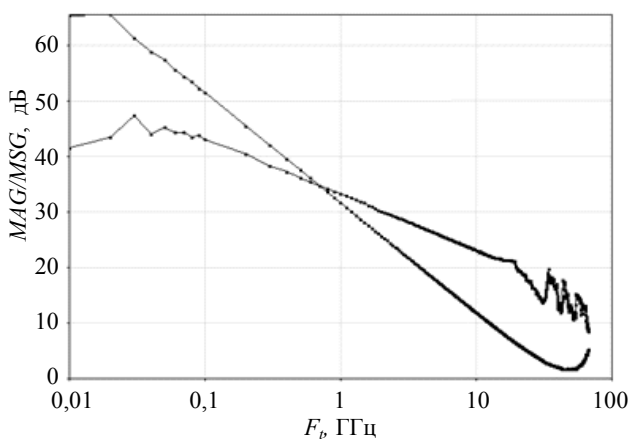


Рис. 2. Зависимости предельных частот усиления по току (средняя кривая) и напряжению каскодного транзистора с периферией 4×100 мкм.

На основе принципиальной схемы разрабатывался топологический проект и выполнялся его электромагнитный расчет методом моментов для верификации полученных результатов. На базе полученного топологического проекта был разработан комплект рабочих фотошаблонов для изготовления МИС.

Изготовление МИС МШУ производилось на технологическом оборудовании ИСВЧПЭ РАН с применением технологии невжигаемых омических контактов к гетероструктуре AlGaIn/GaN. Это позволило получить омические контакты с удельным сопротивлением 0,15–0,2 Ом×мм, что является результатом мирового уровня.

В процессе разработки монолитных интегральных схем на гетероструктурах AlGaIn/GaN/SiC для частот 8–12 ГГц предварительные исследования показали, что создание таких МИС на основе копланарной технологии крайне затруднительно, имея в виду проблемы с обеспечением устойчивости подобных систем и наличием частотно-зависимых фазовых набегов по общим проводникам. Это проявляется уже при повышении усиления и выходной мощности МИС. За рубежом МИС на основе гетероструктур AlGaIn/GaN, как правило, изготавливают по микрополосковой технологии, подразумевающей травление сквозных отверстий сквозь подложку. Однако это связано с серьезными технологическими трудностями.

В результате было найдено конструкторско-технологическое решение данной проблемы, заключающееся в создании «заземляющей плоскости» над лицевой поверхностью пластины с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ-элементами поверх слоя полимерного диэлектрика толщиной 10–15 мкм. При этом заземление соответствующих элементов производится через отверстия в слое фотолака, одновременно выполняющего роль защитной пассивации.

Фотография кристалла МИС МШУ представлена на рис. 3. Размеры кристалла составляют 1,4×1,9 мм.

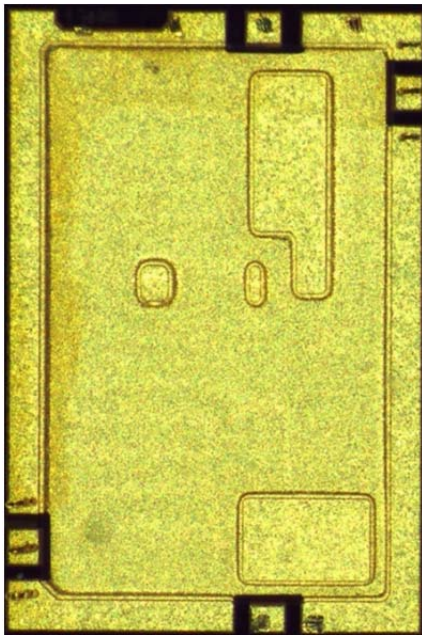


Рис. 3. Фотография кристалла МИС МШУ.

Исследование характеристик МИС МШУ

Измерения СВЧ-характеристик изготовленных образцов проводились зондовым способом на неразрезанной пластине в ИСВЧПЭ РАН при напряжении питания 10 В. Ток потребления составил 80–90 мА. Результаты измерения малосигнальных S -параметров и коэффициента шума показаны на рис. 4. На частоте 10 ГГц коэффициент усиления составляет 20 дБ, а коэффициент шума – 3,5 дБ. Выходная мощность в точке компрессии 1 дБ достигает не менее 10 дБм.

Результаты измерения достаточно хорошо соответствуют расчетам за исключением величины

коэффициента шума, которая ожидалась на уровне 2 дБ. Для выявления причин наблюдаемого несоответствия и дальнейшей оптимизации характеристик МИС МШУ требуются дополнительные исследования.

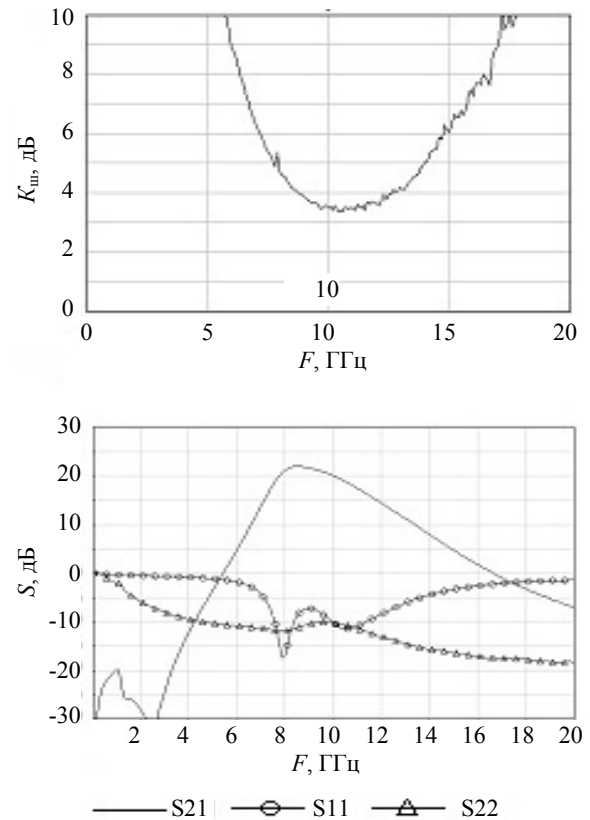


Рис. 4. Измеренные зависимости от частоты коэффициента шума (верхний график) и S -параметров МИС МШУ.

Аналоги разработанного МШУ из числа серийно выпускаемых МИС [6–14] были сведены в таблицу. Отметим, что единственным аналогом на гетероструктурах AlGaIn/GaN является усилитель TriQuint Semiconductor TGA2612. Остальные аналоги изготовлены на GaAs pHEMT-гетероструктурах. Проведя сопоставительный анализ, можно сделать вывод о том, что уровень разработанного МШУ, в целом, соответствует мировому.

Полученные результаты демонстрируют перспективность применения использованных технологий и заложенных схмотехнических решений для создания электронной компонентной базы X-диапазона. По результатам работы получено свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы [6].

Таблица

Сравнения технических характеристик МШУ

| Наименование показателей | Значения показателей МШУ | Значения показателей отечественных и зарубежных объектов аналогичного назначения | | | | | |
|---|--------------------------|--|--------------------|---------------------------|--|--|---------------------------------------|
| | | TGA2612 | NC10160C-112 | MP531 | CHA3666-99F | AMT2142032 | МШУ (Св-во на топологию RU2015630062) |
| Разработчик | ИСВЧПЭ РАН (Россия) | TriQuint Semiconductor (США) | НИИ СЕТС13 (Китай) | АО «НПФ «Микран» (Россия) | United Monolithic Semiconductors (Франция) | Astra Microwave Products Limited (Индия) | ООО «ТУСУР-Электроника» (Россия) |
| Год разработки | 2016 | 2014 | 2014 | н/д | 2015 | 2007 | 2015 |
| Диапазон частот, ГГц | 8–12 | 6–12 | 1–12 | 8–12 | 6–17 | 9,5–12 | 3–20 |
| Материал | GaN/SiC | GaN/SiC | GaAs | GaAs | GaAs | GaAs | GaAs |
| Коэффициент шума, дБ | 3,5–4 | 1,5–2,0 | 1,5–2,0 | 1,5–2,2 | 1,3–2,0 | 0,7–0,8 | 2,6 |
| Коэффициент усиления, дБ | 15–21 | 22–29 | 14,5–16 | 24–26 | 21 | 9–12 | 10,7 |
| Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) по входу | <2,5 | <2,6 | <2,0 | <1,6 | <2,5 | <2,3 | 2 |
| КСВН по выходу | <2 | <2 | <1,6 | <2 | <2 | <2 | 2 |
| Ток потребления, мА | 90 | 100 | 35 | 60 | 80 | 25 | 45 |
| Размер, мм ² | 1,9×1,3 | 2,1×1,5 | 2,6×1,4 | 2,5×1,5 | 1,5×1,5 | 2,9×1,7 | 1,3×0,7 |

Заключение

Впервые в России изготовлены и исследованы образцы каскодных маломощных усилителей X-диапазона на гетероструктуре AlGaIn/AlN/GaN/SiC. В частности, разработана конструкция монолитной интегральной схемы маломощного усилителя для диапазона частот 8–12 ГГц и измерены её параметры. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения использованных технологий и заложенных схемотехнических решений для создания электронной компонентной базы X-диапазона.

По результатам работы получено свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0011).

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров Ю. В., Михайлович С. В. // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 4. С. 217.
2. Галиев Р. Р., Гнатюк Д. Л., Зуев А. В., Крапухин Д. В. и др. // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 2. С. 21.
3. Павлов В. Ю., Павлов А. Ю. // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 10. С. 635.
4. Томаш К. Н., Павлов А. Ю., Павлов В. Ю., Хабибуллин Р. А. и др. // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. Вып. 10. С. 1434.
5. Федоров Ю. В., Михайлович С. В. // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 10. С. 12.
6. Федоров Ю. В., Майтама М. В. «Интегральный маломощный усилитель для диапазона частот 8–12 ГГц». Топология ИМС № 2016630103, 19.08.2016 г.
7. Triquint TGA2612 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qorvo.com/products/p/TGA2612>
8. NC10160C-112 [Электронный ресурс]. URL: <http://reis-zelenograd.ru/productions/element-base/low-noise-amplifier-chips/nc10160c-112/>
9. MP531 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.micran.ru/productions/MIS/amplifiers/MP531>
10. CHA3666-99F [Электронный ресурс]. URL: <http://module-csums.cognix-systems.com/telechargement/10-3-1.pdf>
11. AMT2142032 [Электронный ресурс]. URL: http://astramtl.com/admin/uploads/low_noise_amplifiers/datashheet/1359737280_2142032.pdf
12. Федоров Ю. В., Бузаев А. С., Павлов А. Ю., Гнатюк Д. Л. и др. // Нано- и микросистемная техника. 2017. № 5. С. 273.
13. Матвеев О. С. // Нано- и микросистемная техника. 2017. № 9. С. 568.
14. Путинцев Б. Г. // Нано- и микросистемная техника. 2017. № 12. С. 729.

Monolithic integrated circuit of the X-band low noise amplifier based on the AlGaN/AlN/GaN HEMT-transistor with the SiC substrate

S. A. Gamkrelidze¹, V. K. Ilkov², A. P. Lisitskii¹, and Yu. N. Saveliev³

¹ V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS)
7/5 Nagorniy proezd, Moscow, 117105, Russia
E-mail: liant22@yandex.ru

² MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia
E-mail: Ilkovmirea@mirea.ru

³ Branch of 46 Central Research Institute of the Russian Defense Ministry
10 Chukotskii proezd, Moscow, 129327, Russia
E-mail: savelyevyn@yandex.ru

Received September 25, 2018

Design of a 8–12 GHz low noise amplifier monolithic microwave integrated circuit (MMIC) manufactured with AlGaN/AlN/GaN heterostructure HEMT technology on SiC-substrate is presented. The measurements of manufactured amplifier showed 20 dB gain at 8–10 GHz and minimal noise figure 3.5 dB in 10 GHz.

Keywords: X-band, GaN, HEMT, monolithic integrated circuit, low noise amplifier.

REFERENCES

1. Yu. V. Fedorov and S. V. Mikhailovich, *Nano i Mikrosistemnaya Tekhnika* **18** (4), 217 (2016).
2. R. R. Galiev, D. L. Gnatyuk, A. V. Zuev, et al., *Nano i Mikrosistemnaya Tekhnika*, No. 4, 21 (2015).
3. V. Yu. Pavlov and A. Yu. Pavlov, *Nano i Mikrosistemnaya Tekhnika*. **18** (10), 635 (2016).
4. K. N. Tomosh, A. Yu. Pavlov, V. Yu. Pavlov, et al., *Semiconductors* **50** (10), 1434 (2016).
5. Yu. V. Fedorov and S. V. Mikhailovich, *Nano i Mikrosistemnaya Tekhnika*, No. 4, 12 (2014).
6. Yu. V. Fedorov and M. V. Maitama, *Integral Noiseless Amplifier for the 8–12 GHz Range*. (Topologia IMS No. 2016630103), 19.08.2016 [in Russian].
7. *Triquint TGA2612*. URL: <https://www.qorvo.com/products/p/TGA2612>
8. *NC10160C-112*. URL: <http://reis-zelenograd.ru/productions/element-base/low-noise-amplifier-chips/nc10160c-112/>
9. *MP531*. URL: <http://www.micran.ru/productions/MIS/amplifiers/MP531>
10. *CHA3666-99F*. URL: [http:// http://module-csums.cognix-systems.com/telechargement/10-3-1.pdf](http://http://module-csums.cognix-systems.com/telechargement/10-3-1.pdf)
11. *AMT2142032*. URL: http://astramtl.com/admin/uploads/low_noise_amplifiers/datasheet/1359737280_2142032.pdf.
12. Yu. V. Fedorov, A. S. Bugaev, A. Yu. Pavlov, et al., *Nano i Mikrosistemnaya Tekhnika*, No. 5, 273 (2017).
13. O. S. Matveenko, *Nano i Mikrosistemnaya Tekhnika*, No. 9, 568 (2017).
14. B. G. Putintsev, *Nano i Mikrosistemnaya Tekhnika*, No. 12, 729 (2017).