

Система-на-кристалле со встроенными антеннами V-диапазона на гетероструктурах нитрида галлия*А. П. Лисицкий, В. К. Ильков, Ю. Н. Савельев*

Описаны результаты разработки и исследований монолитных интегральных схем (МИС) приемопередающих модулей (ППМ), изготовленных по НЕМТ-технологии на основе гетероструктур нитрида галлия на сапфировых подложках, предназначенных для работы в V-диапазоне. ППМ реализован как компактная монолитная схема системы-на-кристалле с технологией верхней металлизации со встроенными (интегрированными) антеннами. Измерения изготовленных образцов системы-на-кристалле продемонстрировали устойчивую работу при одновременных приеме и передаче в диапазоне 66,5–69 ГГц. Выходная мощность в передающем тракте составила не менее 10 дБм, диапазон перестройки гетеродина не менее 2 ГГц.

Ключевые слова: V-диапазон, нитрид галлия, НЕМТ, приемопередающий модуль, система-на-кристалле, интегрированная антенна.

Введение

Развитие нанотехнологий стимулировало создание систем на основе наноструктур и нанотрубок со встроенными антеннами [1, 2]. Интенсивно развиваются технологии проектирования и производства монолитных интегральных схем (МИС) на основе гетероструктур нитрида галлия для приемопередающих систем [3–12].

В статье представлены результаты исследований и разработки приемопередающих модулей (ППМ) в виде систем-на-кристалле V-диапазона (40–75 ГГц, стандарт, введенный Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), США). Ширина полосы модуляции в несколько ГГц и отсутствие интерференции между различными ис-

точниками сигналов в данном диапазоне делают его привлекательным для высокоскоростной сверхширокополосной передачи данных, в системах спутниковой связи и датчиках расстояния. В данном диапазоне размеры излучателей столь малы, что возможно интегрировать их непосредственно на кристалл МИС, что устраняет необходимость изготовления СВЧ-части в виде микросборки [13, 14].

Разработка и изготовление МИС

Структурная схема разработанной системы-на-кристалле приведена на рис. 1.

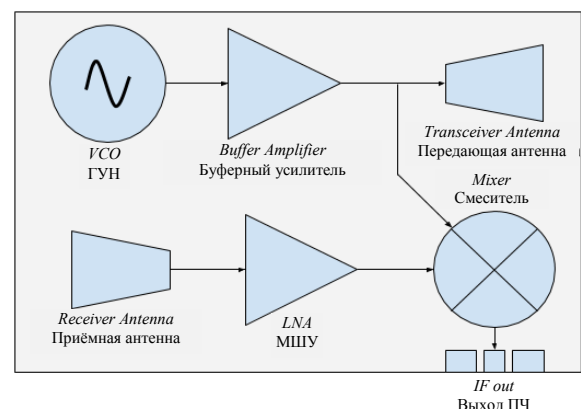


Рис. 1. Блок-схема системы-на-кристалле ППМ V-диапазона.

Генератор, управляемый напряжением (ГУН), вместе с буферным усилителем выполняет роль источника сигнала V-диапазона, поступающего на передающую антенну, а также роль гетеродина.

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

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

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

¹ Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова Российской академии наук (ФГАНУ ИСВЧПЭ РАН).

Россия, 117105, Москва, Нагорный пр-д, 7, стр. 5.

E-mail: liant22@yandex.ru

² МИРЭА – Российский технологический университет

(РТУ МИРЭА).

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

E-mail: Ilkovmirea@miro.ru

³ Филиал ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России.

Россия, 129327, Москва, Чукотский пр-д, 10.

E-mail: savelyevyn@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 3 мая 2018 г.

В смесителе сигнал гетеродина и принятый сигнал с приемной антенны, усиленный малошумящим усилителем (МШУ), преобразуются в сигнал промежуточной частоты. Данная структура обеспечивает излучение и прием частотно-модулированного сигнала и предназначена прежде всего для локационного датчика расстояния. При введении в передающий тракт модулятора, а в приемный тракт – демодулятора реализуются фактически отдельные приемный и передающий каналы связи, интегрированные в МИС.

Разработанные МИС являются развитием разработки микросхем серии 5411 [15] и были реализованы на гетероструктурах AlGaIn/GaN на под-

ложках сапфира толщиной 350 мкм, причем в них использованы НЕМТ-транзисторы (англ.: high electron mobility transistors (HEMT), т. е. гетероструктурные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов) с шириной затвора 2×40 , 2×50 , 2×60 , 2×100 мкм с длиной затвора 140 нм. На начальном этапе было проведено схемотехническое моделирование элементов данной системы на кристалле, в котором использовались нелинейные модели транзисторов, построенные на основе измерений их S -параметров и вольт-амперных характеристик.

Принципиальная схема разработанного двухкаскадного МШУ показана на рис. 2, а.

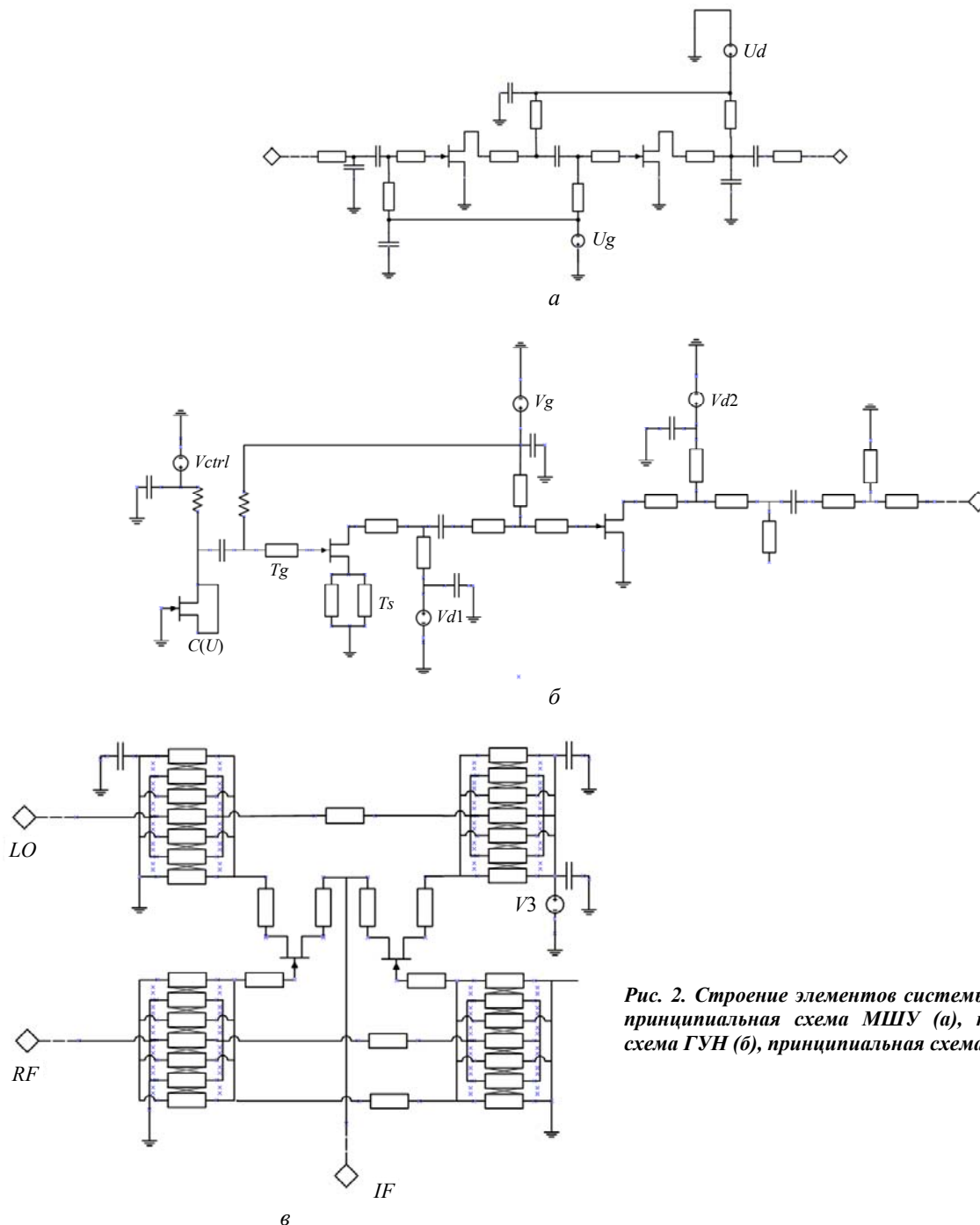


Рис. 2. Строение элементов системы-на-кристалле: принципиальная схема МШУ (а), принципиальная схема ГУН (б), принципиальная схема смесителя (в).

Входная и выходная согласующие цепи МШУ образованы конденсаторами и микрополосковыми линиями. Согласование входа оптимизировалось для достижения минимального уровня шума. Получен коэффициент усиления МШУ более 10 дБ, коэффициент шума 6,0–6,5 дБ [16–18].

В качестве интегрированного в ППМ источника сигнала был реализован ГУН V -диапазона (рис. 2, б). Микрополосковые линии T_s и T_g , подключенные к истоку и затвору транзистора, вместе с варактором образуют резонансный контур. Частота генерации определяется в основном длиной линий T_s и T_g и емкостями транзистора [19]. В качестве варактора используется транзистор в диодном включении, при этом управляющее напряжение меняет его емкость затвор-сток $C(U)$. На выход ГУН подключен однокаскадный буферный усилитель [20].

Смеситель построен на основе двух трансформаторов на основе связанных микрополосковых линий (мостов Маршанда) (принципиальная схема представлена на рис. 2, в). На вход смесителя с ГУН подается сигнал гетеродина (LO), на вход RF – принятый сигнал в диапазоне от 60 до 67 ГГц. На выходе мостов формируются сигналы, смещенные относительно друг друга по фазе на 180° . Выходные сигналы мостов попарно перемножаются в транзисторах, суммируются и пода-

ются на выход промежуточной частоты (IF). Для достижения необходимой рабочей ширины полосы смесителя мосты Маршанда реализованы в виде семи отрезков связанных микрополосковых линий. Оптимизация параметров схемы проводилась с целью минимизации потерь преобразования в смесителе. Расчетные потери при преобразовании сигнала из диапазона 60–67 ГГц в диапазон 0–5 ГГц не превышают 12 дБ.

Для учета взаимного влияния распределенных СВЧ-элементов и оптимизации их геометрических параметров было проведено трехмерное электромагнитное моделирование полученного топологического проекта с помощью САПР Keysight Advanced Design System (ADS).

Микрополосковая антенна в простейшей форме состоит из излучателя (монополя) с одной стороны диэлектрической подложки и земляного проводника с другой стороны (такая антенна называется монополем) [4, 21, 22]. Под излучателем подразумевается проводящая площадка, в общем случае имеющая произвольную форму. Проведено моделирование характеристик монополей квадратной, круглой формы и круглой формы с прорезями (см. рис. 3). Результаты моделирования приведены в табл. 1. Рабочая полоса антенны вида рис. 3, в позволяет повысить полосу модуляции системы до 10 ГГц.

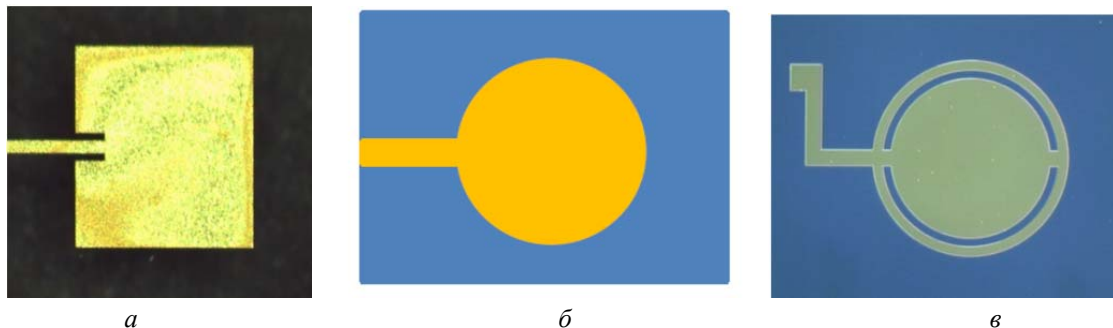


Рис. 3. Вид исследуемых монополей: квадратный (а), круглый (б), круглый с прорезями (в).

Таблица 1

Характеристики антенн-монополей

Топология антенны	Полоса частот по уровню $S_{11} < -10$ дБ, ГГц	Относительная ширина полосы, %
Рис. 3, а	58–61	5,04
Рис. 3, б	64–69	7,52
Рис. 3, в	57–67	16,12

Было использовано оригинальное технологическое решение формирования заземлений микрополосков, заключающееся в создании заземляющей плоскости над слоем полимерного диэлектрика (фотолака), нанесенного на уже изготовленные СВЧ-элементы. При этом межслойные

заземляющие переходы были выполнены через отверстия в слое фотолака, одновременно выполняющего роль защитной пассивации [23]. Эта технология решает следующие проблемы:

- заменяет сложное изготовление заземляющих отверстий сквозь сапфировую подложку;
- электрически изолирует (экранирует) элементы МИС от излучения передающей антенны.

Вид изготовленного кристалла МИС ППМ системы-на-кристалле после нанесения слоев фотолака и верхней металлизации представлен на рис. 4. Размеры кристалла МИС ППМ со встроенными антеннами составляют $4,0 \times 2,4$ мм.

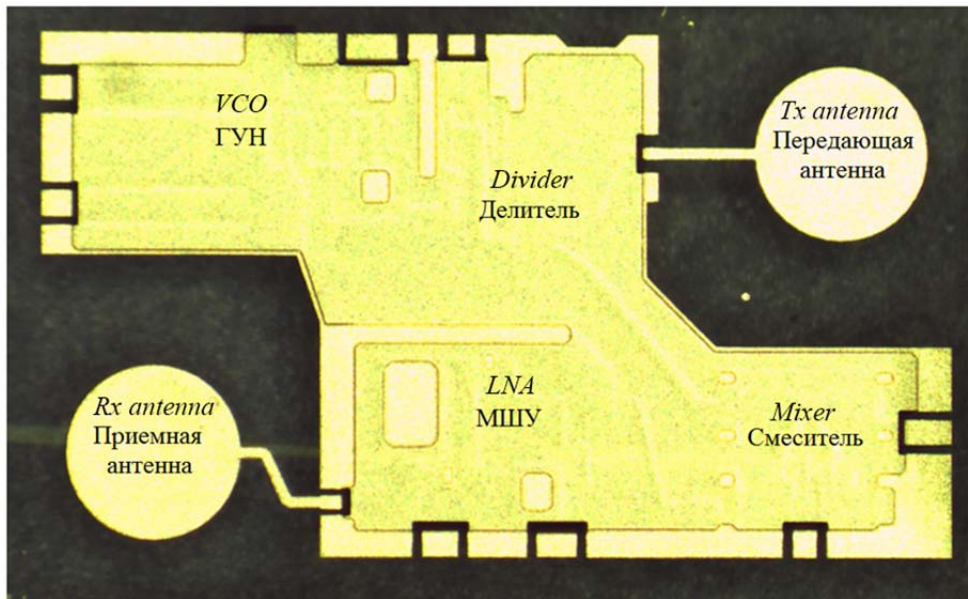


Рис. 4. Вид изготовленного однокристального приемопередающего модуля со встроенными антеннами.

Характеристики МИС ППМ

В результате измерений СВЧ-характеристик образцов МИС ППМ установлено, что выходная мощность в передающем тракте составляет 10–14 дБм, при этом потребляемая мощность (P_{out}) составляет 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. На частоту генерации кроме напряжения смещения на транзисторе в диодном включении влияет также его температура, что необходимо учитывать 3D-анализом теплораспределения [24].

Измеренная зависимость изменения частоты ГУН от напряжения питания – около 200 МГц/В

(при $U_{упр} = 10$ В). Потери преобразования смесителя из V-диапазона в сигнал промежуточной частоты 1–4 ГГц составляют 14...12 дБ при мощности гетеродина 10 дБм (опорный уровень мощности 1 мВт).

Сравнение характеристик разработанной МИС ППМ с аналогами приведена в табл. 2 [25–31].

Как видно из табл. 2, в большинстве ППМ используется КМОП-технология, которая уступает в уровне излучаемой мощности GaN-HEMT-технологии. Дополнительный усилитель мощности, выполненный по GaN-HEMT-технологии в составе системы-на-кристалле, обеспечивает возможность существенно большего уровня выходного сигнала при освоенных в России технологических нормах 140 нм.

Таблица 2

Сравнение характеристик МИС приемопередающих модулей

Наименование характеристик	Значения характеристик МИС						
	ИСВЧПЭ РАН (Россия) [данная работа]	University of Toronto (Канада) [25]	CEA-Leti (Франция) [26]	University of Toronto (Канада) [27]	University of Melbourne (Австралия) [28]	Toshiba (Япония) [29]	Analog Devices (США) [30]
Диапазон частот, ГГц	66–69	55–65	61	62–64	56–64	57–64	57–64
Топологические нормы	140 нм	65 нм	65 нм	180 нм	130 нм	–	–
Материал и технология	GaN HEMT	Si КМОП	Si КМОП	SiGe БиКМОП	SiGe БиКМОП	SiGe БиКМОП	SiGe БиКМОП
Излучаемая мощность, мВт	10–14	–	–	–	4	6	–
Потребляемая мощность, мВт	520	374	98	640	515	600	600
Размер, мм	4,0×2,4	3,2×2,1	3,1×1,9	2,5×2,5	5×5	2,2×1,3	–

Заключение

Предложенная технология нитридных НЕМТ-транзисторов на сапфировой подложке позволяет создавать систему-на-кристалле в виде СВЧ монолитной интегральной схемы в диапазоне частот до 69 ГГц, содержащей основные СВЧ-элементы приемопередающего тракта: генератор, управляемый напряжением, буферный усилитель, смеситель, малошумящий усилитель, интегрированные антенны. Размеры микросхемы со встроенными антеннами составляют 4,0×2,4 мм. Данная разработка является развитием СВЧ микросхем серии 5411, разработанных в ИСВЧПЭ РАН.

Изложены результаты оптимизации, направленные на расширение рабочей полосы частот микрополосковой антенны, состоящей из излучателя (монополя) с одной стороны диэлектрической подложки и земляного проводника с другой стороны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцев П. П., Бочаров Л. Ю. // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 3. С. 2.
2. Леонтьев В. Л., Булярский С. В., Павлов А. А. // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 10. С. 595.
3. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Галиев Г. Б., Бугаев А. С., Сеничкин А. П. // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 11. С. 14.
4. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лищицкий А. П., Фёдоров Ю. В. // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 45.
5. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лищицкий А. П., Фёдоров Ю. В. // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 10. С. 39.
6. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лищицкий А. П., Фёдоров Ю. В. // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 9. С. 34.
7. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лищицкий А. П., Фёдоров Ю. В., Бунегина С. Л., Крапухин Д. В. // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 4. С. 45.
8. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лищицкий А. П., Фёдоров Ю. В., Крапухин Д. В., Бунегина С. Л. // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 10. С. 45.
9. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Лищицкий А. П., Фёдоров Ю. В., Крапухин Д. В., Бунегина С. Л. // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 11. С. 46.
10. Мальцев П. П., Гнатюк Д. Л., Фёдоров Ю. В., Зуев А. В., Галиев Р. Р., Побойкина Н. В. // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 6. С. 29.
11. Мальцев П. П. // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 4. С. 40.
12. Фёдоров Ю. В., Мальцев П. П., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л., Крапухин Д. В., Путинцев Б. Г., Павлов А. Ю., Зуев А. В. // Наноиндустрия. 2015. № 3. С. 44.
13. Мальцев П. П., Матвеев О. С., Фёдоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Крапухин Д. В., Зуев А. В., Бунегина С. Л. // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 9. С. 12.
14. Ваньков В. А., Земляникоff Н. С., Суханов В. С. // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 6. С. 25.
15. Справочный лист комплекта монолитных интегральных схем на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц. Сайт ИСВЧПЭ РАН <http://isvch.ru/wordpress/wp-content/uploads/2016/03/list.pdf>
16. Мальцев П. П., Фёдоров 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.
17. Крапухин Д. В. // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 12. С. 759.
18. Крапухин Д. В., Мальцев П. П. // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 4. С. 42.
19. Muller Jan-Erik, Grave Thomas, Siweris Heinz J. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1997. Vol. 32. No. 9. P. 1342.
20. Мальцев П. П., Фёдоров Ю. В., Крапухин Д. В., Матвеев О. С., Путинцев Б. Г. // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 10. С. 645.
21. Матвеев О. С. // Нано- и микросистемная техника. 2017. № 9. С. 568.
22. Volakis J. L. Antenna engineering handbook – McGraw-Hill Education, 2007. P. 1872.
23. Бугаев А. С., Енюшкина Е. Н., Арутюнян С. С., Иванова Н. Е., Глинский И. А., Томои К. Н. / Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC – 2015), 2016. С. 45–48.
24. Glinskii I. A., Zenchenko N. V. // Russian Microelectronics. 2015. Vol. 44. No. 4. P. 236.
25. Tomkins A., Aroca R. A., Yamamoto T., Nicolson S. T., Doi Y., Voinigescu S. P. / Custom Integrated Circuits Conference. CICC 2008. 2008.
26. Siligian A., Chaix F., Pelissier M., et al. / IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. 2013. P. 297.
27. Yao T., Tchoketch-Kebir L., Yuryevich O., et al. / Microwave Symposium Digest., 2006. IEEE MTT-S International. 2006. P. 1493–1496.
28. Chien M. Ta., Byron Wicks, Bo Yang, Yuan Mo, et al. / Mobile and Wireless Communications: Network layer and circuit level design. 2010. P. 281–303.
29. Toshiya Mitomo, Yukako Tsutsumi, Hiroaki Hoshino, et al. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2012. Vol. 47. No. 12. P. 3160.
30. Analog Devices, HMC6001LP711E, 60 GHz Rx with integrated antenna, Product Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/integrated-transceivers-transmitters-receivers/microwave-mmwave-tx-rx/hmc6001.html>, свободный (дата обращения: 24.11.2016).
31. Путинцев Б. Г. // Нано- и микросистемная техника. 2017. № 12. С. 729.

PACS: 84.40.Lj, 84.40.Ua

GaN-based V-band system on crystal with integrated antennas

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

¹ V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS)

Bd. 5, 7 Nagorniy proezd, Moscow, 117105, Russia

E-mail: liant22@yandex.ru

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

³Branch of FGBI “46 CSRI” of Russian Defense Ministry
10 Chukchi travel, Moscow, 129327, Russia
E-mail: savel'yevyn@yandex.ru

Received May 3, 2018

The design of a V-band Tx/Rx module single-chip monolithic microwave integrated circuit (MMIC) manufactured with GaN heterostructure HEMT technology with integrated antennas is presented in this paper. The measurements of manufactured system-on-chip showed at least 10 dBm output power in Tx channel and 2 GHz of local oscillator (LO) tuning range in 66–69 GHz band.

Keywords: V-band, GaN, HEMT, Tx/Rx module, system-on-chip, integrated antenna.

REFERENCES

1. P. P. Maltsev and L. Yu. Bocharov, Nano- and Microsystem Technology, No. 3, 2 (2012).
2. V. L. Leontiev, S. V. Bulyarsky, and A. A. Pavlov, Nano- and Microsystem Technology, No. 10, 595 (2016).
3. P. P. Maltsev, Yu. V. Fedorov, G. B. Galiev, A. S. Bugaev, and A. P. Senichkin, Nano- and Microsystem Technology, No. 11, 14 (2010).
4. P. P. Maltsev, O. S. Matveenکو, D. L. Gnatyuk, A. P. Lisitskiy, and Yu. V. Fedorov, Nano- and Microsystem Technology, No. 11, 45 (2011).
5. P. P. Maltsev, O. S. Matveenکو, D. L. Gnatyuk, A. P. Lisitskiy, and Yu. V. Fedorov, Nano- and Microsystem Technology, No. 9, 34 (2011).
6. P. P. Maltsev, O. S. Matveenکو, D. L. Gnatyuk, A. P. Lisitskiy, and Yu. V. Fedorov, Nano- and Microsystem Technology, No. 10, 39 (2011).
7. P. P. Maltsev, O. S. Matveenکو, D. L. Gnatyuk, and A. P. Lisitskiy, Nano- and Microsystem Technology, No. 4, 45 (2012).
8. P. P. Maltsev, O. S. Matveenکو, D. L. Gnatyuk, A. P. Lisitskiy, Yu. V. Fedorov, D. V. Krapukhin, and S. L. Bunegina, Nano- and Microsystem Technology, No. 10, 45 (2012).
9. P. P. Maltsev, O. S. Matveenکو, D. L. Gnatyuk, A. P. Lisitskiy, Yu. V. Fedorov, D. V. Krapukhin, and S. L. Bunegina, Nano- and Microsystem Technology, No. 11, 46 (2012).
10. P. P. Maltsev, D. L. Gnatyuk, Yu. V. Fedorov, A. V. Zuev, R. R. Galiev, and N. V. Poboykina, Nano- and Microsystem Technology, No. 6, 29 (2013).
11. P. P. Maltsev, Nano- and Microsystem Technology, No. 4, 40 (2013).
12. Yu. Fedorov, P. Maltsev, O. Matveenکو, D. Gnatyuk, D. Krapukhin, B. Putintsev, A. Pavlov, and A. Zuev, Nanoindustry, No. 3, 44 (2015).
13. P. P. Maltsev, O. S. Matveenکو, Yu. V. Fedorov, D. L. Gnatyuk, D. V. Krapukhin, A. V. Zuev, and S. L. Bunegina, Nano- and Microsystem Technology, No. 9, 12 (2014).
14. V. A. Vankov, N. S. Zemlyannikov, and A. V. Sukhanov, Nano- and Microsystem Technology, No. 6, 25 (2014).
15. Set of GaN monolithic integrated circuits for 57-64 GHz. Datasheet. Site IUHFSE RAS <http://isvch.ru/wordpress/wp-content/uploads/2016/03/list.pdf>
16. P. P. Maltsev, Yu. V. Fedorov, D. L. Gnatyuk, O. S. Matveenکو, and A. V. Zuev, Integral antenna element with built-in amplifier for the 57-64 GHz band. Certificate of state registration of topology. № 2015630131 12.12.2015 [in Russian].
17. D. V. Krapuchin, Nano- and Microsystem Technology, No. 12, 759 (2016).
18. D. V. Krapukhin and P. P. Maltsev, Russian technological journal. 4 (4), 42 (2016).
19. Jan-Erik Muller, Thomas Grave, and Heinz J. Siweris, IEEE Journal of solid-state circuits. 32 (9), 1342 (September, 1997).
20. P. P. Maltsev, Yu. V. Fedorov, D. L. Gnatyuk, O. S. Matveenکو, B. G. Putintsev, and A. V. Zuev, Nano- and Microsystem Technology, No. 10, 645 (2016).
21. O. S. Matveenکو, Nano- and Microsystem Technology, No. 9, 568 (2017).
22. J. L. Volakis, *Antenna engineering handbook* – McGraw-Hill Education. 2007.
23. A. S. Bugaev, E. N. Enjushkina, S. S. Arutjunjan, N. E. Ivanova, I. A. Glinskii, and K. N. Tomosh, *Development of technology for the formation of a common ground on the active surface of a monolithic power amplifier integrated circuit on nitride heterostructures* (INTERMATIC – 2016, 2016). P. 45–48.
24. I. A. Glinskii and N. V. Zenchenko, Russian Microelectronics 44 (4), 236 (2015).
25. A. Tomkins, R. A. Aroca, T. Yamamoto, S. T. Nicolson, Y. Doi, and S. P. Voinigescu, *A Zero-IF 60GHz Transceiver in 65nm CMOS with > 3.5Gb/s Links*, in *Proc. Custom Integrated Circuits Conference*. (CICC 2008. 2008).
26. A. Siligans, F. Chaix, M. Pelissier, et al., *A low power 60-GHz 2.2-Gbps UWB transceiver with integrated antennas for short range communications*, in *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*. 2013). P. 297–300.
27. T. Yao, L. Tchoketch-Kebir, O. Yuryevich, et al. *65GHz Doppler Sensor with On-Chip Antenna in 0.18μm SiGe BiCMOS*, in *Microwave Symposium Digest, 2006*. (IEEE MTT-S International. – 2006). P. 1493–1496.
28. M. Ta. Chien, Wicks Byron, Yang Bo, Mo Yuan, et al., *Wireless Communications at 60 Ghz: A single-chip Solution on CMOS technology*, in *Mobile and Wireless Communications: Network layer and circuit level design*. 2010). P. 281–303.
29. Toshiya Mitomo, Yukako Tsutsumi, Hiroaki Hoshino, et al., IEEE Journal of solid-state circuits 47 (12), 3160 (2012).
30. *Analog Devices, HMC6001LP711E, 60 GHz Rx with integrated antenna*, – <http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/integrated-transceivers-transmitters-receivers/microwave-mmwave-tx-rx/hmc6001.html>.
31. B. G. Putintsev, Nano- and Microsystem Technology, No. 12, 729 (2017).