

УДК 621.3.049.774

© Д. В. Крапухин, Д. Л. Гнатюк, А. В. Зуев, П. П. Мальцев, О. С. Матвеевко,
Ю. В. Федоров

ОДНОКРИСТАЛЬНЫЙ ПРИЕМНЫЙ МОДУЛЬ СО ВСТРОЕННОЙ АНТЕННОЙ НА ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 66–67 ГГц ДЛЯ СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ 5G

Работа посвящена разработке и исследованиям однокристального приемного модуля со встроенной антенной, построенного по НЕМТ-технологии на основе наногетероструктур GaN на подложках сапфира. Модуль предназначен для работы в диапазоне 66–67 ГГц и может быть использован для систем сотовой связи 5G. Измерения изготовленных образцов показали его работоспособность в диапазоне 66–67 ГГц и достижение выходной мощности в передающем тракте более 10 дБм, а диапазона перестройки гетеродина — более 2 ГГц.

Кл. сл.: нитрид галлия, НЕМТ, приемный модуль, приемопередающий модуль, система-на-кристалле, генератор, МШУ, антенна

ВВЕДЕНИЕ

Для создания сетей сотовой связи 5G существует несколько частотных поддиапазонов, в том числе 66–71 ГГц. Одной из задач при освоении этого диапазона является разработка монолитных интегральных схем (МИС) для приемных и передающих устройств и освоение их производства в России. К одному из перспективных направлений создания нового поколения МИС относится технология нитрида галлия на подложках сапфира, обеспечивающая минимальные массогабаритные размеры при максимальной мощности выходных усилителей (УМ) и генераторов, управляемых напряжением (ГУН) для гетеродинных радиоприемников. Нитрид галлия — широкозонный полупроводник, позволяющий создавать усилительные каскады с более высокой выходной мощностью по сравнению с арсенидом галлия, поэтому он наиболее востребован в усилителях мощности, также обладает более высокими пробивными напряжениями, большей стойкостью к внешним воздействиям — температуре, ионизирующему излучению.

В данной работе рассматривается возможность проектирования и изготовления однокристальных приемных устройств на частоты 66–67 ГГц с промежуточной частотой от 0.1 до 2.0 ГГц на основе ГУН и смесителя с встроенной интегральной антенной. Однокристальный модуль построен в результате исследования ГУН и смесителя для диапазона частот 57–63 ГГц. Также в ИСВЧПЭ РАН

ведутся работы по освоению технологии проектирования и производства МИС на основе гетероструктур нитрида галлия для других приемопередающих систем [1–2].

Ширина доступной полосы и отсутствие интерференции между различными источниками сигнала в данном диапазоне делают его привлекательным для применения в высокоскоростной сверхширокополосной передаче данных, в системах межспутниковой и ближней связи. В миллиметровом диапазоне длина волны около 5 мм и соответственно размеры излучателя становятся столь малыми, что целесообразно интегрировать его непосредственно на кристалл. Интеграция антенн на один кристалл с активными элементами позволяет обеспечить низкий уровень потерь между элементами системы, низкий уровень шумов и большую передаваемую мощность, снижает производственные и материальные издержки по сравнению с реализацией в виде микросборки [3].

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МИС

Структурная схема разработанного приемопередающего модуля (ППМ) изображена на рис. 1. Данная "система-на-кристалле" состоит из ГУНа со встроенным буферным усилителем, который выполняет роль источника сигнала диапазона 66–67 ГГц при формировании сигнала на передающую антенну, а также роль гетеродина.

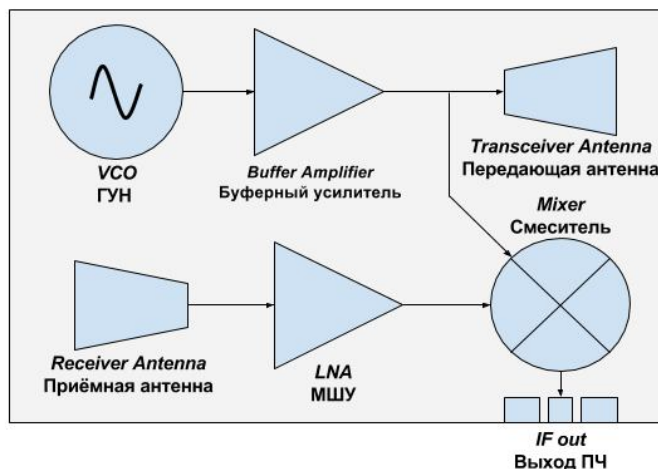


Рис.1. Блок-схема МИС ППМ диапазона 66–67 ГГц

В смесителе происходит преобразование сигнала гетеродина и усиленного на малошумящем усилителе (МШУ) сигнала с приемной антенны в сигнал промежуточной частоты.

Однокристалльный модуль проектировался по микрополосковой технологии. Если в схемах на арсениде галлия использование микрополосков не является проблемой, т. к. пластины легко утоняются и хорошо химически травятся, то в схемах на нитриде галлия на подложке сапфира создание заземляющей плоскости связано с серьезными технологическими трудностями. Было предложено конструкторско-технологическое решение этой

проблемы, заключающееся в размещении земляной плоскости не на обратной стороне пластины, а на лицевой поверх активной части МИС через слой фотолака (разработка ИВС РАН). Такое решение изображено на рис. 2, также показаны сквозные отверстия, через которые будет осуществляться заземление истоков транзисторов и конденсаторов, что обеспечивает общий электрический контакт одного общего электрода [4–5]. Использование заземляющей плоскости поверх слоя фотолака позволило создать МИС по микрополосковой технологии и обеспечить стабильность в рабочем диапазоне частот.

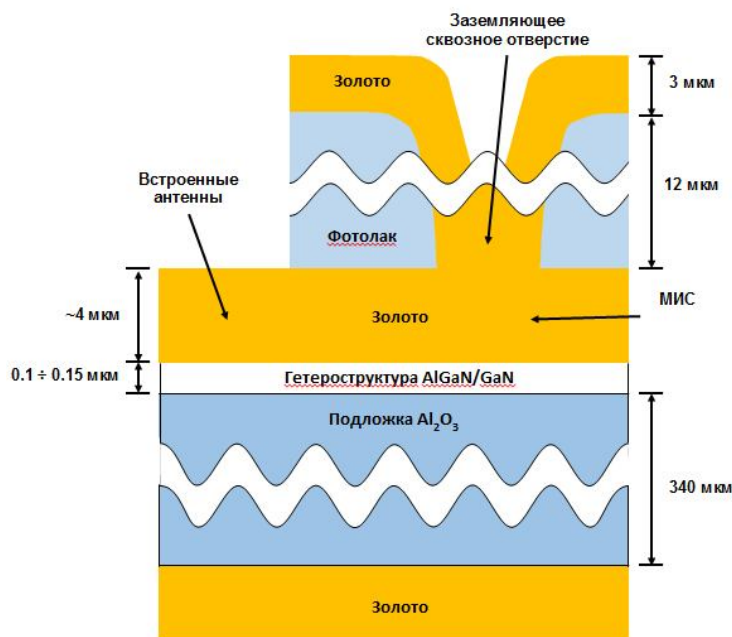


Рис. 2. Поперечное сечение пластины с фотолаком

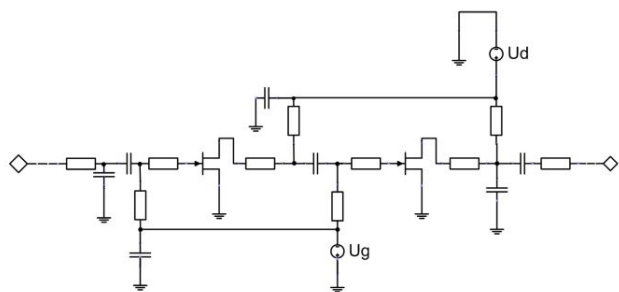


Рис. 3. Принципиальная схема МШУ

МИС были изготовлены на гетероструктурах AlGaIn/GaN на подложках сапфира толщиной 350 мкм. На данных структурах были изготовлены транзисторы 2×50 мкм и 2×100 мкм с длиной затвора 140 нм. Измерения транзисторов показали, что значения предельной частоты усиления по току (F_T) составили около 70 ГГц, а предельной частоты генерации (F_{max}) — около 150 ГГц без процедуры исключения паразитного влияния контактных площадок (деэмбеддинга).

На начальном этапе были созданы модели транзисторов, построенные на основе измерений S-параметров, вольт-амперных характеристик и измерений коэффициента шума. После этого по построенным моделям транзисторов проектировались составные элементы приемопередающего модуля — ГУН, МШУ, смеситель. Также проводилось моделирование встроенной антенны. Принципиальная схема разработанного однокаскадного МШУ показана на рис. 3.

Усилитель состоит из двух каскадов, транзисторы включены по схеме с общим истоком. Согласующие цепи выполнены в виде отрезков микрополосковых линий, конденсаторов на землю маленького номинала и разделительных конденсаторов большого номинала. По микрополосковым линиям также подавались напряжения смещения на затвор и питания на сток. Согласование схемы выполнялось на достижение минимального уровня шума. Расчетный коэффициент передачи МШУ составил 10 дБ, коэффициент шума около 6.0–6.5 дБ [6–9].

В качестве интегрированного источника сигнала был спроектирован ГУН (схема приведена на рис. 4).

Микрополосковые линии T_s и T_g , 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 T_s и T_g и емко-

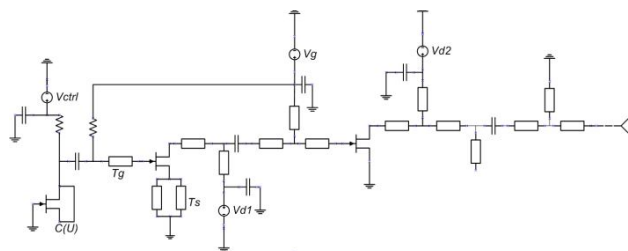


Рис. 4. Принципиальная схема ГУН

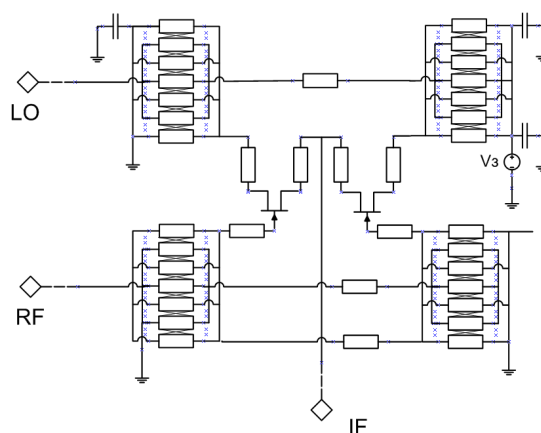


Рис. 5. Принципиальная схема смесителя

стями транзистора [10]. Управление частотой генерации осуществляется варактором, в качестве которого используется транзистор в диодном включении: управляющее напряжение меняет емкость затвор—сток. На выходе ГУН расположен 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 по результатам измерений тестовых транзисторов [11].

Смеситель построен на основе балунов Маршанда — трансформаторов с использованием связанных микрополосковых линий (принципиальная схема представлена на рис. 5).

На один вход смесителя поступает сигнал с ГУН, а на другой вход — сигнал, принятый с приемной антенны. На выходе балунов формируются сигналы, смещенные относительно друг друга по фазе на 180° . Выходные сигналы мостов попарно перемножаются в транзисторах, суммируются,

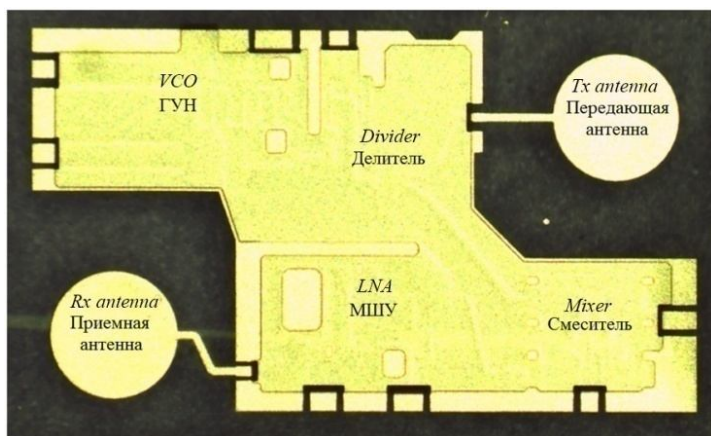


Рис. 6. Фотография изготовленного МИС

и в результате на выходе смесителя образуется сигнал промежуточной частоты (IF). 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 диапазоне 0–5 ГГц не превышают 12 дБ. На данную МИС получено свидетельство о регистрации топологии интегральной схемы [12].

На этапе создания принципиальной схемы все МИС рассчитывались на сосредоточенных элементах, а затем для учета взаимного влияния распределенных элементов друг на друга проводилось электродинамическое моделирование топологического проекта в САПР Advanced Design System (ADS).

Разработанные МИС были изготовлены на технологическом оборудовании ИСВЧПЭ РАН. Фотографии кристаллов МИС ППМ после нанесения слоев фотолака и верхней металлизации представлены на рис. 6. Размеры "системы-на-кристалле" составляют 4.0×2.4 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МИС

На рис. 7 показаны результаты измерений типового образца ГУН. График зависимости частоты генерации от управляющего напряжения показал, что диапазон перестройки частоты составляет 66–68.8 ГГц при управляющем напряжении от 0 до 10 В. График зависимости выходной мощности от частоты показал, что выходная мощность составляет около 10–13 дБм.

Потери преобразования смесителя в сигнал промежуточной частоты 1...4 ГГц составляют –14...–12 дБ при мощности гетеродина 10 дБм.

Измерения усилителя показали (рис. 8), что его характеристики сместились в более низкочастотный диапазон. На частоте 56 ГГц коэффициент

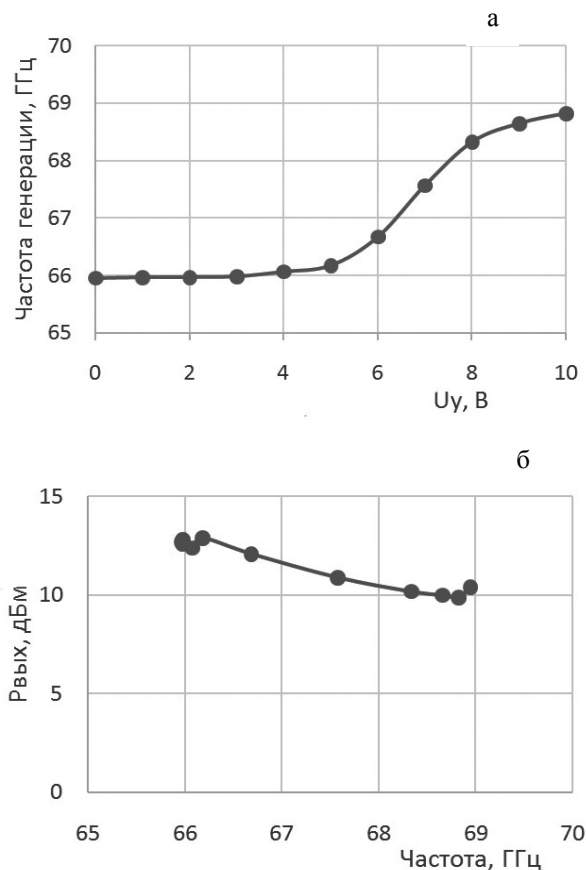


Рис. 7. Параметры МИС ГУН.

а — зависимость частоты генерации ГУН от управляющего напряжения, б — зависимость выходной мощности от частоты ГУН

передачи достигает 6.5 дБ при хорошем согласовании входа и выхода. В диапазоне 66–67 ГГц коэффициент передачи — около 4 дБ.

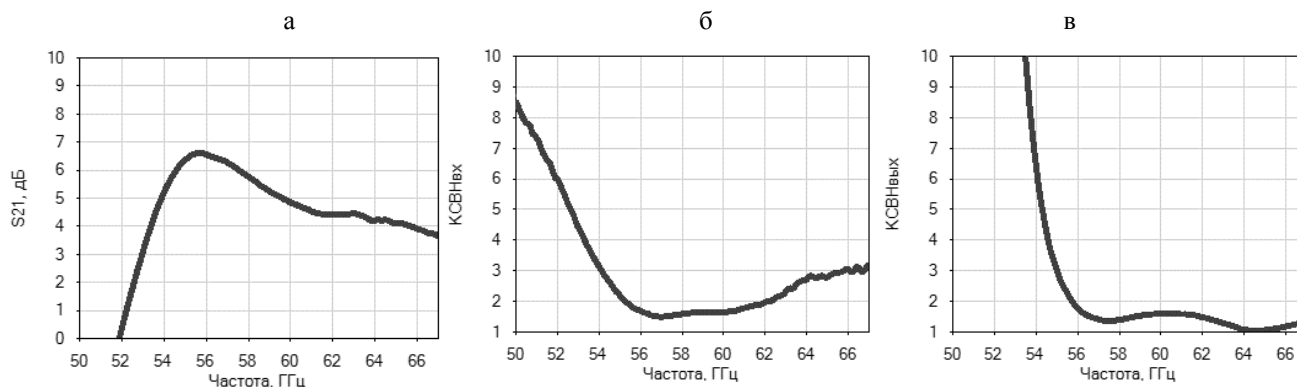


Рис. 8. Измеренные характеристики МШУ.

а — коэффициента передачи; б — КСВН входа; в — КСВН выхода

Проведена оценка полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем: было проведено сравнение разработанной МИС ППМ с устройствами, в которых приемник и передатчик объединены в один конструктивный блок и в котором по меньшей мере одна часть используется для передачи и приема сигнала, при этом все аналоги построены либо по кремниевой технологии, либо по SiGe [13–18]. Изготовленная МИС является единственной разработанной на широкозонном полупроводнике — нитриде галлия, а по габаритам и характеристикам разработанная схема находится на уровне мировых аналогов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительные исследования разработанной МИС приемопередающего модуля диапазона 66–67 ГГц с интеграцией всех элементов приемного и передающего трактов в одной "системе-на-кристалле" продемонстрировали ее работоспособность. Выходная мощность в передающем тракте составила более 10 дБм, диапазон перестройки ГУН — более 2 ГГц. По совокупности характеристик разработанная МИС ППМ соответствует мировому уровню. Впервые в мире приемопередающая "система-на-кристалле" изготовлена на гетероструктурах нитрида галлия.

В перспективе характеристики МИС могут быть улучшены за счет совершенствования технологии и улучшения качества гетероструктур, а стоимость промышленного изготовления может быть существенно снижена при переходе на подложки из кремния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев П.П. Перспективы создания систем-на-кристалле для СВЧ и КВЧ диапазонов частот на арсениде галлия // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 4. С. 40–48.
2. 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.
3. Мальцев П.П., Матвеев О.С., Федоров 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.
4. 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 // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2016. Т. 16, № 4. С. 45–48.
5. Томош К.Н., Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Хабибуллин Р.А., Арутюнян С.С., Мальцев П.П. Исследование процессов изготовления НЕМТ Al-GaN/AlN/GaN с пассивацией Si₃N₄ in situ // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 10. С. 1434–1438.
6. 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. М., 12.12.2015.

7. Крапухин Д.В. Малошумящие усилители диапазона 60 ГГц. Обзор мировых коммерческих разработок // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 12. С. 759–766.
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. С. 42–53.
9. Крапухин Д.В. Монолитная интегральная схема малошумящего усилителя на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц. Автореф. дис. ... к-та техн. наук, М., 2001. 27 с.
10. Muller J.-E., Grave T., Siweris H.J. A GaAs HEMT MMIC chip set for automotive radar systems fabricated by optical stepper lithography // IEEE Journal of solid-state circuits. 1997. Vol. 32, no. 9. P. 1342–1349. Doi: 10.1109/4.628737.
11. Мальцев П.П., Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Матвеевко О.С., Путинцев Б.Г., Зуев А.В. Монолитная интегральная схема ГУН V-диапазона // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 10. С. 645–650.
12. Мальцев П.П., Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Матвеевко О.С., Крапухин Д.В., Путинцев Б.Г. Интегрированный приемно-передающий модуль для диапазона частот 57–64 ГГц. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной схемы № 2016630080. М., 12.07.2016.
13. Tomkins A., Aroca R.A., Yamamoto T., Nicolson S.T., Doi Y., Voinigescu S.P. A Zero-IF 60GHz Transceiver in 65nm CMOS with > 3.5Gb/s Links // Proceedings of 2008 Custom Integrated Circuits Conference. USA. 2008. P. 505–509.
14. Siligaris A., Chaix F., Pelissier M. et al. A low power 60-GHz 2.2-Gbps UWB transceiver with integrated antennas for short range communications // Proceedings of 2013 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. USA. 2013. P. 297–300.
15. Yao T., Tchoketch-Kebir L., Yuryevich O. et al. 65GHz Doppler Sensor with On-Chip Antenna in 0.18μm SiGe BiCMOS // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2006. P. 1493–1496. Doi: 10.1109/MWSYM.2006.249575.
16. Chien M., Wicks B., Yang B., Mo Y. et al. Wireless Communications at 60 GHz: A single-chip Solution on CMOS technology // Mobile and Wireless Communications: Network layer and circuit level design. 2010. P. 281–303. Doi: 10.5772/7701.
17. Mitomo T., Tsutsumi Y., Hoshino H. et al. A 2-Gb/s Throughput CMOS Transceiver Chipset With In-Package Antenna for 60-GHz Short-Range Wireless Communication // IEEE Journal of solid-state circuits. 2012. Vol. 47, no. 12. P. 3160–3171. Doi: 10.1109/JSSC.2013.2253424.
18. Analog Devices, HMC6001LP711E, 60 GHz Rx with integrated antenna. Product Datasheet. URL: <http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/integrated-transceivers-transmitters-receivers/microwave-mmwave-tx-rx/hmc6001.html> (дата обращения: 30.04.2018).

Контакты: Крапухин Дмитрий Владимирович,
d.krapukhin@gmail.com

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники (ИСВЧПЭ) РАН, Москва (Крапухин Д.В., Гнатюк Д.Л., Зуев А.В., Мальцев П.П., Матвеевко О.С., Федоров Ю.В.)

ООО "Новэлком", Москва (Крапухин Д.В.)

Материал поступил в редакцию 28.06.2018

SINGLE-CHIP RECEIVING MODULE WITH BUILT-IN ANTENNA FOR THE FREQUENCY RANGE 66-67 GHz FOR 5G COMMUNICATION SYSTEMS

**D. V. Krapukhin^{1,2}, D. L. Gnatyuk¹, A. V. Zuev¹, P. P. Maltsev¹,
O. S. Matveenko¹, Yu. V. Fedorov¹**

¹*Institute of Ultra-High Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*LLC "Novelcom", Moscow, Russia*

The work dedicated to design and research of a single-chip receiving module with an integrated antenna. Module is based on GaN HEMT technology on sapphire substrates. It is designed to work in the 66-67 GHz band and can be used for 5G communication systems. The measurements showed its operability in the range of 66-67 GHz, achievement output power more than 10 dBm and the tuning range of the VCO is more than 2 GHz.

Keywords: GaN, HEMT, transceiver, receiver, system-on-chip, oscillator, low-noise amplifier, antenna

REFERENCES

1. Maltsev P.P. [The prospects of creation of a system-a-crystal for the microwave oven and KVCh of ranges of frequencies on gallium arsenide]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystems technology], 2013, no. 4, pp. 40–48. (In Russ.).
2. Fedorov Yu.V., Maltsev P.P., Matveenko O.S., Gnatyuk D.L., Krapukhin D.V., Putintsev B.G., Pavlov A.Yu., Zuev A.V. [MMIC amplifiers with built-in antennas based on nano-heterostructures]. *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2015, no. 3, pp. 44–51. (In Russ.).
3. Maltsev P.P., Matveenko O.S., Fedorov Yu.V., Gnatyuk D.L., Krapukhin D.V., Zuev A.V., Bunegina S.L. [Monolithic integrated circuit of the amplifier with the built-in antenna for the five-millimeter range of lengths of waves]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystems technology], 2014, no. 9, pp. 12–15. (In Russ.).
4. Bugaev A.S., Enyushkina E.N., Arutyunyan S.S., Ivanova N.E., Glinskij I.A., Tomosh K.N. [Development of technology of formation of the general earth on the active surface of the monolithic integrated circuit of the amplifier of power on nitride heterostructures]. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya* [Fundamental problems of radioengineering and device construction], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 45–48. (In Russ.).
5. Tomosh K.N., Pavlov A.Yu., Pavlov V.Yu., Habibulin R.A., Arutyunyan S.S., Maltsev P.P. [Research of processes of production HEMT Al-GaN/AlN/GaN with passivation Si₃N₄ in situ]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and equipment of semiconductors], 2016, vol. 50, no. 10, pp. 1434–1438. (In Russ.).
6. Maltsev P.P., Fedorov Yu.V., Gnatyuk D.L., Matveenko O.S., Zuev A.V. *Integral'nyj antennoj ehlement so vstroennym usilitelem dlya diapazona 57–64 GHz* [Integrated antenna element with the built-in amplifier for the range of 57–64 GHz]. Certificate on the state registration no. 2015630131. Moscow, 12.12.2015. (In Russ.).
7. Krapukhin D.V. [Low-noise amplifiers of the range of 60 GHz. Review of world commercial developments]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystems technology], 2016, no. 12, pp. 759–766. (In Russ.).
8. Krapukhin D.V., Maltsev P.P. [Monolithic integrated circuit of the low-noise amplifier on gallium nitride for the range of 57–64 GHz]. *Rossijskij tekhnologicheskij zhurnal* [Russian technological journal], 2016, vol. 4, no. 4, pp. 42–53. (In Russ.).
9. Krapukhin D.V. *Monolitnaya integral'naya skhema maloshumyashchego usilitelya na nitride galliya dlya diapazona 57–64 GHz*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Monolithic integrated circuit of the low-noise amplifier on gallium nitride for the range of 57-64 GHz. Autoref. cand. techn. sci. diss.] Moscow, 2001. 27 p. (In Russ.).
10. Muller J.-E., Grave T., Siweris H.J. A GaAs HEMT MMIC chip set for automotive radar systems fabricated by optical stepper lithography. *IEEE Journal of solid-state circuits*, 1997, vol. 32, no. 9, pp. 1342–1349. Doi: 10.1109/4.628737.
11. Maltsev P.P., Fedorov Yu.V., Gnatyuk D.L., Matveenko O.S., Putintsev B.G., Zuev A.V. [V-range GUN monolithic integrated circuit]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystems technology], 2016, no. 10, pp. 645–650. (In Russ.).
12. Maltsev P.P., Fedorov Yu.V., Gnatyuk D.L., Matveenko O.S., Krapukhin D.V., Putintsev B.G. *Integrirovannyj priemo-peredayushchij modul' dlya diapazona chastot 57–*

- 64 GHz [The integrated send-receive module for the range of the frequencies of 57-64 GHz]. Certificate on the state registration of topology of the integrated circuit no. 2016630080. Moscow, 12.07.2016. (In Russ.).
13. Tomkins A., Aroca R.A., Yamamoto T., Nicolson S.T., Doi Y., Voinigescu S.P. A Zero-IF 60GHz Transceiver in 65 nm CMOS with > 3.5Gb/s Links. *Proceedings of 2008 Custom Integrated Circuits Conference*. USA, 2008, pp. 505–509.
 14. Siligaris A., Chaix F., Pelissier M. et al. A low power 60-GHz 2.2-Gbps UWB transceiver with integrated antennas for short range communications. *Proceedings of 2013 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*. USA, 2013, pp. 297–300.
 15. Yao T., Tchoketch-Kebir L., Yuryevich O. et al. 65GHz Doppler Sensor with On-Chip Antenna in 0.18 μ m SiGe BiCMOS. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2006, pp. 1493–1496. Doi: 10.1109/MWSYM.2006.249575.
 16. Chien M., Wicks B., Yang B., Mo Y. et al. Wireless Communications at 60 GHz: A single-chip Solution on CMOS technology. *Mobile and Wireless Communications: Network layer and circuit level design*, 2010, pp. 281–303. Doi: 10.5772/7701.
 17. Mitomo T., Tsutsumi Y., Hoshino H. et al. A 2-Gb/s Throughput CMOS Transceiver Chipset With In-Package Antenna for 60-GHz Short-Range Wireless Communication. *IEEE Journal of solid-state circuits*, 2012, vol. 47, no. 12, pp. 3160–3171. Doi: 10.1109/JSSC.2013.2253424.
 18. Analog Devices, HMC6001LP711E, 60 GHz Rx with integrated antenna. Product Datasheet. URL: <http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/integrated-transceivers-transmitters-receivers/microwave-mmwave-tx-rx/hmc6001.html>.

Contacts: *Krapuchin Dmitriy Vladimirovitch*,
d.krapukhin@gmail.com

Article received in edition 28.06.2018