# Моделирование и проектирование МИС малошумящего усилителя со встроенной антенной для диапазона 57-64 ГГц на нитриде галлия

Д.В. Крапухин<sup>12</sup>, П.П. Мальцев<sup>12</sup>, О.С. Матвеенко<sup>2</sup>, Д.Л. Гнатюк<sup>2</sup>, Ю.В. Федоров<sup>2</sup>, А.В. Зуев<sup>2</sup> <sup>1</sup>Московский технологический университет (МИРЭА), d.krapukhin@gmail.com <sup>2</sup>ИСВЧПЭ РАН

Аннотация — Работа посвящена разработке малошумящего усилителя с интегрированной антенной на одном кристалле. Выполнено электродинамическое моделирование малошумящего усилителя и антенны в САПР ADS. Описано решение проблемы создания заземляющей плоскости над лицевой поверхностью пластины. Проведены измерения образцов, показавшие хорошее соответствие с результатами проектирования.

# *Ключевые слова* — МИС, МШУ, НЕМТ, антенна, нитрид галлия, гетероструктуры, система на кристалле.

# I. Введение

Частотный диапазон 57-64 ГГц 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. В этом диапазоне возможно создавать приемопередающие устройства широкополосной помехоустойчивой связи, обеспечивающие высокоскоростную и скрытую передачу данных между электронными абонентами, а также перейти к построению мобильных сетей широкополосной связи 5G.

# II. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧА РАБОТЫ

Разработанный малошумящий усилитель (МШУ) предназначен для применения в составе приемопередающих модулей с жесткими ограничениями по



Рис. 1. Внешний вид малошумящего усилителя со встроенной антенной массогабаритным характеристикам, потребляемой требованиями мошности И повышенными по стойкости к внешним факторам, работающих в частотном диапазоне 57 – 64 ГГц. МШУ должен обладать коэффициентом передачи не менее 16 дБ, коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН) не более 2, коэффициентом шума не более 6.5 дБ, ток потребления не должен превышать 100 мА. Форма диаграммы направленности антенны кардиоидная.

# III. Моделирование и проектирование МИС МШУ и встроенной антенны

Внешний вид разработанного антенного элемента со встроенным малошумящим усилителем изображен на рис. 1, размеры топологии: 3,3 х 1,2 мм<sup>2</sup>. Взаимное согласование усилителя и антенного элемента проводилось на нагрузку 50 Ом, антенна соединяется со входом МШУ. Расчеты антенного элемента и малошумящего усилителя проводились отдельно, для проектирования использовались САПР Advanced Design System и Microwave Office.

Антенна реализована в виде монополя сложной формы, изображена на рис. 1 слева, диаметр антенны 0.7 мм. На рис. 2 показана зависимость потерь отражения (S11) от частоты, по расчетам, полоса пропускания антенны составила 56-69 ГГц по уровню потерь отражения -10 дБ. На рис. 3 изображена



Рис. 2. Расчетная зависимость S11 от частоты



Рис. 3. Диаграмма направленности

расчетная диаграмма направленности, её форма близка к кардиоидной (при этом максимум излучения перпендикулярен поверхности антенны).

На основании результатов исследования различных гетероструктур AlGaN/AlN/GaN, для создания моделей транзисторов были выбраны транзисторы с усилительными параметрами, достаточными для создания усилителя диапазона частот 57-64 ГГц. Для этого были измерены ВАХ и СВЧ параметры транзисторов в разных точках ВАХ, затем рассчитаны параметры нелинейной модели транзистора в среде Microwave Office по наилучшему совпадению измеренных и расчетных S-параметров в диапазоне частот 0,01-67 ГГц [1].

За основу для создания нелинейных моделей была выбрана модель полевого транзистора Fujii,

имеющаяся в составе программного пакета AWR Microwave Office [2]. Для расчета коэффициента шума малошумящего усилителя использовалась линейная шумовая модель Поспешальского [3]. Вольтамперная характеристика полученной нелинейной модели достаточно хорошо описывает измеренные значения токов в рабочих точках и измеренные значения Sпараметров.

Все топологические проекты рассчитывались с использованием модели НЕМТ транзисторов, на гетероструктурах AlGaN/GaN/canфир с неутоненной подложкой толщиной 340 мкм и обратной металлизацией.

За основу схемы МШУ взята схема четырехкаскадного усилителя с общим истоком без обратной связи [4]. Транзисторы, на основе которых сконструирован усилитель, имеют величину коэффициента MaxGain около 6 дБ в диапазоне частот от 57 до 64 ГГц, таким образом для достижения необходимых параметров (коэффициента передачи более 16 дБ) требуется 3-4 каскада. На начальном этапе было проведено моделирование усилителя в Microwave Office на САПР сосредоточенных элементах. Практика показывает, что сосредоточенные модели не полностью отражают поведение элементов в СВЧ-диапазоне, поэтому точность такого моделирования недостаточна для моделирования монолитных схем. Существенно большей точностью обладает электродинамическое моделирование.



Рис. 4. Результаты электродинамического расчета четырехкаскадного усилителя для диапазона 60 ГГц



Рис. 5. Результаты измерений МИС МШУ со встроенной антенной

Ha рис. 4 представлены результаты электродинамического расчета полного топологического проекта четырехкаскадного [5]. усилителя Как видно ИЗ приведенных зависимостей, построенных для напряжения питания 5 В, коэффициент передачи составляет 15 - 20 дБ, а КСВН по входу и выходу менее 2 в диапазоне 57 -64 ГГц, коэффициент шума составляет примерно 6.4 дБ. Расчетный ток потребления усилителя: 70-100 мА (напряжение питания 5÷10 В).

Одной из проблем при разработке и изготовлении МИС на основе гетероструктур AlGaN/GaN является сложность заземления при микрополосковой технологии, предполагающей наличие "заземляющей плоскости", на которую должны быть выведены истоки транзисторов и "земли" элементов МИС через металлизированные отверстия [6]. Традиционно, по аналогии с арсенидной технологией, данная задача решалась за рубежом путем "сверления" сквозных отверстий с обратной стороны утоненной подложки, однако это связано с серьезными технологическими трудностями.

Для решения данной проблемы было использовано конструкторско-технологическое решение, заключающееся в создании "заземляющей плоскости"

лицевой поверхностью пластины над с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ элементами поверх слоя полимерного диэлектрика толщиной 10-15 мкм (фотолак). При этом заземление соответствующих элементов производится через отверстия в слое фотолака, одновременно выполняющего роль защитной пассивации.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МИС

Проведены зондовые измерения образцов малошумящих усилителей. Результаты 8 образцов приведены на рис. 5. Как видно из результатов измерений, все усилители соответствуют требованиям на частоте 57 ГГц. Коэффициент передачи имеет диапазон около 54-65 ГГц, что превышает требуемую полосу. КСВН по входу и выходу сдвинулся в более низкочастотный диапазон, однако в диапазоне 57-58 ГГц его значение составило менее 2. Измерения шума показали, что требуемое значение (менее 6.5 дБ) достигается всеми образцами на частоте 57 ГГц, а полоса около 56-58 ГГц.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе разработанного малошумящего усилителя со встроенной антенной возможно создание полностью интегрированного приемопередающего модуля для диапазона 57-64 ГГц для систем ближней связи. Измерения показали хорошее соответствие расчетных результатов и результатов измерений.

МИС изготовлены в ИСВЧПЭ РАН на гетероструктурах нитрида галлия с технологическими нормами 110 нм.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Галиев Р.Р., Гнатюк Д.Л., Зуев А.В., Крапухин Д.В., Майтама М.В., Матвеенко О.С., Михайлович С.В., Фёдоров Ю.В., Щербакова М.Ю. Нитридные технологии для освоения миллиметрового диапазона длин волн // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 2. С. 21-32.
- [2] Fujii K., Hara Y., Ghannouchi F.M., Yakabe T., and Yabe H. A Nonlinear GaAs FET Model Suitable for Active and Passive MM-Wave Applications // IEICE Trans. 2000. V. E83-A. № 2. P. 228.

- [3] Pospieszalski M.W. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. 1989. V. 37. 1340.
- [4] Мальцев П.П., Матвеенко 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 // Известия высших учебных заведений. ЭЛЕКТРОНИКА. 2014. № 4 (108). С. 73-76.
- [5] Мальцев П.П., Матвеенко О.С., Фёдоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Крапухин Д.В., Зуев А.В., Бунегина С.Л. Особенности проектирования интегрального антенного элемента со встроенным усилителем 5-мм диапазона длин волн // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 9. С. 12-15.
- [6] Федоров Ю.В., Мальцев П.П., Матвеенко О.С., Гнатюк Д.Л., Крапухин Д.В., Путинцев Б. Г., Павлов А.Ю., Зуев А.В. МИС усилителей со встроенными антеннами СВЧдиапазона на наногетероструктурах // Наноиндустрия. 2015. № 3. С. 44-51.

# Modeling and design of MIC LNA with built-in antenna for 57-64 GHz bandwidth on GaN

D.V. Krapukhin<sup>12</sup>, P.P. Maltsev<sup>12</sup>, O.S. Matveenko<sup>2</sup>, D.L. Gnatyuk<sup>2</sup>, Yu.V. Fedorov<sup>2</sup>, A.V. Zuev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Technological University (MIREA), d.krapukhin@gmail.com

<sup>2</sup>IUHFSE RAS

*Keywords* — MIC, LNA, HEMT, antenna, GaN, heterostructures, SoC.

### I. INTRODUCTION

The frequency range of 57-64 GHz is characterized by high degree of absorptivity in the atmosphere, thus allowing developing isolated communication channels. A small wavelength makes it possible to integrate antennas and entire antenna arrays on a single chip. At this frequency range, it is possible to develop combined transceiver broadband communication devices, providing high-bit-rate hidden transmission between different electronic devices. It also allows constructing 5G broadband communication mobile networks.

# II. OBJECTIVE

The developed low-noise amplifier (LNA) is designed to be used as part of a combined module with strict limitations to weight and size, power consumption and high requirements on resistance to external factors, working at frequency range of 57-64 GHz. The LNA should have transfer ratio of no less than 16 dB, voltage standing-wave ratio (VSWR) of no more than 2, a noise factor of no more than 6.5 dB, current consumption should not exceed 100 mA. The radiation pattern of the antenna should be cardioid.

# III. MODELING AND DESIGN OF MIC LNA AND BUILT-IN ANTENNA

We illustrate the developed MIC LNA with the built-in antenna. The size of the topology is  $3,3x1,2 \text{ mm}^2$ . The impedance matching of the amplifier and the antenna was conducted on a 50 Ohm load, the antenna was connected to the LNA's input. The modeling of the antenna component and low-noise amplifier were held separately. The design was made with Advanced Design System CAD and Microwave Office.

The antenna is implemented in the form of a monopole with a complex shape. The diameter of the antenna is 0.7 mm. The paper shows the dependence of the input reflection loss (S11) on the frequency. According to the calculations, the bandwidth frequency was 56-69 GHz (the level of input reflection loss of -10 dB. We demonstrate the calculated radiation pattern, its shape is close to a cardioid (the radiation maximum is perpendicular to the surface of the antenna.

Based on the results of research of different AlGaN/AlN/GaN heterostructures, for the purpose of transistor models development, there were chosen transistors with amplifying characteristics sufficient for the development of an amplifier with 57-64 GHz frequency bandwidth. For that purpose, we measured the volt-ampere characteristic and S-parameters of transistors at different points of the volt-ampere characteristic, and then we calculated parameters of the nonlinear model of the

transistor in the Microwave Office CAD with regard to the best coincidence of the measured and calculated S-parameters in the frequency range of 0,01-67 GHz [1].

As the basis for the development of the nonlinear models, we selected the Fuji field-effect transistor model from the AWR Microwave Office [2]. For the calculation of the low-noise amplifier's noise factor the Pospieszalski's linear noise model was used [3]. The voltampere characteristic of the resulting nonlinear model describes quite accurately the calculated current values at the operating points and the measured S-parameters values.

All the topological projects were computed using the HEMT model for the AlGaN/GaN/sapphire heterostructures with the non-thinned substrate 340  $\mu$ m thick and reverse metallization.

The basis of the LNA circuit is the four-stage amplifier circuit with common source without feedback loop [4]. The transistors, based on which the amplifier is designed, have the MaxGain value of about 6 dB in the frequency range from 57 to 64 GHz, thus three-four cascades are required to achieve the necessary parameters (the transfer ratio of more than 16 dB). At the initial stage, there was the modelling of the amplifier carried out with the Microwave Office CAD using lumped elements. Experience shows that the lumped models do not fully reflect the behavior of the elements in the microwave range, therefore the accuracy of such modeling is not sufficient for modeling Electrodynamic modeling monolithic circuits. has significantly higher accuracy.

We present the results of electrodynamic calculation of the complete topological four-stage amplifier project [5]. As can be seen from the charts, constructed for the drain voltage of 5V, the transfer ratio is 15-20 dB, while the VSWR input and output is less than 2 in the range of 57-64 GHz; noise factor is approximately 6,4 dB. The estimated current consumption of the amplifier is 70-100 mA (the drain voltage is 5-10 V).

One of the problems in the design and manufacture of a MIC on the AlGaN/GaN heterostructures is the complexity of grounding in microstrip technology, which assumes the presence of the so-called "ground plane", on which the transistor sources and MIC grounds should be installed through the plated holes [6]. Traditionally, by analogy with arsenide gallium technology, this problem was solved by "drilling" through holes from the back side of the thinned substrate, however it is associated with serious technological difficulties.

In order to solve this problem, we used a particular technological solution, essence of which was to develop the "ground plate" above the plate's front face with the already fabricated active and passive HF elements on top of the polymeric dielectric layer 10-15  $\mu$ m thick

(polyimide). The grounding of the corresponding elements is made through holes in the polyimide layer, which also has passivation function.

### IV. THE MIC MEASUREMENTS RESULTS

Probe measurements of samples of low-noise amplifiers were conducted. The results for eight samples are shown. As can be seen from the measurement results, all the amplifiers comply with the requirements at the frequency of 57 GHz. The transfer ratio has a range of about 54-65 GHz, which exceeds the desired bandwidth. The VSWR input and output shifted to a lower frequency range, however in the range of 57-58 GHz its value is less than 2. The noise measurements have shown that the desired value (less than 6,5 dB) is achieved by all the samples at the 57 GHz frequency, and the bandwidth is about 56-58 GHz.

### V. CONCLUSION

Based on the developed low-noise amplifier with the built-in antenna, it is possible to develop a fully integrated two-way module with 57-64 GHz range for near field communication systems. The measurements have shown a good agreement between the calculated and measurement results. MIC was designed and fabricated in IUHFSE RAS. The gate length is 110 nm.

# REFERENCES

- [1] Galiev R.R., Gnatyuk D.L, Krapukhin D.V., Maytama M.V., Matveenko O.S., Mikhaylovich S.V., Fedorov Yu. V., Sherbakova M. Yu. Nitridnye tehnologii dlja osvoenija millimetrovogo diapazona dlin voln // Journal of NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE. 2015. no. 2. pp. 21-32 (in Russian).
- [2] Fujii K., Hara Y., Ghannouchi F. M., Yakabe T., Yabe H. A Nonlinear GaAs FET Model Suitable for Active and Passive MM-Wave Applications // IEICE Trans. 2000. V. E83-A. no. 2. pp. 228.
- [3] Pospieszalski M.W. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. 1989. V. 37. 1340.
- [4] Maltsev P.P., Matveenko O.S., Fedorov Yu.V., Gnatyuk D.L., Krapukhin D.V., Zuev A.V., Bunegina S.L. Monolitnaja integral'naja shema usilitelja so vstroennoj antennoj dlja pjatimillimetrovogo diapazona dlin voln // zhurnal Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. JeLEKTRONIKA. 2014. no. 4. pp. 73-76 (in Russian).
- [5] Maltsev P.P., Matveenko O.S., Fedorov Yu.V., Gnatyuk D.L., Krapukhin D.V., Zuev A.V., Bunegina S.L. Osobennosti proektirovanija integral'nogo antennogo jelementa so vstroennym usilitelem 5-mm diapazona dlin voln // Journal of NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE. 2014. no. 9. pp. 12-15 (in Russian).
- [6] Fedorov Yu.V., Maltsev P.P., Matveenko O.S., Gnatyuk D.L., Krapukhin D.V., Putintcev B.G., Pavlov A. Yu., Zuev A.V. MIS usilitelej so vstroennymi antennami SVChdiapazona na nanogeterostrukturah // Zhurnal Nanoindustrija. 2015. no. 3. pp. 44-51 (in Russian).