

ПРОЕКТИРОВАНИЕ GAN HEMT ДЛЯ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

DESIGNING GAN HEMT FOR RECEIVING DEVICES

АБОЛДУЕВ ИГОРЬ МИХАЙЛОВИЧ¹ABOLDUEV IGOR M.¹КРАСНОВ ВЯЧЕСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ²KRASNOV VYACHESLAV V.²МИННЕБАЕВ СТАНИСЛАВ ВАДИМОВИЧ¹MINNEBAEV STANISLAV V.¹ФИЛАТОВ АНАТОЛИЙ ЛЕОНИДОВИЧ¹FILATOV ANATOLY L.¹¹ АО «НПП «Пульсар», г. Москва, Россия¹ "S&PE "PULSAR" JSC, Moscow, Russia² АКЦ ФИАН, г. Москва, Россия² "FIAN" ASC, Moscow, Russia

In the past few years a great number of electronic components research and design laboratories for ground and space wireless communications have been focused on the research and application of AlGaIn/GaN heterostructure-based devices. In this work we tried to present our results in comparison of GaN HEMT and GaAs pHEMT technologies from the point of their application in LNAs. Also we demonstrated the method of GaN HEMT small signal model extraction. Two types of HEMT topologies were used to design and produce LNAs. The results of NF and Gain measurements at room and cryogenic temperatures of these LNAs are also demonstrated in this article.

Keywords: HEMT; gallium nitride; gallium arsenide; noise factor; low-noise amplifier; cryogenic measurements; small-signal model.

ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько лет основное внимание разработчиков и производителей электронной компонентной базы, предназначенной для использования в беспроводных линиях связи наземного и космического базирования, направлено на исследования и использование приборов на основе гетероструктур типа AlGaIn/GaN. Такой интерес к устройствам на данном типе материалов обусловлен рекордными значениями пробивных напряжений, удельной выходной мощности скорости насыщения электронов и достаточно хорошей теплопроводностью подложек SiC [1, 2]. Вышеперечисленные характеристики материала позволяют получать на его основе СВЧ транзисторы с удельной выходной мощностью порядка 10 Вт/мм (при $f = 40$ ГГц) и более чем 2 Вт/мм (при $f = 80,5$ ГГц), что в несколько раз превосходит значения, достигаемые на таких материалах, как Si, GaAs, InP и другие [3, 4, 5]. Высокий уровень напряжения пробоя позволяет не только достигать рекордных результатов по значениям удельной выходной мощности, но и разрабатывать и изготавливать приборы, устойчивые к воздействию непрерывной входной мощности на один-два порядка превышающей значения для традиционных маломощных усилителей (МШУ) на основе GaAs pHEMT [6].

При разработке МШУ необходимо учитывать ряд достаточно жестких и противоречивых с точки зрения технологии изготовления требований, к основным из которых можно отнести следующие: малый коэффициент шума (K_n), высокий коэффициент усиления (K_u), широкий динамический диапазон (D), равномерная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и линейная фазочастотная характеристика (ФЧХ) в широкой полосе частот. Для сравнения параметров СВЧ транзисторов, оказывающих влияние на соответствие МШУ вышеописанным требованиям, рассмотрим приборы, представленные в табл. 1 [7].

В данной таблице приведены характеристики приборов, изготовленных на гетероструктурах типа AlGaIn/GaN и AlGaAs/GaAs, которые демонстрируют некоторые преимущества GaN HEMT в области применения их в составе маломощных усилителей.

Немаловажными факторами для радиоэлектронной аппаратуры являются стойкость к внешним воздействиям, в особенности к специальным воздействующим факторам и предельным значениям рабочих температур. СВЧ транзисторы на основе AlGaIn/GaN могут применяться в более широком диапазоне рабочих температур, так как рабочая температура канала для них

Таблица 1. Параметры серийно выпускаемых СВЧ транзисторов фирмы Qorvo, Inc.

Table 1. Parameters of commercially available microwave HEMTs produced by Qorvo, Inc.

Модель HEMT (Qorvo Inc.) HEMT model (Qorvo Inc.)	Рабочий диапазон частот, ГГц Operating frequency range, GHz	K_n @10 ГГц, дБ NF@10GHz, dB	K_u @10 ГГц, дБ G@10GHz, dB	Максимальная входная мощность, мВт Maximum input power, mW
TGF2942 (GaN)	0,1–25	1,2	18	200
TGF2935 (GaN)	0,1–25	1,3	16	500
TGF2934 (GaN)	0,1–25	1,5	14	2000
TGF4350 (GaAs)	0,1–22	0,8	14,5	100
TGF2060 (GaAs)	0,1–20	1,2	12,5	250

может достигать более 200 °С, в то время как аналогичный параметр для GaAs pHEMT составляет 125 °С. Также за счет большей ширины запрещенной зоны GaN обладает лучшей стойкостью к специальным факторам по сравнению с GaAs. На основании приведенных выше параметров нами был сделан вывод о перспективности применения GaN HEMT в составе малошумящих усилителей.

РАЗРАБОТКА МШУ НА ОСНОВЕ GAN HEMT И ИЗМЕРЕНИЯ $K_{ш}$ (Т)

С целью последующего сравнения результатов моделирования и измерения шумовых параметров малошумящих усилителей на основе GaN HEMT, разработанных и изготовленных АО «НПП «Пульсар», проведено построение моделей самих СВЧ транзисторов. В качестве модели транзистора была использована эквивалентная схема (рис. 1), которую условно можно разделить на две части: внешнюю, которая включает в себя паразитные элементы, связанные с контактами транзистора и подложкой, и внутреннюю, состоящую из источника тока, управляемого напряжением, и паразитных емкостей гетероструктуры.

Для построения модели транзистора в среде автоматизированного проектирования AWR Microwave Office требуется провести процесс восстановления эквивалентной схемы, который был разделен на три последовательных этапа:

1. Восстановление вольт-амперной характеристики (ВАХ) транзистора;
2. Восстановление внешней части эквивалентной схемы;
3. Восстановление внутренней части эквивалентной схемы.

Восстановление ВАХ осуществлялось путем ее измерения в импульсном режиме. В ходе измерений СВЧ транзисторов была экспериментально подобрана длительность импульса ~1 мкс, при которой влияние эффектов саморазогрева и перезарядки глубоких центров минимально. Также из проведенной серии экспериментов были определены параметры рабочей точки транзисторов. Для восстановления внешней и внутренней частей эквивалентной

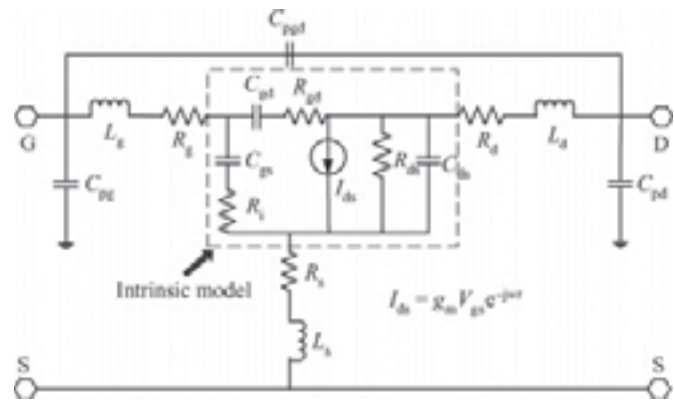


Рис. 1. Малосигнальная эквивалентная схема AlGaIn/GaN HEMT

Fig. 1. Small-signal AlGaIn/GaN HEMT equivalent circuit

схемы использовались результаты измерений S-параметров GaN HEMT при различных режимах питания:

1. $U_{gs} = 0$ В; $U_{ds} = 0$ В («холодный» режим);
2. $U_{gs} = -4$ В; $U_{ds} = 0$ В («закрытый» режим);
3. -3 В < $U_{gs} < 0$ В; $U_{ds} = 10$ В (рабочая точка).

В результате были восстановлены линейные эквивалентные схемы 2 типов транзисторов (рис. 2 а, б), изготовленных на гетеропитаксиальных структурах типа AlGaIn/GaN. Ширина затвора (W_g) у каждого типа транзистора составляет 300 мкм, расстояние сток-исток равно 4 мкм. Различия между 2 типами GaN HEMT заключаются в том, что у транзистора 1 типа (топология типа «гребенка») есть сквозные отверстия в области истока и «полевая плата», а у типа 2 (топология типа «рыбий скелет») они отсутствуют.

Для оценки корректности разработанных моделей транзисторов был спроектирован тестовый малошумящий усилитель с целью сравнения его расчетных и измеренных характеристик. Измерения проводились в тракте с импедансом, равным 50 Ом. Тестовый МШУ (рис. 3) представляет из себя гибридную

INTRODUCTION

In the past few years, the main focus of developers and manufacturers of electronic components for ground and space wireless communications has been directed at the research and use of AlGaIn/GaN heterostructure-based devices. Such interest in devices of this type of material is due to the record values of breakdown voltage, specific output power, electron saturation rate and sufficient thermal conductivity of SiC substrates [1,2]. The above characteristics make it possible to create microwave transistors with specific output power about 10W/mm (at $f = 40$ GHz) and more than 2W/mm (at $f = 80.5$ GHz), which is several times greater than the values achieved with Si, GaAs, InP and other materials [3,4,5]. High breakdown voltage level allows achieving record values of specific output power, as well as developing and producing devices resistant to the effect of continuous input power by several orders

of magnitude higher than the values achieved with traditional low-noise amplifiers (LNA) based on GaAs pHEMT [6].

When developing a LNA, it is necessary to take into account a number of strict and contradictory technology requirements. The main specifications are: low noise figure (NF), high gain (Gain), large dynamic range (DR), uniform frequency response and linear phase response in a wide frequency band. For comparison of the microwave transistor parameters influencing the LNA match to the requirements described above, let us consider the devices presented in Table 1 [7].

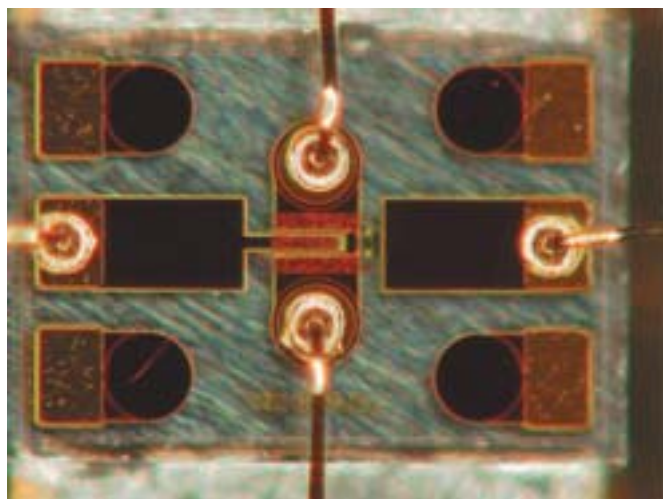
Table 1 shows the characteristics of devices based on AlGaIn/GaN and AlGaAs/GaAs heterostructures. These values show some advantages of GaN HEMT used as part of low-noise amplifiers.

Important parameter for electronic equipment is the resistance to external effects, especially to special factors and operating

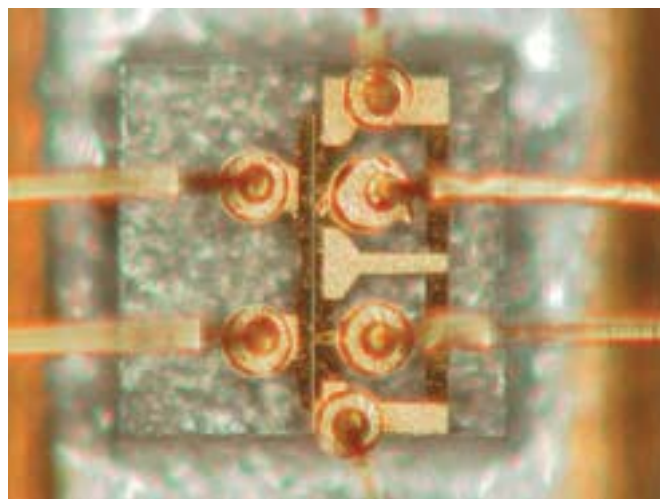
temperature limits. Microwave AlGaIn/GaN HEMTs could be used in a wider operating temperature range, as their channel operating temperature could be up to 200 °С, while GaAs pHEMT channel temperature is 125 °С. Also due to the larger band-gap, GaN has better resistance to special external factors compared to GaAs. Based on the above comparison, we have concluded the feasibility of GaN HEMT use in low-noise amplifiers.

GAN HEMT BASED LNA DESIGN AND NF MEASUREMENTS

We have created microwave HEMT models in order to compare the results of simulations and measurements of GaN HEMT-based low-noise amplifiers' noise parameters, for amplifiers developed and produced by PULSAR S&PE. Equivalent circuit (Fig. 1) has been used as a HEMT model. Equivalent circuit can be divided into two parts: external,



а | а



б | б

Рис. 2. GaN HEMT производства АО «НПП «Пульсар», $W_g = 300 \text{ мкм}$: а) топология типа «гребенка»; б) топология типа «рыбий скелет»
 Fig. 2. PULSAR S&PE GaN HEMT, $W_g = 300 \mu\text{m}$: а) "U-type"-layout; б) "fishbone"-layout

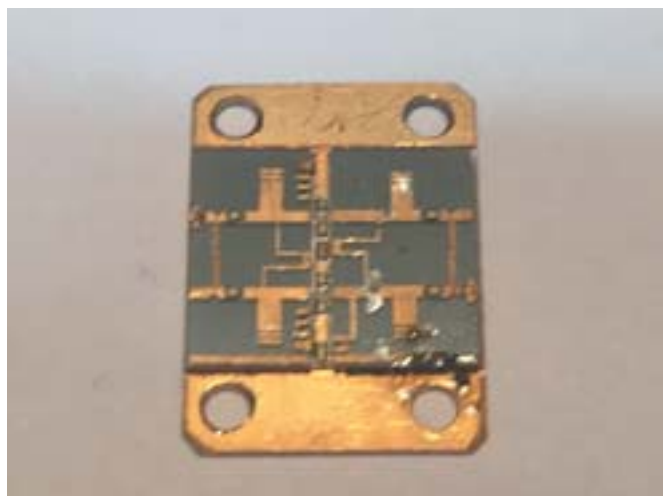


Рис. 3. Тестовый МШУ на основе GaN HEMT
 Fig. 3. Test GaN HEMT LNA

интегральную схему (ГИС) с сумматором на мостах Ланге, применение которых было выбрано из соображений снижения КСВН входа и выхода устройства. Посадка кристаллов СВЧ транзисторов на подложку-носитель, изготовленную из МД-40, осуществлялась на клей ЭЧЭС, в связи с чем измерения параметров ГИС МШУ проводились в импульсном режиме. Измерения проводились на частоте 10 ГГц при длительности импульса 100 мкс и $Q = 10$, а рабочая точка СВЧ транзистора задавалась следующим режимом: $U_{ds} = 10 \text{ В}$, $I_{ds} = 50 \text{ мА}$. Значение коэффициента шума для СВЧ транзистора типа 1 составило 3,8 дБ, а для типа 2—3,5 дБ, что в пределах погрешности в 10% совпадает с результатами расчетов в САПР AWR Microwave Office.

Помимо проведения измерений параметров ГИС МШУ при нормальных условиях, нами были проведены исследования зависимостей коэффициентов шума и усиления от температуры окружающей среды. В данной серии исследований измерения проводились в тех же рабочих точках, но в режиме непрерывной

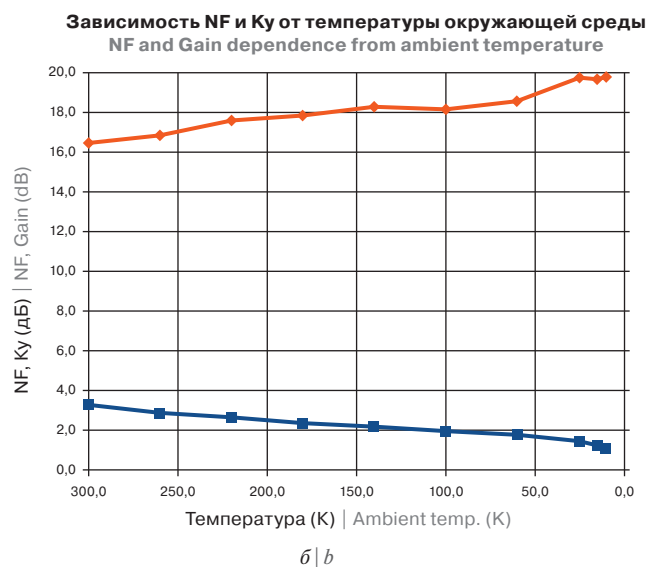
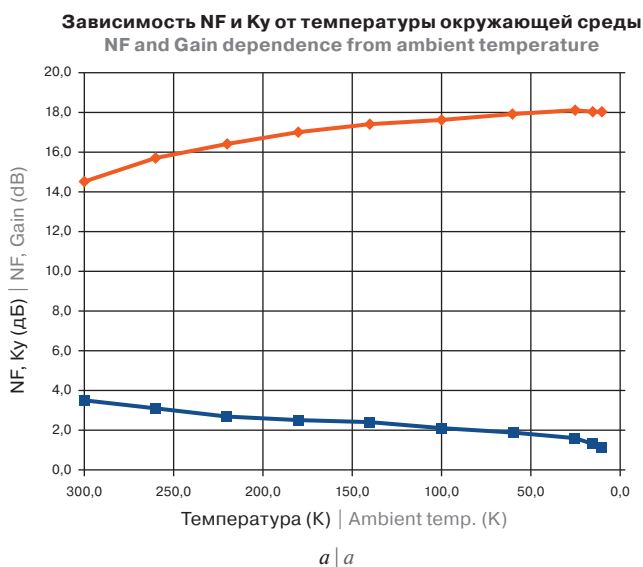


Рис. 4. Зависимости коэффициентов шума и усиления ГИС МШУ от температуры окружающей среды: а — СВЧ транзистор 1 типа; б — СВЧ транзистор 2 типа

Fig. 4. LNA HIC noise figure and gain behavior at different ambient temperature: а — Microwave HEMT of type 1; б — microwave HEMT of type 2



генерации (НГ). Диапазон изменения температур составлял от 10 К до 300 К. Результаты измерений приведены на рис. 4.

Из приведенных зависимостей видно, что при температуре окружающей среды 10 К коэффициент шума GaN HEMT 1 типа равняется 1,15 дБ, а 2 типа — 1,04 дБ. На основании проведенных исследований для $K_{ш}$ и K_y можно сделать вывод о том, что наличие сквозных отверстий и «полевой платы» в конструкции GaN HEMT негативно сказывается на параметрах, являющихся критическими для МШУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения исследований о применимости GaN HEMT в составе МШУ нового поколения проведен обзор научных публикаций по данной тематике, проведена экстракция параметров малосигнальной модели СВЧ транзистора. Однако малосигнальная модель, построенная на основании измерений S-параметров, не дает четкого представления о значении оптимальных коэффициентов отражения входа, в связи с чем запланировано проведение измерений с использованием автоматических тюнеров импеданса в составе тракта. Также необходимо проведение доработки внутренней части эквивалентной схемы, более подробно отражающей источник шума в GaN HEMT, для более точного построения эквивалентной модели в среде Silvaco TCAD.

По результатам измерений можно сделать вывод о том, что ГИС МШУ на основе GaN HEMT имеет аналогичные ГИС МШУ на основе GaAs pHEMT шумовые характеристики, так как для СВЧ транзисторов на основе AlGaIn/GaN нет необходимости в использовании входного защитного устройства. Были проведены измерения шумовых параметров транзисторов при температурах окружающей среды вплоть до 10 К. При измерениях температурной зависимой $K_{ш}$ и K_y транзистора было исследовано

влияние наличия сквозных отверстий и «полевой платы» на шумовые характеристики приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pengelly R. S., Wood S. M., Milligan J. W., Sheppard S. T., Pribble W. L. "A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs" — in IEEE MTT, Vol. 60, № 6, 2012.
2. Hobgood D., Brady M., Brixius W., Fechko G., Glass R., Henshall D., Jenny J., Leonard R., Malta D., Muller S. G., Tsvetkov V., Carter C. "Status of Large Diameter SiC Crystal Growth for Electronic and Optical Applications" — Silicon Carbide Rel. Mater., 1999 (Part 1), Mater. Sci. Forum, Vol. 338–342, p. 3–8, 2000.
3. Palacios T., et al. "High-power AlGaIn/GaN HEMTs for Ka-band Applications" — Vol. 26, No. 11, pp. 781–783, 2005.
4. Chehrenegar P., Abbasi M., Grahn J., Andersson K. "Highly Linear 1–3GHz GaN HEMT Low-noise Amplifier" — in IEEE MTT-S International, 2012.
5. Mishra U., Lukin S., Kazior T., Wu Y. F. "GaN-based RF Power Devices and Amplifiers" — Proceedings of the IEEE, Vol. 96, No. 2, pp. 287–305, 2008.
6. Аболдуев И. М., Гладышева Н. Б., Дорофеев А. А., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М., Чернявский А. А. Исследование малошумящего AlGaIn/GaN ПТБШ на устойчивость к воздействию входной мощности. // Материалы VI-ой научно-технической конференции «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА», 2007 г., Россия, Владимир. — С. 47.
7. Аболдуев И. М., Миннебаев С. В., Филатов А. Л., Краснов В. В. Влияние конструкции GaN HEMT на шумовые параметры приборов. // Материалы XV научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 2017 г., Россия, Москва–Дубна. — С. 59.

which comprises parasitic elements connected with transistor contacts and substrate; and internal, which comprises voltage controlled current supply and heterostructure parasitic capacitances.

To create transistor model in computer-aided design software AWR Microwave Office, we have carried out equivalent circuit extraction divided into three consecutive stages:

1. Extraction of transistor current-voltage curve;
2. Extraction of equivalent circuit external part;
3. Extraction of equivalent circuit internal part.

Extraction of the CV curve has been carried out by measuring it in pulsed mode. In the course of microwave HEMT measurements, the pulse width has been experimentally chosen as 1 μs. For a given pulse width, the effects of self-heating and deep level recharging are minimal. Parameters of HEMT operating point have been defined from the conducted experiments. For the extraction of external and internal parts of equivalent circuit, GaN

HEMT S-parameters have been measured at different power supply modes:

1. $U_{gs} = 0V$; $U_{ds} = 0V$ ("cold" mode);
2. $U_{gs} = -4V$; $U_{ds} = 0V$ ("closed" mode);
3. $-3V < U_{gs} < 0V$; $U_{ds} = 10V$ (operating point).

Linear equivalent circuits have been extracted for 2 types of AlGaIn/GaN HEMT (Fig. 2a,b). Gate width (W_g) of each type of HEMT is 300 μm, drain-source distance being 4 μm. Two types of the GaN HEMT differ in their design: HEMT of the 1st type ("U-type"-layout) has through-vias in the source region and the field plate; HEMT of the 2nd type ("fishbone"-layout) has no through-vias and no field plate.

To evaluate the developed HEMT models, we have designed test low-noise amplifier to compare its simulated and measured performance parameters. Measurements have been carried out in a signal path with 50 Ohm impedance. Test LNA (Fig. 3) is a hybrid integrated circuit (HIC) with adder on Lange bridges chosen in order to decrease VSWR at devices' input and output. Mounting

of microwave HEMT dies on CuMo test-substrate has been made with silver-epoxy adhesive, and LNA IC performance parameters have been measured in pulsed mode. Measurements have been carried out at 10 GHz with 100 μs pulse width and $Q = 10$. Microwave HEMT operating point has been set at: $U_{ds} = 10V$, $I_{ds} = 50mA$. Noise figure for microwave HEMT of type 1 has been 3.8 dB, for type 2–3.5 dB. These results are in a good agreement (within 10 % error) with the results simulated in AWR Microwave Office.

In addition to performing measurements of the LNA HIC parameters under normal conditions, we have studied the behavior of noise figure and gain values at different ambient temperatures. Corresponding measurements have been carried out at the same HEMT operating points, but in continuous mode, temperature range being from 10 to 300 K. The results are given in Fig. 4.

Curves show that noise figure of the 1st type of GaN HEMT is 1.15 dB and of the 2nd type is 1.04 dB at 10 K ambient temperature. Based on the conducted research on NF and gain



performance, we can conclude that through-vias and field plate in GaN HEMT structure negatively affect the parameters that are critical for LNA.

CONCLUSION

In the course of the research on the applicability of GaN HEMT in a new generation of LNAs, relevant scientific publications have been reviewed and small-signal microwave transistor model has been extracted. However, small-signal model created on the basis of S-parameters does not give a clear understanding of the value of the optimal input reflection coefficients. To address that issue, we are planning to conduct further measurements using automated impedance tuners in the signal path. The internal part of equivalent circuit needs to be refined, achieving more detailed reflection of the sources of noise in GaN HEMT, for a more accurate creation of an equivalent model in Silvaco TCAD.

Measurement results have shown that GaN HEMT LNA ICs have the same parameters as GaAs pHEMT LNA HIs, since AlGaIn/GaN ICs do not require input protection

circle. Transistor noise performance has been investigated at ambient temperatures down to 10K. While measuring NF and Gain parameters temperature behavior, the effect of through-vias and the field plate on the noise performance of the devices has also been investigated.

REFERENCES

1. Pengelly R.S., Wood S.M., Milligan J.W., Sheppard S.T., Pribble W.L. "A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs" — in IEEE MTT, Vol. 60, №6, 2012.
2. Hobgood D., Brady M., Brixius W., Fechko G., Glass R., Henshall D., Jenny J., Leonard R., Malta D., Muller S.G., Tsvetkov V., Carter C. "Status of Large Diameter SiC Crystal Growth for Electronic and Optical Applications" — Silicon Carbide Rel. Mater., 1999 (Part 1), Mater. Sci. Forum, Vol. 338–342, p. 3–8, 2000.
3. Palacios T., et al. "High-power AlGaIn/GaN HEMTs for Ka-band Applications" — Vol. 26, No. 11, pp. 781–783, 2005.
4. Chehrenegar P., Abbasi M., Grahn J., Andersson K. "Highly Linear 1–3GHz GaN HEMT Low-noise Amplifier" — in IEEE MTT-S International, 2012.
5. Mishra U., Lukin S., Kazior T., Wu Y.F. "GaN-based RF Power Devices and Amplifiers" — Proceedings of the IEEE, Vol. 96, No. 2, pp. 287–305, 2008.
6. Abolduev I.M., Gladysheva N.B., Dorofeev A.A., Kolkovskii Yu.V., Minnebaev V.M., Chernyavskii A.A. *Issledovanie maloshumyashchego AlGaIn/GaN PTBSh na ustoychivost' k vozdeistviyu vkhodnoi moshchnosti* // Materialy VI-oi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Tverdotel'naya elektronika, slozhnye funktsional'nye bloki REA", 2007 g., Rossiya, Vladimir. P. 47. (In Russian).
7. Abolduev I.M., Minnebaev S.V., Filatov A.L., Krasnov V.V. *Vliyanie konstruktivnoi GaN HEMT na shumovye parametry priborov*. // Materialy XV nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Tverdotel'naya elektronika. Slozhnye funktsional'nye bloki REA", 2017, Rossiya, Moskva–Dubna. — P. 59. (In Russian).

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



ОСНОВЫ МИКРОВОЛНОВОЙ ФОТОНИКИ

Урик Винсент Дж.-мл.,
МакКинни Джейсон Д., Вилльямс Кейт Дж.

перевод с английского д. т. н. М. Е. Белкина, к. ф.-м. н. И. В. Мельникова,
к. ф.-м. н. В. П. Яковлева

под редакцией д. т. н., д. э. н., проф. С. Ф. Боева,
акад. РАН, д. ф.-м. н., проф. А. С. Сигова

Данное издание представляет собой фундаментальное последовательное описание физических основ исследований и разработок в области компонентной базы и оборудования радиоволновых систем. Книга состоит из 10 глав. Отдельная глава посвящена еще слабо изученным вопросам разработки мощных высоколинейных фотодетекторов, в которых NRL является признанным мировым лидером. Помимо основных глав книга включает шесть приложений, облегчающих понимание использованного математического аппарата. Важной методической особенностью данной книги является согласованное изложение методов, принципов и подходов, изученных еще в прошлом столетии и введенных в последние 2–3 года.

Книга предназначена главным образом для студентов высшей школы и аспирантов, обучающихся по направлению «Фотоника», но также может быть полезна для преподавательского состава, для разработчиков аппаратуры в рамках этого только развивающегося в России направления науки и техники, а также для научных и технических специалистов в смежных областях.

М: ТЕХНОСФЕРА, 2017. – 376 с.
ISBN 978-5-94836-445-2

Цена 1090 руб.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; ☎ +7 (495) 956-3346; ✉ knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru