

## Сравнение характеристик GaAs и GaN HEMT-транзисторов

*Н.В. Гуминов, Мьо Мин Тхант, В.А. Романюк, Д.П. Шомахмадов*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*

*v.a.romanjuk@gmail.com*

В настоящее время ведутся интенсивные исследования HEMT-структур на основе GaAs и GaN, направленные на совершенствование микроволновых монолитных интегральных схем. В работе представлены HEMT-транзисторы, изготовленные на основе GaAs и GaN с длиной затвора 0,2–0,25 мкм, шириной затвора 200–300 мкм и проведено сравнение их характеристик. Измерены вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики, а также зависимости от частоты малосигнальных  $S$ -параметров. Проведено компьютерное моделирование с использованием моделей MATERKA для GaAs-транзистора и EHEMT для GaN-транзистора. Адекватность разработанных моделей подтверждена совпадением измеренных частотных зависимостей параметра  $|S_{21}|$  и рассчитанного малосигнального коэффициента усиления мощности. Изучены частотные свойства изготовленных транзисторов. В схемах линейных усилителей рассчитаны предельные частоты колебаний, на которых пропадает усиление мощности. Моделирование показало возможность линейного усиления на частотах до 64 ГГц для GaAs-транзистора и 73 ГГц для GaN-транзистора при одинаковых напряжениях питания. С целью определения максимально возможных усиливаемых частот колебаний спроектированы схемы усилителей с оптимизированной нагрузкой транзисторов. Максимальные частоты колебаний изготовленных транзисторов близки и составили ~82 ГГц. Проведено сравнение энергетических возможностей транзисторов. Малосигнальные коэффициенты усиления мощности транзисторов одинаковы и составляют ~15 дБ на частотах  $L$ - и  $S$ -диапазонов. Наибольшие токи стока для обоих транзисторов в щадящем режиме работы составили 0,34 А/мм при напряжении на стоке 3 В. Для определения максимальных КПД добавленной мощности разработаны схемы нелинейных усилителей, рассчитанные на частоту усиливаемых колебаний 3 ГГц. Наибольший КПД добавленной мощности составил 57 % для GaAs-транзистора и 65% для GaN-транзистора. С учетом того, что напряженность электрического поля пробоя в GaN-транзисторе в несколько раз выше, чем в GaAs-транзисторе, показана возможность достижения КПД GaN-транзистора, превышающего 80 %. Полученные результаты полезны для разработки микроволновых монолитных интегральных схем усилителей мощности до частот, включая  $V$ -диапазон.

**Ключевые слова:** HEMT-транзисторы; GaAs-транзистор; GaN-транзистор; усилители СВЧ

**Для цитирования:** Гуминов Н.В., Мьо Мин Тхант, Романюк В.А., Шомакмадов Д.П. Сравнение характеристик GaAs и GaN HEMT-транзисторов // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 1. – С. 42–50. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-42-50

## Comparison of GaAs and GaN HEMT Characteristics

*N.V. Guminov, Myo Min Thant, V.A. Romanjuk, D.P. Shomakhmadov*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

*v.a.romanjuk@gmail.com*

**Abstract:** In this work the HEMPT-transistors made of various semiconductor materials with the gate length of 0.2–0.25  $\mu\text{m}$  and width of 200–300  $\mu\text{m}$  have been considered and their characteristics have been compared. The current-voltage and farad-voltage characteristics and also the dependences of small signal S parameters on frequency have been measured. On the basis of the measurements the computer models of transistors: for GaAs – MATERKA, for GaN EEHEMT – have been developed. The adequacy of the developed models has been confirmed by the coincidence of the measured frequency of the parameter  $|S_{21}|$  and the calculated low-signal power gain. The frequency properties of the manufactured transistors have been studied. In the schemes of linear amplifiers the limit of the oscillation frequency, on which the power amplification is lost, has been calculated. The modeling has shown the possibility of linear amplification for frequencies up to 64 GHz of GaAs transistors and 73 GHz of GaN transistors. In order to determine the maximum possible amplified oscillation frequencies the amplifier circuits with an optimized load of transistors have been designed. The maximum oscillation frequencies of the manufactured transistors are close to  $\sim 82$  GHz. The power parameters of the transistors have been compared. Small signal coefficients of transistors amplification power are equal and are  $\sim 15$  dB at frequencies of L and S ranges. The highest drain currents for both transistors in the operation non-sparing regime were 0.34 A/mm with voltage on drain 3 V. To determine the maximum power added efficiency (PAE), the scheme of the nonlinear amplifiers, calculated for a frequency of the amplified oscillations 3 GHz has been developed. The highest PAE was 57 % for GaAs and 65 % for GaN. Taking into account that the electric field strength breakdown in GaN is several times higher than that one in GaAs, the possibility to achieve the efficiency of the transistor from GaN, exceeding 80 %, has been shown. The obtained results are useful for development of microwave monolithic integrated circuits for power amplifiers up to frequencies, including V-range.

**Keywords:** HEMT-transistors; GaAs; GaN; amplifiers

**For citation:** Guminov N.V., Myo Min Thant, Romanjuk V.A., Shomakhmadov D.P. Comparison of GaAs and GaN HEMT Characteristics. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 42–50. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-42-50

**Введение.** В настоящее время ведутся интенсивные исследования и разработки, направленные на совершенствование микроволновых монокристаллических интегральных схем на основе полевых НЕМТ-транзисторов (High Electron Mobility Transistor). Особое внимание уделяется приборам и устройствам на основе GaAs и GaN [1, 2]. В ряде публикаций сравниваются характеристики и параметры микроволновых монокристаллических интегральных схем, созданных на этих материалах. Расхождения объясняются в основном разницей электрофизических свойств полупроводников и размерами конструкций транзисторов. Однако существенное значение имеют особенности процессов изготовления GaAs- и GaN-транзисторов.

Цель настоящей работы – сравнение характеристик и параметров НЕМТ-транзисторов на основе GaAs и GaN, изготовленных на единой технологической базе в МИЭТ.

**Конструкция НЕМТ-транзисторов.** На рис. 1 показаны конструкции изготовленных НЕМТ-транзисторов. Длина затвора GaAs-транзистора составляет 0,2 мкм, GaN-транзистора – 0,25 мкм. Полная ширина затвора GaAs-транзистора равна 300 мкм (6 параллельных структур по 50 мкм), GaN-транзистора – 200 мкм (2 параллельные структуры по 100 мкм).

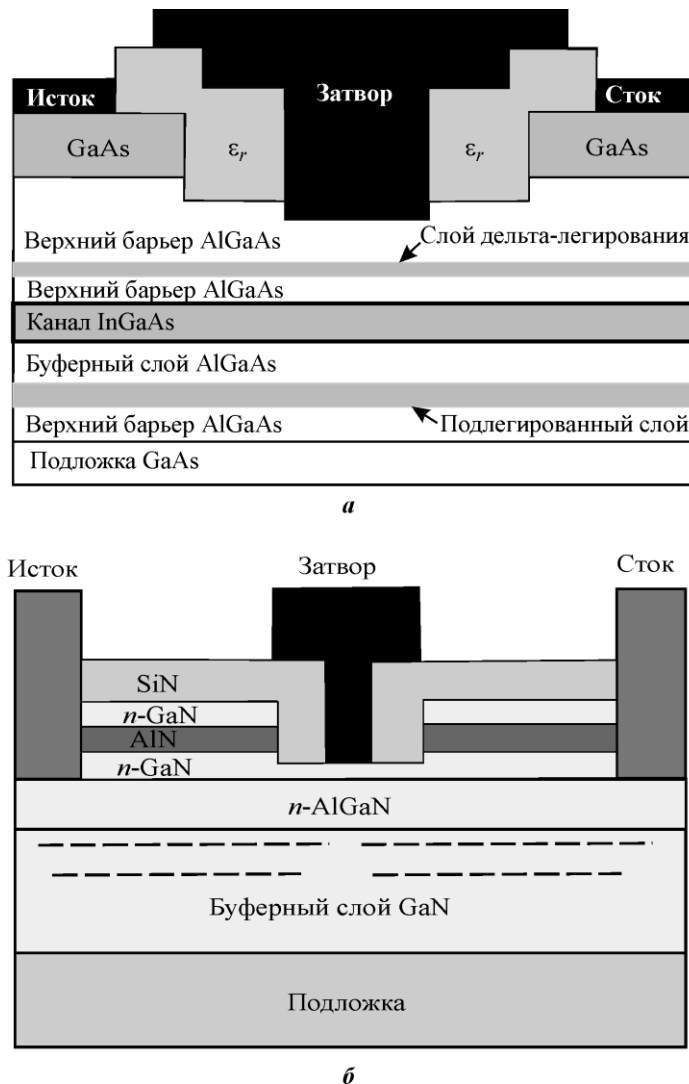


Рис. 1. Структуры НЕМТ-транзисторов: а – на основе GaAs; б – на основе GaN  
 Fig. 1. The structures of HEMT-transistors: a – of GaAs; b – of GaN

Транзисторы изготавливались на гетероструктурах, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, по технологии формирования Т-образного затвора с применением электронно-лучевой литографии. Для осаждения и травления диэлектрических слоев использовались плазмохимические процессы. Металлизация выполнялась методом электрохимического осаждения золота с применением воздушных мостовых соединений истоковых областей параллельных структур транзисторов.

В GaN-транзисторе напряженность электрического поля пробоя и коэффициент теплопроводности существенно выше, чем в GaAs-транзисторе [3]. Таким образом, к GaN-транзистору можно подводить более высокое напряжение питания, не опасаясь пробоя и перегрева.

**Результаты измерений.** На образцах изготовленных транзисторов измерены зависимости малосигнальных  $S$ -параметров от частоты, а также статические ВАХ и ВФХ входной емкости. На основе результатов измерений проведено компьютерное моделирование изготовленных транзисторов с использованием моделей Tom, Angelov, MATERKA, STATZ, EHEMT [4]. Наилучшее совпадение результатов измерений и расчетов удалось добиться с использованием моделей MATERKA для GaAs-транзистора и EHEMT для GaN-транзистора.

На рис. 2 показаны семейства выходных ВАХ  $I_C(U_C)$ , измеренных при напряжениях на стоке  $U_C = 0...4$  В и разных напряжениях на затворе  $U_3$  GaAs- и GaN-транзисторов. Статические ВАХ показывают, что выходной ток GaAs-транзистора несколько больше тока GaN-транзистора, что объясняется разной шириной затвора. Нормированные к 1 мм максимальные токи стока одинаковы и составляют  $I_C \approx 0,34$  А/мм при  $U_C = 3$  В.

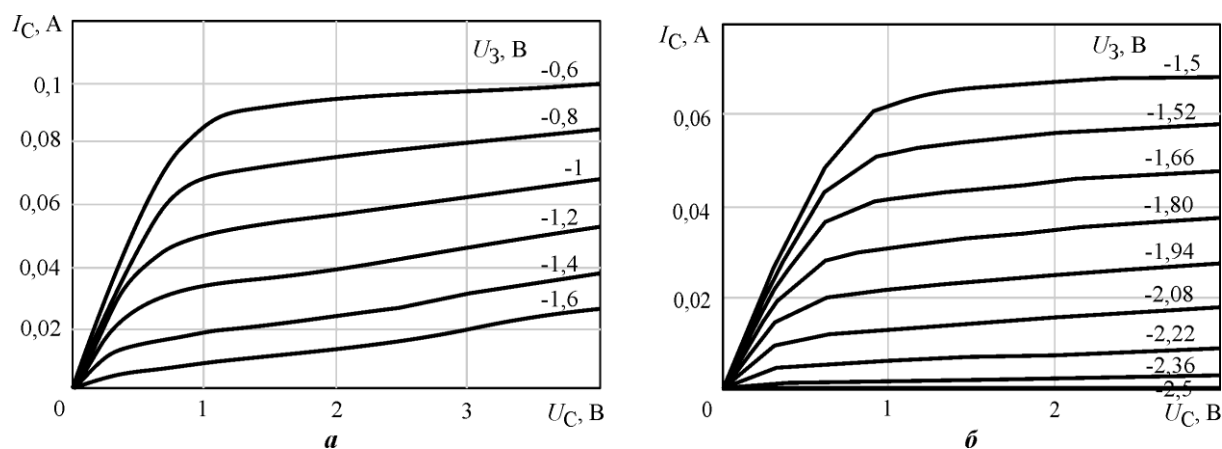


Рис.2. Измеренные статические выходные ВАХ GaAs-транзистора (а) и GaN-транзистора (б) при разном напряжении на затворе  $U_3$

Fig.2. Measured static output I-V characteristic of GaAs transistor (a); GaN transistor (b)

На рис.3 показаны зависимости малосигнального коэффициента усиления мощности  $K_p$  обоих типов транзисторов от частоты  $f$ , рассчитанные в схемах усилителей с использованием компьютерных моделей MATERKA и EHEMT. Коэффициент усиления мощности определялся как отношение выходной мощности транзистора к мощности источника колебаний. Исток каждого транзистора заземлен, напряжение питания, подводимое к стоку, составляет 3 В, напряжение смещения на затворе соответствует максимальной крутизне статической переходной ВАХ ( $-0,3$  В для GaAs-транзистора и  $-2$  В для GaN-транзистора). Выходное сопротивление источника колебаний и сопротивления нагрузки равны 50 Ом. На рис.3 также представлены зависимости модуля малосигналь-

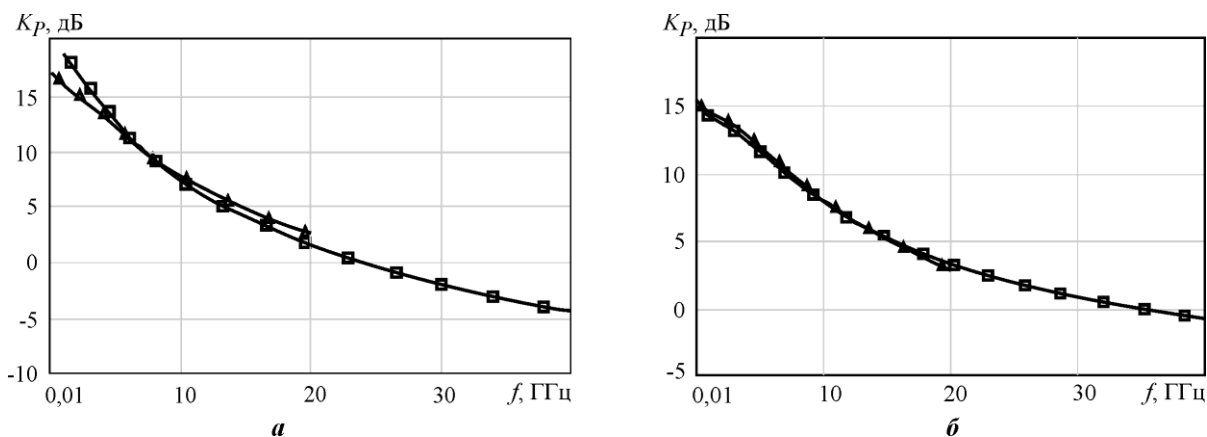


Рис.3. Зависимость малосигнального коэффициента усиления мощности транзисторов и модуля параметра  $S_{21}$  от частоты для GaAs-транзистора (а) и GaN-транзистора (б):  $\Delta$  – измеренный параметр  $|S_{21}|$ ;  $\square$  – полученный при моделировании коэффициент  $K_p$

Fig.3. Frequency dependence of the low-signal power gain and the modulus of parameter  $S_{21}$  of GaAs transistor (a) and GaN transistor (b):  $\Delta$  – measurement;  $\square$  – simulation

ного параметра транзистора  $S_{21}$  от частоты, измеренные до частоты 20 ГГц. Видно хорошее соответствие характеристик, полученных в результате расчетов и моделирования. Если продолжить по оси абсцисс измеренные  $|S_{21}|(f)$  и рассчитанные в моделях зависимости  $K_p(f)$ , то можно определить граничные частоты транзисторов, на которых пропадает усиление мощности. Граничные частоты по мощности в стандартной схеме усилителя составляют 24 ГГц для GaAs-транзистора и 35 ГГц для GaN-транзистора.

**Сравнение частотных свойств транзисторов.** Коэффициент усиления мощности зависит от того, какая часть мощности источника колебаний попадает в транзистор, а также от сопротивления нагрузки. Для поиска возможностей получения более высоких граничных частот рассчитаны зависимости  $K'_p(f)$  при оптимизированной нагрузке транзисторов. Коэффициент  $K'_p$  определяется как отношение выходной мощности к мощности, поступающей на вход транзистора.

С целью обеспечения согласования транзистора последовательно с выводом стока включена индуктивность, компенсирующая выходную емкость транзистора, и изменено сопротивление нагрузки усилителя. Компенсирующая индуктивность составляет 0,01 нГн для GaAs-транзистора и 0,03 нГн для GaN-транзистора, выходное сопротивление усилителя равно 5 и 14 Ом для GaAs- и GaN-транзистора соответственно. Расчеты с использованием моделей транзисторов показали, что максимальные частоты, на которых еще имеется усиление мощности в усилителях с оптимизированной нагрузкой, приблизительно одинаковы для обоих типов транзисторов и составляют  $\sim 82$  ГГц.

Для создания усилителей наиболее высоких частот рассчитаны электрические схемы линейных усилителей, а их параметры оптимизированы для получения достаточного коэффициента усиления мощности ( $K_p > 6$  дБ) на максимально возможной частоте. Моделирование в среде Microwave Office осуществлялось в линейном режиме расчетов с использованием команды GT – отношение выходной мощности к мощности входного источника колебаний. На рис.4 показаны результаты моделирования усилителей. Как видно из рис.4, удалось получить схемы усилителей, настроенные на частоту 64 ГГц для GaAs-транзистора и на частоту 73 ГГц для GaN-транзистора.

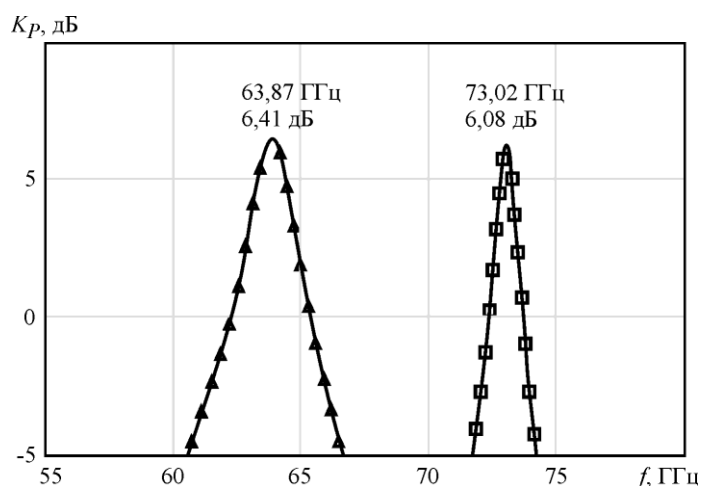


Рис.4. АЧХ усилителей при работе на наиболее высоких частотах:

Δ – GaAs-транзистор; □ – GaN-транзистор

Fig.4. Frequency response of amplifiers operating at the highest frequencies:

Δ – GaAs transistor; □ – GaN transistor

**Энергетические характеристики транзисторов.** Энергетическими параметрами транзисторов являются выходная мощность, коэффициент усиления мощности и КПД. Коэффициент усиления максимален при работе транзистора в линейном режиме и приблизительно одинаковый для GaAs- и GaN-транзисторов: 15 дБ на частотах диапазона единиц гигагерц (см. рис.3). Выходная мощность первой гармоники  $P_1$  определяется мощностью, потребляемой транзистором из источника питания:

$$P_0 = I_{C0} U_{пит},$$

где  $I_{C0}$  – постоянный ток стока;  $U_{пит}$  – напряжение питания, и КПД

$$\eta = P_1/P_0. \quad (1)$$

Наибольшая возможная потребляемая мощность зависит от предельно допустимого напряжения  $U_{доп}$  сток – исток и максимального постоянного тока стока  $I_{C0}$ , определяющего допустимый нагрев транзистора. Предельно допустимое напряжение  $U_{доп} = E_{пр} l$  ( $E_{пр}$  – напряженность электрического поля пробоя;  $l$  – расстояние между истоком и стоком транзистора). Отметим, что напряженность электрического поля пробоя и коэффициент теплопроводности в GaN-транзисторе существенно выше, чем в GaAs-транзисторе. Поэтому к GaN-транзистору можно подводить из источника питания более высокую мощность  $P_0$ , чем к GaAs-транзистору.

КПД транзистора, определяемый выражением (1), наиболее высок при работе транзистора в нелинейном режиме с отсечкой выходного тока и малых углах отсечки (класс С). Для его расчета используется формула

$$\eta = 0,5 I_1/I_{C0} U_1/U_{пит} \cos\varphi, \quad (2)$$

где  $I_1$ ,  $U_1$  – амплитуды колебаний первой гармоники;  $\varphi$  – фазовый угол между колебаниями тока и напряжения стока; отношения  $I_1/I_{C0}$  и  $U_1/U_0$  зависят от вида зависимостей  $i_c(t)$  и  $u_c(t)$ .

Для достижения наибольших значений КПД усилителей составлены и оптимизированы электрические схемы усилителей мощности при частоте колебаний 3 ГГц с использованием компьютерных моделей GaAs- и GaN-транзисторов.

Усилители мощности обычно оценивают КПД добавленной мощности PAE (Power Added Efficiency):

$$PAE = (P_1 - P_{вх}) / P_0,$$

где  $P_{вх}$  – входная мощность усилителя.

На рис. 5 показаны зависимости PAE от частоты колебаний для двух типов транзисторов. Максимальный PAE усилителя на основе GaAs-транзисторов составляет ~58 % на частоте 3 ГГц при  $K_P > 6$  дБ, а усилителя на основе GaN-транзисторов ~65 % при  $K_P > 7$  дБ, мощность входных колебаний 10 дБм, напряжение питания 3 В. Напряженность электрического поля пробоя в GaN-транзисторах в несколько раз выше, чем в GaAs-транзисторе, поэтому для увеличения КПД применялось повышенное напряжение питания. На рис.5 показано, что PAE усилителей на основе GaN-транзисторов с напряжением питания  $U_{пит} = 7$  В составил 73 %. Это возрастание обусловлено тем, что при увеличенном напряжении питания удалось добиться большего отношения  $I_1/I_0$  (2), которое возросло от 1,4 до 1,7 при изменении  $U_{пит}$  от 3 до 7 В.

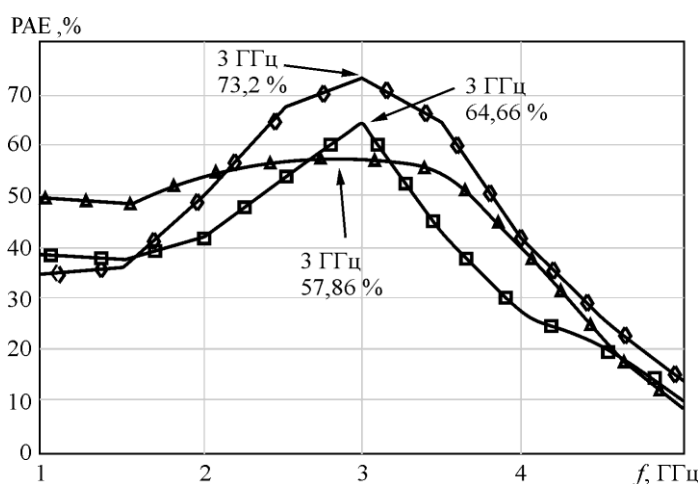


Рис.5. Зависимости КПД добавленной мощности усилителей от частоты: Δ – GaAs-транзистор; □ – GaN-транзистор; ◇ – GaN-транзистор с увеличенным напряжением питания

Fig.5. Frequency dependence of amplifiers PAE: Δ – GaAs transistor; □ – GaN transistor; ◇ – GaN transistor with increased supply voltage

**Закключение.** Изготовленные GaAs- и GaN-транзисторы имеют схожие частотные и энергетические свойства. Граничные частоты усиления мощности для обоих типов транзисторов превышают 80 ГГц. Моделирование усилителей показало некоторое преимущество GaN-транзисторов: в линейных усилителях на их основе получено усиление на частоте 73 ГГц, а на основе GaAs-транзисторов – 64 ГГц; в нелинейных усилителях на основе GaN-транзисторов достигнут КПД добавленной мощности 73 % (см. таблицу).

В таблице приведены основные параметры GaAs- и GaN-транзисторов, а также усилителей на их основе. Видно, что КПД преобразования мощности постоянного электрического поля в мощность электромагнитных колебаний превысил 80 % при использовании в усилителе GaN-транзистора.

**Параметры транзисторов и усилителей на их основе  
Parameters of transistors and amplifiers based on them**

Параметр	GaAs	GaN
Средняя крутизна переходной характеристики, мА/В·мм	270	250
Наибольший ток стока, мА/мм, при $U_{пит} = 3$ В	330	350
Максимальная входная емкость, пФ	0,02	0,02
Граничная частота по мощности, ГГц	82	82
Наибольшая частота линейного усилителя, ГГц ( $K_p > 6$ дБ)	64	73
Выходная мощность, мВт/мм, при $U_{пит} = 3$ В на частоте 3 ГГц	250	340
Наибольший КПД транзистора, %, при $f = 3$ ГГц	73	76; 83*
РАЕ усилителя, %, при $f = 3$ ГГц	57	65; 73*

\* При  $U_{пит} = 7$  В.

Напряжение питания при измерениях, как правило, не превышало 4 В во избежание пробоя и сгорания транзисторов. Однако моделирование показало потенциальные возможности возрастания выходной мощности и КПД усилителей на основе GaN-транзисторов при увеличении питающего напряжения.

Результаты сравнения характеристик и параметров начальных структур транзисторов совпадают с результатами, полученными в работах [5–8].

**Литература**

1. Мощные AlGaIn/GaN HEMT X- и Ku-диапазонов / *Н.А. Торхов, В.Г. Божков, И.М. Добуш и др.* // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 1 (35). – С. 52–55.
2. Усилитель мощности X-диапазона с высоким КПД на основе технологии AlGaIn/GaN / *П.А. Туральчук, В.В. Кириллов, П.Э. Осипов и др.* // Письма в ЖТФ. – 2017. – Т. 43. – Вып. 17. – С. 20–26.
3. *Сечи Ф., Буджатти М.* Мощные твердотельные СВЧ-усилители. – М.: Техносфера, 2016. – 404 с.
4. MWO/AO Element Catalog > Nonlinear > FET. – 2010.
5. *Pavlidis D., Valizadeh P., Hsu S.H.* AlGaIn/GaN high electron mobility transistor (HEMT) reliability // 13<sup>th</sup> GaAs Symposium. – Paris, 2005. – P. 265–268.
6. Innovative solid state amplifier technology in the 21st century. By CPI SMP Satcom Products Group. – URL: [www.cpii.com/satcom/](http://www.cpii.com/satcom/) (дата обращения: 10.06.2018).
7. *Browne J.* What's the difference between GaN and GaAs? // *Microwaves & RF.* – 2016. – No. 7. – P. 54–56.
8. *Колотун О.* Усилители СВЧ на основе технологий GaN и GaAs, эволюция технологии Diamond FETs // *Chip News.* – 2013. – No. 2 (122). – URL: [www.chipnews.com.ua](http://www.chipnews.com.ua) (дата обращения: 10.06.2018).

Поступила в редакцию 18.06.2018 г.; после доработки 12.07.2018 г.; принята к публикации 27.11.2018 г.

**Гуминов Николай Владимирович** – магистр техники и технологии, старший преподаватель кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), [gummi.qdn@gmail.com](mailto:gummi.qdn@gmail.com)

**Мьо Мин Тхант** – аспирант Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), [myominthant5129@gmail.com](mailto:myominthant5129@gmail.com)

**Романюк Виталий Александрович** – кандидат технических наук, доцент Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского уни-

верситета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1),  
v.a.romanjuk@gmail.com

**Шомахмадов Далер Парвизович** – магистрант кафедры квантовой физики и нано-электроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), dlr\_2002@live.ru

### **References**

1. Torkhov N.A., Bozhkov V.G., Dobush I.M. et al. Powerful AlGa<sub>N</sub> / GaN HEMT X- and Ku-bands. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radio-electronics*, 2015, no. 1 (35), pp. 52–55. (in Russian).
2. Turalchuk P.A., Kirillov V.V., Osipov P.E., Vendik I.B., Vendick O.G., Parnes M.D. X-band power amplifier with high efficiency based on AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> technology. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Letters in Journal of Technical Physics*, 2017, vol. 43, no. 17, pp. 20–26. (in Russian).
3. Sechi F., Bujatti M. *Powerful solid-state microwave amplifiers*. Moscow, Technosphere Publ., 2016. (in Russian).
4. MWO/AO Element Catalog > Nonlinear > FET. 2010.
5. Pavlidis D., Valizadeh P., Hsu S.H. AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> High Electron Mobility Transistor (HEMT) Reliability. *13<sup>th</sup> GaAs Symposium*, Paris, 2005, pp. 265–268.
6. *Innovative Solid State Amplifier Technology in the 21<sup>st</sup> century*. By CPI SMP Satcom Products Group. Available at: [www.cpii.com/satcom/](http://www.cpii.com/satcom/) (accessed: 10.06.2018).
7. Browne J. What's the Difference Between Ga<sub>N</sub> and GaAs? *Microwaves & RF*, 2016, no. 07, pp. 54–56.
8. Oleg Kolotun. Microwave amplifiers based on Ga<sub>N</sub> and GaAs technology, evolution of Diamond FETs technology. *CHIP NEWS Ukraine*, 2013, no. 2 (122). Available at: [www.chipnews.com.ua](http://www.chipnews.com.ua) (accessed: 10.06.2018).

Received 18.06.2018; Revised 12.07.2018; Accepted 27.11.2018.

### **Information about the authors:**

**Nikolay V. Guminov** – Master of Engineering and Technology, Senior Lecturer of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gummi.qdn@gmail.com

**Myo Min Thant** – PhD student of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), myominthant5129@gmail.com

**Vitaly A. Romanjuk** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), v.a.romanjuk@gmail.com

**Daler P. Shomahmadov** – Master Degree Student of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dlr\_2002@live.ru