



НИТРИДНЫЕ ПРИБОРЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

П.Мальцев*, д.т.н., Ю.Федоров*, Р.Галиев*,
С.Михайлович*, Д.Гнатюк*, к.т.н. /
iuhfseras2010@yandex.ru

Анализ современного состояния и основных направлений развития технологии создания миллиметровых СВЧ-приборов на широкозонных гетероструктурах (Al,Ga,In)N/GaN показывает, что достигнутый в Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники (ИСВЧПЭ) РАН технологический уровень находится в хорошем соответствии с общемировыми тенденциями и достижениями. Это создает предпосылки для создания и освоения промышленного производства в России комплектов монолитных интегральных схем (МИС) для приемопередающих систем Ка-, В- и W-диапазонов частот, превосходящих по своим параметрам СВЧ-приборы на арсенидных гетероструктурах.

Создание радиационностойкой элементной базы для обеспечения работоспособности твердотельных электронных систем в экстремальных условиях околоземного пространства, зоны воздействия ионизирующих излучений или при поражающем действии ядерного взрыва, то есть в специальной аппаратуре для военных и гражданских применений, является чрезвычайно актуальной задачей. Если потенциал развития приборов на основе арсенидных гетероструктур уже практически полностью исчерпан, то возможности HEMT (High Electron Mobility Transistor – транзисторы с высокой подвижностью электронов) на основе широкозонных гетероструктур AlGaN/GaN убедительно продемонстрированы в последние годы при создании усилителей мощности (УМ) L-, S-, C- и X-диапазонов [1].

Повышение выходной мощности УМ в низкочастотных L- и S-диапазонах в основном связано с увеличением пробивных напряжений ($U_{\text{пр}}$) затворов транзисторов при введении одного или нескольких дополнительных "field-plated" электродов, которые расположены в пространстве между затвором и стоком транзисторов через слои изолятора и способствуют уменьшению пиковых напряженностей

* Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники (ИСВЧПЭ) РАН

MILLIMETRE RANGE NITRIDE DEVICES

P.Maltsev*, D.Sc., Yu. Fedorov*, R.Galiev*,
S.Mikhailovich*, D.Gnatyuk*, Ph.D. /
iuhfseras2010@yandex.ru

An assessment of the current status and key trends in the millimetre microwave device development technology on wide-band heterostructures (Al, Ga, In)N/GaN shows that the technology level achieved in the Institute of Ultra-High-Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS) is quite in line with the global trends and developments. This creates prerequisites for the establishment and development of the industrial production of monolithic integrated circuits (MIC) in Russia for the Ka-, V- and W- band frequency receive/transmit systems exceeding by their parameters the microwave devices on arsenide heterostructures.

It is quite a relevant objective to create a radiation-proof element base for ensuring efficiency of the solid-state electronic systems in extreme conditions of the near-earth space, the ionizing radiation impact area or the damaging effects of a nuclear explosion; that is in the special equipment for military and civilian applications. If the potential development of devices based on arsenide heterostructures has almost completely been exhausted, the HEMT (High Electron Mobility Transistor) capabilities based on the wide-band heterostructures AlGaN/GaN have been convincingly demonstrated in recent years in the creation of L-, S-, C- and X-band power amplifiers (PA) [1].

An increase in power output from the PA in the low-frequency L- and S- bands is mainly due to an increase in the breakdown voltage (Ubreaokdown) of transistor gates in the introduction of one or more additional field-plated electrodes, which are located in the space between the gate and drain of the transistors through the insulator layers and contribute to the reduction of peak field strength between the gate and drain [2, 3]. As early as 2006 in using HEMT on SiC substrates with one field-plated electrode obtained was the saturated

* Institute of Ultra-High-Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences



поля между затвором и стоком [2, 3]. Так, еще в 2006 году при использовании HEMT на подложках SiC с одним "field-plated" электродом была получена насыщенная выходная мощность гибридного УМ до 371 Вт на частоте 2,14 ГГц в непрерывном режиме с КПД 24% при пробивных напряжениях затворов около 200 В [4]. Дальнейшее развитие УМ в данных диапазонах в части повышения их эффективности и снижения стоимости было связано с использованием ключевых режимов работы транзисторов, для чего потребовалось дальнейшее повышение импульсных пробивных напряжений сток-затвор в закрытом состоянии и переход к кремниевым подложкам (уже получены $U_{пр}=1590$ В [5] и даже более 2000 В [6] при удалении подложки Si). Достигнутые результаты позволили создать конкурентоспособные ключевые транзисторы на нитридных гетероструктурах для силовой электроники [7], массовый выпуск которых планируется начать в ближайшие годы [8]. Кроме того, уже освоено производство высокоеффективных ключевых УМ диапазона частот до 2,5 ГГц (RFMD [9]) с КПД до 70% при выходной мощности до 25 Вт. К сожалению, данная технология применима только в низкочастотных диапазонах, поскольку "field-plated" электроды многократно увеличивают емкости затворов C_{gs} и C_{gd} , что резко снижает частотные параметры транзисторов (в лучшем случае $f_T=10\text{-}20$ ГГц, а $f_{MAX}=40\text{-}50$ ГГц [10]). По этой причине, в частности, МИС УМ С- и Х-диапазонов частот имеют более скромные параметры: получены выходные мощности 40 Вт (60% PAE) и 58 Вт (38% PAE), соответственно [11, 12].

В последние годы приборы на нитридных гетероструктурах получили новый мощный импульс для применения в более высокочастотных Ка-, В- и W-диапазонах в связи с развитием сверхширокополосных телекоммуникационных систем нового поколения, высокоточных систем вооружений, систем межспутниковой связи, автомобильных радаров, антитеррористических систем и др. Это стимулировало широкий фронт исследовательских работ по освоению миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов на нитридных приборах во всех технологически развитых странах мира [13, 14].

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ НИТРИДНЫХ ПРИБОРОВ мм-ДИАПАЗОНА ЗА РУБЕЖОМ

Общая идеология развития нитридных приборов для мм-диапазона за рубежом показана на рис.1.

Совершенствование нитридных гетероструктур для повышения рабочих частот приборов в основном заключалось в уменьшении толщины верхнего

output power of a hybrid-type PA up to 371 W at a frequency of 2.14 GHz in a continuous mode with an efficiency of 24% at the gate breakdown voltage of about 200 V [4]. Further PA development in the ranges in terms of enhancing their efficiency and cost reduction was due to the use of the key operational modes of transistors, which required a further increase in impulse breakdown voltage drain-gate in the closed position and transition to the silicon substrate ($U_{breakdown} = 1590$ [5] already received and even more than 2000 [6] by removing the substrate Si). The achieved results have contributed to creation of key competitive transistors on nitride heterostructures for power electronics [7]; mass production is planned to start in the next few years [8]. Besides, already mastered the production of high-performance key PA of the frequency range up to 2.5 GHz (RFMD [9]) with an efficiency of up to 70% at an output power up to 25 W. Unfortunately, this technology is applicable only in the lower frequency bands as the field-plated electrodes multiply the gate capacitance C_{gs} and C_{gd} thereby drastically reducing the frequency parameters of the transistors (in the best case, $f_T = 10\text{-}20$ GHz and $f_{MAX} = 40\text{-}50$ GHz [10]). For that reason, in particular, IIA PA of C-and X-band frequencies have more modest parameters, the output power of 40 W (60% PAE) and 58 W (38% PAE) respectively [11, 12] are received.

In recent years, the nitride heterostructure instruments have obtained a new impetus for the use in higher-frequency Ka-, V- and W-bands due to the development of ultra-wideband communication systems of the new generation, high-precision weapons systems, inter-satellite communications systems, automotive radar systems, anti-terrorism systems etc. This has promoted a wide scope of research and development activities dedicated to the millimetre and sub-millimetre ranges on nitride devices in all technologically advanced countries [13, 14].

DEVELOPMENT OF THE MM-RANGE NITRIDE DEVICE TECHNOLOGY ABROAD

The general ideology of development nitride devices for mm-range abroad is shown in fig.1.

Improving nitride heterostructures to increase the operating frequency of devices mainly consisted in reducing the thickness of the upper barrier layer t_B to preserve the aspect ratio of $L_G/t_B > 10\div 15$ [15] to prevent short-channel effects with

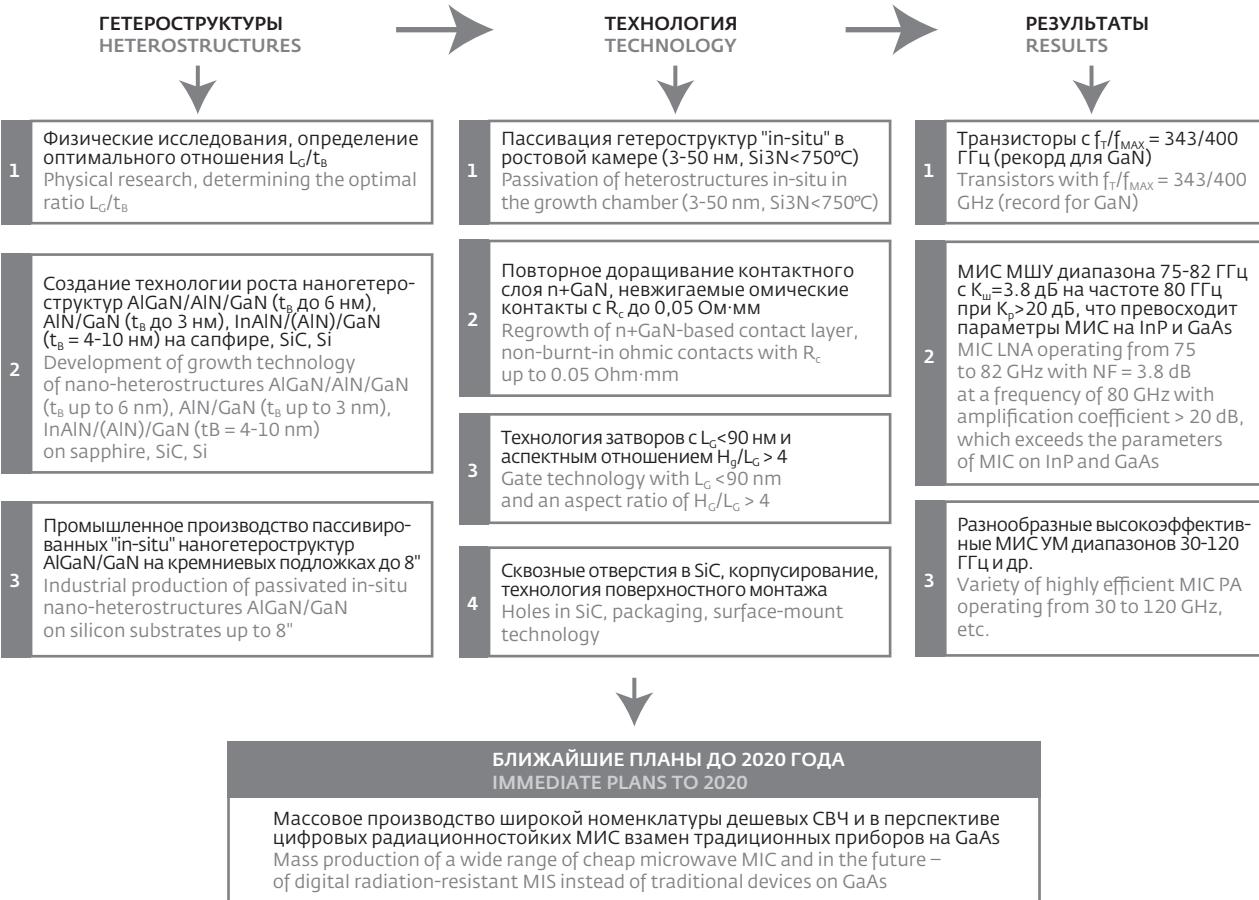


Рис.1. Основные направления развития работ по нитридной тематике за рубежом в 2005-2012 гг. и планы на перспективу

Fig.1. Main directions in the development of the topics nitrides abroad in 2005-2012 and plans for the future

барьерного слоя t_B с целью сохранения величины аспектного отношения $L_G/t_B > 10 \div 15$ [15] для предотвращения развития короткоканальных эффектов при уменьшении длины затвора L_G . Поддержание величины L_G/t_B на как можно более высоком уровне крайне важно и для сохранения высоких пробивных напряжений, которые, как оказалось [15], определяются не толщиной гетероструктуры, а аспектным соотношением. Осознание данного факта, который был установлен эмпирически на основе обработки экспериментальных результатов многочисленных работ, привело к разработке новых типов более тонких и эффективных широкозонных гетероструктур: от AlGaN/AlN/GaN (t_B до 7 нм) к AlN/GaN (t_B до 3,5 нм) [16] и InAlN/(AlN)/GaN (t_B до 4,7 нм), потенциально обладающих наиболее высокими параметрами двумерного электронного газа [17, 18]. Проблемы создания таких гетероструктур и полученные

decreasing gate length L_G . It is quite important to support the values L_G/t_B at the highest possible level in order to maintain high breakdown voltage, which proved [15] to be determined by not the heterostructure thickness but the aspect ratio. Awareness of this fact, which was established empirically based on the processing of the experimental results of numerous works, led to the development of new types of more subtle and effective wideband heterostructures from AlGaN/AlN/GaN(t_B to 7 nm) to AlN/GaN (t_B to 3.5 nm) [16] and InAlN/(AlN)/GaN (t_B to 4.7 nm) having the highest potential parameters of the two-dimensional electron gas [17, 18]. The problems of creating such heterostructures and the results are provided in numerous publications partly mentioned in the reviews [13, 14]. It should be noted that to maintain a high concentration



результаты отражены в многочисленных публикациях, частично упомянутых в обзорах [13, 14]. Важно отметить, что для сохранения высокой концентрации электронов двумерного газа при уменьшении t_B пришлось увеличить содержание Al в барьере слое до следующих величин: 60% в AlGaN/AlN/GaN, 100% в AlN/GaN и 83% в InGaN/(AlN)/GaN.

Высокое содержание Al в барьере слое первоначально вызвало серьезные проблемы с изготовлением омических контактов [19], для решения которых были предложены обращенные "N-face" гетероструктуры [20], активно развивающиеся Калифорнийским университетом. На последних было получено сопротивление вжигаемых омических контактов до 0,1 Ом·мм [21]. Однако и для обычных "Ga-face" гетероструктур AlGaN/GaN также было найдено решение [22]: частичное вытравливание барьера слоя AlN в плазме BCl₃ для улучшения омического сопротивления вжигаемых контактов до 0,59 Ом·мм, что характерно для традиционных "толстых" HEMT-гетероструктур, содержащих 27-31% Al в барьере слое. В дальнейшем развитие этой идеи привело к созданию невжигаемых омических контактов для всех типов гетероструктур. Эта технология заключается в полном вытравливании Al-содержащего барьера слоя до канала GaN для "Ga-face" гетероструктур или верхнего нелегированного GaN до барьера AlGaN для "N-face" гетероструктур, с последующим выращиванием через маску SiO₂ сильно легированного контактного слоя n+GaN с концентрацией кремния (6-8)·10²⁰ см⁻³. Затем выполняются "взрывное" удаление SiO₂ в растворе HF в ультразвуковой ванне и напыление металла омических контактов составов Cr/Pt/Au [23] или Ti/Pt/Au [24], оказавшихся наиболее стабильными для всех типов гетероструктур при температурах до 400-450°C. Полученные результаты для различных гетероструктур суммированы в презентации университета Notre Dame [25]. Были получены сопротивления невжигаемых омических контактов 0,27 Ом·мм для "Ga-face" HEMT [25] и до 0,09 Ом·мм для "N-face" HEMT [26]. Следует подчеркнуть, что разработка технологии невжигаемых омических контактов создала условия для изготовления HEMT по самосовмещенной технологии, минимизирующей сопротивление канала транзистора. Так, в работе [27], являющейся квинтэссенцией всех перечисленных выше технологических достижений, получено рекордно малое сопротивление транзистора в открытом состоянии 0,29 Ом·мм, сопротивление омических контактов 0,025 Ом·мм, крутизна характеристики $G_m=1105$ мСм/мм, начальный ток $I_{dss0}=2,77$ А/мм, частота отсечки тока $f_T=155$ ГГц.

of two dimensional electron gas with decreasing t_B it was necessary to increase the Al content in the barrier layer to the following values, 60% in AlGaN/AlN/GaN, 100% in AlN/GaN and 83% in InGaN/(AlN)/GaN.

A high Al content in the barrier layer initially caused serious problems with the production of ohmic contacts [19], for which solving there were proposed the inverted N-face heterostructures [20] vigorously developed by the University of California. At the latter the resistance of burnt-in ohmic contacts to 0.1 Ohm·mm [21] was obtained. However, a solution was also found for the usual Ga-face heterostructures AlGaN/GaN [22], partial etching the AlN barrier layer in the BCl₃ plasma to improve the burnt-in ohmic contacts to 0.59 Ohm·mm, which is typical for traditional "thick" HEMT heterostructures containing 27-31% Al in the barrier layer. Further development of this idea led to the creation of non-burnt-in ohmic contacts for all types of heterostructures. This technology represents full etching the Al-containing barrier layer to the GaN channel for Ga-face heterostructures or upper undoped GaN to the AlGaN barrier for the N-face heterostructures followed by cultivation through the SiO₂ mask strongly doped contact layer with n+GaN with the silicon concentration (6-8) 10²⁰ cm⁻³. Then the 'explosive' removal of SiO₂ in HF solution in an ultrasonic bath and powder metal ohmic contacts of the compositions Cr/Pt/Au [23] or Ti/Pt/Au [24] which turned out to be most stable for all types of heterostructures at the temperatures up to 400-450°C. The results obtained for different heterostructures are summarised in the presentation of the University of Notre Dame [25]. There were obtained the resistances of non-burnt-in resistance ohmic contacts 0.27 Ohm mm for Ga-face HEMT [25] and to 0.09 Ohm·mm for N-face HEMT [26]. It should be emphasized that the development of the non-burnt-in ohmic contact technology provided conditions for the production of HEMT according to the self-combined technology minimizing the resistance of the transistor channel. For example, in the work [27], which is the quintessence of all the above technological advances, the record low resistance of the transistor in the open position 0.29 Ohm mm was obtained, the resistance of ohmic contacts 0.025 Ohm·mm, transconductance $G_m = 1105$ mCm/mm, the initial current $I_{dss0} = 2.77$ A/mm, the current cut-off frequency $f_T = 155$ GHz.



В последние годы совершенствовалась технология пассивации нитридных приборов с целью устранения ловушек на гетерограницах, в частности пассивация "in-situ" в камере роста стала уже промышленной технологией при производстве гетероструктур.

В результате технологического прорыва последних лет зарубежными исследователями достигнуты частотные параметры нитридных HEMT, близкие к рекордным параметрам арсенидных rHEMT и mHEMT на подложках GaAs и InP. Так, в 2008 году была получена величина $f_T = 190$ ГГц [28], затем в 2010 году при длине затвора $L_G = 40$ нм получены значения $f_T = 220$ ГГц и $f_{MAX} = 400$ ГГц [29], которые были перекрыты значением $f_T = 343$ ГГц [30] уже в 2011 году.

Нитридные наногетероструктуры явились основой для разработки и создания высокоеффективных радиационностойких МИС УМ Ка-диапазона, в 10-15 раз превосходящих МИС на основе rHEMT GaAs по массогабаритным параметрам (UMS, 2012 год). Разрабатываются также приемо-передающие модули АФАР для радиолокаторов диапазона 94 ГГц (QuinStar Technology совместно с HRL) с выходной мощностью до 5 Вт и удельной выходной мощностью более 2 Вт/мм.

Ведущими зарубежными производителями (Northrop Grumman, Cree, TriQuint, Fujitsu и др.) высокими темпами совершенствуется технология и осваивается выпуск широкой номенклатуры МИС на нитридных гетероструктурах с рабочими частотами до 100 ГГц и выше, причем не только УМ. Например, разработана МИС малошумящего усилителя диапазона 75-82 ГГц с $K_{ш} = 3,8$ дБ на частоте 80 ГГц при $K_p > 20$ дБ [31], что превосходит параметры лучших МИС на GaAs и InP.

Освоение промышленного производства нитридных гетероструктур на кремниевых подложках диаметром до 8" (NITRONEX Corp, США [32]), создало условия для массового производства дешевых МИС, которые могут полностью вытеснить ВЧ- и СВЧ-приборы на традиционных арсенидных гетероструктурах и кремнии.

РАЗРАБОТКИ НИТРИДНЫХ ПРИБОРОВ ММ-ДИАПАЗОНА В ИСВЧПЭ РАН

На основании анализа современного состояния зарубежных разработок в области широкозонных наногетероструктур AlGaN/AlN/GaN в СВЧ- и КВЧ-диапазонах и опыта работ ИСВЧПЭ РАН с гетероструктурами AlGaN/GaN, полученном в ходе выполнения ряда НИР и НИОКР, был сделан вывод о возможности и необходимости переноса акцента исследований на создание технологии проектирования и изготовления широкой номенклатуры

In recent years, the nitride device passivation technology has developed in order to eliminate traps at heterointerfaces, in particular, in-situ passivation in the growth chamber has become an industrial technology in the production of heterostructures.

As a result of technological breakthroughs in recent years by foreign researchers achieved were the frequency parameters of the nitride HEMT close to the record parameters of the arsenide mNEMT and rNEMT on the GaAs and InP substrates. For example, in 2008 the value $f_T = 190$ GHz [28] was obtained, and then in 2010 with a gate length of $L_G = 40$ nm the values $f_T = 220$ GHz and $f_{MAX} = 400$ GHz [29] were derived, which were blocked by the value of $f_T = 343$ GHz [30] as early as 2011.

The nitride nanoheterostructures provided the basis for the development and creation of highly radiation-resistant MIC PA Ka-band of 10-15 times higher than the MIC based on GaAs rNEMT in terms of weight and size parameters (UMS, 2012). The transceiver AESA modules for the radar range of 94 GHz (QuinStar Technology together with HRL) with output power up to 5 W and a specific power output of more than 2 W/mm are also being developed.

The leading overseas manufacturers (Northrop Grumman, Cree, TriQuint, Fujitsu etc.) are rapidly improving the technology and developing a wide range of MIC on nitride heterostructures with the operating frequencies up to 100 GHz and above, and not only PA. For example, a MIC is designed for a low-noise amplifier with the range of 75-82 GHz with $NF = 3.8$ dB at 80 GHz with amplification coefficient > 20 dB [31], which exceeds the parameters of the best MIC on GaAs and InP.

The established industrial production of nitride heterostructures on silicon substrates with a diameter of up to 8" (NITRONEX Corp, USA [32]) provided the conditions for the mass production of cheap MIC, which can completely replace HF devices and microwave devices on the traditional arsenide and silicon heterostructures.

DEVELOPMENT OF MILLIMETRE RANGE NITRIDE DEVICES IN IUHFSE RAS

Based on the review of the existing international developments in the field of wide nanoheterostructures AlGaN/AlN/GaN in the microwave bands and EHF bands and work experience of IUHFSE RAS with the AlGaN/GaN heterostructures obtained during the execution of R&D, it was concluded that it was possible and



радиационностойких МИС для приемопередающих модулей мм-диапазона на базе широкозонных НЕМТ гетероструктур отечественных производителей ("Элма-Малахит", "Светлана-Рост", НИЦ "Курчатовский институт"). Имеющиеся разработки и направления исследований ИСВЧПЭ в целом показаны на рис.2. В данной статье мы не будем рассказывать о них подробно, рассмотрим только основные проблемы, способы их решения и достигнутые результаты.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР

В течение 3-4 лет нами было исследовано большое число нитридных гетероструктур AlGaN/GaN с толщинами барьера AlGaN от 28 до 33 нм (1-го типа), а также специально выращенных гетероструктур AlGaN/AlN/GaN с толщинами барьера слоя от 28 до 7 нм (2-го типа) на подложках из сапфира и SiC (см. таблицу). Результатом исследований стало определение критериев выбора оптимальных параметров гетероструктур для различных частотных диапазонов.

В частности, установлено, что для Ка-диапазона частот оптимальными являются гетероструктуры 2-го типа с $t_B=15$ нм, из которых на сегодняшний день наилучшими параметрами обладает V-1400 ("Элма-Малахит") на подложке SiC, обеспечивающая создание транзисторов с начальным током до 1,1 А/мм при максимальной крутизне до 380 мА/мм и напряжении отсечки -4 В. При этом полевые транзисторы с $L_G=180$ нм ($L_G/t_B=12$) имеют $f_T/f_{MAX}=62/130$ ГГц при отсутствии короткоканальных эффектов, что оптимально для УМ Ка-диапазона. В то же время транзисторы с $L_G=100$ нм ($L_G/t_B=8$) на этой же гетроструктуре имеют более высокие частоты $f_T/f_{MAX}=77/161$ ГГц, то есть могут быть использованы в более высокочастотных V- и Е-диапазонах, но из-за короткоканальных эффектов не являются оптимальными для этих частот.

Потенциально более высокочастотные гетероструктуры с меньшими толщинами $t_B=13$ нм и 11 нм производства "Светлана-Рост" пока имеют значительно меньшие начальные токи транзисторов (500 мА/мм и 300 мА/мм соответственно). Более успешными оказались работы по созданию тонких гетероструктур AlGaN/AlN/GaN (11 нм) и AlN/GaN (3,5 нм) на подложках из сапфира, выполняемые совместно с НИЦ "Курчатовский институт". Впервые в России получены транзисторы с начальными токами более 1 А/мм на гетероструктурах AlN/GaN/сапфир, создающие перспективы освоения W-диапазона частот.

Параметры отечественных гетероструктур и транзисторов с оптимальной длиной затворов на их основе (расчет)

Parameters of domestic heterostructures and transistors with a optimal gate length (calculation)

	t_B , нм (AlGaN+AIN) t_B , нм (AlGaN+AIN)	I_{dss0} , mA/mm I_{dss0} , mA/mm	f_T (max), ГГц (при $L_G/t_B=15$) f_T (max), GHz ($L_G/t_B=15$)	L_G (опт), нм (при $L_G/t_B=15$) L_G (opt), нм ($L_G/t_B=15$)
"Светлана-Рост", подложки: сапфир, SiC Svetlana-Rost, substrate: sapphire, SiC				
№992	27	1000-1200	36,5	405
№1120	13	500	76	195
№1124	11	300	90	165
"Элма-Малахит", подложки: SiC, Si Elma-Malachit, substrate: SiC, Si				
V-1285	25	1300-1450	40	375
V-1267, V-1269	19,5	1250-1350	50	292
V-1305, V1317	16	1000-1100	60	240
V-1400	15,3	1000-1100	65	230
V-1723 (Si)	25,7	В стадии исследо- ваний In the research phase	38	385
НИЦ "Курчатовский институт", подложка: сапфир Kurchatov Institute, substrate: sapphire				
26_4, 27_3	11 (AlGaN/AlN) + 30 (SiN)	> 1200	90	165
026_3, 027_4	3,5 (AlN) + 30 (SiN)	> 1000	300	48

necessary to put greater emphasis on developing a technology to ensure the design and manufacture of a wide range of radiation-proof MIC for millimetre range transceiver modules based on wide-range HEMT heterostructures of domestic producers (Elma-Malachit Co, Svetlana-Rost Co and Kurchatov Institute). The current R&D activities of IUHFSE RAS are generally shown in fig.2. In this article we will not talk about them in detail, we will consider only the basic problems, solutions and outputs.

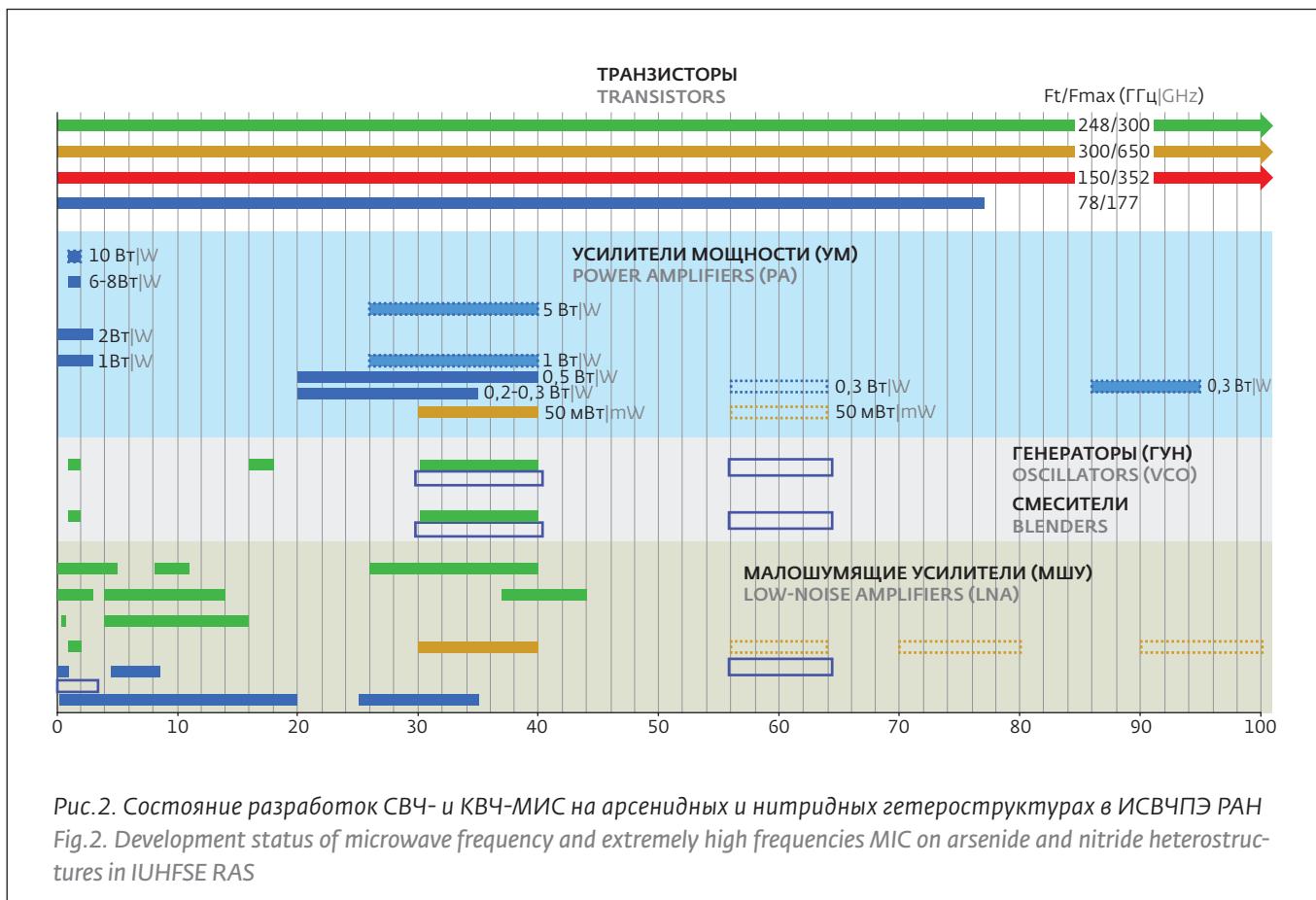


Рис.2. Состояние разработок СВЧ- и КВЧ-МИС на арсенидных и нитридных гетероструктурах в ИСВЧПЭ РАН
Fig.2. Development status of microwave frequency and extremely high frequencies MIC on arsenide and nitride heterostructures in IUHFE RAS

Начаты работы по созданию СВЧ-приборов на базе нитридных гетероструктур на кремниевых подложках ("Элма-Малахит"), что открывает пути к их у densification и массовому выпуску.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДОСТИЖЕНИЯ И РАЗРАБОТКИ

Главным результатом является создание воспроизводимой технологии разработки и изготовления транзисторов и МИС на нитридных гетероструктурах с заданными параметрами в диапазоне от постоянного тока до 40 ГГц. Ведутся работы по освоению диапазонов частот 56-64 ГГц и 92-96 ГГц, а также повышению выходной мощности УМ в Ка-диапазоне. Это потребовало решения следующих технологических проблем:

- разработки технологии пассивации гетероструктур непосредственно в ростовой камере "in-situ" для устранения "lagg"-эффектов и повышения концентрации двумерного электронного газа;
- совершенствования технологии изготовления омических контактов (в пределе – создание "невжигаемых" контактов), включающей операции плазмохимического вытравливания барьера слоя AlGaN или AlN с последующим эпитаксиальным дорожением контактного слоя n+GaN через маску SiO₂.

HETEROSTRUCTURE IMPROVEMENTS

For 3-4 years we have studied a large number of nitride heterostructures AlGaN/GaN with the AlGaN barrier thicknesses from 28 to 33 nm (Type 1) as well as the specially grown heterostructures AlGaN/AlN/GaN with a thickness of the barrier layer from 28 to 7 nm (Type 2) on the sapphire and SiC substrates (Table 1). The research resulted in the determined criteria for the selection of optimal heterostructure parameters for different frequency ranges.

In particular, it was found that for the Ka-frequency band optimal were the heterostructures of Type 2 with t_B = 15 nm, of which by now V-1400 has shown the best parameters (Elma-Malachit) on the SiC substrate providing the creation of transistors with the initial current up to 1.1 A/mm at a maximum slope of up to 380 mA/mm and cutoff voltage 4 V. The field transistors with L_G= 180 nm (L_G/t_B=12) have f_T/f_{MAX}=62/130 GHz with the absence of short-channel effects being optimal for the Ka-band PA. At the same time, transistors with L_G=100 nm (L_G/t_B=8) on the same heterostructure have higher frequencies f_T/f_{MAX}=77/161 GHz meaning that they can be used in



Решение данных задач особенно актуально для тонких гетероструктур с повышенной мольной долей Al в барьере слое для W-диапазона частот и выше. Работы ведутся совместно с НИЦ "Курчатовский институт". Впервые в России получены сопротивления невжигаемых омических контактов до 0,11 Ом/мм на гетероструктурах, приведенных в таблице, что соответствует лучшим мировым образцам. Данные результаты были представлены на 9-й Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы" в 2013 году.

Следующий комплекс технологических проблем связан с переходом от копланарной топологии к микрополосковой, предполагающей наличие "заземляющей плоскости", на которую должны быть выведены истоки транзисторов и "земли" элементов МИС через металлизированные отверстия. Следует отметить, что это является ключевым условием для создания квадратурных смесителей и генераторов, управляемых напряжением, для приемо-передающих модулей мм-диапазона на нитридных гетероструктурах, а также повышения выходной мощности МИС УМ. По аналогии с арсенидной технологией, данная задача решалась за рубежом путем "сверления" сквозных отверстий с обратной стороны утоненной

a higher V- and E-band but are not optimal for those frequencies due to the short-channel effects.

The heterostructures with potentially higher frequencies with lower thicknesses $t_B = 13$ nm and 11 nm made by Svetlana-Rost Co yet have much lower initial currents of transistors (500 mA/mm and 300 mA/mm respectively). More successful was the work on the creation of thin heterostructures AlGaN/AlN/GaN (11 nm) and AlN/GaN (3.5 nm) on sapphire substrates performed jointly with Kurchatov Institute. For the first time in Russia obtained transistors with initial currents exceeding 1 A/mm on the AlN/GaN/Sapphire heterostructures to ensure prospective development of the W-band frequencies.

The development of microwave devices based on the nitride heterostructures on silicon substrates (Elma-Malachit Co) has started to ensure cheaper output and mass production.

TECHNOLOGY ADVANCES AND DEVELOPMENTS

The key output is to create a reproducible technology to develop and manufacture transistors and MIS on nitride heterostructures with set parameters in the range from DC to 40 GHz. The frequency bands 56-64 GHz and 92-96 GHz are being developed, and

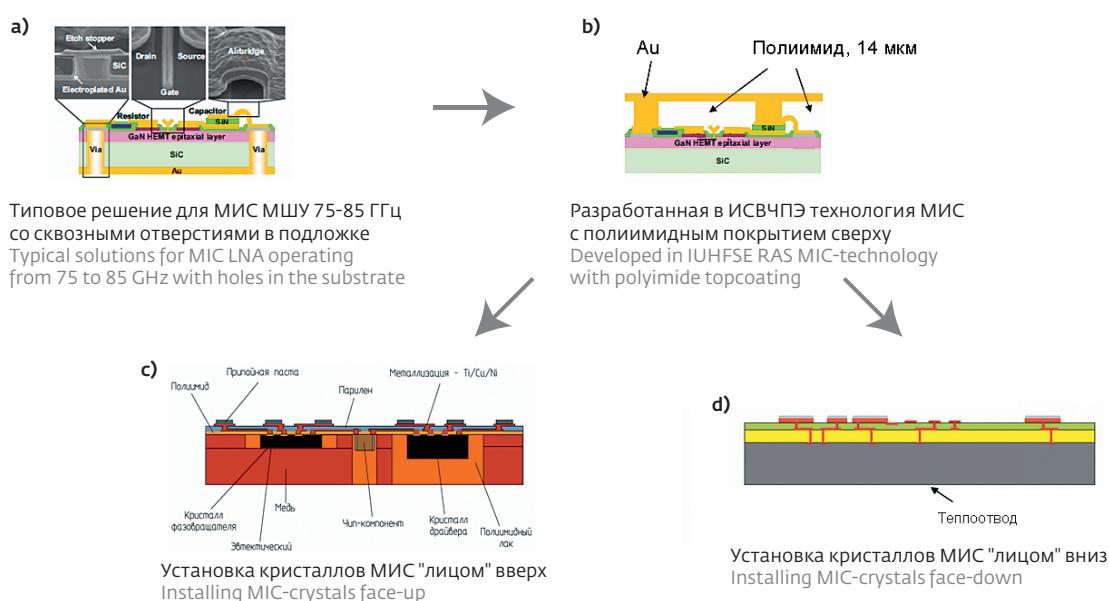


Рис.3. Использование полиимида для формирования "заземляющей плоскости" сверху, разводки СВЧ-полосков и сборки СВЧ-модулей по технологии "Радуга"

Fig.3. Using of polyimide to form a "ground plane" from above, microwave wiring strips and to assembly microwave modules by technology of Raduga Co



подложки (рис.3а), что имеет следующие серьезные недостатки:

- невозможность "сверления" отверстий в подложках из сапфира, низкая скорость плазмо-химического травления подложек из SiC (не более 1 мкм/мин), еще более низкая скорость травления буферного слоя AlGaN/GaN;
- необходимость прецизионного однородного утонения подложек для обеспечения требуемых СВЧ-параметров микрополосков и однородного вытравления отверстий, что отрицательно сказывается на производительности технологических процессов и выходе годных МИС с пластины.

Частично решение данных проблем может быть облегчено при переходе к гетероструктурам на кремниевых подложках, создавая дополнительный стимул к освоению их производства. Однако мы считаем, что более перспективным решением является создание "заземляющей плоскости" над лицевой поверхностью пластины с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ-элементами с помощью, например, нанесения полиимида покрытия (рис.3б). Такое решение очень хорошо согласуется с разработанной в НПП "Радуга" технологией поверхностного монтажа кристаллов при сборке СВЧ модулей (рис.3с,д) и позволит облегчить и удешевить промышленное производство малогабаритных многофункциональных СВЧ-модулей для приемопередающих систем мм-диапазона на нитридных гетероструктурах.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКТОВ МИС

Созданная технология являлась основой для разработки комплектов МИС на нитридных гетероструктурах для приемопередающих СВЧ-устройств взамен традиционно используемых МИС на арсенидных гетероструктурах. Состояние работ в ИСВЧПЭ РАН в данной области проиллюстрировано на рис.2, где показаны уже законченные (сплошные линии) или находящиеся в различных стадиях разработки (пунктирные линии) МИС. Подробное описание их параметров выходит за рамки данной статьи. Однако, некоторые выводы могут быть сделаны из рис.4, где показаны шумовые и усиительные параметры некоторых МИС на арсенидных и нитридных гетероструктурах в диапазоне частот до 40 ГГц, разработанных в ИСВЧПЭ РАН, а также за рубежом. Как видно, МИС МШУ на нитридных гетероструктурах вполне конкурентны с МИС на основе рНЕМТ на GaAs. Некоторый проигрыш по шумовым параметрам, мы считаем, является следствием еще имеющегося несовершенства гетероструктур и технологии изготовления нитридных МИС. Отметим, что здесь приведены параметры нитридных МИС, изготовленных

ан increase in the power output of PA in the Ka-band is going to be achieved. It required to meet the technological challenges as follows:

- development of the heterostructure passivation technology directly in the growth chamber 'in-situ' to eliminate the lagg effects and increase concentration of the two-dimensional electron gas;
- improving the ohmic contact production technology (within the limit, the creation of non-burnt-in contacts) including the operation of plasma chemical etching of the barrier layer AlGaN or AlN followed by epitaxial completing the contact layer n+GaN through the mask SiO₂.

It is especially important to solve the problems for thin heterostructures with a higher Al mole fraction in the barrier layer for the W-band of frequencies and above. Work is being done in cooperation with Kurchatov Institute. First obtained in Russia the resistance of non-burnt-in ohmic contacts to 0.11 Ohm/mm on the heterostructures shown in Table 1, which corresponds to the best world's standards. The results were presented at the 9th Russian Conference "Gallium Nitrides, Indium and Aluminum - Structures and Devices" in 2013.

Another set of technological challenges is associated with the transition from the coplanar topology to the microstrip topology implying the presence of 'ground plane', to which there should be brought out the sources of the transistors and 'ground' of the MIC elements through plated-through holes. It should be noted that this is the key to creating quadrature mixers and voltage-controlled generators for transmit-receive modules of the millimetre range on nitride heterostructures and increase in the output power of PA MIC. By analogy with the arsenide technology, this problem was solved abroad by 'drilling' through-holes on the back side of the thinned substrate (fig.3а), which demonstrates the following serious drawbacks:

- it is impossible to drill holes in the sapphire substrates, the lowest rate of plasma-chemical etching of a SiC substrate (less than 1 micron/min), the rate of etching the buffer layer AlGaN/GaN is even lower;
- there is a need for precise homogenous thinning of substrates to provide the required parameters of microwave microstrips and uniform hole etching, which has impact on the performance of technological processes and suitable MIC going from the plate.

Solving the problems can be somewhat facilitated by switching to heterostructures on silicon substrates thus creating an additional incentive to the

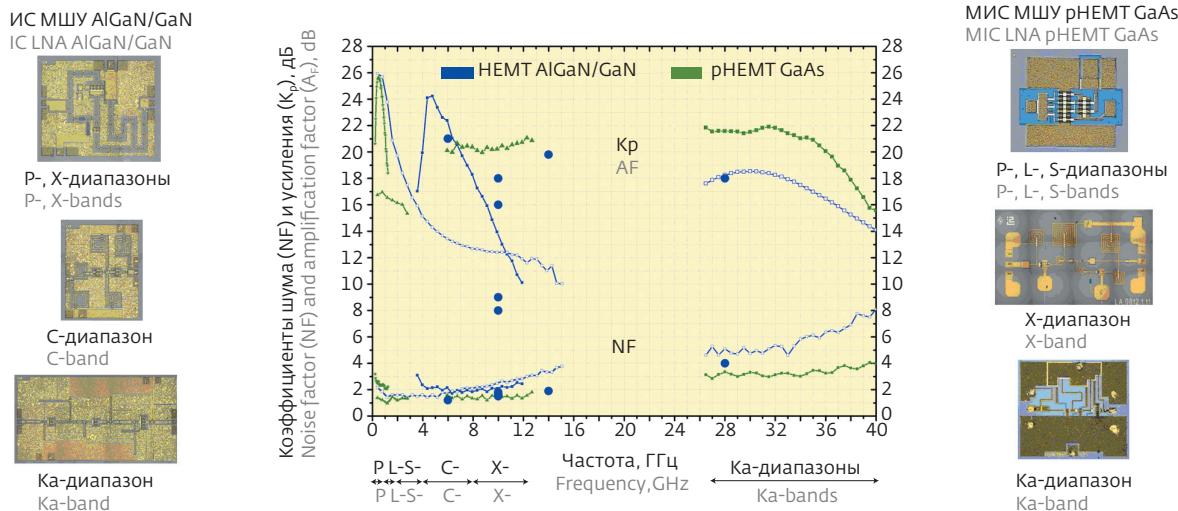


Рис.4. Сравнение шумовых и усиительных параметров МИС на арсенидных и нитридных гетероструктурах (точки - зарубежные результаты)

Fig.4. Comparison of noise and amplification for MIC on arsenide and nitride heterostructures (points - foreign results)

по копланарной технологии на гетроструктурах с толщиной барьера более 18 нм. Расчеты показывают, что дальнейшее снижение $K_{\text{ш}}$ транзисторов и МИС на нитридных гетероструктурах в мм-диапазоне возможно при использовании более тонких барьерных слоев в совокупности с технологией "невжигаемых" омических контактов и пассивации "in-situ". Приборы с использованием новых технологических решений в настоящее время находятся в стадии изготовления.

В качестве иллюстрации к уровню технологических достижений ИСВЧПЭ РАН в освоении мм-диапазона на нитридных гетероструктурах можно привести СВЧ-параметры разработанных впервые в России МИС УМ диапазона частот 85-95 ГГц. Измерения произведены на оборудовании НПП "Исток". Следует отметить хорошее "попадание" в заданный диапазон частот, что свидетельствует о соответствующем уровне проектирования МИС. В настоящее время продолжаются работы в данном направлении на более тонких гетероструктурах производства НИЦ "Курчатовский институт" [33].

ПЕРСПЕКТИВЫ

Результаты исследований по созданию технологии проектирования и изготовления МИС мм-диапазона на нитридных гетероструктурах в ИСВЧПЭ РАН показывают возможность создания в России комплектов МИС для приемопередающих систем, превосходящих по своим параметрам соответствующие приборы

development of that kind of production. However, we believe that a more promising solution would be to create a ground plane on the face of the plate with the ready-made active and passive microwave components, e.g. by applying polyimide coating (fig.3b). This solution is very well in line with the crystal surface mounting technology in the assembly of microwave modules of the Raduga Co research and production company (fig.3c, d), and it will make it easier and cheaper to arrange for the industrial production of small-sized multifunctional microwave modules for the millimetre range transceiver systems on nitride heterostructures.

DEVELOPMENT OF MIC SETS

The developed technology provided the basis for the creation of MIC sets of on nitride heterostructures for receipt and transmission microwave devices instead of arsenide heterostructures traditionally used by MIC. The status of activities in IUHFSE RAS in this area is illustrated in fig.2, which shows MIC already completed (solid lines) or MIC at various stages of development (dotted lines). A detailed description of the parameters is beyond the scope of this article. However, some conclusions can be drawn from fig.4, which shows the noise and amplifying parameters of some MIC on the arsenide and nitride heterostructures and in the frequency range up to 40 GHz developed by IUHFSE RAS as well as abroad.



на арсенидных гетероструктурах, что соответствует мировому уровню развития данного направления. Для успешного промышленного освоения и массового производства МИС для приемопередающих модулей различных диапазонов частот необходимо решать данную задачу в едином комплексе: гетероструктуры – технология изготовления МИС – технология сборки СВЧ-модулей. Только при таком подходе можно ожидать быстрого налаживания массового производства дешевых радиационностойких приемопередающих модулей различного назначения, так необходимых нашей стране.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 14.427.12.0001 от 30 сентября 2013 года по заказу Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gallium Nitride (GaN) Microwave Transistor Technology For Radar Applications. – Aethercomm, 2010.
2. **Huili Xing, Dora Y., Chini A., Heikman S., Keller S., Mishra U.K.** High Breakdown Voltage AlGaN-GaN HEMTs Achieved by Multiple Field Plates. – IEEE Electron Device Letters, April 2004, vol.25, no. 4, p.161-163.
3. **Suh C.S., Dora Y., Fichtenbaum N., McCarthy L., Keller S., Mishra U.K.** High-Breakdown Enhancement-Mode AlGaN/GaN HEMTs with Integrated Slant Field-Plate. – Overview, International Electron Devices Meeting, vol.1, iss.c, p.1-3, IEEE 2006.
4. **Nanishi Y., Miyamoto H., Suzuki A., Okumura H., Shibata N.** Development of AlGaN/GaN High Power and High Frequency HFETs under NEDO's Japanese National Project. – CS MANTECH Conference, p.45-48, 2006, Vancouver, Canada.
5. **Lee J.-G., Park B.-R., Lee H.-J., Lee M., An H., Seo K.-S., Cha H.-Y.** – High Breakdown Voltage (1590 V) AlGaN/GaN-on-Si HFETs with Optimized Dual Field Plates. – CS MANTECH Conference, April 23-26, 2012, Boston, Massachusetts, USA.
6. **Srivastava P., Cheng K., Das J., Van Hove M. et al.** 2 kV Breakdown Voltage GaN-on-Si DHFETs with Sub-micron Thin AlGaN Buffer. – CS MANTECH Conference, April 23-26, 2012, Boston, Massachusetts, USA.
7. **Гольцова М.** Мощные GaN-транзисторы – истинно революционная технология. – Электроника-НТБ, 2012, №4, с.86-100.
8. GaN technologies for power electronic applications: Industry and market status & forecasts. – 2012 edition, YOLE Development, <http://www.yole.fr>.

As it can be seen, the monolithic integrated circuit of the low-noise amplifier (MIC LNA) on nitride heterostructures can be quite competitive with the MIC based on pNEMT on GaAs. Some disadvantages in terms of noise parameters we believe represent a consequence of still existing imperfections related to heterostructures and the nitride MIC manufacturing technology. We would like to note that presented here are the parameters of nitride MIC produced by the coplanar technology on heterostructures with the barrier thickness higher than 18 nm. Calculations show that a further reduction of NF of transistors and MIC on the nitride heterostructures in the mm-range is possible by using thinner barrier layers together with the technology of non-burnt-in ohmic contacts and in-situ passivation. Devices, which use new technological solutions, are currently at the stage of production.

As an illustration of the level of technological advances of IUHFSE RAS in the millimetre band development on nitride heterostructures can provide microwave parameters developed for the first time in Russia MIC PA frequency range 85-95 GHz. Measurements were made on the equipment of the research and production company Istok. Focus should be put on good match in a given frequency range thus proving the appropriate level of MIC design. Currently, the work in this direction on thinner heterostructures by Kurchatov Institute [33] is in progress.

ПРОСПЕКТЫ

The outcomes of research on the creation of a technology to design and manufacture of the millimetre range MIC on nitride heterostructures in IUHFSE RAS indicate the possibility of creating MIC sets in Russia for transceiver systems that exceed by parameters the corresponding devices on arsenide heterostructures, which corresponds to the world level of development in this direction. For successful industrial development and mass production of MIC for transceiver modules of different frequency bands, it is vital to coherently address this issue, heterostructures – MIC manufacturing technology – microwave module assembly technology. It can be expected that only this approach will help quickly establish the inexpensive and mass production of radiation-proof transceiver modules for different purposes which are so necessary to our country.

The research was carried out under the Public Contract No 14.427.12.0001 dated 30 September 2013 by order of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. ■



9. High-Power GaN Power ICs. – RF Micro Devices, <http://rfmd.com>.
10. Xu H., Sanabria C., Chini A., Wei Y., Heikman S., Keller S., Mishra U.K., York R.A. Characterization of two Field-Plated GaN HEMT Structures. – Доклад Electrical and Computer Engineering University of California at Santa Barbara, 2010.
11. Milligan J.W., Sheppard S., Pribble W., Ward A., Wood S. SiC and GaN Wide Bandgap Technology Commercial Status. – CS MANTECH Conference, April 14–17, 2008, Chicago, Illinois, USA.
12. Piotrowicz S., Morvani I.E., Aubryi R. et al. State of the Art 58W, 38% PAE X-Band AlGaN/GaN HEMTs microstrip MMIC Amplifiers – In proceeding of: Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium, 2008, CSIC '08, IEEE.
13. Федоров Ю.В. Анализ развития широкозонных гетероструктур (Al,Ga,In)N и приборов на их основе для миллиметрового диапазона длин волн. – Электроника-НТБ, 2011, №2, с.92-108.
14. Майская В. Освоение терагерцовой щели – полупроводниковые приборы вторгаются в субмиллиметровый диапазон. – Электроника: НТБ, 2011, №8, с.74-87.
15. Jessen G.H. et al. Short-Channel Effect Limitations on High Frequency Operation of AlGaN/GaN HEMTs for T-Gate Devices. – IEEE Transactions on Electron Devices, Oct. 2007, vol.54, No 10, p.2589–2597.
16. Smorchkova I.P., Chen L., Mate T., Shen L. et al. – AlN/GaN and (Al,Ga)N/AlN/GaN two-dimensional electron gas structures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy – J. Appl. Phys. 2001, 90, 5196.
17. Kuzmik J. Power electronics on InAlN/(In)GaN: prospect for a record performance. – In IEEE Electron Devices Letters. ISSN 0741-3106, 2001, vol. 22, p.510-512. IEEE Electron Devices Letters. ISSN 0741-3106, 2001, vol.22, p.510-512. Type: ADCA.
18. Gillespie J.K., Jessen G.H., Via G.D., Crespo A. et al. Realization of InAlN/GaN Unstrained HEMTs on SiC Substrates with a 75 Å Barrier Layer. – CS MANTECH Conference, p.73-74, May 14-17, 2007, Austin, Texas, USA.
19. Zimmermann T., Deen D., Cao Yu., Jena D., Xing H.G. Formation of ohmic contacts to ultra-thin channel AlN/GaN HEMTs. – Physica status solidi, May 2008, vol. 5, iss.6, p.2030-2032.
20. Jinwook W. Chung J. W., Edwin L. Piner E.L., Palacios T. N-Face GaN/AlGaN HEMTs Fabricated Through Layer Transfer Technology. – IEEE Electron Device Letters, February 2009, vol.30, No.2.
21. Nidhi D.F., Brown S.K., Mishra U.K. Very Low Ohmic Contact Resistance through an AlGaN Etch-Stop in Nitrogen-Polar GaN-Based High Electron Mobility Transistors. – Jpn. J. Appl. Phys. 49 (2010) 021005.
22. Chabak K., Crespo A., Tomich D., Langley D. et al. Processing Methods for Low Ohmic Contact Resistance in AlN/GaN MOSHEMTs. – CS MANTECH Conference, May 18-21, 2009, Tampa, Florida, USA.
23. Lee M. L., Sheu J. K., Hu C.C. Nonalloyed Cr/Au-based Ohmic contacts to n-GaN. – Appl. Phys. Lett, 2007, 91, 182106.
24. Chang Z., Shu-Ming Z., Hui W. et all. Formation of Low-Resistant and Thermally Stable Nonalloyed Ohmic Contact to N-Face n-GaN. – Chin. Phys. Lett, 2012, vol.29, no.1, 017301.
25. Xing H.(G.), Zimmermann T., Deen D., Wang K., Yu C., Kosel T., Fay P., Jena D. Ultrathin all-binary AlN/GaN based high-performance RF HEMT Technology. – Department of Electrical Engineering, University of Notre Dame, 2011, Notre Dame, IN 46556, USA.
26. Denninghoff D.J., Dasgupta S., Lu J., Keller S., Mishra U.K. Design of High-Aspect-Ratio T-Gates on N-Polar GaN/AlGaN MIS-HEMTs for High f_{max} . – IEEE Electron Device Letters, vol.33, no.6, June 2012.
27. Record transconductance of 1105 mS/mm for GaN/InAlN MIS-HFET. – Semiconductor Today, Compaunds & Advanced Silicon, vol.7, iss.5, June/July 2012, <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2012.2190965>.
28. Masataka H., Takashi M., Toshiaki M. AlGaN/GaN heterostructure field-effect transistors on 4H-SiC substrates with current-gain cutoff frequency of 190 GHz. – Appl. Phys. Express, vol.1, no.2, 021103/1-021103/3, 29 October 2008.
29. Shinohara K., Corrion A., Regan D., Milosavljevic I., Brown D. et al. 220 GHz f_T and 400 GHz f_{max} in 40-nm GaN DH-HEMTs with re-grown ohmic. – IEDM Tech. Dig., San Francisco, CA, Dec. 2010, p.30.1.1-30.1.4.
30. Shinohara K., Regan D., Corrion A., Brown D., Burnham S. et al. Deeply-scaled Self-aligned-gate GaN DH-HEMTs with ultrahigh cutoff frequency. – IEDM Tech. Dig., Washington, DC, Dec. 2011, p.19.1.1-19.1.4.
31. Okamoto N., Ohki T., Makiyama K. Backside Process Considerations for Fabricating Millimeter-WaveGaN HEMT MMICs. – CS MANTECH Conference, May 17-20, 2010, Portland, Oregon, USA.
32. GaN Essentials: Substrates for GaN RF Devices. – Application Note AN-011, Nitronex Corp., June 2008.
33. Мальцев П.П., Федоров Ю.В. Современное состояние и перспективы развития нитридных СВЧ-приборов миллиметрового диапазона за рубежом и в России. – Интеграл, 2013, №3, с.25-29.