

УДК 621.375.4

СВЧ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ НА НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НИТРИДА ГАЛЛИЯ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 80–100 ГГц

© 2020 г. Д. Л. Гнатюк^а, Р. Р. Галиев^а, А. В. Зуев^а, С. Л. Крапихина^а, **,
М. В. Майтама^а, П. П. Мальцев^а, *, О. С. Матвеев^а, Ю. В. Федоров^а

^аФедеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН),
Нагорный проезд, 7, стр. 5, Москва, 117105 Россия

*E-mail: isvch@isvch.ru

**E-mail: sone4ka07@mail.ru

Поступила в редакцию 13.02.2020 г.

После доработки 25.03.2020 г.

Принята к публикации 31.03.2020 г.

Представлены результаты измерения СВЧ характеристик экспериментальных образцов монолитной интегральной схемы усилителя на нитриде галлия в диапазоне частот 80–100 ГГц, являющимся перспективным для применения в системах связи и радиолокации.

Ключевые слова: миллиметровый диапазон длин волн, монолитные интегральные схемы, усилитель, нитрид галлия, карбид кремния, связь, радиолокация

DOI: 10.31857/S054412692005004X

Существует ряд областей радиоэлектроники, требующих достижения максимальной выходной мощности в СВЧ диапазоне при отсутствии дополнительных теплоотводящих элементов. В таких модулях для обеспечения минимальных массогабаритных характеристик устройств теплообмен обеспечивается исключительно с кристалла усилителя. Прежде всего, такие требования возникают у разработчиков робототехнических устройств и космических аппаратов.

Частотные характеристики полупроводниковых приборов в значительной мере определяются подвижностью носителей заряда, а наиболее перспективными являются СВЧ приборы с применением полупроводниковых материалов с высокой подвижностью носителей заряда (НЕМТ). Среди них особое место занимает нитрид галлия (GaN) и гетероструктуры AlN/GaN, которые формируются на таких подложках, как карбид кремния, сапфир и кремний, обеспечивающих функционирование при высоких температурах и высоком уровне радиации.

Это связано с уникальными электрофизическими свойствами GaN: широкой запрещенной зоной, высокой подвижностью и высокой скоростью насыщения электронов, высокими пробивными полями, достаточной высокой теплопроводностью и другими полезными свойствами, что позволяет создавать мощные высокочастотные транзисторы на основе таких структур. Использо-

вание широкозонных материалов и гетероструктур в настоящее время является приоритетным направлением развития транзисторов и комплексированных изделий на их основе.

СВЧ транзисторы, выполненные по GaN-технологии, имеют высокую удельную мощность на миллиметр ширины затвора до 8 Вт/мм, что почти на порядок превышает удельную выходную мощность СВЧ транзисторов, выполненных по GaAs-технологии, и являются ядром модулей сверхбыстродействующей твердотельной электроники.

В ИСВЧПЭ РАН изготовлен нитрид-галлиевый трехкаскадный усилитель по схеме с суммированием мощности на подложке карбида кремния для W-диапазона (диапазона частот 84–96 ГГц) на транзисторах с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) и длиной затвора 90 нм на гетероструктурах AlGaIn/AlN/GaN/SiC, изготовленных ЗАО “Элма-Малахит” (рис. 1).

Измерения малосигнальных S-параметров и выходной мощности усилителя проводились совместно с АО “НПП “Исток” им. Шокина”. Для измерений использовался контактный метод, основанный на контакте СВЧ зондов и зондов питания с исследуемыми кристаллами усилителей, расположенных на неутоненной и неразрезанной пластине со структурами монолитной интегральной схемы (МИС).

Результаты измерения малосигнальных S-параметров экспериментальных образцов трехкас-

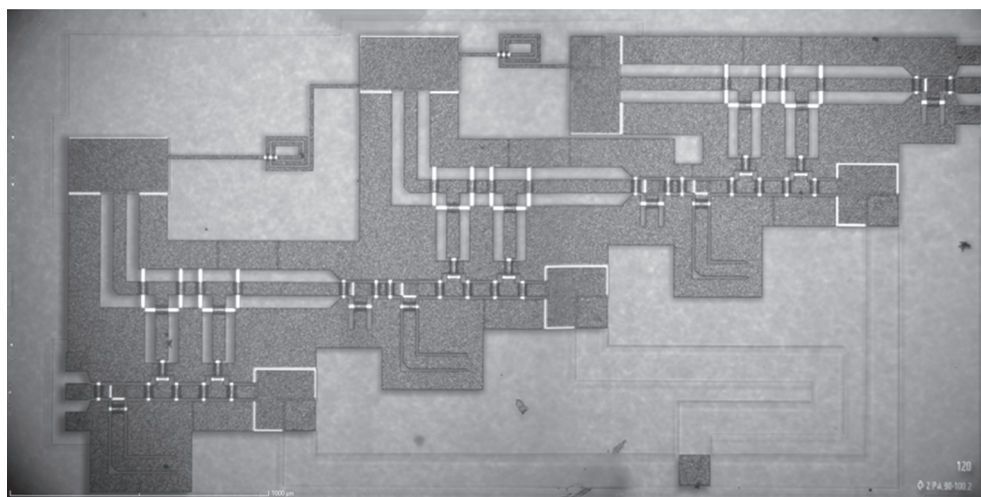
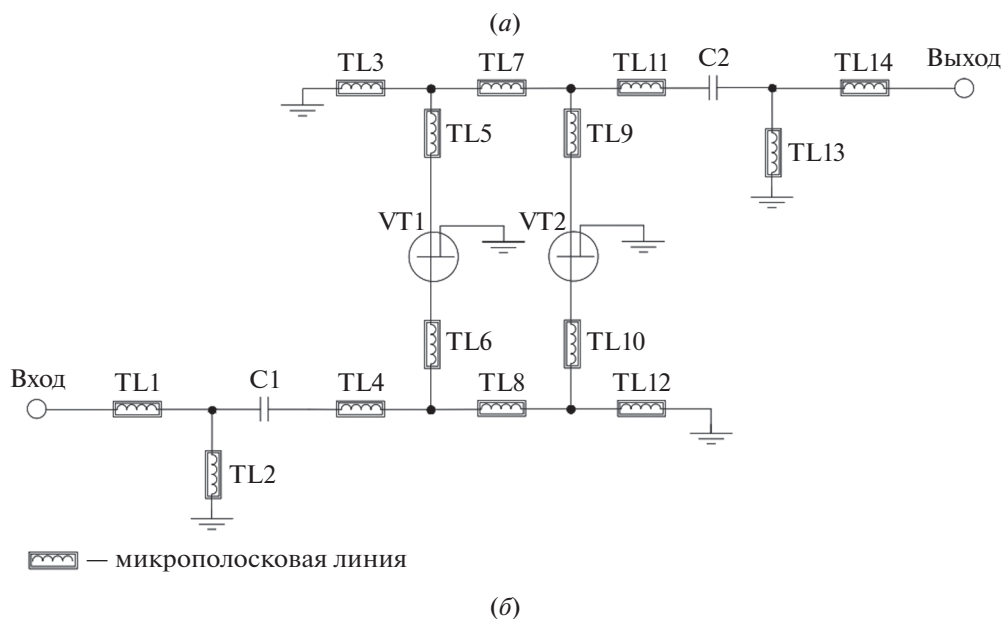


Рис. 1. Схема базового усилителя для трехкаскадного усилителя (а); фотография изготовленного трехкаскадного усилителя для диапазона частот 84–96 ГГц (б).

кадных усилителей при напряжении питания 10 В приведены на рис. 2–4 и имеют коэффициент усиления (S_{21}) не менее 12 дБ при коэффициенте стоячей волны (КСВ) по входу и выходу не более 2 в полосе 84–96 ГГц, неравномерность не превышает 1 дБ, а максимальный коэффициент усиления 14.5 дБ достигается на частотах 85 и 92 ГГц.

Для проведения измерений выходной мощности экспериментальных образцов усилителей использовался стенд АО “НПП “Исток” им. Шокина”. На вход испытываемой МИС через волноводный СВЧ зонд и волноводную поворотную секцию подается СВЧ сигнал с генератора.

В качестве СВЧ генератора используется технологический генератор диапазона 90–94 ГГц с постоянной выходной мощностью. На выходе генератора устанавливается регулируемый поляри-

зационный аттенуатор с диапазоном регулировки 0–50 дБ.

Измерения выходной мощности экспериментальных образцов трехкаскадных усилителей проводились при выходной мощности генератора 30 и 52 мВт на частотах 92 и 94 ГГц соответственно.

На рис. 5 представлена динамическая характеристика усилителя на частоте 92 ГГц. На рис. 6 представлена зависимость выходной мощности усилителя от напряжения на стоке на частотах 92 и 94 ГГц.

В ходе измерений выходной мощности усилителя в волноводном тракте зафиксирована максимальная насыщенная мощность 20.26 дБм (106 мВт) при входной мощности 12.2 дБм и напряжении питания 14 В (рис. 6). Удельная выходная мощность выходного каскада усилителя с общей ши-

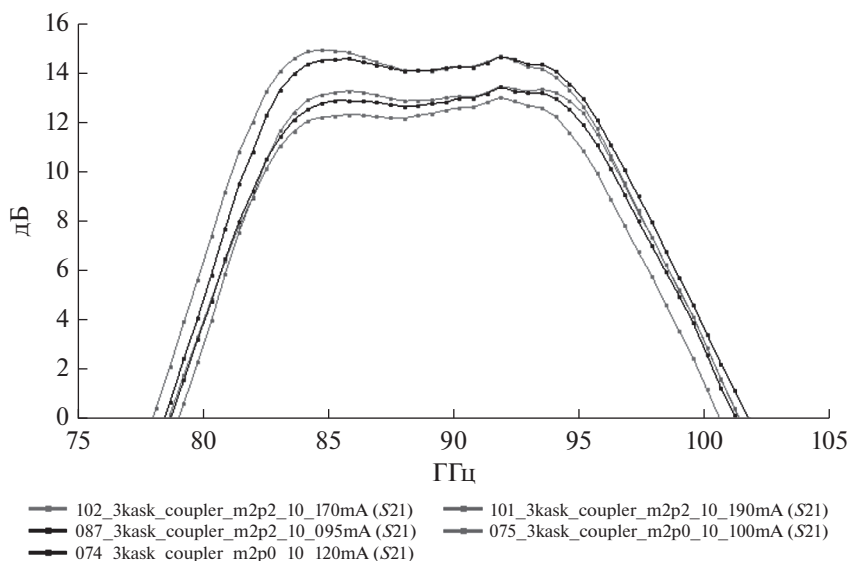


Рис. 2. Результаты измерения коэффициента передачи S_{21} пяти экспериментальных образцов трехкаскадного усилителя.

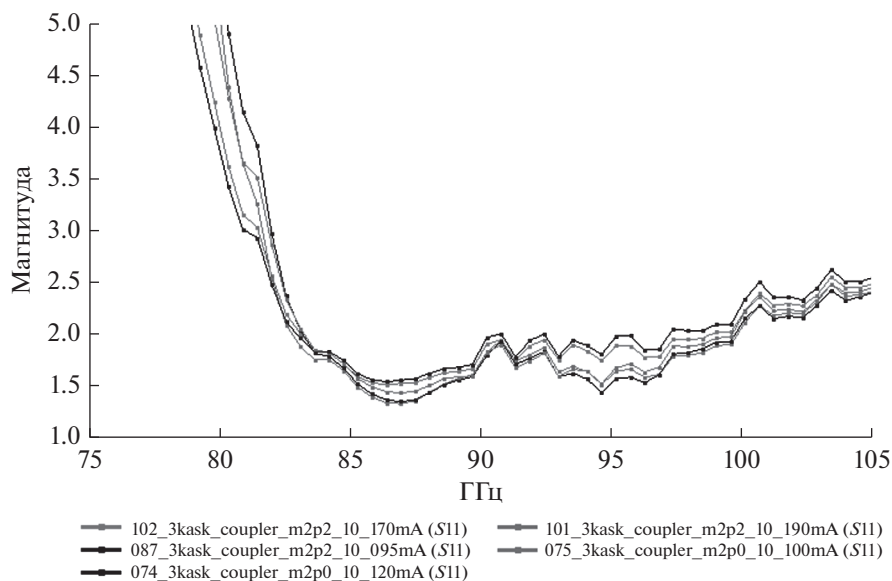


Рис. 3. Результаты измерения КСВ по входу пяти экспериментальных образцов трехкаскадного усилителя.

риной затворов транзисторов 200 мкм при этом достигает 530 мВт/мм.

ИСВЧПЭ РАН совместно с ЗАО “Элма-Малахит” и НИЦ “Курчатовский институт” была проведена работа по созданию гетероструктур (г/с) с уменьшенной толщиной барьерного слоя t_B . Параметры гетероструктур представлены в табл. 1.

По мере утонения t_B гетероструктур и технологии затворов наблюдалось повышение частотных параметров НЕМТ (рис. 7), как результат повышения аспектного отношения L_G/t_B для фиксированной длины затвора транзистора L_G .

Интересно отметить, что наилучшие СВЧ параметры НЕМТ максимального коэффициента усиления по току $f_T > 100$ ГГц при максимальной частоте усиления по мощности $f_{MAX} > 200$ ГГц (рис. 8) были получены на гетероструктуре V-1911, не с минимальной толщиной t_B , но с максимальной величиной подвижности, что предполагает большую величину дрейфовой скорости электронов. Предельно достижимый коэффициент усиления НЕМТ на частоте 90 ГГц в этом случае составлял 7 дБ. На этой же гетероструктуре V-1911 были получены и наилучшие СВЧ параметры усилителя.

Увеличение выходной мощности усилителя может быть достигнуто двумя способами.

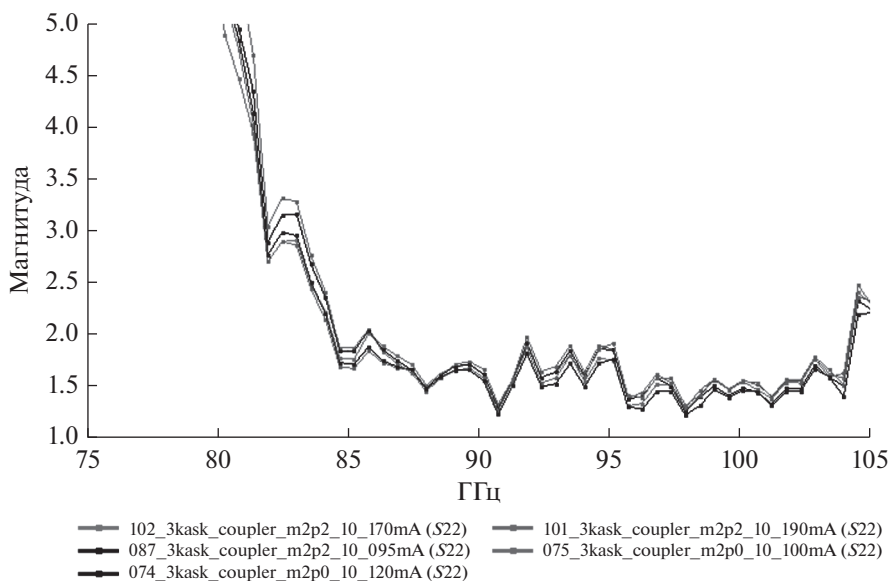


Рис. 4. Результаты измерения КСВ по выходу пяти экспериментальных образцов трехкаскадного усилителя.

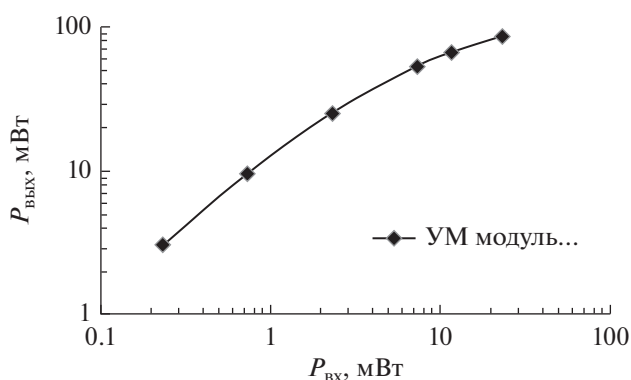


Рис. 5. Динамическая характеристика усилителя на частоте 92 ГГц.

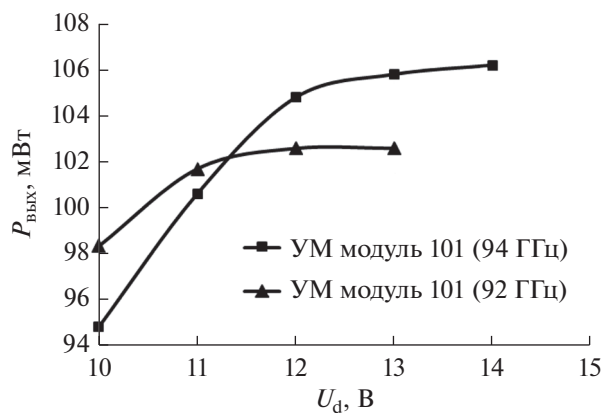


Рис. 6. Зависимость выходной мощности усилителя от напряжения на стоке на частотах 92 и 94 ГГц при входной мощности 16.87 мВт.

Первый способ заключается в увеличении общей ширины затвора транзисторов выходного каскада в обычной или балансной схеме включения. При уровне удельной выходной мощности 530 мВт/мм для этого потребуются выходной каскад с периферией 1.9 мм, что эквивалентно применению 10 базовых транзисторных ячеек с конфигурацией 4×50 мкм. При этом могут возникнуть потенциальные сложности как с теплоотводом, так и с построением большого числа цепей деления и суммирования мощности, приводящие к увеличению потерь и уменьшению абсолютной выходной мощности и КПД. Кроме того, в данной конфигурации представляет сложность заземление большого количества истоков транзисторов.

Следует отметить трудность технологии травления сквозных отверстий в подложках SiC при изготовлении МИС по микрополосковой технологии. Применение же копланарной технологии без заземляющих сквозных отверстий, по нашему мнению, малоперспективно ввиду сложности с обеспечением устойчивости усилителя с высокой выходной мощностью.

Решением проблемы может послужить применение технологии формирования плоскости заземления над лицевой поверхностью кристалла поверх слоя диэлектрического материала, успешно примененной в ряде работ ИСВЧПЭ РАН [1, 2]. При этом заземление соответствующих элементов производится через отверстия в слое диэлектрического материала.

Второй способ, представляющийся нам более перспективным, связан с совершенствованием гетероструктур. На рис. 9 показаны расчетные зависимости удельной выходной мощности нитридных НЕМТ в W-диапазоне от толщины барьера гетеро-

Таблица 1. Характеристики исследованных гетероструктур

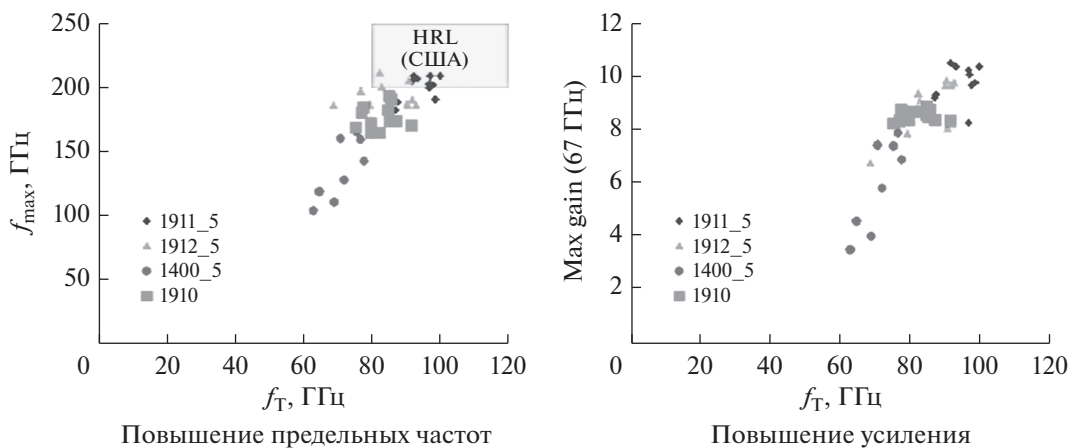
№ п.п.	Номер гетероструктуры	Толщина барьера Al-GaN/AlN, нм (X_{Al})	Подвижность электронов в канале, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Концентрация электронов в канале, см^{-2}	Слоевое сопротивление, Ом/кВ	Ток насыщения (расчет), А/мм	Начальный ток транзистора (при $U_g = 0$), А/мм
Способ роста – MOCVD, подложка – SiC (ЗАО “Элма-Малахит”)							
1	V-1909	26.7 (29%)	2055	1.11×10^{13}	274	1.77	1.0
2	V-1915	25.7 (28%)	2100	1.17×10^{13}	254	1.87	1.1
3	V-1910	15.7 (31%)	1880	1.28×10^{13}	259	2.05	1.2
4	V-1440*	15.3 (32%)	1880	1.3×10^{13}	260	2.08	1.2
5	V-1911	13.7 (31%)	2300	1.28×10^{13}	212	2.05	1.1
6	V-1966	13.2 (38.7%)	1944	1.34×10^{13}	240	2.14	1.3
7	V-1990	13.2 (39%)	2000	1.32×10^{13}	237	2.11	–
8	V-1991	11.7 (39%)	1720	1.43×10^{13}	254	2.29	–
9	V-1912	11.2 (31%)	2040	1.16×10^{13}	264	1.86	0.85
Способ роста – МВЕ, подложка – Сапфир (НИЦ “Курчатовский институт”)							
10	58_4	10 (40%)	1462	1.55×10^{13}	237	2.48	1.35
11	60_1.2	3.5 (100%)	1220	1.8×10^{13}	284	2.88	1.6

структуры t_B в диапазоне длин затворов L_G от 100 до 300 нм, выполненные на основе зависимостей, полученных в [3]. Звездочкой на рисунке показан уровень разработанного усилителя. Из рисунка следует, что при использовании более тонких гетероструктур толщиной, например, 6 нм можно ожидать значительного повышения удельной мощности транзисторов в W-диапазоне (до 3.4 Вт/мм). Это позволит поднять выходную мощность разработанной МИС УМ до величины около 500 мВт, что крайне желательно для практического применения. Важно, что при этом не требуется разрабатывать новый усилитель. Увеличение мощности будет достигнуто с применением той же самой топологии микросхемы. При дальнейшем утонении

барьерного слоя гетероструктуры до 4 нм теоретически ожидается удельная выходная мощность 6 Вт/мм, при которой выходная мощность усилителя может возрасти до 1.2 Вт.

Применение более тонких гетероструктур, как было показано в [4], должно способствовать не только увеличению выходной мощности усилителя, но и снижению коэффициента шума.

Кроме того, для увеличения выходной мощности усилителя возможно комбинирование двух вышеуказанных способов. Например, при уменьшении толщины гетероструктуры до 10 нм удельная выходная мощность возрастает до 1.2 Вт/мм, что допускает применение 5 базовых транзисторных ячеек с конфигурацией 4×50 мкм вместо 10, требу-

Рис. 7. Повышение f_T и f_{\max} НЕМТ по мере утонения барьера гетероструктур.

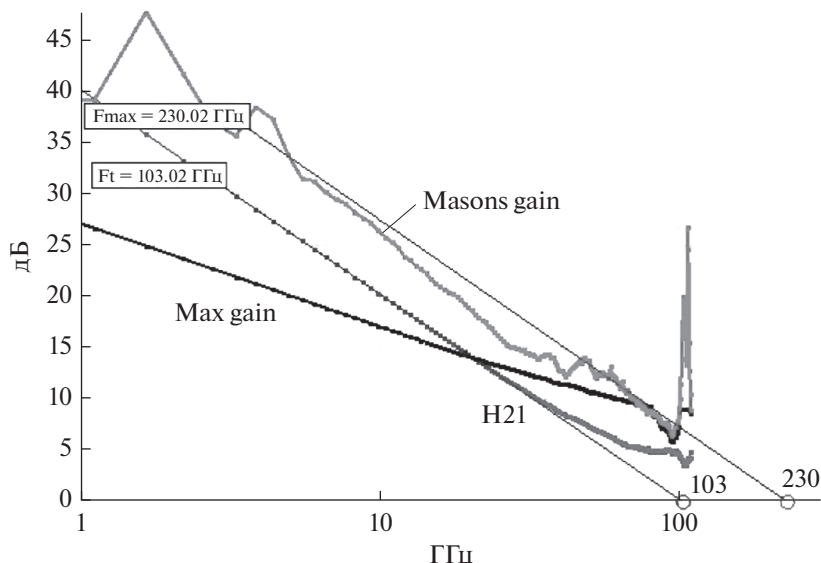


Рис. 8. СВЧ параметры нитридных НЕМТ на гетероструктуре V-1911-5 (ЗАО “Элма-Малахит”).

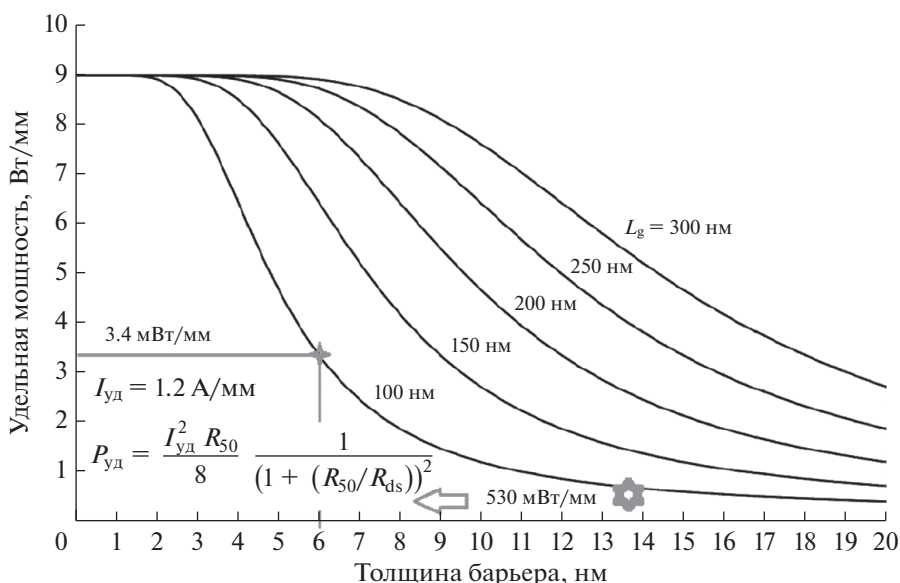


Рис. 9. Расчетные зависимости удельной выходной мощности нитридных НЕМТ в W -диапазоне от толщины барьера гетероструктуры t_B в диапазоне длин затворов L_G от 100 до 300 нм.

ющихся при толщине барьерного слоя 13.7 нм, что существенно упростит топологию микросхемы. При дальнейшем уменьшении толщины до 6 нм с использованием всего 2 базовых транзисторных ячеек с конфигурацией 4×50 мкм теоретически возможно получить выходную мощность 1.3 Вт.

Таким образом, с целью увеличения выходной мощности усилителя до 1–2 Вт необходимо на предприятиях-изготовителях гетероструктур провести работы по созданию нового класса эффективных нитридных гетероструктур с толщиной барьерного слоя 5–10 нм для W -диапазона.

В обзоре [5] проанализировано более 20 зарубежных источников и рассмотрены варианты

построения монолитных интегральных схем для W -диапазона, являющегося привлекательным для применения в системах связи и радиолокации. Особое внимание уделено возможности использования нитрида галлия в микросхемах.

Для оценки уровня МИС, разработанных в ИСВЧПЭ РАН, был проведен анализ, и в табл. 2 представлено сравнение полученных параметров с достижениями мировых лидеров в миллиметровом диапазоне длин волн – Института Фраунгофера и фирмы Raytheon, работы [6–8].

Из анализа изложенной информации следует, что параметры разработанных усилителей W -диапазона на нитридных гетероструктурах хорошо

Таблица 2. Сравнение экспериментальных образцов ИСВЧПЭ РАН с зарубежными аналогами

	[5]	[6]	[7]	ИСВЧПЭ РАН
Малосигнальный коэффициент усиления, дБ	14–18	16–21	10	14
Выходная мощность, Вт	0.4 0.43	1.2–1.7	0.19	0.1
Удельная выходная мощность, мВт/мм	566 606	Нет данных	530	530
КСВ по входу	<2	<3	<2	<2
КСВ по выходу	<3	<3	3	<2
Напряжение питания, В	20	15–20	12	14

соответствуют лучшим зарубежным образцам по коэффициенту усиления и удельной выходной мощности, но уступая по параметру абсолютной выходной мощности. Это объясняется применением в выходном каскаде транзисторов с общей шириной 200 мкм по сравнению с шириной у зарубежных аналогов 720–800 мкм [6, 7] и 320 мкм [8], соответственно. Отметим, что разработанные в ИСВЧПЭ РАН экспериментальные образцы имеют значения КСВ по входу и выходу менее 2 в полосе частот шириной 10–11 ГГц, тогда как у зарубежных аналогов эта величина часто лежит в пределах от 2 до 3 (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате измерений было установлено, что усилители имеют равномерное усиление в полосе частот 84–96 ГГц. Максимальный коэффициент усиления достигает 14.5 дБ при КСВ по входу и выходу менее 2. Таким образом, выходная мощность трехкаскадных экспериментальных образцов усилителей достигает значений 100 мВт.

Изготовленные МИС усилителей на основе наногетероструктур нитрида галлия предназначены для применения в перспективных системах беспроводной передачи данных и связи в миллиметровом диапазоне длин волн и обеспечения сбора и передачи потоков информации со скоростями до 10–100 Гбит/с.

ИСВЧПЭ РАН были получены свидетельства о государственной регистрации топологий интегральных микросхем [9–12] для диапазона частот 84–96 ГГц.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России по государственному контракту № 14.427.12.0001 от 30.09.2013 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров Ю.В., Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л. и др. МИС усилителей со встроенными антеннами СВЧ-диапазона на наногетероструктурах // Наноиндустрия. 2015. № 3. С. 44–51.
2. Федоров Ю.В., Бугаев А.С., Павлов А.Ю., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Павлов В.Ю., Слаповский Д.Н.,

Томош К.Н., Енюшкина Е.Н., Галиев Р.Р., Майтама М.В., Зуев А.В., Крапухин Д.В., Гамкрелидзе С.А. Технология изготовления и разработка монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2017. № 5. С. 273–293.

3. Федоров Ю.В., Михайлович С.В. Нитридные НЕМТ против арсенидных: последняя битва? // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18. № 1. С. 16–22.
4. Фёдоров Ю.В., Михайлович С.В. Влияние параметров наногетероструктур и технологии изготовления на шумовые свойства AlGaIn/GaN НЕМТ // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 10. С. 12–17.
5. Гнатюк Д.Л., Крапухина С.Л., Лисицкий А.П., Мальцев П.П. Обзор перспективных монолитных интегральных схем усилителей на нитриде галлия для диапазона частот 80–100 ГГц // Нано- и микросистемная техника. 2020. № 4.
6. van Heijningen M., van der Bent, Rodenburg M., van Vliet F.E., Quay R., Bruckner P., Schwantuschke D., Jukkala P., Narhi T. 94 GHz power amplifier MMIC development in state of the art MHEMT and AlGaIn/GaN technology // Microwave Technology and Techniques Workshop 2012, 21–23 May 2012, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
7. Brown A., Brown K., Chen J., Hwang K.C., Koliass N., Scott R. W-Band GaN Power Amplifier MMICs // 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), 5–10 June 2011.
8. Quay R., Tessmann A., Kiefer R., Maroldt S. et al. Dual-Gate GaN MMICs for MM-Wave Operation // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2011. V. 21. № 2. P. 95–97.
9. Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Кузнецова Т.И., Майтама М.В., Галиев Р.Р. Трехкаскадный усилитель мощности W-диапазона // Свидетельство о государственной регистрации № 2013630035 от 19.02.2013 г.
10. Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Кузнецова Т.И., Майтама М.В., Галиев Р.Р. Двухкаскадный усилитель мощности W-диапазона // Свидетельство о государственной регистрации № 2013630036 от 19.02.2013 г.
11. Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Зуев А.В., Галиев Р.Р. Двухкаскадный маломощный усилитель W-диапазона // Свидетельство о государственной регистрации № 2014630155 от 19.12.2014 г.
12. Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л. Однокаскадный маломощный усилитель W-диапазона // Свидетельство о государственной регистрации № 2015630132 от 02.12.2015 г.