

Оптимизация параметров НЕМТ-гетероструктур GaN/AlN/AlGaN для СВЧ транзисторов с помощью численного моделирования

© В.Г. Тихомиров^{+,*}, В.Е. Земляков^{*,†}, В.В. Волков^{*}, Я.М. Парнес^{*}, В.Н. Вьюгинов^{*},
В.В. Лундин^{*,#}, А.В. Сахаров^{*,#}, Е.Е. Заварин^{*,#}, А.Ф. Цацульников^{*,#},
Н.А. Черкашин[†], М.Н. Мизеров[#], В.М. Устинов^{*}

⁺ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197376 Санкт-Петербург, Россия

^{*} ЗАО „Светлана-Электронприбор“,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[†] Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,
124498 Зеленоград, Москва, Россия

[#] Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

^{*} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[†] CEMES-CNRS — Université de Toulouse,
Toulouse, France

E-mail: VV11111@yandex.ru

(Получена 11 июня 2015 г. Принята к печати 17 июня 2015 г.)

Проведены численное моделирование, а также расчетная и экспериментальная оптимизация полевых СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктур GaN/AlN/AlGaN. Результаты выполненных исследований показали, что оптимальные значения толщин и составов слоев гетероструктур, позволяющих реализовать высокую мощность в СВЧ диапазоне, лежат в относительно узких пределах. Проведенные исследования показали возможность эффективного использования численного моделирования для разработки СВЧ НЕМТ с учетом основных физических явлений и особенностей реальных приборных конструкций.

1. Введение

Гибридные и монокристалльные СВЧ усилители широко используются в радарных, средствах связи и коммуникаций. В настоящее время они строятся на основе GaAs- и Si-транзисторов и имеют ряд существенных ограничений. Требуется существенное повышение радиолокационного потенциала радаров за счет увеличения удельной мощности передающих устройств и снижения собственных шумов приемных устройств. Транзисторы на основе GaN существенно расширяют возможности приборов СВЧ диапазона. Высокая концентрация электронов в области двумерного электронного газа в сочетании с приемлемой подвижностью электронов дает возможность реализации большой плотности тока в сечении канала транзистора и высокого коэффициента усиления. Максимальная критическая напряженность электрического поля в сочетании с высокой плотностью тока обеспечивает удельную выходную мощность промышленных GaN-транзисторов, на порядок превышающую удельную выходную мощность GaAs-транзисторов. По сравнению с серийно выпускаемыми новыми изделиями на основе GaN-транзисторов имеют больший КПД при одинаковых или меньших размерах кристалла.

На сегодняшний день экспериментальная оптимизация гетероструктурных СВЧ транзисторов продолжает оставаться сложной, трудоемкой и затратной процедурой [1]. Использование методов математического моделирова-

ния, базирующихся на многомерных численных моделях расчета транспорта носителей, тепловых процессов и динамических характеристик [2], позволяет дополнить, проверить и объяснить существующие экспериментальные данные, предсказать поведение приборных структур при изменении параметров, которые затруднительно экспериментально воспроизвести. Такие возможности открывают использование современных пакетов численного моделирования полупроводниковых приборов [3,4] в сочетании с физической моделью, подтвержденной экспериментальными результатами. Однако оптимальный выбор и эффективное использование того или иного пакета возможно только после верификации его возможностей для решения определенного класса задач, что требует получения параметров используемых моделей с учетом свойств конкретного объекта моделирования.

В рамках настоящей работы проводились численное моделирование, а также расчетная и экспериментальная оптимизация конструкции гетероструктур полевых СВЧ транзисторов (НЕМТ — high electron mobility transistor) на основе системы материалов AlGaIn. Необходимость прогнозирования важнейших выходных характеристик транзисторов потребовала построения моделей для статистики распределения носителей во всех областях гетероструктуры, модели дифференциальной подвижности в двух основных материалах (GaN, AlGaIn) при возможном легировании каждого, а также тщательной настройки модели полного энергетического баланса транс-

порта носителей в канале НЕМТ для учета разогрева основных носителей и адекватного описания процессов токопрохождения при субмикрометровой длине затвора. В качестве базовых инструментов для моделирования и оптимизации НЕМТ использовались широко известные программные пакеты для численного моделирования полупроводниковых приборов TCAD „Synopsys“ и „Silvaco“. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными результатами измерения электрофизических параметров гетероструктур и НЕМТ.

2. Эксперимент

Гетероструктуры для НЕМТ были выращены в НТЦ микроэлектроники РАН на подложках SiC, изготовленных ЗАО „Светлана–Электронприбор“, и на стандартных сапфировых подложках методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МО ГФЭ) на установке Dragon-125 [5]. Водород и азот-водородные смеси, триметилгаллий (TMGa), триметилалюминий (TMAI), аммиак и моносилан (SiH₄) использовались в качестве несущего газа и прекурсоров. В ходе работ проводилась оптимизация технологии подготовки поверхности подложек, которая была основана на анализе параметров выращенных на них транзисторных гетероструктур. Гетероструктуры НЕМТ состояли из зародышевого слоя (GaN для подложек сапфира и AlGaN для подложек SiC), изолирующего буферного слоя GaN толщиной 2 мкм, слоя AlN толщиной ~ 1 нм и нелегированного барьерного слоя AlGaN. Толщина слоя AlGaN варьировалась в различных образцах в диапазоне 15–35 нм, а содержание Al — в диапазоне 20–35%.

Исследованные СВЧ транзисторы были изготовлены в ЗАО „Светлана–Электронприбор“. Транзисторы имели конструкцию, позволяющую удобно проводить измерения с помощью копланарных зондов, в том числе измерения СВЧ параметров. Тестовые транзисторы изготавливались методами оптической фотолитографии и имели затвор длиной ~ 0.6 мкм. При формировании омических контактов была использована стандартная металлизация из Ti/Al/Ni/Au, в барьерном контакте — Ni/Au. Затворы транзисторов были пассивированы слоем Si₃N₄, нанесенного методом плазмохимического осаждения.

3. Результаты

На первом этапе исследований была проведена адаптация численных моделей к особенностям конструкции и технологии изготовления реальной приборной структуры (рис. 1, *a*). Хорошо известно, что значительное влияние на характеристики НЕМТ оказывают параметры нелегированного барьерного слоя AlGaN, расположенного вблизи двумерного электронного канала. Были выполнены расчеты вариантов конструкции НЕМТ-гетероструктуры с различной толщиной барьерного слоя AlGaN в пределах 15–35 нм, фиксированной мольной

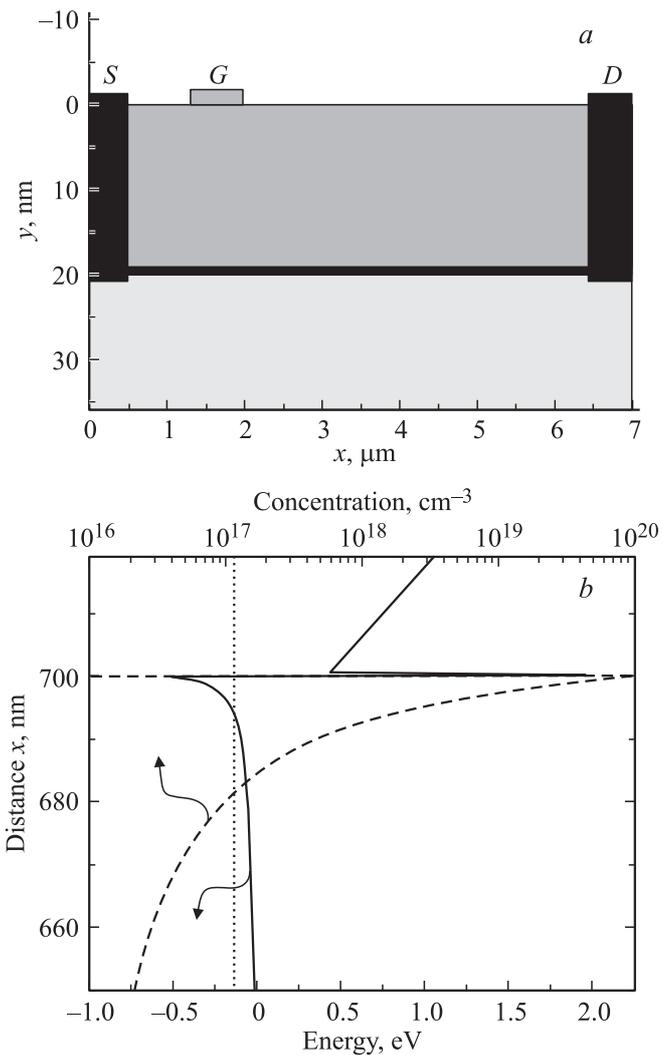


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции транзистора в координатах x , y (*a*) и зонной структуры, а также распределения носителей в активной области НЕМТ-гетероструктуры (*b*). *a*: S — исток, D — сток, G — затвор.

долей Al 25% и изучены пути ее оптимизации. Схематическое изображение последовательности слоев и зонной структуры активной области (области двумерного канала GaN/AlN/AlGaN) приведено на рис. 1, *b*.

В результате проведенных расчетов было обнаружено сильное влияние толщины барьерного слоя на ток насыщения транзистора I_d и крутизну характеристики ⟨ток стока I_d ⟩–⟨напряжение на затворе U_g ⟩ (transconductance G_m) (рис. 2, *a*). Хорошо видно, что с увеличением толщины барьерного слоя AlGaN в пределах от 15 до 25 нм происходит существенный рост тока насыщения. В то же время уменьшение толщины барьерного слоя приводит к значительному возрастанию крутизны. Однако уменьшение тока насыщения в области малых толщин барьерного слоя AlGaN означает невозможность даже без учета эффектов коллапса тока получить от транзистора, изготовленного из та-

кой структуры, достаточно большую плотность мощности. С другой стороны, создание тонкого барьерного слоя имеет большую привлекательность с точки зрения улучшения высокочастотных характеристик транзисторов и уменьшения эффектов „короткого канала“ при субмикрометровой длине затвора. Одним из очевидных путей преодоления указанных выше затруднений является повышение содержания алюминия в барьерном слое AlGaN, что приводит к возрастанию концентрации свободных носителей заряда в канале транзистора и, следовательно, увеличивает ток насыщения канала.

Однако следует отметить, что эпитаксиальный рост AlGaN с высоким содержанием Al может привести к ухудшению кристаллического качества барьерного слоя, что связано с рассогласованием параметров кристаллических решеток GaN и AlN и опасностью образования дефектов при превышении критической толщины или состава. Кроме того, при этом становится труднее формировать омические контакты к слоям, что снижает ток насыщения канала транзистора. Таким образом, оптимизация толщины и состава барьерного слоя требует совместных теоретических и экспериментальных исследований.

На следующем этапе исследований были выполнены расчеты, позволяющие ориентировочно оценить влияние изменения содержания алюминия в барьерном слое на некоторые параметры выбранной гетероструктуры. Известно, что, даже не прибегая к численному моделированию, включающему в себя расчет по методу Монте-Карло междолинных переходов и модель подвижности, учитывающую отдельные компоненты электрического поля, можно оценить влияние изменения мольной доли AlN на концентрацию носителей заряда в двумерном электронном газе (2DEG). В работе [6] было показано, что повышение мольной доли AlN от 15 до 30% должно радикально повышать концентрацию электронов в двумерном электронном газе. Однако такой простой путь увеличения тока насыщения канала имеет свои ограничения. Проведенные численные расчеты по методу Монте-Карло, позволяющие учесть существенно нелинейную поле-скоростную характеристику материала барьерного слоя и включающие модифицированную модель подвижности [7,8], позволяют предположить существование оптимальной величины содержания алюминия для выбранной толщины барьерного слоя.

На рис. 2, *b* показаны величины концентрации электронов в двумерном электронном газе (n_s) и локальной подвижности (μ) электронов под затвором, полученные в результате численного расчета, учитывающего упомянутые выше эффекты, для толщины барьерного слоя 25 нм. Полученные значения достаточно хорошо согласуются с экспериментом.

Для верификации модели и проведения экспериментальных исследований параметров HEMT были выращены различные эпитаксиальные структуры на сапфировых подложках, в которых изменялись толщина барьерного слоя и мольная доля AlN. Для определения

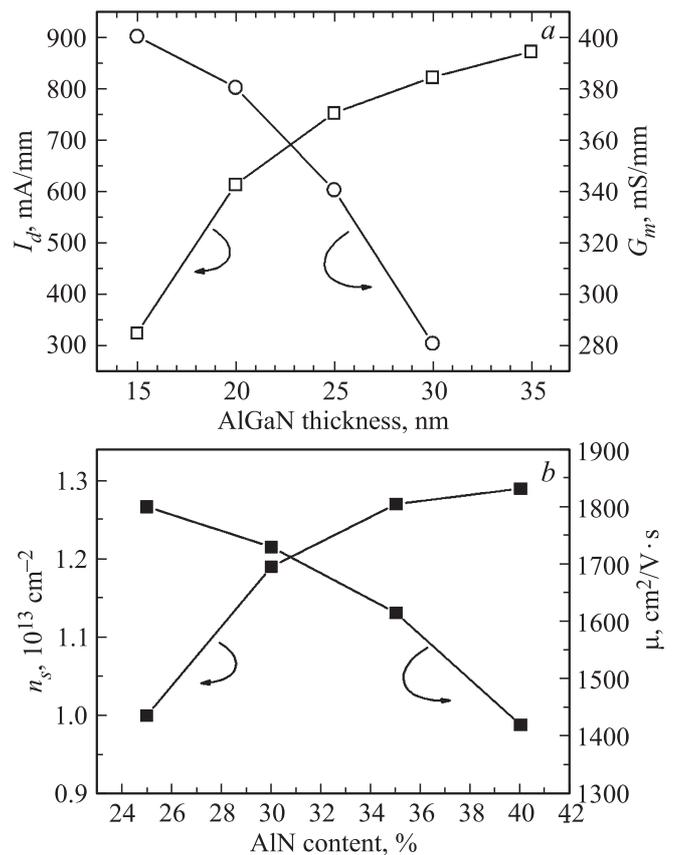


Рис. 2. Расчетные зависимости тока насыщения транзистора I_d при потенциале на стоке 10 В, крутизны ВАХ G_m от толщины барьерного слоя AlGaN (*a*) и концентрации электронов в канале n_s , локальной подвижности электронов μ под затвором от содержания алюминия в барьерном слое (*b*).

параметров сверхтонкого слоя AlN были проведены исследования тестовых структур, содержащих активную область GaN/AlN/AlGaN, с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (рис. 3, *a*). Полученные изображения были проанализированы с помощью метода анализа геометрических фаз (GPA) [9], позволяющего получить двумерное распределение деформации в напряженных слоях относительно недеформированной матрицы GaN (рис. 3, *b*) и количественно оценить толщины слоев. Из рис. 3, *b* видно, что толщина слоя AlN составляет ~ 1 нм, что соответствует значению, использованному при расчетах. Интерфейсы GaN/AlN и AlN/AlGaN — планарные, толщина переходного слоя составляет около одного монослоя, и не наблюдается формирования дополнительных дефектов в слое AlGaN, что свидетельствует об отсутствии пластической релаксации.

Были выполнены расчеты статических вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарядных (ВФХ) характеристик HEMT с субмикрометровой длиной затвора. На рис. 4, *b* показаны примеры расчета ВАХ исследуемого гетероструктурного HEMT и сравнение с экспериментальными

Параметры НЕМТ-гетероструктуры

Номер гетероструктуры	AlGaN		Электрофизические параметры гетероструктуры		Удельный ток насыщения, мА/мм	
	толщина, нм	содержание Al, %	$n_s, 10^{13} \text{ см}^{-2}$	$\mu, \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	эксперимент	расчет
905b1	18	28	1.16	1770	352	360
905b2	18	28	1.16	1770	359	360
911a	22	28	1.22	1700	676	680
912a	25	26	1.29	1620	686	700
912c	27	26	1.28	1630	699	710

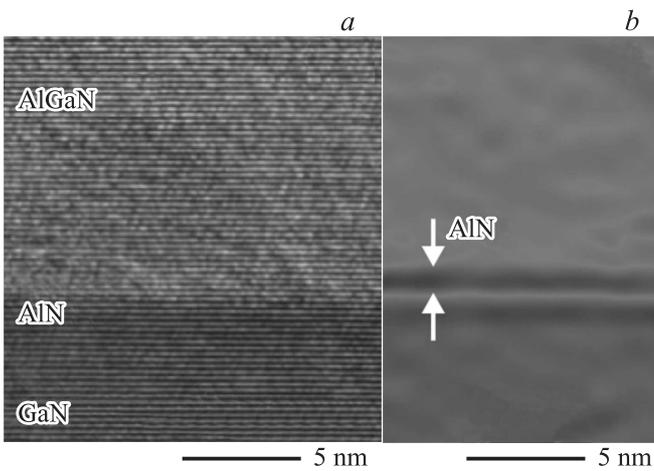


Рис. 3. Изображения, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, последовательности слоев GaN/AlN/AlGaN (a) и распределения деформации вдоль направления роста относительно недеформированной матрицы GaN (b).

характеристиками, измеренными на тестовом транзисторе, изготовленном из гетероструктур 912a. В качестве тестового был выбран транзистор с двумя затворами шириной 180 мкм, изображенный на рис. 4, a. В таблице обобщены результаты измерений удельного тока стока в статическом режиме для различных гетероструктур при напряжении на затворе $U_g = 0$. При увеличении толщины барьерного слоя с 18 до 22 нм наблюдается значительное увеличение тока, почти в 2 раза, но при дальнейшем увеличении толщины рост тока замедляется. Этот результат подтверждает предсказанное по результатам численного моделирования поведение тока насыщения, как показано на рис. 2, a.

Относительно низкая теплопроводность подложки сапфира не позволяет достичь высоких удельных мощностей из-за перегрева транзистора. Использование подложек SiC позволяет преодолеть эту проблему. По результатам выполненной оптимизации конструкции гетероструктур на подложках сапфира были выращены НЕМТ-гетероструктуры на подложках SiC и проведены их СВЧ измерения. Достигнута плотность мощности 5.5 Вт/мм на частоте 3 ГГц.

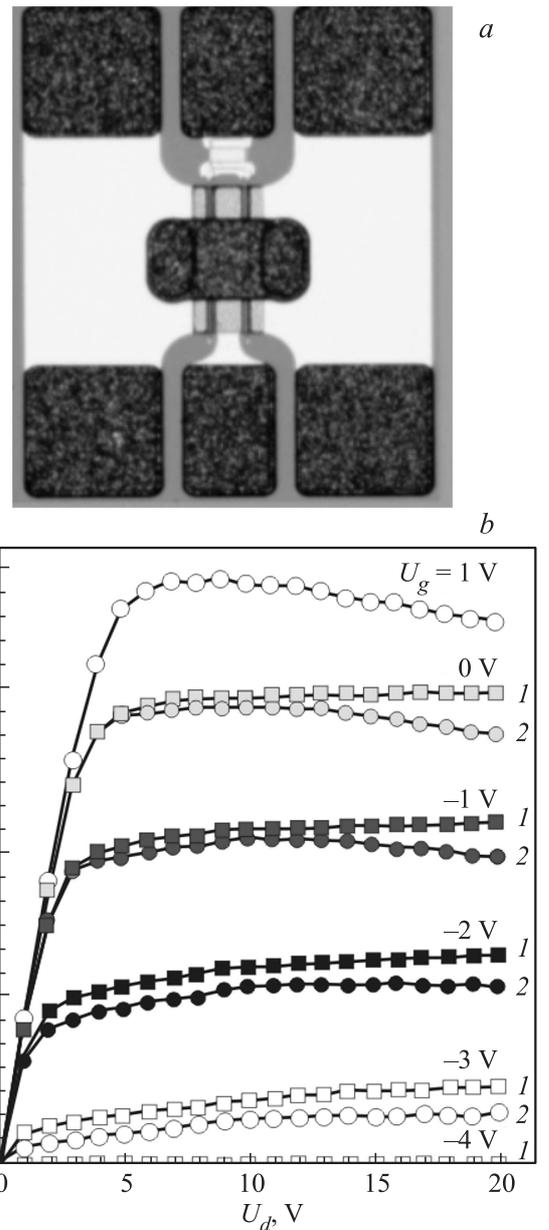


Рис. 4. Фотография тестового транзистора с двумя затворами шириной 180 мкм (a), расчетные (1) и экспериментальные (2) вольт-амперные характеристики $I_d(U_d)$ при различных напряжениях на затворе U_g (b).

4. Заключение

В результате проведенных численных расчетов и сопоставления их с данными экспериментальных исследований было показано, что наблюдается сильная зависимость параметров транзисторов от толщины и состава барьерного слоя AlGaN. Диапазон параметров гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN (толщин слоев и содержание алюминия), позволяющих создавать мощные СВЧ транзисторы с заданными параметрами, достаточно узок. Построенная физическая модель позволила достичь хорошего соответствия между экспериментальными и расчетными данными. Таким образом, результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о возможности эффективного использования численного моделирования СВЧ HEMT для оптимизации конструкций гетероструктур на основе нитрида галлия.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о субсидии № 14.607.21.0003 от 05.06.2014, уникальный код проекта: RFMEFI60714X0003).

Список литературы

- [1] M. Malmkvist, S. Wang, J.V. Grahn. IEEE Trans. Electron Dev., **55**, 268 (2008).
- [2] H. Brech, T. Grave, T. Simlinger, S. Selberherr. IEEE Trans. Electron Dev., **44**, 1822 (1998).
- [3] V. Palankovski, R. Quay, S. Selberherr. IEEE J. Solid-State Circuits, **36**, 1365 (2001).
- [4] В.Г. Тихомиров, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, Ю.В. Соловьев, А.Г. Гладышев, М.М. Кулагина, В.Е. Земляков, К.В. Дудинов, В.Б. Янкевич, А.В. Бобыль, В.М. Устинов. ФТП, **45** (10), 1405 (2011).
- [5] В.В. Лундин, Д.В. Давыдов, Е.Е. Заварин, М.Г. Попов, А.В. Сахаров, Е.В. Яковлев, Д.С. Базаревский, Р.А. Талалаев, А.Ф. Цацульников, М.Н. Мизеров, В.М. Устинов. Письма ЖТФ, **41** (5), 9 (2015).
- [5] M. Kramer. Ph. D Thesis (Eindhoven University of Technology, 2006).
- [7] J. Kolnik, İ.H. Oğuzman, K.F. Brennan, R. Wang, P.P. Ruden. J. Appl. Phys., **81** (2), 726 (1997).
- [8] M. Shirahata, H. Kusano, N. Kotani, S. Kusanoki, Y. Akasaka. IEEE Trans. Computer-Aided Design, **11** (9), 1114 (1992).
- [9] M.J. Hytch, E. Snoeck, R. Kilaas. Ultramicroscopy, **74**, 131 (1998).

Редактор Л.В. Шаронова

Optimization of parameters of HEMT GaN/AlN/AlGaN heterostructures using numerical modelling

V.G. Tikhomirov^{+,*}, V.E. Zemlyakov^{*,‡}, V.V. Volkov^{*}, Ya.M. Parnes^{*}, V.N. Vyuginov^{*}, W.V. Lundin^{#,•}, A.V. Sakharov^{#,•}, E.E. Zavarin^{#,•}, A.F. Tsatsulnikov^{#,•}, N.A. Cherkashin[†], M.N. Mizerov[#], V.M. Ustinov[•]

⁺ Saint Petersburg Electrotechnical University „LETI“, 197376 St. Petersburg, Russia

^{*} Joint Stock Company „Svetlana–Electronpribor“, 194021 St. Petersburg, Russia

[‡] National Research University of Electronic Technology — „MIET“, 124498 Zelenograd, Moscow, Russia

[#] Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

[•] Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

[†] CEMES-CNRS–Université de Toulouse, Toulouse, France

Abstract Numerical modelling and theoretical and experimental optimization of field microwave high electron mobility transistors based on GaN/AlN/AlGaN heterostructures were carried out. It was shown that optimal parameters of layer thickness and content which allow realization high microwave power lie in relatively narrow ranges. Investigations shown that TCAD software can be effectively used for numerical calculations of the HEMT transistors taking into account physical phenomena and features of the design of a real device.