

Модель для многопараметрического анализа параметров короткоканальных транзисторов типа НЕМТ

© А.Д. Недошивина¹, И.В. Макарецв^{1,2}, С.В. Оболенский^{1,2}

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

² АО Научно-производственное предприятие „Салют“, 603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: nnastasiaa@rambler.ru

Поступила в Редакцию 2 марта 2022 г.

В окончательной редакции 25 марта 2022 г.

Принята к публикации 25 марта 2022 г.

На основе комплекса аналитической и одномерной численной моделей предложен подход к проведению многопараметрической оптимизации транзисторов типа НЕМТ для диапазона частот ~ 100 ГГц.

Ключевые слова: НЕМТ-транзисторы, эффект всплеска скорости, короткоканальные транзисторы, аналитическая модель.

DOI: 10.21883/FTP.2022.07.52747.02

1. Введение

В современной наноэлектронике широко используются полевые транзисторы с каналом из слоя узкозонного полупроводника, формирующего квантовую яму, в которой образуется двумерный электронный газ (НЕМТ). Используются как структуры на основе соединений AlGaAs/InGaAs/GaAs, InP/InGaAs/InP, GaAs/AlGaAs, InGaAs/GaAs, так и структуры на основе соединения GaN/AlGaIn, в которых квантовая яма формируется за счет возникновения пьезоэлектрической поляризации на границах слоев [1,2]. На основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs были созданы высокочастотные усилители большой мощности, способные работать в миллиметровом диапазоне [3]. Тем не менее проблема создания усилителя с выходной мощностью > 100 мВт в диапазоне частот выше 100 ГГц является актуальной [4]. Важной задачей является разработка подходов к проведению моделирования эффектов переноса электронов в канале транзисторов с длинами затворов < 100 нм, когда движение электронов является безстолкновительным и (или) прерывающимся малоугловым упругим рассеянием на фононах или ионах доноров, слабо влияющим на ускорение электронов в электрическом поле. Такое движение характеризуется эффектом всплеска скорости, позволяющим существенно улучшить характеристики транзисторов.

Цель данной работы — усовершенствование комплекса аналитической и одномерной численной модели НЕМТ транзисторов, а также разработка подходов к проведению многопараметрического анализа влияния эффекта всплеска скорости в канале короткоканальных транзисторов на их радиотехнические параметры, что позволит оперативно оценивать наиболее критичные параметры полупроводниковой структуры, требующие

изменения при проведении итерационной разработки транзисторов и интегральных схем на их основе.

Ранее авторами [5–7] детально изучались особенности физико-топологического моделирования данных структур, был предложен комплекс аналитических и численных моделей для расчета электрофизических параметров исследуемых приборов. Важной особенностью предлагаемого в данной работе комплекса моделей является численный расчет параметров переноса электронов вдоль канала транзистора их скорости и энергии в одномерном приближении. За счет использования одномерной модели становится возможным проведение многопараметрической (до 5–6 параметров и более) оптимизации параметров транзистора. Последнее важно при использовании многослойных гетероструктур, каждый из слоев которых характеризуется рядом параметров — толщиной, проводимостью и т. п. Подобные возможности отсутствуют в современных системах автоматизированного проектирования (САПР), которые используют модели транзисторов на основе эквивалентной схемы, что не позволяет учитывать такие явления как эффект всплеска скорости, реализующийся в канале транзисторов с характерными длинами затворов < 100 нм.

На первом этапе работы проводился анализ дрейфовой скорости носителей заряда, продольной скорости, электрического поля и средней энергии электронов короткоканальных полевых транзисторов Шоттки (ПТШ) и проводилось сравнение результатов расчетов, произведенных с помощью аналитической модели с данными, предложенными в литературе [8,9]. На втором этапе полученные данные и параметры структуры транзисторов использовались как входные для проведения численного моделирования. Были рассчитаны сток-затворные ВАХ и крутизна исследуемых транзисторов. Оценена возможность проведения оптимизации параметров транзисторов с помощью предложенной модели.

2. Исследуемые образцы

В расчетах были использованы транзисторы — приборные НЕМТ гетероструктуры ES-228 и ES-344 с двухсторонним легированием канала (double НЕМТ), выращенные в АО НПП „Салют“ методом МОС-гидридной эпитаксии. Особенностями конструкции приборных double НЕМТ гетероструктур является наличие дополнительного поставщика электронов в канал — высоколегированного слоя n^+ -AlGaAs, расположенного ниже канального слоя InGaAs, обеспечивающего поставку дополнительного количества электронов в проводящий канал [10], контактного слоя n^+ -GaAs для формирования омических контактов и технологического стоп-слоя AlAs, предназначенного для создания равномерного углубления подзатворной канавки методом селективного химического травления [10]. Концентрация и подвижность $2D$ газа в канале составляет $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $7000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Дизайн структуры показан в табл. 1. Поперечное сечение исследуемого транзистора представлено на рис. 1.

Гетероструктура InAlAs/InGaAs (RC-1725) с двухсторонним легированием канала на подложке InP бы-

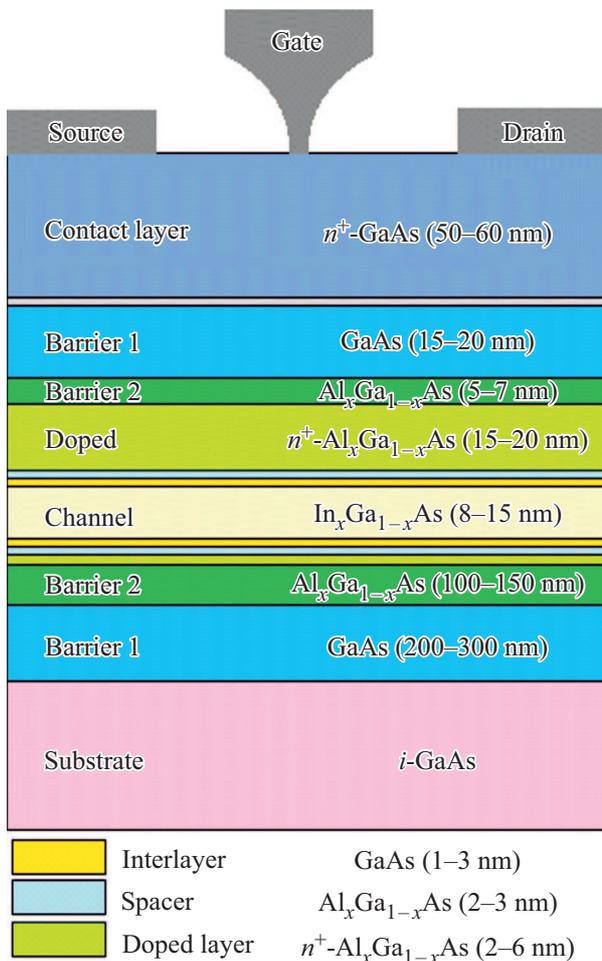


Рис. 1. Поперечное сечение исследуемого транзистора.

Таблица 1. Параметры слоев транзисторной гетероструктуры НЕМТ GaAs

Наименование слоя эпитаксиальной структуры	Материал	Толщина слоя, нм
Контактный слой	n^+ -GaAs	50–60
Etch-stop слой	AlAs	2–3
Барьерный слой 1	GaAs	15–20
Барьерный слой 2	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	5–7
Легированный слой	$n^+-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	15–20
Спейсер	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	2–3
Сглаживающий слой	GaAs	1–3
Канальный слой	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	8–15
Сглаживающий слой	GaAs	1–3
Спейсер	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	2–3
Легированный слой	$n^+-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	2–6
Барьерный слой 2	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	100–150
Барьерный слой 1	GaAs	200–300
Подложка	i -GaAs	

Таблица 2. Параметры слоев транзисторной гетероструктуры НЕМТ InP

Наименование слоя эпитаксиальной структуры	Материал	Толщина слоя, нм
Контактный	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	20
Etch-stop слой	InAlAs	3
Контактный	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	15
Барьерный	$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	21
Композитный		26
Буферный	$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	150
Подложка InP (100)		

ла выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург [11]. Для используемой структуры типичные значения концентрации и подвижности $2D$ газа в канале составляют $(2.8–3.1) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $9500–10\,000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ соответственно. Дизайн структуры показан в табл. 2 [11].

В АО НПП „Салют“ были изготовлены три партии СВЧ полевых транзисторов с затвором длиной 100 нм и шириной 120 мкм: на структуре ES-228 травление проходило однократно, затвор расположен по центру между стоком и истоком (SR-HEMT GaAs), на структурах ES-344 и RC-1725 проводилось двойное травление, затвор смещен к истоку транзистора (DR-HEMT GaAs и DR-HEMT InP соответственно). Для других подложек форма затвора и длина были аналогичными. Грибообразная форма затвора с высокой ножкой применяется для уменьшения паразитных емкостей транзистора, прежде всего емкости затвор–сток. Широкая шляпка необходима для уменьшения сопротивления затвора.

3. Математическая модель

Численное моделирование включает в себя большое количество временных шагов нестационарной модели, т.е. большой объем вычислений. Таким образом, численные расчеты, которые необходимо проводить для оптимизации конструкции прибора по 3–5 параметрам, включая температуру канала и уровень его радиационной стойкости, крайне ресурсоемки и требуют использования суперкомпьютеров.

В ряде случаев, однако, можно решить задачу быстрее и проще. Оптимальным представляется сочетание аналитических методов поиска приближенного решения, позволяющих проводить оптимизацию конструкции приборов за малое время, и численных методов моделирования, уточняющих полученное решение. Несколько итераций, сочетающих применение аналитической и численной модели, позволяют проводить оптимизацию с использованием рядовых вычислительных средств. В статье представлена аналитическая модель для расчета тепловых и электрофизических параметров НЕМТ, основанная на достаточно простых формулах. Для получения точных данных аналитической модели с помощью результатов численных расчетов подбирались поправочные коэффициенты.

Далее представлены вольт-амперные характеристики, которые рассчитывались по следующим аналитическим формулам:

$$I = W(a - d_g) \cdot N_d \cdot V, \quad (1)$$

$$d_g = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(V_g + V_b)}{eN_d}}, \quad (2)$$

$$V = \frac{\mu E}{1 + \mu E/V_{\text{sat}}}, \quad (3)$$

где I — ток, W — ширина затвора, N_d — концентрация доноров, μ — подвижность носителей заряда, ϵ — диэлектрическая проницаемость, e — заряд электрона, d_g — толщина обедненной области, V_b — контактная разность потенциалов затвора, V_g — напряжение затвора, V_{sat} — скорость насыщения [8,12]. Выражения (1)–(3) специально выбирались максимально простыми. Целью было определение величины погрешности при расчетах тока, которое бы позволило в дальнейшем целенаправленно уточнять модель без излишнего ее усложнения. Результаты расчета электрофизических параметров по данным аналитическим формулам дают погрешность $\leq 20\%$, причем использование аналитических выражений (1)–(3) дает выигрыш по времени оптимизации до 5 раз [13].

Для качественной и наглядной оценки изменения дрейфовой скорости и средней энергии электронов в однородно легированном полупроводнике в сильных электрических полях применяются уравнения баланса

усредненных импульса mv_d и энергии W :

$$dm(\bar{W})v_d/dt = qE - m(\bar{W})v_d/\tau_p(\bar{W}),$$

$$d(\bar{W})/\partial t = qEv_d - (\bar{W} - W_0)/\tau_w(\bar{W}),$$

где $W_0 = 3kT_0/2$ — средняя тепловая энергия электронов в отсутствие электрического поля, $v_d \equiv \langle v \rangle$, а $\tau_p(W)$ и $\tau_w(W)$ — времена релаксации импульса и энергии соответственно [14].

Всплеск скорости в пространстве — явление, реально реализующееся в полупроводниковых структурах. Такой всплеск носит стационарный характер. Его возникновение не требует практически нереализуемого импульса поля с бесконечно крутым (субпикосекундным) фронтом. Скачок поля реализуется за счет неоднородности структуры полупроводника по координате.

Электроны при своем движении по полупроводнику, попадая в область крутого скачка поля, испытывают резкое изменение скорости и эффект ее всплеска.

Если поле после скачка остается постоянным на протяжении всего пролета электронов, то, считая в уравнениях баланса τ_p константой до энергии $W_{\text{ГЛ}}$ междолинного рассеяния и $\tau_p \ll \tau_E$, получим для дистанции, проходимой электронами за время T , за которое электроны приобретают энергию, чуть меньшую $W_{\text{ГЛ}}$,

$$d_b = (v_0\tau_p/\sqrt{2}) [T/\tau_p - (1 - e^{-T/\tau_p})]^{1/2},$$

где

$$v_0 = \hbar^{-1}(\partial W/\partial k)_{W=W_{\text{ГЛ}}}$$

— максимальная скорость, которую может достичь электрон прежде, чем испытает междолинное рассеяние. Для параболической зоны можно написать $mv_0^2/2 = W_{\text{ГЛ}}$. Средняя скорость, с которой электрон проходит дистанцию

$$d = \int_0^t v_d(t')dt',$$

$$v_d(d) = d/t.$$

Если d — толщина активной части структуры прибора, то необходимо так подбирать T , т.е. значение пол E , чтобы $v_d(d)$ было максимально.

Всплеск скорости в пространстве $v_d(x)$ можно определить из всплеска скорости во времени $v_d(t)$ с помощью уравнения

$$dx = v_d(t)dt.$$

Однако при рассмотрении всплеска $v_d(x)$ в пространстве проявляются новые факторы, учет которых существенно изменяет и делает отличной форму всплеска в пространстве от формы всплеска во времени. Такими факторами являются неоднородности концентрации, объемного заряда, средней энергии носителей заряда по координате. Их наличие приводит к возникновению диффузии носителей, диффузионному переносу тепла, термоэдс и изменению конфигурации поля [14]. Параметры модели приведены в табл. 3.

Таблица 3. Диапазон параметров конструкции транзисторов, для которых проводилось варьирование для достижения совпадения экспериментальной и расчетных ВАХ

Параметр	GaAs	InP
Толщина слоя канала под истоком, мкм	0.15	0.15
Концентрация примеси под истоком N_d , $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	3	3
Расстояние от края n^+ до затвора, мкм	0.2	0.2
Расстояние от затвора до края n^+ слоя стока, мкм	1.2	1.2
Концентрация примеси в слое канала, прилегающем к затвору N_{d1} , $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	2.7–3.3	2.7–3.3
Толщина слоя канала, прилегающего к затвору, мкм	0.009	0.009
Концентрация примеси в слое канала, прилегающем к буферу N_{d2} , $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$	27–33	27–33
Толщина слоя канала, прилегающего к буферу, мкм	0.045–0.052	0.04–0.045
Ширина затвора W , мкм	120	120
Длина затвора L_g , мкм	1	1
Подвижность в канале, $\mu \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	7000	9500–10000
Контактная разность потенциалов затвора V_b , В	0.6	0.6
Диэлектрическая проницаемость, ϵ	13	13
Число секций затвора r затвора, Ом · см	4	1
Толщина металлизации затвора, мкм	$2.06 \cdot 10^{-6}$	$2.06 \cdot 10^{-6}$
Толщина металлизации затвора, мкм	0.19	0.19
Длина площадок истока и стока, мкм	20	20
Расстояние исток–сток по n^+ слоям, мкм	4.2	4.2

4. Результаты расчетов и сравнение с экспериментом

Результаты измерений статических характеристик исследуемых транзисторов показаны на рис. 2. Наличие области отрицательного дифференциального сопротивления связано с междолинным рассеянием электронов в транзисторах с коротким затвором. Двойная канавка увеличивает ток стока транзистора, что связано с увеличением скорости электронов в канале.

В табл. 4 представлены типичные значения напряжения отсечки (V_{th}), напряжения пробоя затвора (V_{br}) по

уровню 1 мА/мм, максимального рабочего напряжения сток–исток при максимальной крутизне ($V_{ds \max}$), удельной максимальной крутизне (g_m) и удельного тока насыщения стока (I_{dsat}) SR-HEMT транзисторов (ES-228) и DR-HEMT транзисторов (ES-344) на подложках GaAs и для DR-HEMT транзисторов (RC-1725) на подложке InP.

Зарубежные аналоги DR-HEMT транзисторов демонстрируют удельную крутизну — 500 мСм/мм, удельный ток насыщения — 680 мА/мм [15].

Транзисторы, выполненные по технологии двойного травления на структуре InP HEMT, показали в 2 раза большую крутизну (~ 1000 мСм/мм), чем транзисторы на структуре ES-344 GaAs HEMT, вследствие большей подвижности электронов в канале и меньшего напряжения отсечки (см. рис. 3). Стоит отметить, что, несмотря на большое пробивное напряжение затвор–исток (12 В), транзисторы на структуре InP имели рабочее напряжение на стоке ≤ 4 В.

Представленная аналитическая модель позволяет оптимизировать процесс расчета электрофизических пара-

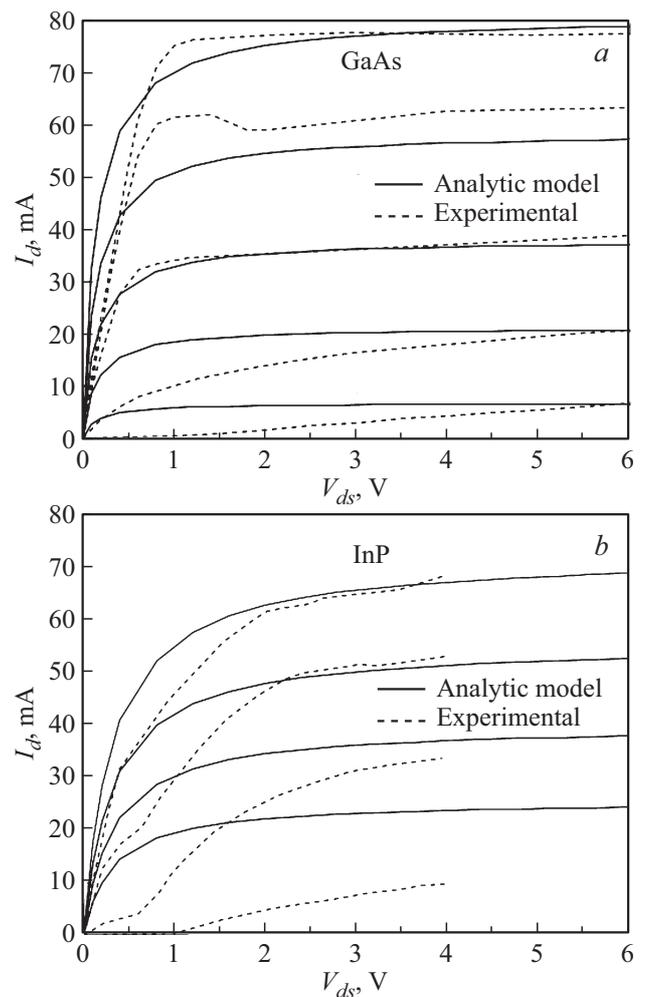


Рис. 2. Сравнение вольт-амперных теоретических (сплошная линия) и экспериментальных (штриховая линия) характеристик: от -1.2 до 0.4 В с шагом 0.4 В для GaAs-структуры (a) и от -0.8 до -0.2 В с шагом 0.2 В для InP-структуры (b).

Таблица 4. Параметры транзисторов на постоянном токе

Структура, тип транзистора	V_{th} , В	V_{br} , В	g_m , мСм/мм ($V_{ds} = 4$ В)	$I_{d sat}$, мА/мм	$V_{ds max}$, В	g_m , мСм/мм	δg_m , мСм/мм
			эксперимент			расчет	
ES-228 SR-HEMT GaAs	1.4	13	400	450	5–6	374.5	Менее 15%
ES-334 DR-HEMT GaAs	1.3	14	520	670	7–8	–	–
RC-1725 DR-HEMT InP	1.2	12	1000	600	3–4	888	Менее 30% (для верхних линий ВАХ)

Таблица 5. Зависимость времени, затраченного на расчет, от количества варьируемых параметров

Количество варьируемых параметров модели (см. табл. 1–3)	Затраченное на расчет время, с	
	Данные, полученные в ходе проведения вычислений	Теоретическая оценка времени на реализацию автоматической оптимизации на основе возможностей MSeXcel
1	< 1	0.1
3	150	78
5	> 10 ⁴	5 · 10 ³
7	–	10 ⁵ –10 ⁶

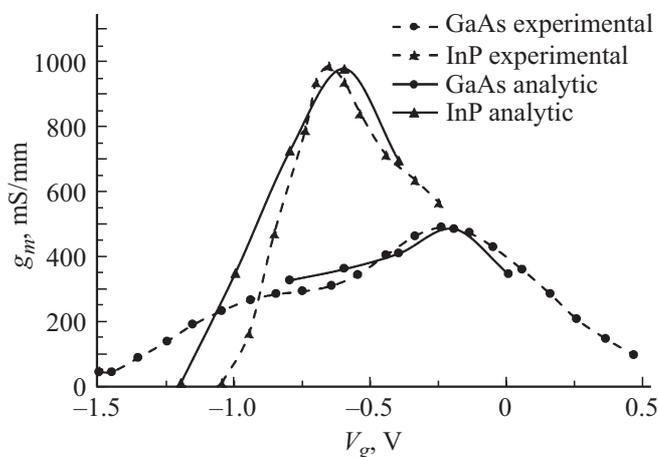


Рис. 3. Измеренные зависимости удельной крутизны изготовленных DR-HEMT на подложках различного типа от напряжения на затворе при напряжении на стоке 4 В.

метров транзисторов (см. табл. 5). Видно, что оптимизация параметров транзистора и его полупроводниковой структуры может быть проведена в автоматическом режиме в течение 1–2 сут для 5–6 параметров.

5. Заключение

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы.

1. Предложенный подход позволяет проводить многопараметрическую оптимизацию параметров НЕМТ за 1 сут, что приемлемо для решения многих прикладных задач.

2. Предложенная модель основывается на простейших выражениях и уравнениях, но учитывает основные эффекты транспорта электронов в канале транзистора, в том числе и эффект всплеска скорости, характерный для современных НЕМТ с длинами затвора < 100 нм.

3. Благодаря оптимальному сочетанию степени детализации аналитического и численного подходов при проведении оптимизации возможен учет параметров полупроводниковой структуры, что не может быть реализовано в программах типа MicrowaveOffice, которые производят оптимизацию на основе метода эквивалентной схемы, не позволяющей проводить анализ эффектов переноса электронов в полупроводниковых структурах.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания, проект 0729-2020-0057.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.Г. Тихомиров, В.Е. Земляков, В.В. Волков, Я.М. Парнес, В.Н. Вьюгинов, В.В. Лундин, А.В. Сахаров, Е.Е. Зава-рин, А.Ф. Цацульников, Н.А. Черкашин, М.Н. Мизеров, В.М. Устинов. ФТП, **50** (2), 245 (2016).
- [2] Е.А. Тарасова, С.В. Оболенский, О.Е. Галкин, А.В. Хана-нова, А.Б. Макаров. ФТП, **51** (11), 1543 (2017).
- [3] S.-J. Cho, C. Wang, R.K. Maharjan, N.-Y. Kim. Proc. APMS 2012 (Kaohsiung, Taiwan, 2012) p. 4
- [4] В.А. Беляков, И.В. Макарецв, А.Г. Фефелов, С.В. Обо-ленский, А.П. Васильев, А.Г. Кузьменков, М.М. Кулагина, Н.А. Малеев. ФТП, **55** (10), 890 (2021).
- [5] Е.А. Тарасова, Д.С. Демидова, С.В. Оболенский, А.Г. Фе-фелов, Д.И. Дюков. ФТП, **46** (12), 1587 (2012).
- [6] K. Yokoyama, K. Hess. Phys. Rev. B, **33** (8), 5595 (1986).
- [7] Е.А. Тарасова, С.В. Оболенский, С.В. Хазанова, Н.Н. Гри-горьева, О.Л. Голиков, А.Б. Иванов, А.С. Пузанов, А.Д.Боженкина. ФТП, **54** (9), 968 (2020).
- [8] Ю. Пожела. *Физика быстродействующих транзисто-ров* (Вильнюс, Москлас. 1989).
- [9] М. Шур. *Современные приборы на основе арсенида галлия*, пер. с англ. (М., Мир, 1991). 632 с.
- [10] J.V. Voos, W. Kruppa. Electron. Lett., **27**, 1909 (1991).
- [11] Н.А. Малеев, А.П. Васильев, А.Г. Кузьменков, М.А. Боб-ров, М.М. Кулагина, С.И. Трошков, С.Н. Малеев, В.А. Бе-ляков, Е.В. Петряков, Ю.П. Кудряшов, Е.Л. Фефелова, И.В. Макарецв, С.А. Блохин, Ф.А. Ахмедов, А.В. Егоров, А.В. Егоров, А.Г. Фефелов, В.М. Устинов. Письма ЖТФ, **45** (21), 29 (2019).
- [12] Е.А. Тарасова, Е.С. Оболенская, С.В. Оболенский. Вопро-сы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационно-го воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, **4**, 12 (2012).
- [13] Е.А. Тарасова, С.В. Оболенский. Вестн. ННГУ, **5**, 348 (2011).
- [14] М.М. Венедиктов, Е.А. Тарасова, А.Д. Боженкина, С.В. Оболенский, В.В. Елесин, Г.В. Чуков, И.О. Метелкин, М.А. Кривский, Д.И. Дюков, А.Г. Фефелов. ФТП, **52** (12), 1414 (2018).
- [15] S.-J. Cho, C. Wang, N.-Y. Kim. Microelectron. Eng., **113**, 11 (2014).

Редактор Г.А. Оганесян

Model for multiparametric analysis of parameters Short-channel transistors of HEMT type

A.D. Nedoshivina¹, I.V. Makartsev^{1,2}, S.V. Obolensky^{1,2}

¹ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (NNSU),

603950 Nizhny Novgorod, Russia

² JSC „RPE Salut“,

603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Based on a set of analytical and one-dimensional numerical models an approach to multi-parameter optimization of HEMT transistors for frequency range ~ 100 GHz is proposed.