

# Модель для многопараметрического анализа параметров короткоканальных транзисторов типа НЕМТ

© А.Д. Недошивина<sup>1</sup>, И.В. Макарецв<sup>1,2</sup>, С.В. Оболенский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> 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  $\sim 100$  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-

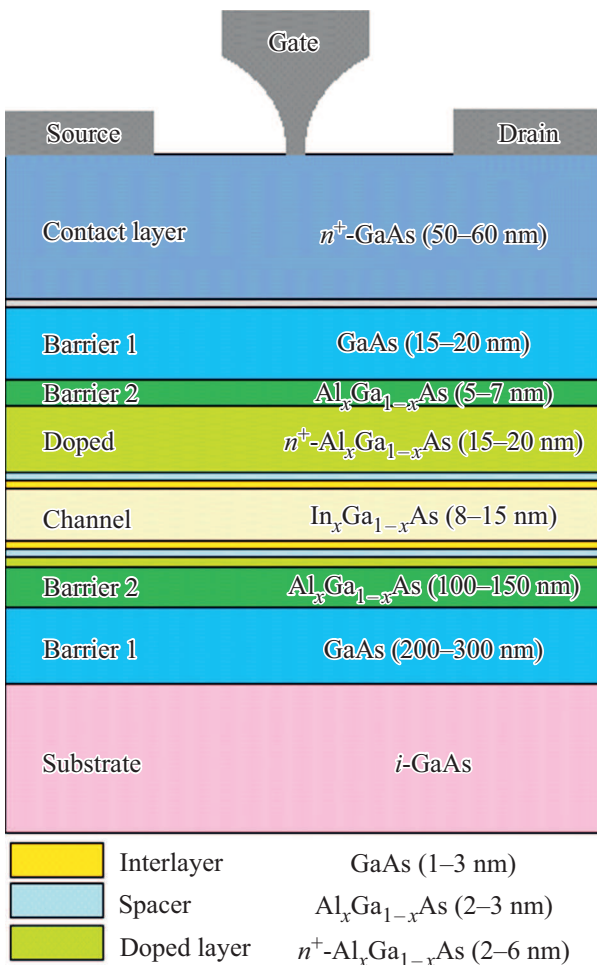


Рис. 1. Поперечное сечение исследуемого транзистора.

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,  $\mu$  — подвижность носителей заряда,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость,  $e$  — заряд электрона,  $d_g$  — толщина обедненной области,  $V_b$  — контактная разность потенциалов затвора,  $V_g$  — напряжение затвора,  $V_{\text{sat}}$  — 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  $W$ :

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

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

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  $\tau_p$  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, $\epsilon$	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.

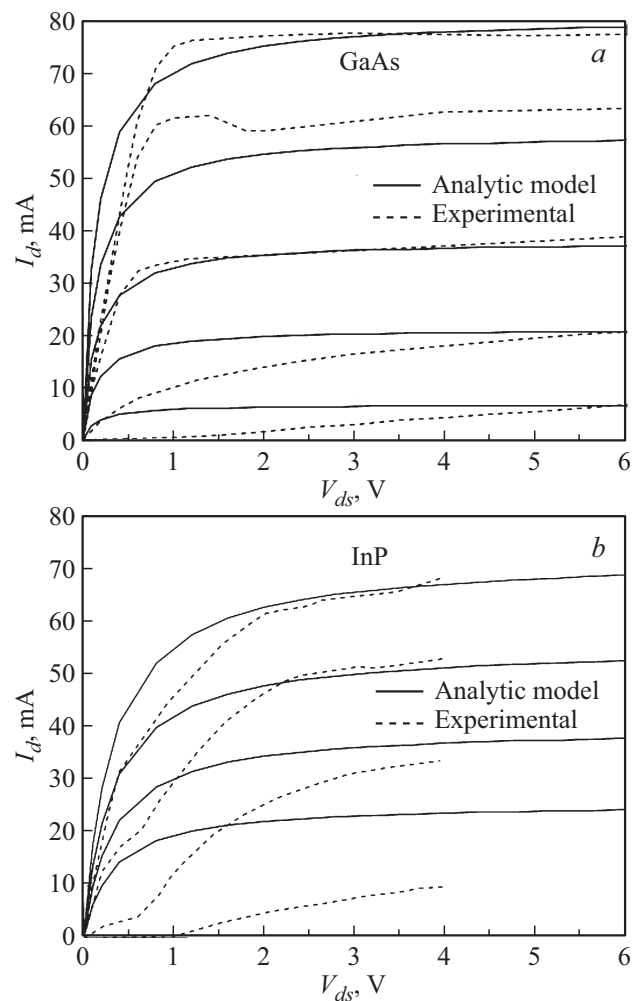
В табл. 4 представлены типичные значения напряжения отсечки ( $V_{th}$ ), напряжения пробоя затвора ( $V_{br}$ ) по

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 ( $\sim 1000$  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  $\leq 4$  В.

Представленная аналитическая модель позволяет оптимизировать процесс расчета электрофизических пара-



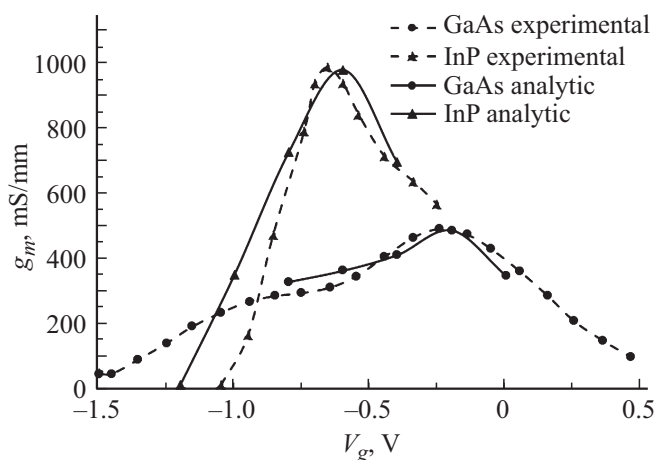
**Рис. 2.** Сравнение вольт-амперных теоретических (сплошная линия) и экспериментальных (штриховая линия) характеристик: от  $-1.2$  до  $0.4$  В с шагом  $0.4$  В для GaAs-структуры (a) и от  $-0.8$  до  $-0.2$  В с шагом  $0.2$  В для InP-структуры (b).

**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	$\delta g_m$ , 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 <sup>4</sup>	5 · 10 <sup>3</sup>
7	–	10 <sup>5</sup> –10 <sup>6</sup>

**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. Nedoshivina<sup>1</sup>, I.V. Makartsev<sup>1,2</sup>, S.V. Obolensky<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (NNSU),

603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> 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  $\sim 100$  GHz is proposed.