

Численный анализ AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT

А. В. Сапожников^{1,2✉}, И. С. Пушница², А. Л. Дудин², В. В. Перепеловский¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² АО "Светлана-Рост", Санкт-Петербург, Россия

✉ avsapozhnikov@stud.etu.ru

Аннотация

Введение. В большинстве технологических процессов параметры транзисторов имеют некоторую вариацию значений. Таким образом, возникает разброс параметров интегральной схемы (ИС) около номинальных значений, указанных в технологической спецификации. Достижение параметрической надежности проектируемых устройств является неотъемлемой частью параметрического анализа с использованием моделирования. В данной статье представлен численный анализ псевдоморфного транзистора с высокой подвижностью электронов GaAs/AlGaAs/InGaAs в среде TCAD. Основное внимание уделено анализу стоковых и сток-затворных вольт-амперных характеристик (ВАХ) с учетом 10 % отклонений от заявленных производителем параметров pHEMT. Проведена оценка высокочастотных свойств моделируемого pHEMT. Проанализировано влияние толщины спейсера на стоковые и сток-затворные характеристики. Анализ основан на большом объеме экспериментальных данных.

Цель работы. Численный анализ псевдоморфного транзистора с высокой подвижностью электронов AlGaAs/InGaAs/GaAs в среде TCAD.

Материалы и методы. Моделирование структуры основывается на решении фундаментальных уравнений полупроводниковой электроники с использованием численных методов анализа. Применяется гидродинамическая двумерная численная модель pHEMT, которая учитывает влияние квантовых ям, эффекты нестационарной динамики, такие как локальный перегрев в канале и насыщение скорости носителей. Экспериментальные данные pHEMT получены на производстве АО "Светлана-Рост".

Результаты. Параметрический анализ выявил критический параметр, оказывающий значительное влияние на характеристики транзисторов pHEMT, – концентрация донорного слоя AlGaAs. Изменения длины канала, длины затвора и глубины затвора в слое GaAs имеют менее выраженное влияние на электрические характеристики pHEMT. Стоковые и сток-затворные характеристики численной модели pHEMT продемонстрировали высокую степень соответствия с экспериментальными данными. Экспериментальные и расчетные ВАХ, полученные при варьировании толщины спейсера, позволили уточнить значение толщины спейсера, реализуемого в производственных условиях. В рамках данного анализа выявлена зависимость частоты отсечки от напряжения на затворе.

Заключение. Проведенный анализ выявил параметры, оказывающие влияние на характеристики численной модели GaAs/AlGaAs/InGaAs pHEMT. Критические отклонения исследуемых характеристик обнаружены в результате 10 %-й вариации концентрации донорного слоя AlGaAs. Получено значение толщины спейсера, согласующееся с экспериментальными структурами, в ходе анализа экспериментальных и расчетных ВАХ с вариацией разных значений спейсера. Параметрическая стабильность является критически важным аспектом в производстве микроэлектронных приборов, влияя на надежность, долговечность, производительность, соответствие стандартам. Улучшение параметрической стабильности способствует снижению уровня брака, оптимизации производственных процессов.

Ключевые слова: параметрический анализ, pHEMT, транзистор с высокой подвижностью электронов, GaAs/AlGaAs/InGaAs, TCAD, параметрическая стабильность, численное моделирование

Для цитирования: Численный анализ AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT / А. В. Сапожников, И. С. Пушница, А. Л. Дудин, В. В. Перепеловский // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 3. С. 116–128.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-3-116-128

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.11.2024; принята к публикации после рецензирования 24.04.2025; опубликована онлайн 30.06.2025

Numerical Analysis of AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT

Alexander V. Sapozhnikov^{1,2✉}, Iliya S. Pushnitsa², Anatoliy L. Dudin², Vadim V. Perepelovskiy¹

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²Joint Stock Company "Svetlana-Rost", St Petersburg, Russia

✉ avsapozhnikov@stud.etu.ru

Abstract

Introduction. In most technological processes, the parameters of transistors may exhibit variations in values. As a result, integrated circuit (IC) parameters may spread beyond the nominal values stated in the technological specification. Parametric reliability of the designed devices is an important goal of parametric analysis based on simulation. This paper presents a numerical analysis of a pseudomorphic GaAs/AlGaAs/InGaAs high electron mobility transistor conducted in the TCAD environment. Particular attention is paid to the analysis of the drain and transfer characteristics taking into account 10% deviations from the pHEMT parameters specified by the manufacturer. High-frequency properties of the simulated pHEMT are evaluated. The effect of the spacer thickness on the drain and drain-gate characteristics is analyzed. The work is based on a large amount of experimental data.

Aim. Numerical analysis of a pseudomorphic AlGaAs/InGaAs/GaAs high electron mobility transistor in the TCAD environment.

Materials and methods. The simulation approach involved solving the fundamental equations of semiconductor electronics using numerical analysis methods. A hydrodynamic two-dimensional numerical pHEMT model was used, which takes into account the influence of quantum wells, the effects of non-stationary dynamics, and the phenomena of charge carrier transport. The experimental data of pHEMT were obtained at the production facility of JSC Svetlana-Rost.

Results. The conducted parametric analysis revealed the concentration of the AlGaAs donor layer to be a critical parameter having a significant impact on the characteristics of pHEMT transistors. Changes in the channel length, gate length, and gate depth in the GaAs layer have a less pronounced effect on the electrical characteristics of pHEMT. The drain and drain-gate characteristics of the numerical model of pHEMT demonstrated a high degree of agreement with the experimental data. The experimental and calculated I–V characteristics obtained by varying the thickness of the spacer layer made it possible to clarify the value of the spacer thickness implemented in production conditions. As part of this analysis, the dependence of the cutoff frequency on the gate voltage was obtained.

Conclusion. The conducted analysis revealed the parameters affecting the characteristics of the numerical model of GaAs/AlGaAs/InGaAs pHEMT. Critical deviations of the studied characteristics were detected as a result of 10 % variation in the concentration of the AlGaAs donor layer. The analysis of experimental and calculated I–V characteristics, under varied spacer values, established the spacer thickness which showed agreement with the experimental structures. Parametric stability is a critical aspect in the production of microelectronic devices, affecting reliability, durability, performance, and compliance with standards. Improved parametric stability reduces the level of defects and optimizes production processes.

Keywords: parametric analysis, pHEMT, high electron mobility transistor, AlGaAs/InGaAs/GaAs, TCAD, parametric stability, numerical simulation

For citation: Sapozhnikov A. V., Pushnitsa I. S., Dudin A. L., Perepelovskiy V. V. Numerical Analysis of AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 3, pp. 116–128. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-3-116-128

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 10.11.2024; accepted 24.04.2025; published online 30.06.2025

Введение. Транзистор с высокой подвижностью электронов (HEMT) на арсениде галлия (GaAs) – технология полупроводниковых полевых транзисторов, характеризующаяся высокой подвижностью электронов и высокой концен-

трацией носителей заряда. В сфере СВЧ-технологий стремительно возрастает значение транзисторов с высокой подвижностью электронов [1]. Технология GaAs HEMT повсеместно используется в монолитных микроволновых инте-

гральных схемах (ММИС) [2–5] из-за возможности достижения малых размеров и обеспечения высокой надежности при низкой стоимости готовой продукции. Некоторые параметры, включая высокую частоту среза, низкий уровень шумов и функционирование в гигагерцевом и терагерцевом [6] диапазонах частот, внесли значительный вклад в распространение этих транзисторов в сфере интегральных схем.

В процессе проектирования полупроводниковых устройств наблюдается разброс в явном диапазоне параметров транзисторов, обусловленный технологическими спецификами производственных циклов. Эти вариации приводят к отклонению характеристик в сравнении с номинальными значениями, указанными в техническом задании. Транзисторы, параметры которых превышают установленные пределы, подлежат исключению из производственного процесса. Моделирование отклонений характеристик транзисторов ориентировано на достижение параметрической стабильности разрабатываемых микросхем. Значимость анализа параметров транзистора выделяется в соответствующих исследованиях, таких как [7]. Существующие методы измерений позволяют получить точные данные только по ограниченному набору параметров при незначительных затратах, в то время как оценка остальных характеристик (например, длины затвора, толщины эпитаксиальных слоев, концентрации легирующих примесей) осуществляется посредством косвенных методик. Определение критических параметров, имеющих значительное влияние на функциональные характеристики устройств, безусловно важно. Данная задача находит решение в осуществлении параметрического анализа.

Математическая модель. В области приборно-технологического моделирования полупроводниковых элементов применялись численные методы анализа с целью решения основополагающих уравнений, таких как уравнение Пуассона, уравнения непрерывности и переноса зарядов. Для численного моделирования в системе TCAD использовалась гидродинамическая модель, ориентированная на моделирование структур с размерами в субмикронном диапазоне.

Уравнение Пуассона:

$$\nabla(\epsilon \nabla \phi) + \bar{P} = -q(p - n + N_d - N_a) - \rho_{\text{trap}},$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость; ϕ – электростатический потенциал; $\bar{P}$ – сегнетоэлектрическая поляризация; q – элементарный электрический заряд; n и p – плотности электронов и дырок соответственно; N_d – концентрация ионизированных доноров; N_a – концентрация ионизированных акцепторов; ρ_{trap} – плотность заряда, создаваемая ловушками и фиксированными зарядами.

Уравнения непрерывности:

$$\begin{aligned} \nabla \bar{J}_n &= qR_{\text{net},n} + q \frac{\partial n}{\partial t}; \\ -\nabla \bar{J}_p &= qR_{\text{net},p} + q \frac{\partial p}{\partial t}, \end{aligned}$$

где $\bar{J}_n$ – плотность тока для электронов; $\bar{J}_p$ – плотность тока для дырок; $R_{\text{net},n}$ и $R_{\text{net},p}$ – суммарная скорость рекомбинации электронов и дырок соответственно.

Уравнения переноса для гидродинамической модели:

$$\begin{aligned} \bar{J}_n &= \mu_n(n \nabla E_c + kT_n \nabla n - nkT_n \nabla \ln \gamma_n + \\ &\quad + \lambda_n f_n^{\text{td}} kn \nabla T_n - 1.5nkT_n \nabla \ln m_n); \\ \bar{J}_p &= \mu_p(p \nabla E_v - kT_p \nabla p + pkT_p \nabla \ln \gamma_p - \\ &\quad - \lambda_p f_p^{\text{td}} kp \nabla T_p + 1.5pkT_p \nabla \ln m_p), \end{aligned}$$

где μ_n – подвижность электронов; μ_p – подвижность дырок; E_c – энергия границы зоны проводимости; E_v – энергия границы валентной зоны; k – постоянная Больцмана; T_n – электронная температура; T_p – дырочная температура; γ_n – степень вырождения для электронов; γ_p – степень вырождения для дырок; λ_n – интеграл Ферми порядка 1/2 безразмерной кинетической энергии электрона; λ_p – интеграл Ферми порядка 1/2 безразмерной кинетической энергии дырки; f_n^{td} – константа термодиффузии для электронов; f_p^{td} – константа термодиффузии для дырок; m_n и m_p – эффективная масса электронов и дырок соответственно.

Для определения температуры решетки, электронных и дырочных температур в гидро-

динамической модели используются уравнения энергетического баланса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_n}{\partial t} + \nabla \overline{S_n} &= \overline{J_n} \nabla E_c / q + \left. \frac{dW_n}{dt} \right|_{\text{coll}}; \\ \frac{\partial W_p}{\partial t} + \nabla \overline{S_p} &= \overline{J_p} \nabla E_v / q + \left. \frac{dW_p}{dt} \right|_{\text{coll}}; \\ \frac{\partial W_l}{\partial t} + \nabla \overline{S_l} &= \left. \frac{dW_l}{dt} \right|_{\text{coll}}, \end{aligned}$$

где W_n , W_p и W_l – плотности энергии электронов, дырок и решетки; S_n , S_p и S_l – потоки энергии электронов, дырок и решетки.

Для экономии времени в моделируемом рНЕМТ n -типа принято считать и учитывать только электроны, так как учет дырок вносит несущественный вклад в конечный результат моделирования. Все обозначения общепринятые и соответствуют приведенным в [8].

Рассматриваемый подход обеспечивает высокую степень точности в прогнозировании поведения полупроводниковых устройств в различных эксплуатационных условиях. Задействованные физико-математические модели полностью соответствуют установленным стандартам и принципам, представленным в [8].

На рис. 1 представлена топология GaAs рНЕМТ. Слоевая структура (толщины слоев, значения легирования слоев и т. д.) GaAs рНЕМТ соответствует технологии АО "Светлана-Рост".

Технология изготовления на основе нормально открытых транзисторов с проектной нормой 0.5 мкм выстроена на базе эпитаксиальной структуры GaAs рНЕМТ.

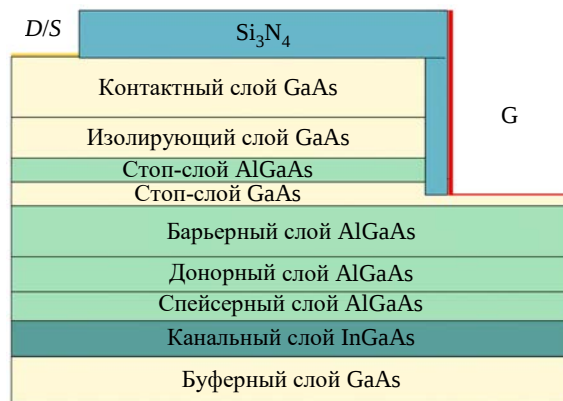


Рис. 1. Топология GaAs рНЕМТ 0.5 switch

Fig. 1. GaAs pHEMT 0.5 switch topology

Исследование электрофизических параметров рНЕМТ выполнено в программной среде TCAD, поддерживающей многокритериальный анализ и моделирование полупроводниковых устройств [9, 10].

Конфигурация устройства включает функциональные слои. Поверхность контактного слоя GaAs толщиной 50 нм изолирована с помощью слоя Si_3N_4 . В топологии присутствуют стоп-слои AlGaAs и GaAs, служащие отметкой для остановки процедуры травления. Защитный стоп-слой предотвращает взаимодействие травителя с 17.5 нм барьерным слоем AlGaAs. Барьер Шоттки сформирован в верхней части защитного слоя на глубину 2 нм. Донорная область AlGaAs, толщиной 12.5 нм, интегрирована между спейсером и барьерным слоем AlGaAs. В качестве подложки структуры использован полупроводник GaAs производства Ram-Xiamen толщиной 625 ± 25 мкм и диаметром 100 ± 0.4 мм. Структурные параметры устройства систематизированы в таблице.

Данные структуры типа GaAs рНЕМТ 0.5 switch

Data on the GaAs pHEMT 0.5 switch structure

Последовательность слоев	Толщина слоя, нм	Тип легирования, концентрация, см^{-3}
Пассивация Si_3N_4	20	–
Контактный слой GaAs	50	$n, 3.3 \cdot 10^{18}$
Изолирующий слой GaAs	20	$n, 2.0 \cdot 10^{17}$
Стоп-слой AlGaAs	2.5	$n, 4.1 \cdot 10^{18}$
Стоп-слой GaAs	5 (2 нм затвор Шоттки)	$n, 1.0 \cdot 10^{17}$
Барьерный слой $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$	17.5	$n, 1.0 \cdot 10^{17}$
Донорный слой $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$	12.5	$n, 3.4 \cdot 10^{18}$
Спейсерный слой $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$	2	–
Канальный слой $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$	12	–
Буферный слой GaAs	800	–

В масштабах проведенного численного анализа внимание сосредоточено на тщательном включении в модель важных физических явлений. Для этого выбрана стандартная физическая модель, которая учитывает квантование двумерного газа в гетеропереходах [11]. Нелинейность переноса носителей в сильных полях, моделируемая через механизмы фононного и кулоновского рассеяния, адекватно отражается в численной модели TCAD. Процессы рекомбинации носителей заряда сопровождаются диссипацией и передачей энергии в кристаллической решетке для достижения термодинамического равновесия. Для количественного описания данных явлений в численных расчетах используются математические модели, учитывающие различные механизмы рекомбинации, такие как излучательная рекомбинация, оже-рекомбинация и рекомбинация по модели Шокли–Рида–Холла. Валидация подхода подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными [12], демонстрирующими необходимость многоуровневого учета физических явлений при проектировании pHEMT. Реализация комплексной модели в TCAD обеспечивает адекватное прогнозирование рабочих характеристик устройства, включая подвижность носителей и вольт-амперные зависимости.

Для дискретизации расчетной области транзистора сформирована адаптивная вычислительная сетка, состоящая из $\sim 3.2 \times 10^4$ узлов. В области канала InGaAs реализовано локальное повышение плотности сетки: вдоль вертикальной оси (Y) задано пространственное разрешение 8 узлов/12 нм, при горизонтальном шаге дискретизации (X) 5 нм, что обеспечивает точное моделирование градиентов электрического поля.

Стратегия параметрического исследования предполагала последовательный анализ чувствительности характеристик устройства к вариациям технологических параметров. Каждый исследуемый параметр подвергался систематическому отклонению в диапазоне $\pm 10\%$ от номинального значения при фиксированных остальных переменных. Параметрический анализ охватывал изучение следующих ключевых характеристик:

- длина затвора: исследовано влияние отклонения длины затвора на $\pm 10\%$ от стандартного

значения 0.5 мкм, т. е. при минимальном значении 0.45 мкм и максимальном 0.55 мкм;

- концентрация донорного слоя AlGaAs: исследовано влияние отклонения концентрации донорного слоя AlGaAs на $\pm 10\%$ от стандартного значения $3.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, при минимальном значении $3.06 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и максимальном $3.74 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$;

- концентрация контактного слоя GaAs: исследовано влияние отклонения концентрации контактного слоя GaAs на $\pm 10\%$ от стандартного показателя $3.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, при минимальном значении $2.97 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и максимальном $3.63 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$;

- длина канала InGaAs: проанализировано влияние отклонения длины канала InGaAs на $\pm 10\%$ от нормативной длины 12 нм, при минимальном значении 10.8 нм и максимальном 13.2 нм;

- глубина затвора в 5-нанометровом слое GaAs: исследовано влияние отклонения глубины затвора на $\pm 10\%$ от стандартного значения 2 нм, при минимальном значении 1.8 нм и максимальном значении 2.2 нм.

В исследовании проведен подробный анализ характеристик pHEMT при варьировании толщины спейсера AlGaAs, который пространственно разделяет донорный слой AlGaAs от канального слоя InGaAs. Параметру задавались значения в диапазоне от 4 до 0 нм с шагом 1 нм. Выбор варьирования спейсера обусловлен его размерами [13], которые составляют единицы нанометров. Разброс значений спейсера при эпитаксиальном росте может быть обусловлен сегрегацией индия, при которой молекулы индия встраиваются в решетку спейсера AlGaAs и, таким образом, уменьшают его толщину [14]. Также при технологическом разбросе концентрации носителей заряда в донорном слое AlGaAs изменяется эффективная толщина спейсера [15]. Сопоставление численных характеристик модели, использующей варьированные значения спейсера, с экспериментальными характеристиками позволит судить о реальных значениях толщины спейсера в структурах, которые выращиваются на производстве.

В исследовании, представленном в [16], проводится анализ значимости критических параметров, в частности длины канала и длины затвора, особенно важных для данного исследования, на функциональные характеристики

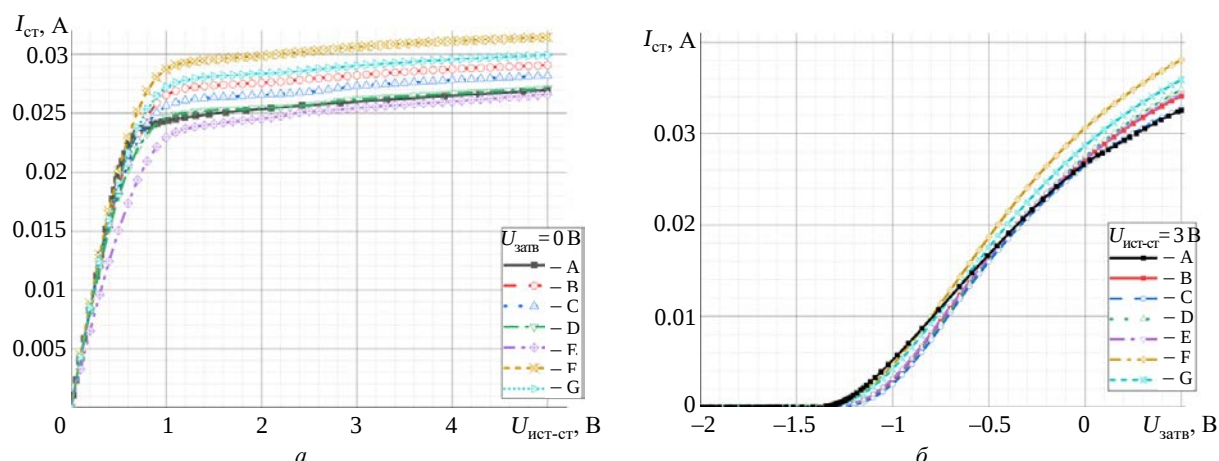


Рис. 2. Стоковые (а) и сток-затворные (б) характеристики для моделируемых и экспериментальных устройств pHEMT: А – характеристика, полученная с применением численного моделирования; В–Г – характеристики, определенные экспериментально

Fig. 2. Drain (a) and transfer (б) characteristics of simulated and experimental pHEMTs:

А – characteristic obtained through numerical simulation; В–Г – characteristics determined experimentally

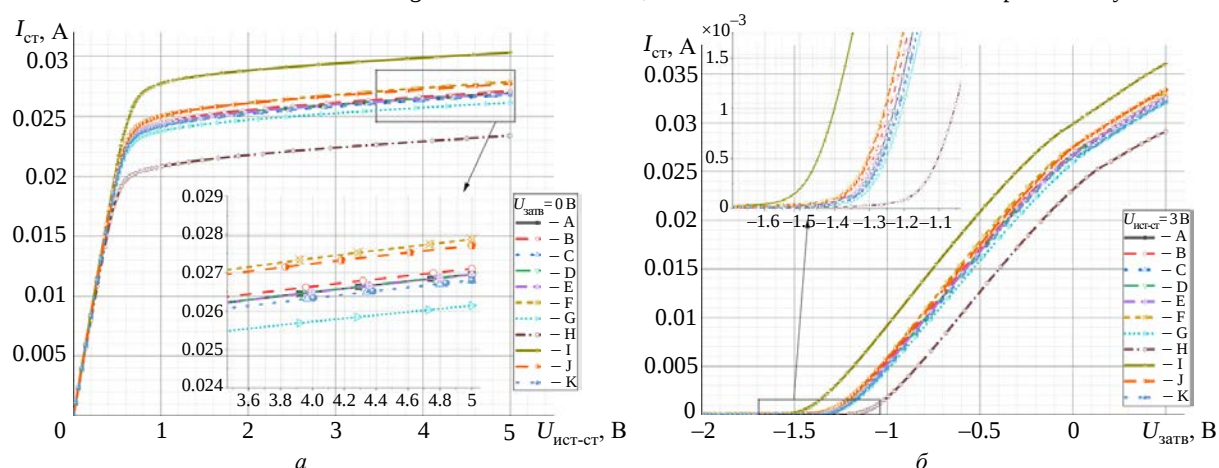


Рис. 3. Стоковые (а) и сток-затворные (б) характеристики численной модели pHEMT, иллюстрирующие сравнение кривых, полученных с 10 %-й вариацией различных параметров по отношению к базовой кривой: А – базовая ВАХ; В, С – вариация глубины затвора; D, Е – вариация концентрации контактного слоя; F, G – вариация длины затвора; H, I – вариация концентрации донорного слоя; J, K – вариация длины канала

Fig. 3. Drain (a) and transfer (б) characteristics of the numerical pHEMT model, illustrating the comparison of curves obtained with a 10 % variation of various parameters relative to the base curve: А – base I–V characteristic; В, С – gate depth variation; D, Е – contact layer concentration variation; F, G – gate length variation; H, I – donor layer concentration variation; J, K – channel length variation

устройства. Эти данные коррелируют с поведением полученных характеристик численной модели pHEMT в настоящей статье.

В исследовании проводится сравнение стоковых и сток-затворных вольт-амперных характеристик (ВАХ) (рис. 2–4), полученных с использованием численной двумерной модели с экспериментальными данными, полученными в производственном комплексе АО "Светлана-Рост".

Результаты параметрического исследования. В текущем параметрическом исследовании сравниваются стоковые (рис. 2, а) и сток-

затворные (рис. 2, б) характеристики модели реального устройства AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT с экспериментальными характеристиками устройств AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT, обладающих идентичной топологией. Такое сопоставление ВАХ предоставляет возможность проанализировать степень соответствия численной модели pHEMT реальным экспериментальным данным, что является критически важным для верификации надежности модели. При анализе стоковых характеристик, полученных в результате изменения напряжения

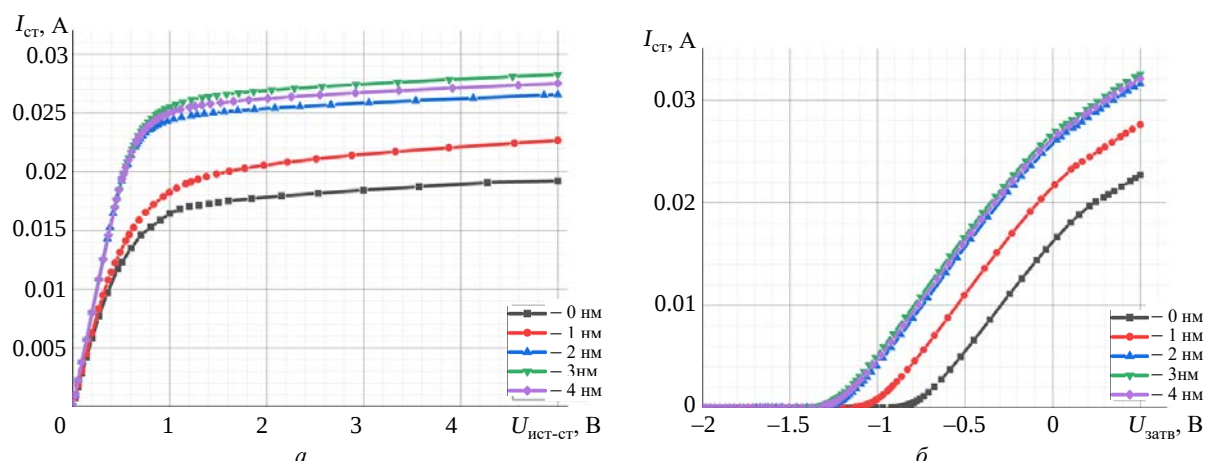


Рис. 4. Стоковые (а) и сток-затворные (б) характеристики численной модели рНЕМТ при различных толщинах спейсера AlGaAs
Fig. 4. Drain (a) and transfer (b) characteristics of the numerical model of pHEMT for different thicknesses of the AlGaAs spacer layer

сток-исток в диапазоне от 0 до 5 В при фиксированном значении напряжения на затворе 0 В, были рассчитаны токи насыщения и сопротивления во включенном состоянии (R_{Dson}) для каждой из полученных кривых. В дополнение к проведенным экспериментам, исследование сток-затворных характеристик выполнено при фиксированном напряжении сток-исток 3 В и модуляции потенциала затвора в диапазоне от -2 до 0.5 В, что позволило определить пороговое напряжение и крутизну (S). Напряжение отсечки и крутизна измерялись в режиме насыщения, так как это является рабочим режимом моделируемого рНЕМТ, используемых в СВЧ-усилителях. Численное моделирование демонстрирует предельный ток насыщения 26.96 мА, который находится в пределах экспериментально зарегистрированного диапазона от 26.61 до 31.46 мА. Рассчитанное сопротивление во включенном состоянии, имеющее значение 24.98 Ом, находится в диапазоне экспериментально полученных значений от 24.8 до 28.13 Ом. Рассчитанное пороговое напряжение, оценивающееся в -1.42 В, также соответствует экспериментальным данным, варьирующимся от -1.48 до -1.26 В. Значение крутизны передаточной характеристики моделируемого рНЕМТ, оценивающееся в 23.3 мСм, лежит внутри диапазона экспериментальных данных, варьирующихся от 23.1 до 28.8 мСм.

При анализе стоковых ВАХ установлено воздействие параметра толщины спейсера на уровень тока насыщения и напряжения отсечки

в численной модели GaAs рНЕМТ.

В ходе экспериментальных исследований были зарегистрированы стоковые (см. рис. 3, а) и сток-затворные (см. рис. 3, б) вольт-амперные характеристики для структур GaAs рНЕМТ с варьируемой толщиной спейсера. Измерения стоковых характеристик осуществлялись при вариации напряжения сток-исток в интервале 0...5 В при нулевом потенциале затвора, тогда как сток-затворные зависимости фиксировались при фиксированном напряжении сток-исток 3 В с модуляцией затворного напряжения от -2 до 0.5 В. Результаты демонстрируют выраженную корреляцию между толщиной спейсера и ключевыми параметрами устройства: током насыщения и напряжением отсечки. На стоковых ВАХ ток насыщения в отсутствие спейсера составил 18.2 мА; при толщине спейсера 1 нм – 22.6 мА; при 2 нм – 26.9 мА; при 3 нм – 28.3 мА; при 4 нм – 27.1 мА. Сопротивление во включенном состоянии в отсутствие спейсера оценивается в 41.28 Ом; при толщине спейсера 1 нм – 35.76 Ом; при 2 нм – 24.98 Ом; при 3 нм – 25.13 Ом; при 4 нм – 25.02 Ом. На сток-затворных ВАХ напряжение отсечки в отсутствие спейсера составило -0.9 В. Определены напряжения отсечки для 1, 2, 3, 4 нм толщин соответственно: -1.19, -1.40, -1.46, -1.42 В. Крутизна в отсутствие спейсера оценивается в 19.8 мСм. Определена крутизна передаточной характеристики для 1, 2, 3, 4 нм толщин соответственно: 21.9, 23.3, 23.4, 23.4 мСм. Таким образом, в отсутствие спейсера и при очень тонком спейсере

с толщиной 1 нм рНЕМТ выходит из диапазона требуемых экспериментальных значений. Наблюдаемый результат связан с влиянием кулоновского рассеяния на донорном слое AlGaAs, из-за чего в канале InGaAs значительно снижается подвижность носителей заряда [15, 17]. При толщине спейсера 2 нм, принимающийся за базовый уровень в исследовании, а также при толщинах спейсера 3 и 4 нм рабочая структура остается в рамках номинального диапазона экспериментальных значений тока насыщения и напряжения отсечки. При толщине спейсера 3 нм структура демонстрирует более высокие показатели тока насыщения, чем прочие, что указывает на повышение работоспособности прибора при данной конфигурации. Таким образом, данную толщину следует считать оптимальной. Увеличение толщины спейсера свыше 3 нм приводит к ухудшению характеристик прибора. При толщине спейсера 4 нм ток насыщения снижается на 4.2 %, напряжение отсечки отклоняется на 2.7 % относительно толщины спейсера 3 нм. Данное явление связано со снижением количества электронов, попадающих в яму из донорного слоя, что, соответственно, приводит к уменьшению концентрации двумерного электронного газа в канале InGaAs. Подобное явление в НЕМТ описано в [18].

В границах проведенного параметрического анализа с 10 %-й вариацией заданных параметров исследованы стоковые характеристики (рис. 4, а) моделируемого рНЕМТ при фиксированном значении напряжения на затворе, установленном на уровне 0 В, и варьировании напряжения сток-исток в пределах от 0 до 5 В. В аналогичной манере сток-затворные характеристики (рис. 4, б) исследованы при стабильном напряжении сток-исток 3 В, с изменением напряжения на затворе в диапазоне от –2 до 0.5 В. Целью построения данных графиков являлось выявление параметров, оказывающих наиболее существенное влияние на функциональные характеристики моделируемого устройства рНЕМТ.

В результате проведенного анализа установлено, что предельное отклонение тока стока на стоковых характеристиках составляет порядка 12.7 %. Сопоставимые изменения наблюдаются для напряжения отсечки, которое по

данным сток-затворных характеристик достигает 11.2 %. Также проведена оценка предельных отклонений крутизны и сопротивления во включенном состоянии, которые оцениваются, соответственно, в 3.43 и 8.65 %. Данный результат получен в результате вариации концентрации электронов в донорном слое AlGaAs на уровне 10 %.

Анализ быстродействия моделируемого рНЕМТ выявил зависимость частоты отсечки от напряжения на затворе (рис. 5). Изменение потенциала затвора от –0.5 до 0.5 В при постоянном напряжении сток-исток 3 В сопровождается уменьшением частоты отсечки с 29 до 15 ГГц. Экспериментальные измерения, проведенные при нулевом напряжении затвора и напряжении сток-исток 3 В, зафиксировали частоту отсечки в диапазоне 22...28 ГГц, тогда как численная модель предсказала значение 22.5 ГГц. Данное поведение частоты отсечки от напряжения на затворе связано с усилением межэлектронных столкновений и нагревом носителей в канале рНЕМТ. Совпадение частотных характеристик модели с экспериментальными данными, а также корректное воспроизведение зависимости частоты отсечки от управляющего напряжения подтверждают достоверность используемой численной модели рНЕМТ. Полученные результаты свидетельствуют о ее адекватности для прогнозирования рабочих параметров устройства, включая высокочастотные характеристики, что критично для проектирования микроволновых компонентов на основе гетероструктур III–V.

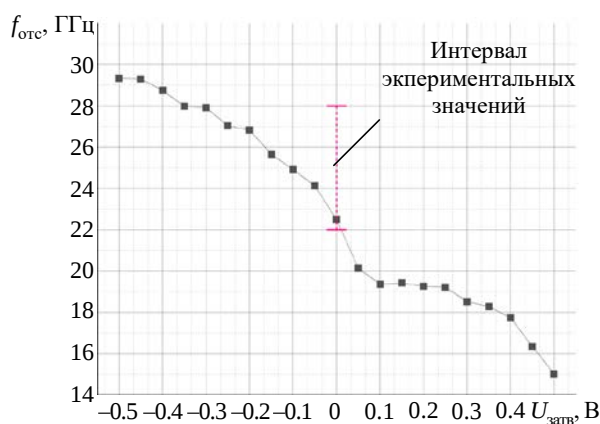


Рис. 5. Расчетная зависимость частоты отсечки от напряжения на затворе

Fig. 5. Calculated dependence of cutoff frequency on gate voltage

Исследование выявило следующие закономерности:

- вариация длины затвора на уровне 10 % индуцирует отклонение напряжения отсечки на 3.5 % на сток-затворной ВАХ и тока насыщения на 2.2 % на стоковой характеристике. Отклонение крутизны составило 3.43 %, а отклонение сопротивления во включенном состоянии – 1 %;

- корректировка длины канала на 10 % провоцирует сопряженные изменения обоих параметров: снижение длины вызывает 3 %-е уменьшение тока насыщения на стоковой характеристике и 3.5 %-й сдвиг напряжения отсечки на сток-затворной ВАХ, тогда как увеличение приводит к менее выраженным отклонениям (1.5 и 1.4 % соответственно), что согласуется с [19]. Отклонения крутизны и сопротивления во включенном состоянии оцениваются в 0.43 и 1.64 % соответственно;

- изменение глубины затвора в GaAs-структуре на 10 % вызывает незначительные отклонения напряжения отсечки на 0.7 % на сток-затворной ВАХ и тока насыщения на 0.3 % на стоковой характеристике. Вариация данного параметра не оказывает значимого влияния на крутизну и сопротивление во включенном состоянии;

- изменение концентрации носителей в контактной области на 10 % не оказывает статистически значимого влияния на рабочие параметры транзистора;

- изменение толщины спейсера AlGaAs значительно влияет на рабочие характеристики GaAs pHEMT. При толщине 3 нм достигаются наилучшие показатели тока насыщения – 28 мА, напряжения отсечки со значением –1.46 В, крутизны передаточной характеристики – 23.4 мСм и сопротивления во включенном состоянии – 25.13 Ом. При толщине спейсера 4 нм ток насыщения снижается на 4.2 %, напряжение отсечки отклоняется на 2.7 % относительно толщины спейсера 3 нм. Далее переход на толщину спейсера 2 нм сопровождается падением тока насыщения на 4.6 %, регистрируется увеличение напряжения отсечки на 4.2 %. Отклонения крутизны и сопротивления во включенном состоянии при толщинах спейсера от 2 до 4 нм относительно друг друга оказываются менее 1 %. Резкое ухудшение данных показателей транзистора регистрируется при

переходе с базового уровня со значением 2 на толщину спейсера 1 нм – ток насыщения в этом случае падает на 16 %, напряжение отсечки отклоняется на 15 % в сторону увеличения показателя. Значения крутизны и сопротивления во включенном состоянии падают на 6 и 43 % соответственно. В отсутствие спейсера критическое влияние кулоновского рассеяния на донорном слое AlGaAs на канал InGaAs отклоняет ток насыщения на 32 %, напряжение отсечки – на 35 %, крутизну – на 15 %, сопротивление во включенном состоянии – на 65 % по отношению к базовому уровню спейсера. Характеристики, определяемые толщинами 1 и 0 нм, выходят за пределы номинальных технологических данных.

Заключение. В результате всестороннего параметрического моделирования идентифицированы и количественно оценены ключевые факторы, детерминирующие эксплуатационные показатели GaAs/AlGaAs/InGaAs pHEMT. Проведенное исследование актуализирует необходимость их экспериментального изучения для верификации и подтверждения корректности прогнозируемых свойств модели. Значительные отклонения, как в токе стока, так и в значениях напряжения отсечки, обнаружены в результате 10 %-й корректировки концентрации донорного слоя AlGaAs, подтверждая его определяющую роль в формировании электрофизических характеристик устройства. Менее выраженное влияние продемонстрировали 10 %-е вариации геометрических параметров: длины канала, длины затвора и глубины его залегания в GaAs-слое, что свидетельствует об устойчивости этих параметров в контексте моделирования. Толщина спейсера оказывает существенное влияние на характеристики структуры: очень тонкий спейсер – 1 нм значительно ухудшает характеристики транзистора. Толщина спейсера, согласующаяся с экспериментальными характеристиками структур, для численной модели транзистора составляет 3 нм. Увеличение толщины спейсера свыше оптимальной приводит к ухудшению характеристик.

На этапе разработки приборов численная модель pHEMT предоставляет возможность выявить ключевые параметры, оказывающие значительное влияние на функциональные характеристики устройства. Исследование численной

модели позволяет проводить контроль необходимых характеристик и выявлять несоответствия технологическим требованиям параметров для проведения процедуры отбраковки.

Авторский вклад

Сапожников Александр Владимирович – проектирование численной модели в среде TCAD; анализ экспериментальных данных.

Пушница Илья Сергеевич – получение и систематизация экспериментальных данных.

Дудин Анатолий Леонидович – рекомендации по процессу моделирования pHEMT в TCAD; обсуждение результатов.

Перепеловский Вадим Всеволодович – постановка задачи; рекомендации по процессу моделирования pHEMT в TCAD; обсуждение результатов.

Author's contribution

Alexander V. Sapozhnikov, design of the numerical model in the TCAD environment; analysis of experimental data.

Iliya S. Pushnitsa, obtaining and systematizing experimental data.

Anatoliy L. Dudin, recommendations on the process of pHEMT modeling in TCAD; discussion of the results.

Vadim V. Perepelovskiy, problem statement; recommendations on the process of pHEMT modeling in TCAD; discussion of the results.

Список литературы

1. High electron mobility transistors: performance analysis, research trend and applications / M. N. A. Aadit, S. G. Kirtania, F. Afrin, M. K. Alam, Q. D. M. Khosru; ed. by M. M. Pejovic, M. M. Pejovic // Different Types of Field-Effect Transistors-Theory and Applications. In Tech. 2017. P. 45–64.

doi: 10.5772/67796

2. Noise measurements of discrete HEMT transistors and application to wideband very low-noise amplifiers / A. H. Akgiray, S. Weinreb, R. Leblanc, M. Renvoise, P. Frijlink, R. Lai, S. Sarkozy // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2013. Vol. 61, № 9. P. 3285–3297.

doi: 10.1109/TMTT.2013.2273757

3. K-band GaAs MMIC Doherty power amplifier for microwave radio with optimized driver / R. Quaglia, V. Camarchia, T. Jiang, M. Pirola, S. D. Guerrieri, B. Loran // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2014. Vol. 62, № 11. P. 2518–2525.

doi: 10.1109/TMTT.2014.2360395

4. Nonlinear modeling of GaAs pHEMTs for millimeter-wave mixer design / G. Crupi, A. Raffo, G. Avolio, G. Bosi, G. Sivverini, F. Palomba, G. Vannini // Solid-State Electronics. 2015. Vol. 104. P. 25–32.

doi: 10.1016/j.sse.2014.11.001

5. An ultra-wideband distributed amplifier MMICs based on 0.15-um GaAs pHEMT technology / J. Yang, L. Wang, L. Li, J. Zhan, Y. F. Xie, M. Z. Zhan // Intern. J. of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. 2020. Vol. 33, № 3. Art. № e2605.

doi: 10.1002/jnm.2605

6. First demonstration of amplification at 1 THz using 25-nm InP high electron mobility transistor process / X. Mei, W. Yoshida, M. Lange, J. Lee, J. Zhou, P. H. Liu, W. R. Deal // IEEE Electron Device Lett. 2015. Vol. 36, № 4. P. 327–329.

doi: 10.1109/LED.2015.2407193

7. Карпов С. Н. Методика прогнозирования характеристик транзисторных GaAs-гетероструктур и полевых транзисторов на их основе // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2023. Вып. 2 (558). С. 61–69.

8. Sentaurus™ Device User Guide. Ver. T-2022. 03. URL: <https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html> (дата обращения 25.03.2024)

9. Experimental Study of a Low-Voltage 4H-SiC Drift Step Recovery Diode / S. A. Shevchenko, B. V. Ivanov, A. A. Smirnov, V. A. Ilyin, A. V. Afanasyev, K. A. Sergushichev // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St Petersburg, Moscow, Russia, 27–30 Jan. 2020. IEEE, 2020. P. 1004–1006.

doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039004

10. Коловский Ю. В., Левицкий А. А., Маринускин П. С. Компьютерное моделирование компонентов МЭМС // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2008. № 1. С. 398–401.

11. Quantum Modeling of Nanoscale Symmetric Double-Gate InAlAs/InGaAs/InP HEMT / N. Verma, M. Gupta, R. S. Gupta, J. Jogi // J. of Semiconductor Technology and Science. 2013. Vol. 13, № 4. P. 342–354.

doi: 10.5573/JSTS.2013.13.4.342

12. Influence of double InGaAs/InAs channel on DC and RF performances of InP-based HEMTs / H. L. Hao, M. Y. Su, H. T. Wu, H. Y. Mei, R. X. Yao, F. Liu, S. X. Sun // J. of Ovonic Research. 2022. Vol. 18, № 3. P. 411–419.

doi: 10.15251/JOR.2022.183.411

13. Influence of spacer thickness on the noise performance in InP HEMTs for cryogenic LNAs / J. Li, A. Pourkabirian, J. Bergsten, N. Wadefalk, J. Grahn // IEEE Electron Device Lett. 2022. Vol. 43, № 7. P. 1029–1032.

doi: 10.1109/LED.2022.3178613

14. Atomic-scale insights of indium segregation and its suppression by GaAs insertion layer in InGaAs/AlGaAs multiple quantum wells / S. F. Ma, L. Li, Q. B. Kong, Y. Xu, Q. M. Liu, S. Zhang, X. D. Hao // Chinese Physics B. 2023. Vol. 32, № 3. Art. № 037801. doi: 10.1088/1674-1056/ac70b5

15. Huang Y., Shklovskii B. I., Zudov M. A. Scattering mechanisms in state-of-the-art GaAs/AlGaAs quantum wells // Physical Review Materials. 2022. Vol. 6, № 6. Art. № L061001. doi:10.1103/PhysRevMaterials.6.L061001

16. Pattnaik G., Mohapatra M. Design of AlGaAs/InGaAs/GaAs-Based PHEMT for High Frequency Application // Proc. of Intern. Conf. on Communication, Circuits, and Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering. Vol. 728. Springer, Singapore, 2021. P. 329–337. doi: 10.1007/978-981-33-4866-0_41

17. Hwang E. H., Das Sarma S. Limit to two-dimensional mobility in modulation-doped GaAs quantum structures: How to achieve a mobility of 100 million // Phys. Rev. B. 2008. Vol. 77, № 23. Art. № 235437. doi: 10.1103/PhysRevB.77.235437

18. Influences of δ -doping time and spacer thickness on the mobility and two-dimensional electron gas concentration in δ -doped GaAs/InGaAs/GaAs pseudomorphic heterostructures / H. M. Shieh, W. C. Hsu, M. J. Kao, C. L. Wu // J. of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. 1994. Vol. 12, № 1. P. 154–157. doi:10.1116/1.587174

19. Gao H. C., Yin Z. J. Theoretical and Experimental Optimization of InGaAs Channels in GaAs PHEMT Structure // Chinese Physics Let. 2015. Vol. 32, № 6. Art. № 068102. doi: 10.1088/0256-307X/32/6/068102

Информация об авторах

Сапожников Александр Владимирович – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2023, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), инженер АО "Светлана-Рост". Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – СВЧ; моделирование приборов твердотельной электроники; НЕМТ.

Адрес: АО "Светлана-Рост", пр. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Россия

E-mail: avsapozhnikov@stud.etu.ru

<https://orcid.org/0009-0006-5106-4428>

Пушница Игорь Сергеевич – специалист в области фундаментальной радиофизики и физической электроники (2004, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный университет"), ведущий инженер-конструктор АО "Светлана-Рост". Автор девяти научных публикаций. Сфера научных интересов – СВЧ; технология и моделирование полупроводниковых приборов, разработка ММИС; НЕМТ.

Адрес: АО "Светлана-Рост", пр. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Россия

E-mail: i.pushnitsa@svrost.ru

<https://orcid.org/0009-0006-9912-3490>

Дудин Анатолий Леонидович – специалист в области физики и технологии полупроводниковых приборов (1996, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), заместитель генерального директора по производству и технологическим разработкам АО "Светлана-Рост". Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – СВЧ; технология полупроводниковых приборов; НЕМТ

Адрес: АО "Светлана-Рост", пр. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Россия

E-mail: a.dudin@svrost.ru

<https://orcid.org/0009-0007-2005-4304>

Перепеловский Вадим Всеволодович – кандидат физико-математических наук (1992), доцент (1995) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – моделирование приборов твердотельной электроники.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vvperepelovsky@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-2622-4567>

References

1. Aadit M. N. A., Kirtania S. G., Afrin F., Alam M. K., Khosru Q. D. M. High Electron Mobility Transistors: Performance Analysis, Research Trend and Applications. Different Types of Field-Effect Transistors-Theory and

Applications. Ed. by M. M. Pejovic, M. M. Pejovic. In Tech, 2017, pp. 45–64. doi: 10.5772/67796

2. Akgiray A. H., Weinreb S., Leblanc R., Renvoise M., Frijlink P., Lai R., Sarkozy S. Noise Measurements of Discrete HEMT Transistors and Application to Wideband Very Low-Noise Amplifiers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2013, vol. 61, no. 9, pp. 3285–3297. doi: 10.1109/TMTT.2013.2273757
3. Quaglia R., Camarchia V., Jiang T., Pirola M., Guerrieri S. D., Loran B. K-band GaAs MMIC Doherty Power Amplifier for Microwave Radio with Optimized Driver. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2014, vol. 62, no. 11, pp. 2518–2525. doi: 10.1109/TMTT.2014.2360395
4. Crupi G., Raffo A., Avolio G., Bosi G., Sivverini G., Palomba F., Vannini G. Nonlinear Modeling of GaAs pHEMTs for Millimeter-Wave Mixer Design. *Solid-State Electronics*. 2015, vol. 104, pp. 25–32. doi: 10.1016/j.sse.2014.11.001
5. Yang J., Wang L., Li L., Zhan J., Xie Y. F., Zhan M. Z. An Ultra-Wideband Distributed Amplifier MMICs Based on 0.15-um GaAs pHEMT Technology. *Intern. J. of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*. 2020, vol. 33, no. 3, art. no. e2605. doi: 10.1002/jnm.2605
6. Mei X., Yoshida W., Lange M., Lee J., Zhou J., Liu P. H., Deal W. R. First Demonstration of Amplification at 1 THz Using 25-nm InP High Electron Mobility Transistor Process. *IEEE Electron Device Let.* 2015, vol. 36, no. 4, pp. 327–329. doi: 10.1109/LED.2015.2407193
7. Karpov S. N. Method for Predicting the Characteristics of Transistor GaAs-Heterostructures and HEMTs Transistors Based on Them. *Electronic Engineering. Series 1: Microwave Engineering*. 2023, no. 2 (558), pp. 61–69. (In Russ.)
8. SentaursTM Device User Guide, Ver. T-2022. 03. Available at: <https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html> (accessed 25.03.2024).
9. Shevchenko S. A., Ivanov B. V., Smirnov A. A., Ilyin V. A., Afanasyev A. V., Sergushichev K. A. Experimental Study of a Low-Voltage 4H-SiC Drift Step Recovery Diode. *IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, St Petersburg, Moscow, Russia, 27–30 Jan. 2020. *IEEE*, 2020, pp. 1004–1006. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039004
10. Kolovskiy Yu. V., Levitskiy A. A., Marinushkin P. S. Computer Modeling of MEMS Components. *Problems of Developing Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems*. 2008, no. 1, pp. 398–401. (In Russ.)
11. Verma N., Gupta M., Gupta R. S., Jogi J. Quantum Modeling of Nanoscale Symmetric Double-Gate InAlAs/InGaAs/InP HEMT. *J. of Semiconductor Technology and Science*. 2013, vol. 13, no. 4, pp. 342–354. doi: 10.5573/JSTS.2013.13.4.342
12. Hao H. L., Su M. Y., Wu H. T., Mei H. Y., Yao R. X., Liu F., Sun S. X. Influence of Double InGaAs/InAs Channel on DC and RF Performances of InP-Based HEMTs. *J. of Ovonic Research*. 2022, vol. 18, no. 3, pp. 411–419. doi: 10.15251/JOR.2022.183.411
13. Li J., Pourkabarir A., Bergsten J., Wadefalk N., Grahm J. Influence of Spacer Thickness on the Noise Performance in InP HEMTs for Cryogenic LNAs. *IEEE Electron Device Let.* 2022, vol. 43, no. 7, pp. 1029–1032. doi: 10.1109/LED.2022.3178613
14. Ma S. F., Li L., Kong Q. B., Xu Y., Liu Q. M., Zhang S., Hao X. D. Atomic-Scale Insights of Indium Segregation and Its Suppression by GaAs Insertion Layer in InGaAs/AlGaAs Multiple Quantum Wells. *Chinese Physics B*. 2023, vol. 32, no. 3, art. no. 037801. doi: 10.1088/1674-1056/ac70b5
15. Huang Y., Shklovskii B. I., Zudov M. A. Scattering Mechanisms in State-of-the-Art GaAs/AlGaAs Quantum Wells. *Physical Review Materials*. 2022, vol. 6, no. 6, art. no. L061001. doi: 10.1103/PhysRevMaterials.6.L061001
16. Pattnaik G., Mohapatra M. Design of AlGaAs/InGaAs/GaAs-Based PHEMT for High Frequency Application. *Proc. of Intern. Conf. on Communication, Circuits, and Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Vol. 728. Springer, Singapore, 2021, pp. 329–337. doi: 10.1007/978-981-33-4866-0_41
17. Hwang E. H., Das Sarma S. Limit to Two-Dimensional Mobility in Modulation-Doped GaAs Quantum Structures: How to Achieve a Mobility of 100 Million. *Phys. Rev. B*. 2008, vol. 77, no. 23, art. no. 235437. doi: 10.1103/PhysRevB.77.235437
18. Shieh H. M., Hsu W. C., Kao M. J., Wu C. L. Influences of δ -Doping Time and Spacer Thickness on the Mobility and Two-Dimensional Electron Gas Concentration in δ -Doped GaAs/InGaAs/GaAs Pseudomorphic Heterostructures. *J. of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 1994, vol. 12, no. 1, pp. 154–157. doi: 10.1116/1.587174
19. Gao H. C., Yin Z. J. Theoretical and Experimental Optimization of InGaAs Channels in GaAs PHEMT Structure. *Chinese Physics Let.* 2015, vol. 32, no. 6, art. no. 068102. doi: 10.1088/0256-307X/32/6/068102

Information about the authors

Alexander V. Sapozhnikov, Master's degree in Electronics and nanoelectronics (2023, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University, engineer of JSC "Svetlana-Rost". The author of 2 scientific publications. Area of expertise: microwave; modeling of solid-state electronics devices; HEMT. Address: JSC "Svetlana-Rost", 27, Engelsa Ave., St Petersburg 194156, Russia

E-mail: avsapozhnikov@stud.etu.ru
<https://orcid.org/0009-0006-5106-4428>

Iliya S. Pushnitsa, Specialist in fundamental radiophysics and physical electronics (2004, Omsk State University), leading design engineer of JSC "Svetlana-Rost". The author of 9 scientific publications. Area of expertise: microwave; technology and modeling of semiconductor devices, MMIC development; HEMT.

Address: JSC "Svetlana-Rost", 27, Engelsa Ave., St Petersburg 194156, Russia

E-mail: i.pushnitsa@svrost.ru
<https://orcid.org/0009-0006-9912-3490>

Anatoliy L. Dudin, Specialist in physics and technology of semiconductor devices (1996, Saint Petersburg Electrotechnical University), Chief Technologist of JSC "Svetlana-Rost" The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: microwave; technology of semiconductor devices; HEMT.

Address: JSC "Svetlana-Rost", 27, Engelsa Ave., St Petersburg 194156, Russia

E-mail: a.dudin@svrost.ru
<https://orcid.org/0009-0007-2005-4304>

Vadim V. Perepelovskiy, Cand. Sci. (Eng.) (1992), Associate Professor (1995) of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: simulation of solid-state electronics devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vvperepelovsky@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-2622-4567>
