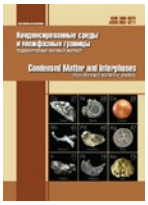

ISSN 1606-867X (Print)
ISSN 2687-0711 (Online)
Конденсированные среды и межфазные границы
https://journals.vsu.ru/kcmf/

Оригинальные статьи

Научная статья
УДК 538.91
Научная специальность ВАК – 1.3.8. Физика конденсированного состояния; 1.3.11. Физика полупроводников
https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13967

Снижение коэффициента шума pHEMT транзистора на подложке GaAs за счет оптимизации толщины подзатворного барьерного слоя с использованием методов численного моделирования

Е. И. Василькова[1]✉, К. Ю. Шубина[1], Д. С. Папылев[2], В. В. Андрюшкин[2], Е. В. Пирогов[1], А. Г. Гладышев[1], И. И. Новиков[1], Л. Я. Карачинский[1], М. С. Соболев[1]

[1]ФГБУВОН «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук»,
ул. Хлопина, 8к3, лит. А, Санкт-Петербург 194021, Российская Федерация

[2]ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»,
Кронверкский пр., д. 49, лит. А, Санкт-Петербург 197101, Российская Федерация

Аннотация

Цель статьи: Целью настоящей работы является снижение коэффициента шума pHEMT транзистора на подложке GaAs за счет оптимизации толщины барьерного слоя гетероструктуры транзистора и исследование применимости в данных целях методов численного моделирования.

Экспериментальная часть: Представлены результаты численного моделирования крутизны и тока стока малошумящего pHEMT-транзистора с использованием диффузионно-дрейфовой и гидродинамической моделей транспорта носителей заряда в канале.

Выводы: Показано, что гидродинамическая модель точнее описывает результаты эксперимента для pHEMT-транзистора с затвором субмикронных размеров. С использованием гидродинамической численной модели была определена оптимальная конструкция гетероструктуры малошумящего pHEMT-транзистора, что привело к снижению минимального коэффициента шума pHEMT-транзистора на 0.1 дБ до уровня 0.7 дБ.

Ключевые слова: GaAs-pHEMT, численное моделирование, коэффициент шума, крутизна

Источник финансирования: Исследование выполнено при поддержке Министерства Науки и Высшего Образования Российской Федерации (ГЗ FSRM-2025-0001 и ГЗ FSER-2025-0005).

Для цитирования: Василькова Е. И., Шубина К. Ю., Папылев Д. С., Андрюшкин В. В., Пирогов Е. В., Гладышев А. Г., Новиков И. И., Карачинский Л. Я., Соболев М. С. Снижение коэффициента шума pHEMT транзистора на подложке GaAs за счет оптимизации толщины подзатворного барьерного слоя с использованием методов численного моделирования. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2026;28(3): 388–395. https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13967

✉ Василькова Елена Игоревна, e-mail: elenvasilkov@gmail.com
© Василькова Е. И., Шубина К. Ю., Папылев Д. С., Андрюшкин В. В., Пирогов Е. В., Гладышев А. Г., Новиков И. И., Карачинский Л. Я., Соболев М. С., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original articles

Research article
https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13967

Noise figure reduction of a GaAs-based pHEMT transistor by optimization of the gate barrier layer thickness using numerical simulation

E. I. Vasilkova[1]✉, K. Yu. Shubina[1], D. S. Papylev[2], V. V. Andryushkin[2], E. V. Pirogov[1], A. G. Gladyshev[1], I. I. Novikov[1], L. Ya. Karachinsky[1], M. S. Sobolev[1]

[1]*Alferov University,*
8/3 Khlopina st., St. Petersburg 194021, Russian Federation

[2]*ITMO University,*
49, bldg. A, Kronverksky pr., St. Petersburg 197101, Russian Federation

Abstract

Objectives: The objective of the present work is to reduce the noise figure of a GaAs-based pHEMT transistor by optimizing the thickness of the gate barrier layer of the transistor heterostructure, and to investigate the applicability of numerical simulation methods for this purpose.

Experimental: Numerical simulation of the transconductance and drain current of a low-noise pHEMT transistor was carried out using the drift-diffusion and hydrodynamic models of charge carrier transport in the channel.

Conclusions: It is shown that the hydrodynamic model describes the experimental results for a pHEMT transistor with a sub-micron gate length more accurately than the drift-diffusion model. The optimal heterostructure design of a low-noise pHEMT transistor was determined by means of the hydrodynamic numerical model, which resulted in a reduction of the minimum noise figure of the pHEMT transistor by 0.1 dB to a level of 0.7 dB.

Keywords: GaAs-pHEMT, Numerical Simulation, Noise figure, Transconductance

Funding: This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSRM-2025-0001 and FSER-2025-0005).

For citation: Vasilkova E. I., Shubina K. Yu., Papylev D. S., Andryushkin V. V., Pirogov E. V., Gladyshev A. G., Novikov I. I., Karachinsky L. Ya., Sobolev M. S. Noise figure reduction of a GaAs-based pHEMT transistor by optimization of the gate barrier layer thickness using numerical simulation. *Condensed Matter and Interphases*. 2026;28(3): 388–395. https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13967

✉ Elena I. Vasilkova, e-mail: elenvasilkov@gmail.com
© Vasilkova E. I., Shubina K. Yu., Papylev D. S., Andryushkin V. V., Pirogov E. V., Gladyshev A. G., Novikov I. I., Karachinsky L. Ya., Sobolev M. S., 2026

1. Введение

Псевдоморфные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (pHEMT) на основе эпитаксиальных гетероструктур на подложках GaAs получили широкое распространение в производстве монолитных интегральных схем малошумящих усилителей (МШУ) СВЧ-диапазона [1, 2]. Несмотря на освоенную технологию производства таких pHEMT-транзисторов существует потребность в предварительном численном расчете параметров устройств, что позволяет провести усовершенствование конструкции приборов под конкретные задачи с меньшими затратами на производство.

С развитием технологий радиосвязи возрастают требования к величине коэффициента шума МШУ, определяемого на уровне 1 дБ в современных системах [3]. Коэффициент шума МШУ в значительной степени определяется характеристиками используемого в устройстве транзистора, поэтому возникает потребность в уменьшении минимального коэффициента шума транзистора N_F до значений менее 1 дБ. В свою очередь, уменьшение значение минимального коэффициента шума транзистора достигается при увеличении крутизны передаточной характеристики g в соответствии с формулой [4]:

$$N_F = 1 + \frac{\sqrt{G_{ng} G_{nd}}}{g}, \quad (1)$$

где G_{ng} и G_{nd} – эквивалентные шумовые проводимости полевого транзистора. Таким образом, при разработке малошумящих pHEMT-транзисторов ставится задача повышения крутизны передаточной характеристики.

Зависимость максимальной внутренней крутизны pHEMT транзистора (без влияния сопротивления контактов) от параметров транзисто-

ра может быть представлена аналитическим выражением [5]:

$$g_{\max,\text{int}} = \frac{q\mu n_{s0}}{l_g\sqrt{1+\left[q\mu n_{s0}\dfrac{d_{gc}+\Delta d_{gc}}{\varepsilon v_{sat} l_g}\right]^2}}, \qquad (2)$$

где q – элементарный заряд; μ – подвижность электронов; n_{s0} – поверхностная концентрация электронов при отсутствии внешнего электрического поля; l_g – длина затвора; ε – диэлектрическая проницаемость; d_{gs} – расстояния между затвором и канальным слоем; Δd_{gc} – расстояние между гетерограницей барьер/канал и положением максимума концентрации электронов; v_{sat} – скорость насыщения электронов. Среди прочих параметров гетероструктуры, исходя из выражения (2), крутизна в значительной мере определяется толщиной барьерного слоя с зависимостью $g_{\max,\text{int}} \propto d_{gc}^{-1}$, тем самым, являясь критическим параметром при оптимизации pHEMT транзистора.

Для расчета физических параметров pHEMT транзисторов могут применяться различные численные модели [6], описывающие физические явления в транзисторе с различной степенью корректности. Следует учитывать, что использование более комплексных моделей связано с большими временными и вычислительными затратами в вычислениях. Таким образом, для описания исследуемых параметров в процессе разработки транзистора выгодно использование наиболее простых моделей, которые позволяют эффективно рассчитывать выходные характеристики транзисторов с достаточной точностью. Одной из наиболее распространенных и не требующих значительных вычислительных ресурсов моделей численного расчета характеристик полупроводниковых приборов является диффузионно-дрейфовая (ДД) модель транспорта носителей заряда, представляющая собой систему дифференциальных уравнений Пуассона и непрерывности [7]. В данной модели принято приближение равенства температуры носителей заряда температуре кристаллической решетки, а подвижность носителей заряда определяется локальной напряженностью электрического поля. Однако использование такого приближения может приводить к несоответствию результатов моделирования экспериментальным данным при уменьшении характерных размеров затвора до субмикронных значений. При субмикронных размерах затвора транзистора начинают проявляться эффекты всплеска дрейфовой скорости, связанные с разогревом электронов. В результате разогрева эффективная скорость электронов может превышать скорость насыщения [8, 9]. Для учета данных параметров должна использоваться гидродинамическая (ГД) модель, включающая также и расчет температуры носителей заряда [10]. Однако ввиду того, что ГД модель является более комплексной по сравнению с ДД моделью, ее использование связано с увеличением временных и ресурсных затрат на моделирование.

Целью настоящей работы является снижение коэффициента шума pHEMT транзистора на подложке GaAs за счет оптимизации толщины барьерного слоя гетероструктуры транзистора и исследование применимости в данных целях методов численного моделирования.

2. Экспериментальная часть

Опорной исследуемой конструкцией транзистора в исследовании является pHEMT 130 с толщиной подзатворного барьерного слоя 13 нм, разработанного для работы в режиме отрицательного напряжения смещения. Гетероструктура транзистора pHEMT130 со стоп-слоем InGaP выращена на полуизолирующей подложке GaAs (001) диаметром 3″ методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Контактный слой гетероструктуры выполнен из GaAs толщиной 54 нм с концентрацией легирования Si $3.0\cdot10^{18}$ см$^{-3}$. Под контактным слоем следуют: стравливаемый барьерный слой $Al_{0.23}Ga_{0.77}As$ толщиной 10.5 нм; стоп-слой $In_{0.51}Ga_{0.49}P$ толщиной 3 нм; барьерный слой $Al_{0.23}Ga_{0.77}As$ толщиной 13 нм; область дельта-легирования Si с поверхностной концентрацией $2.1\cdot10^{12}$ см$^{-2}$, выполненная в слое 0.8 нм GaAs; спейсерные слои AlGaAs и GaAs толщиной 7 нм и 1.5 нм соответственно. Канальный слой выполнен из тройного твердого раствора $In_{0.23}Ga_{0.77}As$ толщиной 10 нм. Описанные функциональные слои выращены на буферной гетероструктуре AlGaAs/GaAs. Температура подложки во время эпитаксиального роста варьировалась от 560 °C для AlGaAs и GaAs слоев до 500 °C для InGaAs и InGaP слоев при соотношении A_3/B_5 потоков материалов 1/10.

Конструкция транзистора, схематически представленная на рис. 1, была сформирована с помощью травления области верхних слоев под затвор, глубина травления при этом ограничивалась глубиной расположения стоп-слоя InGaP. Длина затвора транзистора составляет 0.25 мкм при ширине 240 мкм. Расстояние между контак-

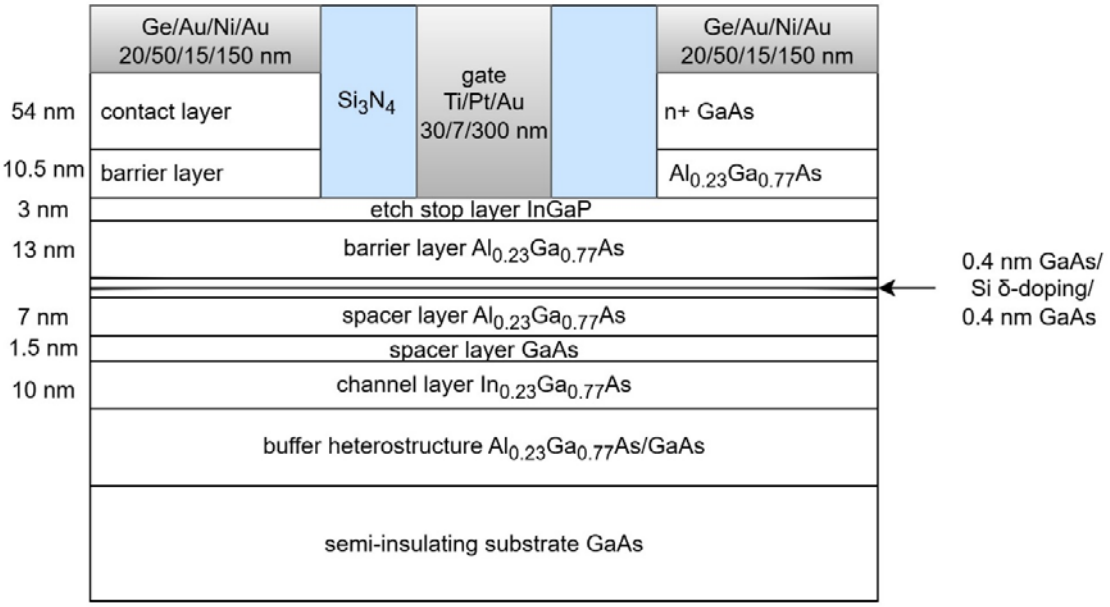

Рис. 1. Схематическое изображение конструкции pHEMT130

тами стока и истока составляет 2.50 мкм. Металлизация контакта затвора сформирована напылением слоев металлов Ti/Pt/Au толщиной 30/7/300 нм соответственно. Омические контакты выполнены из многослойной металлизации Ge/Au/Ni/Au толщиной 20/50/15/150 нм. Пассивация из нитрида кремния выполнена методом плазмохимического осаждения из газовой фазы.

Для оценки параметров транзистора при моделировании производился расчет тока на стоке I_d при постоянном напряжении на контакте стока в зависимости от приложенного на затворе напряжения U_g. Крутизна передаточной характеристики определялась выражением $g_m = \partial I_d / \partial U_g$. Моделирование параметров транзистора производилось с использованием ДД и ГД моделей, реализованных в программной среде Silvaco TCAD. Использование ДД модели при незначительных отклонениях в результатах является более выгодным ввиду упрощения процедуры расчетов. В этой модели решением дифференциальных уравнений являются концентрации носителей заряда, значение потенциала в узлах расчетной сетки модели транзистора. Кроме того, было проведено моделирование с использованием ГД модели в области канала транзистора, включающей в вычисления помимо расчетных параметров ДД модели температуру электронов. В моделях учитывалась зависимость подвижности носителей заряда от концентрации легирования [11] и насыщение скорости носителей заряда в сильных полях. Расчет производился с использованием статистики Ферми–Дирака. Учтено влияние рекомбинации Шокли–Рида–Холла, Оже-рекомбинации и процессов рекомбинации, связанных с излучательными переходами в прямозонных полупроводниках.

В модели приняты параметры материалов, характерные для объемных материалов. Положение дна зоны проводимости в слоях гетероструктуры определяется относительно сродства к электрону GaAs. При построении численной модели транзистора для калибровки модели использовались параметры, полученные из экспериментальных данных. Одним из таких параметров выступала высота барьера Шоттки, определяющая напряжение отсечки. В ДД модели значение скорости насыщения электронов в канале InGaAs подбиралось для соответствия данным, получаемым в реальных транзисторах с малой длиной затвора [9]. В ГД модели, учитывающей эффект всплеска дрейфовой скорости, использовалось калибровочное время релаксации носителей заряда в InGaAs в приближении постоянного значения параметра в пределах порядка десятых долей пс [12]. Основные параметры, используемые в модели, представлены в табл. 1.

3. Результаты и обсуждение

Измерения изготовленных транзисторов проводились в 50-Ом тракте без использования трансформаторов импенданса при комнатной температуре. Коэффициент шума был измерен

Таблица 1. Значения основных параметров модели

Параметр	GaAs	AlGaAs	InGaP	InGaAs
Диэлектрическая постоянная [13]	12.9	12.25	11.8	13.29
Эффективная масса [13]	$0.063m_0$	$0.082m_0$	$0.088m_0$	$0.053m_0$
Сродство к электрону, эВ [13]	4.07	3.88	3.87	4.26
Ширина запрещенной зоны, эВ [13]	1.424	1.711	1.849	1.100
Скорость насыщения электронов, 10^7 см/с [14]	0.72	0.74	0.74	0.73 (ГД модель) 2.28 (ДД модель)
Время релаксации носителей заряда, пс	–	–	–	0.3
Высота барьера Шоттки, эВ	4.73			
Удельное сопротивление омических контактов, Ом·см^2	$2\cdot10^{-6}$			
Поверхностная плотность заряда на границе полупроводник/диэлектрик, см$^{-2}$ [15]	$4\cdot10^{11}$			

на частоте 3 ГГц. По результатам измерений максимальная крутизна переходной характеристики изготовленного транзистора pHEMT130 достигла 498 мСм/мм, ток стока при нулевом напряжении на затворе составил 278 мА/мм. Коэффициент шума при этом составил 0.8 дБ.

На основании экспериментальных данных были построены численные модели транзистора с использованием ДД и ГД подходов к описанию транспорта носителей заряда. Как видно из сравнения результатов измерений и моделирования, представленных на рис. 2, рассчитанные характеристики обеих моделей достаточно хорошо согласуются с результатами измерений в диапазоне меньше –0.4 В. Однако в диапазоне напряжений свыше –0.4 В расчетные результаты ДД модели показывают более сглаженный профиль крутизны по сравнению с результатами измерений. В виду того, что по наблюдаемому расчетному профилю величина крутизны в максимуме значительно отличается от экспериментальных значений при использовании ДД модели, оценка влияния изменений в конструкции гетероструктуры на максимальную крутизну будет некорректной. Также отклонение соответствующего максимуму крутизны напряжения смещения не позволяет разрабатывать конструкцию транзистора под требуемые режимы работы в составе электрической схемы МШУ. Более высокое соответствие результатов достигается при использовании ГД модели транспорта в канале транзистора, моделирующей эффект всплеска

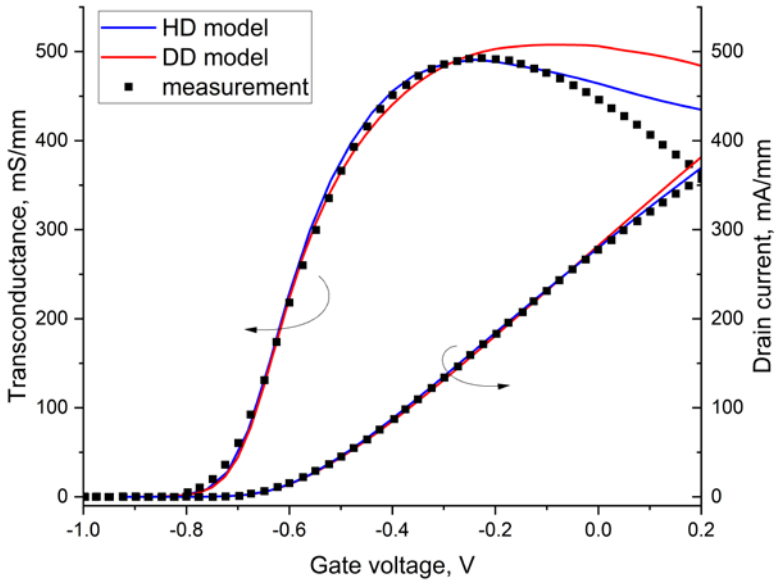

Рис. 2. Результаты измерений и моделирования характеристик транзистора pHEMT130 с использованием ДД и ГД моделей

дрейфовой скорости, что позволяет описать наиболее важный диапазон напряжений, соответствующий максимальному значению крутизны. Однако при изменении напряжения в сторону положительных значений модель не позволяет описать резкий спад значений крутизны. Подобное наблюдение может объясняться более сильным, чем принято в модели, пространственным ограничением электронов в канале в результате квантования энергетических уровней [16]. Тем не менее, используемая модель может успешно применяться для поставленной задачи расчета максимальной крутизны характеристики.

В целях усовершенствования конструкции гетероструктуры с использованием ГД модели были рассчитаны зависимости параметров транзистора от толщины подзатворного барьерного слоя. Как следует из рис. 3, полученные расчетные данные демонстрируют увеличение максимального значения крутизны при уменьшении толщины подзатворного слоя. Также при этом происходит сдвиг значений напряжения, соответствующих максимальной крутизне, в сторону положительных величин. При оптимизации конструкции гетероструктуры исследуемого транзистора максимум крутизны должен находиться в области отрицательных значений, так как переход максимума крутизны в область положительных напряжений приводит к необходимости изменения схемотехнических решений при разработке усилителей, требуя использования дополнительного источника напряжения, обеспечивающего двухполярное питание.

Исходя из расчетных данных с целью повышения максимальной крутизны для производства усовершенствованного транзистора pHEMT105, была выбрана толщина барьера 10.5 нм. Согласно результатам моделирования при такой толщине барьера максимум крутизны достигается при напряжении затвор-исток, равном –0.06 В. Небольшое отрицательное смещение на затворе при этом определяется необходимостью технологического запаса.

Как следует из сравнения результатов расчетов и измерений статических параметров изготовленных транзисторов, представленных на рис. 4, расчетные результаты позволяют достаточно точно описать эффект сдвига напряжения отсечки и увеличения максимальной крутизны при уменьшении толщины подзатворной области. По итогам измерений pHEMT105 максимальная крутизна была увеличена до 517 мСм/мм по сравнению с pHEMT130, однако плотность тока снизилась до уровня 200 мА/мм. При этом значение N_F составило 0.7 дБ, что на 0.1 дБ ниже подобной характеристики pHEMT130. Полученное снижение N_F является существенным при разработке сверхмалошумящих усилителей с коэффициентом шума прибора меньше 1 дБ, что подтверждает эффективность примененной методики. В то же время рекордные значения N_F современных pHEMT транзисторов с субмикронным затвором на подложке GaAs составляют менее 0.3 дБ [17], что указывает на возможности

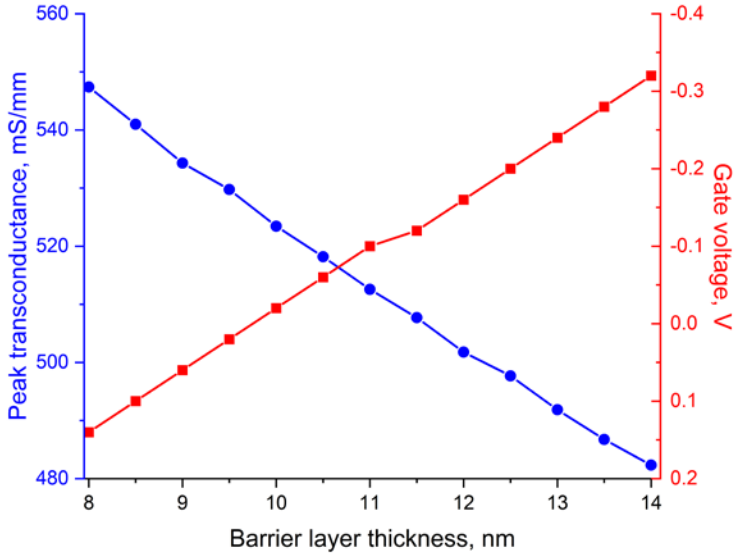

Рис. 3. Расчетные зависимости максимальной крутизны транзистора и соответствующего напряжения от толщины подзатворного барьерного слоя

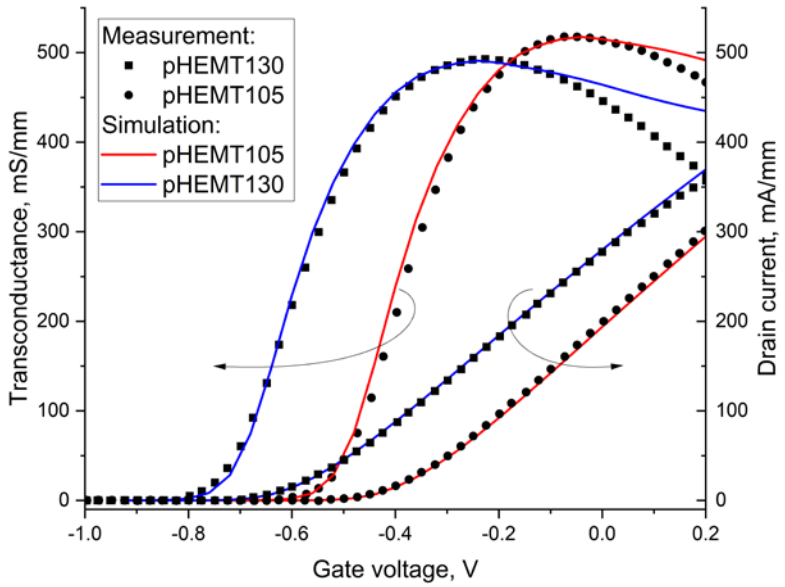

Рис. 4. Результаты моделирования и измерений транзисторов pHEMT130 и pHEMT105 с использованием ГД модели

дальнейшего совершенствования конструкции разработанных pHEMT транзисторов. Учитывая, что уменьшение толщины подзатворного барьерного слоя на 2.5 нм помимо сдвига рабочего диапазона напряжения ведет к снижению тока насыщения на 78 мА/мм, дальнейшее уменьшение толщины может привести к критическому снижению выходной мощности. Поэтому дальнейшие пути оптимизации конструкции транзисторов связаны с параметрами легирования и канального слоя, а также технологией формирования затворного контакта.

4. Заключение

В настоящей работе методами численного моделирования была оптимизирована толщина подзатворного барьерного слоя гетероструктуры малошумящего pHEMT-транзистора с целью снижения коэффициента шума.

Показано, что диффузионно-дрейфовая модель транспорта носителей заряда позволяет предсказать величину крутизны передаточной характеристики pHEMT-транзистора с длиной затвора 250 нм в ограниченном диапазоне обратных напряжений, не превышающих –0.4 В. В то же время гидродинамическая модель с высокой точностью описывает экспериментальные значения тока стока и крутизны транзистора на всей рабочей области обратных напряжений.

Для достижения максимальной крутизны и, соответственно, минимального коэффициента шума малошумящего pHEMT-транзистора на основе гидродинамической модели была определена оптимальная толщина барьерного слоя в конструкции pHEMT-гетероструктуры. Таким образом, в результате уменьшения толщины барьера подзатворной области с 13 нм до расчетного значения 10.5 нм минимальный коэффициент шума транзистора снизился на 0.1 дБ и достиг уровня 0.7 дБ.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Jimenez-Martin J. L., Gonzalez-Posadas V., Parra-Cerrada A., Espinosa-Adams D., Segovia-Vargas D., Hernandez W. Differential broadband (1–16 GHz) MMIC GaAs mHEMT low-noise amplifier for radio astronomy applications and sensing. *Sensors*. 2024;24(10): 3141. https://doi.org/10.3390/s24103141

2. Balla L., Gollakota V. K. S. A low noise amplifier with 27 dB gain and 1.78 dB noise for satellite communications with 0.1 μm GaAs pHEMT technology. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2023;13(5): 11763. https://doi.org/10.48084/etasr.6264

3. Roobert A. A., Rani D. G. N. Survey on parameter optimization of mobile communication band low noise amplifier design. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2019;29(7): e21720. https://doi.org/10.1002/mmce.21720

4. Григорьев А. Д., Иванов В. А., Молоковский С. И. *Микроволновая электроника*. Издательство Лань; 2022. 496 с.

5. Brech H., Grave T., Simlinger T., Selberherr S. Optimization of pseudomorphic HEMT's supported by numerical simulations. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1997;44(11), 1822–1828. https://doi.org/10.1109/16.641348

6. Munteanu D., Autran J. L. Modeling and simulation of single-event effects in digital devices and ICs. *IEEE Transactions on Nuclear science*. 2008;55(4): 1854–1878. https://doi.org/10.1109/tns.2008.2000957

7. Selberherr S. *Analysis and simulation of semiconductor devices*. Springer Science & Business Media; 2012. 296 p.

8. Passlack M., Abrokwah J. K., Lucero R. Experimental observation of velocity overshoot in N-channel AlGaAs/InGaAs/GaAs enhancement mode MODFETs. *IEEE Electron Device Letters*, 2000;21(11): 518. https://doi.org/10.1109/55.877195

9. De La Houssaye P. R., Allee D. R., Pao Y., Schlom D. G., Harris J. S., Pease R. F. W. Electron saturation velocity variation in InGaAs and GaAs channel MODFET's for gate lengths to 550 A. *IEEE Electron Device Letters*, 1988;9(3): 148. https://doi.org/10.1109/55.2071

10. Grasser T., Kosina H., Selberherr S. Hydrodynamic and energy-transport models for semiconductor device simulation. In: *Proceedings of the VI-th International Conference CADSM 2001*. Lviv Publishing House of Lviv Polytechnic National University; 2001. p. 19

11. Sotoodeh M., Khalid A. H., Rezazadeh A. A. Empirical low-field mobility model for III–V compounds applicable in device simulation codes. *Journal of Applied Physics*, 2000;87(6): 2890. https://doi.org/10.1063/1.372274

12. Brech H. *Optimization of GaAs based high electron mobility transistors by numerical simulation*. Dissertation, Technische UniversitaÈt, Wien; 1998.

13. Levinshtein M., Rumyantsev S., Shur M. *Handbook Series on Semiconductor Parameters*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; 1996. 452 p.

14. Quay R., Moglestue C., Palankovski V., Selberherr S. A temperature dependent model for the saturation velocity in semiconductor materials. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2000;3(1-2): 149. https://doi.org/10.1016/s1369-8001(00)00015-9

15. Oh J.-H., Sul W.-S., Han H.-J., ... Kim S.-D. Effects of silicon-nitride passivation on the electrical behavior of 0.1-μm pseudomorphic high-electron-mobility transistors. *Journal of the Korean Physical Society*, 2004;44(4): 899–903.

16. Moglestue C. Monte Carlo particle simulation of a quantum well heterojunction field-effect transistor: comparison with experimental data. *Journal of Applied Physics*. 1996;80(3): 1499. https://doi.org/10.1063/1.363020

17. Liou J. J. Ziegler M., Schwierz F. Gigahertz and terahertz transistors for 5G, 6G, and beyond mobile communication systems. *Applied Physics Reviews*, 2024;11(3): 031318. https://doi.org/10.1063/5.0213011

Информация об авторах

Василькова Елена Игоревна, м. н. с., СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова (Санкт-Петербург, Российская Федерация).
https://orcid.org/0000-0002-0349-7134
elenvasilkov@gmail.com

Шубина Ксения Юрьевна, к. ф.-м. н., н. с., СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова (Санкт-Петербург, Российская Федерация).
https://orcid.org/0000-0003-1835-1629
rein.raus.2010@gmail.com

Папылев Денис Сергеевич, инженер, Университет ИТМО, (Санкт-Петербург, Российская Федерация).
https://orcid.org/0009-0001-3683-5558
dspapylev@itmo.ru

Андрюшкин Владислав Васильевич, к. т. н., с. н. с., Университет ИТМО (Санкт-Петербург, Российская Федерация).
https://orcid.org/0000-0002-7471-8627
vvandriushkin@itmo.ru

Пирогов Евгений Викторович, н. с., СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова (Санкт-Петербург, Российская Федерация).
https://orcid.org/0000-0001-7186-3768
zzzavr@gmail.com

Гладышев Андрей Геннадьевич, к. ф.-м. н., с. н. с., СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова (Санкт-Петербург, Российская Федерация).
https://orcid.org/0000-0002-9448-2471
andrey.gladyshev@connector-optics.com

Новиков Иннокентий Игоревич, к.ф.-м.н., с. н. с., СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова (Санкт-Петербург, Российская Федерация).
https://orcid.org/0000-0003-1983-0242
innokenty.novikov@connector-optics.com

Карачинский Леонид Яковлевич, д. т. н., гл. н. с., СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова (Санкт-Петербург, Российская Федерация).
https://orcid.org/0000-0002-5634-8183
leonid.karachinsky@connector-optics.com

Соболев Максим Сергеевич, к. ф.-м. н., заведующий лабораторией, СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова (Санкт-Петербург, Российская Федерация).
https://orcid.org/0000-0001-8629-2064
sobolevsms@gmail.com

Поступила в редакцию 25.08.2025; одобрена после рецензирования 13.10.2025; принята к публикации 15.12.2025; опубликована онлайн 25.09.2026.