

Параметрическое исследование псевдоморфного транзистора с высокой подвижностью электронов GaAs/AlGaAs/InGaAs в среде TCAD

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

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²АО «Светлана-Рост»

Аннотация: В данной работе представлено параметрическое исследование псевдоморфного транзистора с высокой подвижностью электронов GaAs/AlGaAs/InGaAs в среде TCAD. Основное внимание уделено анализу вольт-амперных характеристик стока и сток-затвора с учетом 10-процентных отклонений от заявленных производителем параметров рНЕМТ. В рамках данного анализа была получена зависимость частоты отсечки от напряжения на затворе, что позволило оценить высокочастотные свойства рНЕМТ. Моделирование структуры основывается на решении фундаментальных уравнений полупроводниковой электроники с использованием метода конечных элементов. Применяется гидродинамическая двумерная численная модель рНЕМТ, которая учитывает влияние квантовых ям, эффекты нестационарной динамики, а также явления переноса носителей заряда. В рамках исследования рассматривались такие факторы, как радиационная рекомбинация и мольные доли компонентов в тройных твердых растворах. В результате были выявлены ключевые параметры, оказывающие значительное влияние на характеристики рНЕМТ, что подчеркивает необходимость их тщательного технологического контроля.

Ключевые слова: параметрический анализ, рНЕМТ, транзистор с высокой подвижностью электронов, GaAs/AlGaAs/InGaAs, TCAD, параметрическая стабильность.

1. Введение

В области применения СВЧ технологий, в монолитных микроволновых интегральных схемах (ММИС) важность транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) растет [1]. Некоторые характеристики, такие как более высокая частота отсечки, низкий уровень шума и работа в гигагерцовом-терагерцовом режиме оказали влияние на популярность этих транзисторов в области интегральных схем.

В процессе разработки полупроводниковых устройств, параметры транзисторов варьируются в определенном диапазоне значений из-за технологических особенностей производственных процессов. Эти вариации приводят к разбросу характеристик относительно номинальных значений, представленных в технической документации. Транзисторы, параметры которых выходят за пределы допустимых значений, подлежат отбраковке. Моделирование вариаций характеристик транзисторов направлено на обеспечение параметрической стабильности разрабатываемых микросхем. Актуальность анализа параметров транзисторов подчеркнута в исследованиях, например, в работе [2]. Существующие методики позволяют провести измерения только определенного спектра параметров с высокой степенью точности и при минимальных затратах, в то время как измерения остальных параметров осуществляются методами косвенной оценки. Важность определения ключевых, или критических, параметров, оказывающих значительное влияние на функциональные характеристики устройства, несомненна. Решение этой задачи возможно через проведение параметрического анализа.

2. Математическая модель

В контексте приборно-технологического моделирования полупроводниковых

структур, особенно в среде TCAD, применяется метод конечных элементов для решения ключевых фундаментальных уравнений, таких как уравнение Пуассона, уравнения непрерывности и переноса зарядов. Этот подход позволяет достигать высокой точности в предсказании поведения полупроводниковых структур при различных условиях. Используемые в данном процессе физико-математические модели соответствуют стандартам и принципам, изложенным в литературе [3, 4].

Технологический процесс изготовления на основе нормально открытых (Depletion-Mode) транзисторов с проектной нормой 0,5 мкм выстроен на базе эпитаксиальной структуры GaAs pHEMT.

Параметрическое исследование псевдоморфного транзистора с высокой подвижностью электронов (pHEMT) выполнялось в среде TCAD. Поверхность 50 нм контактного слоя GaAs изолирована тонким слоем нитрида кремния. В структуре присутствует 2,5 нм стоп-слой AlGaAs, который останавливает травление контактного слоя и не дает реактиву проникнуть вглубь 17,5 нм барьерного слоя AlGaAs. Затвор образует выпрямляющий барьер Шоттки находясь на глубине 2 нм в слое 5 нм GaAs под стоп-слоем AlGaAs. Донорным выступает 12,5 нм слой AlGaAs находясь между спейсером и барьерным слоем в структуре. Подложка является полуизолятором марки Ram-Xiamen с толщиной 625 ± 25 мкм. Параметры и топология pHEMT сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Тип структуры: GaAs pHEMT 0.5 switch

Последовательность слоёв	Толщина слоя, А ⁽¹⁾	Тип легирования, Концентрация, см ⁻³
Si ₃ N ₄	200	-
GaAs	500	n, $3,3 \cdot 10^{18}$
GaAs	200	n, $2,0 \cdot 10^{17}$
Al _{0,8} Ga _{0,2} As	25	n, $4,1 \cdot 10^{18}$
GaAs	50(20 нм затвор Шоттки)	n, $1,0 \cdot 10^{17}$
Al _{0,22} Ga _{0,78} As	175	n, $1,0 \cdot 10^{17}$
Al _{0,22} Ga _{0,78} As	125	n, $3,4 \cdot 10^{18}$
Al _{0,22} Ga _{0,78} As	10	-
In _{0,22} Ga _{0,78} As	120	-
GaAs	8000	-
GaAs подложка	полуизолятор марки Ram-Xiamen ориент.(100) EPD <5000 см ⁻² , диаметр 100±0.4 мм, толщина 625 ± 25 мкм	

В рамках численного исследования было уделено пристальное внимание адекватному учёту ряда ключевых физических эффектов. Использована стандартная физическая модель, учитывающая квантование двумерного газа. В условиях сильного электрического поля, когда скорость дрейфа носителей заряда не находится в прямой зависимости от величины электрического поля, наблюдается явление, при котором энергия носителей рассеивается через фононный механизм. Этот процесс был адекватно отражён в численной модели, интегрированной в секцию физических моделей в среде TCAD. В процессе рекомбинации, когда энергия высвобождается или передаётся кристаллической решётке для достижения энергетически равновесных состояний, применяются модели, описывающие различные механизмы рекомбинации, включая излучательную рекомбинацию, рекомбинацию по механизму Оже и рекомбинацию Шокли-Рида-Холла. Необходимость включения всех учтенных в численной модели процессов подтверждается наличием функционирующей модели, основанной на данных процессах, в работе [5].

В ходе исследования была разработана вычислительная сетка для численного моделирования транзистора pHEMT, содержащая приблизительно 31 тысячу узлов. В

канале транзистора вычислительная сетка обеспечивает разрешение в восемь узлов по координате Y на каждую единицу шага по координате X. Для получения более детальных рекомендаций по конструированию вычислительной сетки рекомендуется обратиться к работе [6].

В рамках настоящего исследования было проведено систематическое варьирование параметров модели рНЕМТ транзистора с целью оценки их влияния на характеристики устройства. Изменение каждого параметра производилось с отклонением на 10% от его стандартного значения, в то время как остальные параметры оставались на исходных уровнях. Анализ включал в себя оценку следующих ключевых параметров:

- **Длина затвора:** исследовались значения 0,55 мкм и 0,45 мкм по сравнению со стандартным значением 0,5 мкм.
- **Концентрация донорного слоя AlGaAs:** анализировались значения $3,06 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $3,74 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в сравнении со стандартной концентрацией $3,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$.
- **Концентрация контактного слоя:** рассматривались значения $2,97 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $3,63 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ относительно стандартного показателя $3,3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$.
- **Длина канала InGaAs:** изучались длины 10,8 нм и 13,2 нм при нормативной длине в 12 нм.
- **Глубина затвора в 5-нанометровом слое GaAs:** оценивались глубины 1,8 нм и 2,2 нм по отношению к исходной глубине 2 нм

Таким образом, было выполнено детальное исследование влияния критических параметров на функциональные характеристики транзисторов рНЕМТ, что позволяет глубже понять механизмы их работы и оптимизировать процессы их проектирования. В исследовании, представленном в [7], проводится анализ значимости критических параметров, в частности длины канала и длины затвора, на функциональные характеристики устройства.

В работе проводится сравнение стоковых и стоко-затворных вольт-амперных характеристик (ВАХ) полученных с использованием численной двумерной модели с экспериментальными данными, предоставленными АО "Светлана-Рост".

3. Результаты параметрического исследования

В данном исследовании произведено сравнение стоковых (см. рис. 1а) и стоко-затворных (см. рис. 1б) характеристик моделируемого устройства рНЕМТ с экспериментально полученными характеристиками устройств рНЕМТ, обладающих одинаковой топологией. Это сравнение позволяет оценить соответствие численной модели рНЕМТ фактическим экспериментальным данным, что является ключевым для подтверждения достоверности модели. Анализируя стоковые характеристики, полученные при вариации напряжения питания от 0 до 5 В при постоянном напряжении на затворе 0 В, были вычислены токи насыщения для каждой из кривых. Дополнительно, изучение стоко-затворных характеристик, выполненное при напряжении питания 5 В с изменением напряжений на затворе от -2 до 0,5 В, обеспечило определение значений напряжения отсечки. Ток насыщения, вычисленный с использованием численной модели, составил 26,96 мА, что находится в соответствии с экспериментальными данными, колеблющимися в диапазоне от 26,61 до 31,46 мА. Напряжение отсечки, полученное с помощью численной модели и равное -1,42 В, согласуется с диапазоном экспериментальных значений от -1,42 до -1,26 В. Изучение быстродействия моделируемого рНЕМТ выявило зависимость частоты отсечки от напряжения на затворе при напряжении питания 3 В, с частотой отсечки, изменяющейся от 29 до 15 ГГц при вариации напряжения на затворе от -0,5 до 0,5 В. Экспериментальные данные по частоте отсечки были получены лишь для условий напряжения затвора 0 В и напряжения питания 3 В, при этом частота отсечки

экспериментальных образцов находилась в диапазоне от 22 до 28 ГГц, в то время как в численной модели она составляла 22,5 ГГц. Соответствие наблюдаемой частоты отсечки с экспериментальными результатами и точность модели в отражении зависимости частоты отсечки от напряжения на затворе подтверждают надежность и достоверность применяемой численной модели рНЕМТ.

В рамках проведенного параметрического анализа стоковых характеристик (см. рис. 2а), исследование выполнялось при фиксированном значении напряжения на затворе, установленном на уровне 0 В, и варьировании напряжения питания в пределах от 0 до 5 В. В аналогичной манере, стоко-затворные характеристики (см. рис. 2б) были исследованы при стабильном напряжении питания, равном 5 В, с изменением напряжения на затворе в диапазоне от -2 до 0,5 В. Целью построения данных графиков являлось выявление параметров, оказывающих наиболее существенное воздействие на функциональные характеристики моделируемого устройства рНЕМТ.

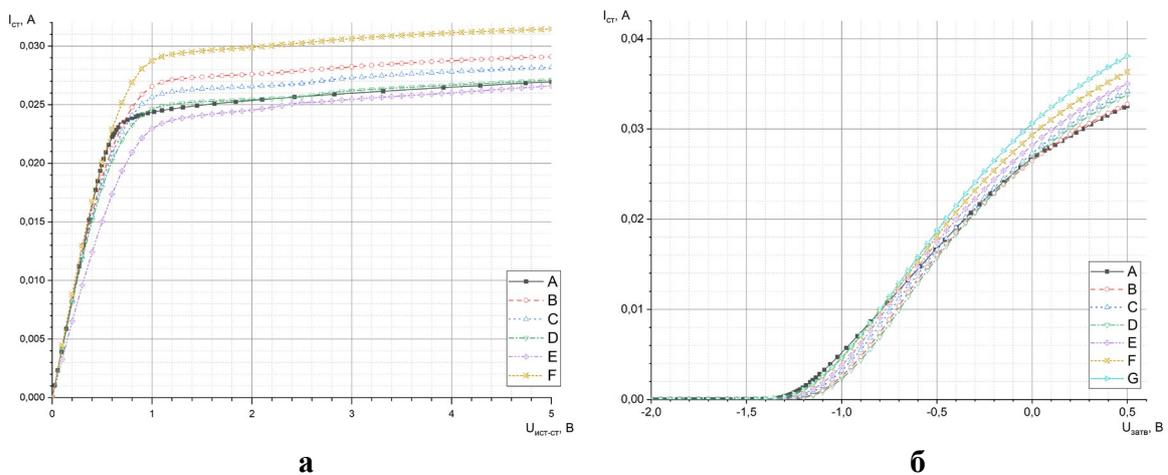


Рисунок 1. Стоковые (а) и стоко-затворные (б) характеристики для моделируемых и экспериментальных устройств рНЕМТ. Обозначения: А - характеристика, полученная с использованием численного моделирования; В-Г - характеристики, определенные экспериментальным путем.

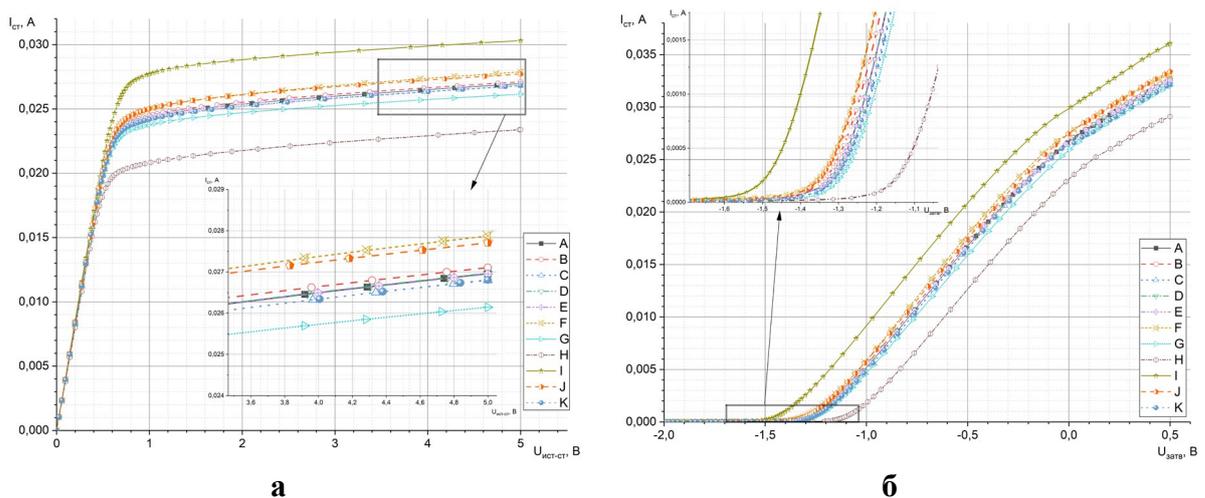


Рисунок 2. Стоковые (а) и стоко-затворные (б) характеристики численной модели рНЕМТ, иллюстрирующие сравнение кривых, полученных с 10% вариацией различных параметров по отношению к базовой кривой. Обозначения: А - кривая, полученная численно без вариации параметров на 10%; ВС - кривые с 10% вариацией глубины затвора; DE - кривые с 10% вариацией концентрации контактного слоя; FG - кривые с 10% вариацией длины затвора; HI - кривые с 10% вариацией концентрации донорного слоя; JK - кривые с 10% вариацией длины канала.

В рамках проведенного исследования было выявлено, что максимальное отклонение тока стока на стоковой характеристике достигает приблизительно 12,7%. Аналогичным образом, наибольшее отклонение напряжения отсечки, обнаруженное на основе стоко-затворной характеристики, составляет около 11,2%. Данный результат был получен в результате вариации концентрации электронов в донорном слое AlGaAs на уровне 10%.

Исследование также показало следующие взаимосвязи между вариацией параметров и характеристиками транзистора:

– Вариация длины затвора на 10% приводит к изменению напряжения отсечки на стоко-затворной характеристике на 3,5%, а также к отклонению тока насыщения на 2,2%.

– При 10% изменении длины канала наблюдаются изменение напряжения отсечки и тока насыщения, что находит подтверждение в работе [8]. Отклонение тока насыщения при уменьшении (увеличении) длины канала составляет 3% (1,5%), отклонение напряжения отсечки составляет 3,5% (1,4) %.

– При 10 % вариации глубины затвора в слое GaAs изменение напряжения отсечки составляет 0,7 %, а отклонение тока насыщения - 0,3 %.

– 10 % вариация концентрации электронов контактного слоя не приводит к заметным изменениям характеристик рНЕМТ.

4. Заключение

В ходе детализированного параметрического анализа, были выявлены и систематически оценены критические параметры, оказывающие доминирующее воздействие на функциональные характеристики разрабатываемой численной модели транзистора. Это исследование подчеркивает неотложную потребность в их всестороннем экспериментальном изучении для обеспечения верификации и валидации модели. Значительные отклонения, как в токе стока, так и в значениях напряжения отсечки, были обнаружены в результате 10-процентной корректировки концентрации донорного слоя AlGaAs, что подчеркивает его критичность в определении электрических свойств устройства. В контрасте, модификации, такие как 10-процентные изменения длины канала, длины затвора и глубины затвора в слое GaAs, привели к вариациям, имеющим меньшую степень влияния на электрические характеристики, что указывает на относительную устойчивость этих параметров в контексте моделирования.

Список литературы

1. Aadit M. N. A. et al. High electron mobility transistors: performance analysis, research trend and applications //Different Types of Field-Effect Transistors-Theory and Applications. – 2017. – С. 45-64.
2. Карпов С. Н. Методика прогнозирования характеристик транзисторных GaAs-гетероструктур и полевых транзисторов на их основе //Электронная техника. – 2023.
3. Перепеловский В. В., Михайлов Н. И., Марочкин В. В. Разработка электронных устройств в среде Synopsys Sentaurus TCAD: лаб. практикум. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
4. Sentaurus™ Device User Guide, Ver. T-2022. 03, Synopsys TCAD Sentaurus, San Jose, CA, USA, 2022.
5. Hao H. L. et al. Influence of double InGaAs/InAs channel on DC and RF performances of InP-based HEMTs //Journal of Ovonic Research. – 2022. – Т. 18. – №. 3. – С. 411-419.
6. Lee M. Design optimization of the double delta doping HEMT : дис. – University of Delaware, 2018. (mesh)
7. Pattnaik G., Mohapatra M. Design of AlGaAs/InGaAs/GaAs-Based PHEMT for High Frequency Application //Proceedings of International Conference on Communication, Circuits, and Systems: IC3S 2020. – Springer Singapore, 2021. – С. 329-337.
8. Gao H. C., Yin Z. J. Theoretical and Experimental Optimization of InGaAs Channels in GaAs PHEMT Structure //Chinese Physics Letters. – 2015. – Т. 32. – №. 6. – С. 068102. CHIN. PHYS. LETT. Vol. 32, No. 6 (2015) 068102