

УДК

Прогнозирование электрофизических характеристик GaAs НЕМТ методом Монте-Карло

С.Н. Карпов

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Аннотация: в работе представлены результаты моделирования GaAs НЕМТ различных конструкций. Показано, что внесение в конструкцию двусторонне-легированной GaAs-гетероструктуры слоев, легированных акцепторной примесью, позволяет повысить максимальный ток стока транзистора на 13%. Показано, что при одинаковых отрицательных напряжениях затвор-исток ток стока DA-DpHEMT превышает ток стока DpHEMT в 1,5-2 раза. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Ключевые слова: НЕМТ, DpHEMT, DA-DpHEMT, всплеск дрейфовой скорости

1. Введение

В настоящее время моделированию СВЧ полупроводниковых приборов и прогнозированию их характеристик уделяют огромное внимание. Изготовление новых приборов или использование новых материалов без предварительных расчетов влекут за собой большие экономические риски, требуют большого количества времени, поэтому использование математических моделей, способных корректно описывать влияние различных конструктивных или технологических особенностей прибора на его характеристики, является неотъемлемой частью производственного цикла.

При описании протекания электрического тока в приборе используют модели, основанные на различных системах дифференциальных уравнений. Для полноценного анализа транзисторов с высокой подвижностью электронов (High electron mobility transistor – НЕМТ) предпочтительно использовать модели, основанные на решении кинетического уравнения Больцмана. Подобные модели позволяют наблюдать за процессами переноса и рассеяния носителей заряда в полупроводниковом приборе. В работе приведены результаты моделирования электрофизических характеристик НЕМТ на основе GaAs-гетероструктур различных конструкций.

2. Теоретический расчет

Проводилось исследование транзистора на основе GaAs-гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием (DA-DpHEMT) [1], паспорт которой представлен в таблице 1.

При расчете электрофизических характеристик, исследуемых GaAs НЕМТ использовалась модель, основанная на методе Монте-Карло и методе частиц [2 – 4]. Учитывалось рассеяния на полярных оптических, акустических, междолинных фонах, пьезоэлектрическое рассеяние и рассеяние на ионизированных примесях, а также учитывался принцип запрета Паули. Использовались частоты рассеяния, представленные в [3,5,6], для учета принципа Паули использовалась методика, представленная в [7]. Движение частиц рассматривалось в течение первых 30 пс, шаг дискретизации по времени $dt=0.5$ фс, начальное количество частиц $Z=80000$, расстояния затвор-исток L_{gs} , затвор-сток L_{gd} и длина затвора L_g исследуемого транзистора равны 0.5, 0.9 и 0.15 мкм, соответственно, поверхностная плотность заряда $Q_s = 0$.

Таблица 1. Паспорт моделируемой DA-DrHEMT структуры

№ слоя, п/п	Материал	Толщина, нм	Легирование
1	GaAs	50	н/л
2	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	100	н/л
3	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	15	$N_a = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
4	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	5	н/л
5	δ -Si	-	$8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
6	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	3	н/л
7	GaAs	3	н/л
8	Ga _{0,835} In _{0,165} As	14	н/л
9	GaAs	1,5	н/л
10	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	3	н/л
11	δ -Si	-	$7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
12	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	7	н/л
13	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	8	$N_a = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
14	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	10	н/л

Модель апробировалась на гетероструктуре DA-DrHEMT с поверхностной плотностью заряда $Q_s = -1,6 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$ и полевом транзисторе с длиной затвора 0,3 мкм и общей шириной затвора 0,8 мм На рисунке 1 представлено сравнение расчетных значений тока насыщения и крутизны передаточной характеристики DA-DrHEMT с экспериментально полученными значениями при $V_{ds} = 2 \text{ В}$. Результаты расчета находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

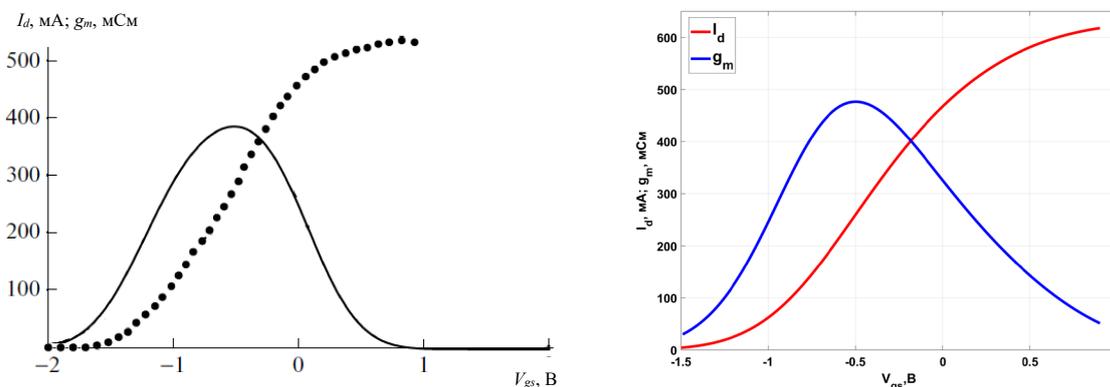


Рисунок 1. Ток насыщения и крутизна передаточной характеристики DA-DrHEMT при $V_{ds} = 2 \text{ В}$. Слева представлены экспериментальные данные из [1] (сплошная – крутизна, пунктирная – ток насыщения), справа – результаты моделирования.

Проведено сравнение ВАХ DA-DrHEMT с транзистором на основе двусторонне легированной гетероструктуры (DrHEMT), паспорт которой приведен в таблице 2.

Таблица 2. Паспорт моделируемой DrHEMT структуры

№ слоя, п/п	Материал	Толщина, нм	Легирование
1	GaAs	50	н/л
2	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	120	н/л
3	δ -Si	-	$2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
4	Al _{0,25} Ga _{0,75} As	3	н/л
5	GaAs	3	н/л
6	Ga _{0,835} In _{0,165} As	14	н/л
7	GaAs	1,5	н/л

8	$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$	3	н/л
9	$\delta\text{-Si}$	-	$3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
10	$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$	25	н/л

Другие параметры конструкции ДрНЕМТ аналогичны DA-ДрНЕМТ. На рисунке 2 представлено сравнение токов стока DA-ДрНЕМТ и ДрНЕМТ.

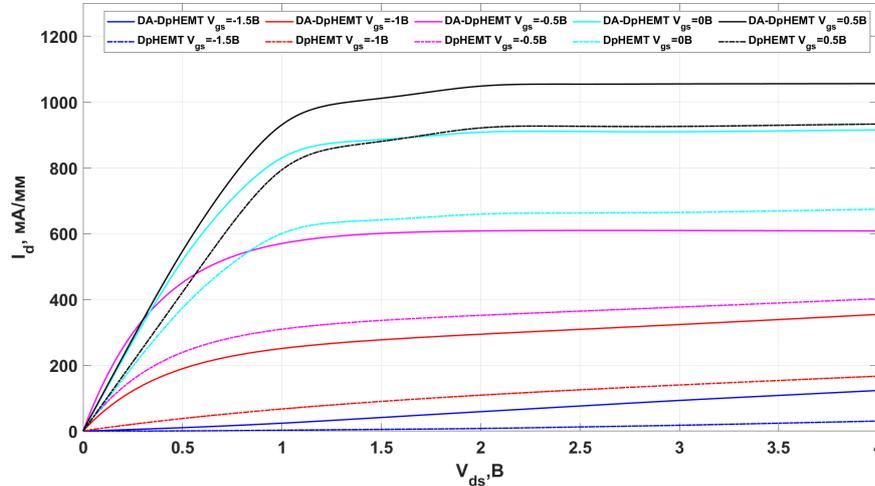


Рисунок 2. Семейства ВАХ DA-ДрНЕМТ и ДрНЕМТ.

Как следует из рисунка 2, при одинаковых отрицательных напряжениях затвористок, ток стока DA-ДрНЕМТ превышает ток стока в ДрНЕМТ в 1,5–2 раза, при этом максимальный ток стока DA-ДрНЕМТ превышает максимальный ток стока ДрНЕМТ на 13%.

Рост тока стока в DA-ДрНЕМТ относительно ДрНЕМТ связан с более сильной локализацией носителей заряда в канале гетероструктуры, вследствие чего повышается средняя дрейфовая скорость электронов вдоль канала. Дрейфовые скорости электронов v_d в рассматриваемых транзисторах при $V_{ds} = 3 \text{ В}$, $V_{gs} = -1 \text{ В}$ представлены на рисунке 3.

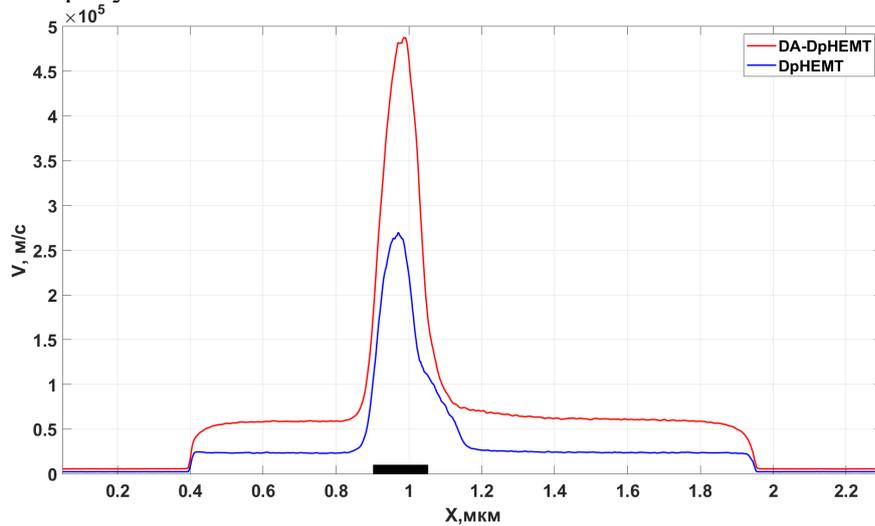


Рисунок 3. Сравнение дрейфовых скоростей электронов в DA-ДрНЕМТ и ДрНЕМТ.

Из рисунка 3 следует, что v_d в подзатворной области DA-ДрНЕМТ (v_d^{DA}) выше аналогичной v_d в ДрНЕМТ (v_d^{DP}) в 1,7-1,8 раза, на участках затвористок и затворсток – более чем в 2 раза.

Дрейфовые скорости электронов v_d в рассматриваемых транзисторах при $V_{ds} = 3$ В, $V_{gs} = 0$ В представлены на рисунке 4. Примечательно, что для данной рабочей точки v_d^{DA} в подзатворной области оказывается меньше v_d^{DP} . Такой эффект может быть обусловлен более высоким уровнем легирования донорных слоев в DA-DpHEMT, которые при превышении некоторого значения V_{gs} начинают выступать в качестве проводящих каналов.

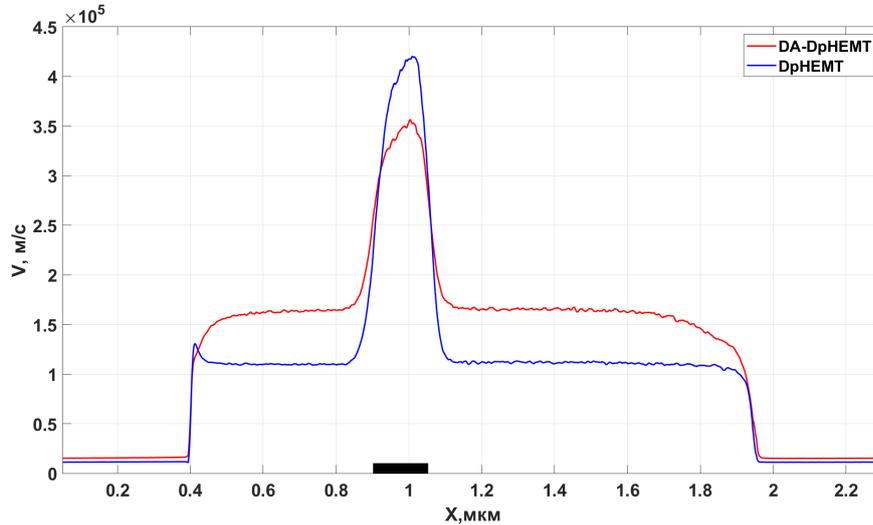


Рисунок 4. Сравнение дрейфовых скоростей электронов в DA-DpHEMT и DpHEMT.

Токи насыщения и крутизны передаточных характеристик DA-DpHEMT и DpHEMT при $V_{ds} = 3$ В представлены на рисунке 5.

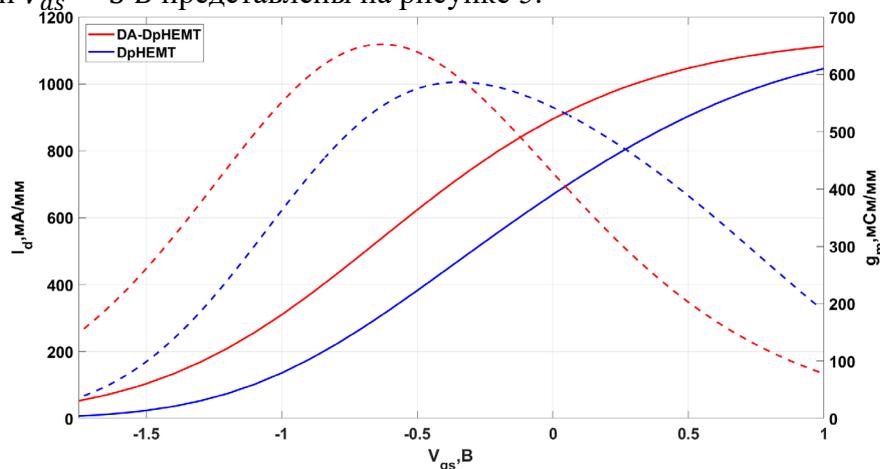


Рисунок 5. Токи насыщения (сплошные линии) и крутизны передаточных характеристик (штриховые линии) DA-DpHEMT и DpHEMT при $V_{ds} = 3$ В.

3. Заключение

Проведено численное моделирование электрофизических характеристик СВЧ полевых транзисторов на основе GaAs-гетероструктур различных конструкций, результаты моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Показано, что внесение в конструкцию DpHEMT гетероструктуры слоев, легированных акцепторной примесью, позволяет повысить максимальный ток стока транзистора на 13%. Сравнение семейства ВАХ исследуемых транзисторов показало, что при одинаковых отрицательных напряжениях затвор-исток ток стока DA-DpHEMT превышает ток стока DpHEMT в 1,5-2 раза. Сравнение дрейфовых скоростей электронов в транзисторах при $V_{ds} = 3$ В показало, что при $V_{gs} = -1$ В дрейфовая

скорость электронов в подзатворной области в DA-DpHEMT больше дрейфовой скорости электронов в подзатворной области в DpHEMT в 1,7-1,8 раза, а при $V_{gs} = 0$ В средняя дрейфовая скорость электронов в канале DA-DpHEMT больше средней дрейфовой скорости электронов в канале DpHEMT в 1.5 раза. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования DA-DpHEMT гетероструктур при изготовлении мощных СВЧ полевых транзисторов.

Список литературы

1. V.M. Lukashin et.al Prospects for the Development of High-Power Field-Effect Transistors Based on Heterostructures with Donor-Acceptor Doping // Semiconductors. – 2014. – Vol. 48 – No. 5. – pp. 666–674.
2. C. Jacoboni, P. Lugli. The Monte Carlo method for semiconductor device simulation. – Springer-Verlag/Wien. – 1989. – 359 p.
3. Р. Хокни. Дж. Иствуд. Численное моделирование методом частиц: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987 – 640 с.
4. D. Vasileska, S.M. Goodnick. Computational Electronics. – Morgan & Claypool. – 2006. – 208 p.
5. K. Nederveen. Ensemble Monte Carlo simulation of electron transport in AlGaAs/GaAs heterostructures; PhD Thesis. – Technische Universiteit Eindhoven. – 1989. – 199 p.
6. M.V. Fischetti. Monte Carlo Simulation of Transport in Technologically Significant Semiconductors of the Diamond and Zinc-Blend Structures – Part I: Homogeneous Transport // IEEE Transaction on Electron Devices. – 1991. – Vol. 38. – No. 3. – pp. 634–649.
7. J. Mateos et. al. Improved Monte Carlo Algorithm for the Simulation of δ -Doped AlInAs/GaInAs HEMT's // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2000. – Vol. 47. – No. 1. – pp. 250–253.