

# Анализ влияния DX-центров на характеристики псевдоморфного транзистора с высокой подвижностью электронов (рНЕМТ)

А.В. Сапожников<sup>1,2</sup>, Р.С. Крюков<sup>1,2</sup>, А.Л. Дудин<sup>2</sup>, В.В. Перепеловский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>АО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург

**Аннотация:** в данной работе проведен детальный анализ влияния глубоких донорных ловушек - DX-центров - на характеристики псевдоморфного транзистора с высокой подвижностью электронов (рНЕМТ). Особое внимание уделено систематическому исследованию стоковых и сток-затворных вольт-амперных характеристик (ВАХ) при варьировании эмпирического коэффициента  $E_b$  и молярной доли алюминия в донорном слое AlGaAs. Показано, что изменения этих параметров вызывают модуляцию концентрации DX-центров, оказывающих существенное влияние на формирование локализованных состояний в запрещённой зоне. Численное моделирование основано на решении системы фундаментальных уравнений полупроводниковой электроники (уравнения Пуассона, непрерывности и переноса) с использованием двумерной гидродинамической модели, учитывающей квантовые ямы. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными ВАХ, подтверждая корректность используемой модели. На основе рассчитанных зависимостей сделаны выводы о влиянии концентрации DX-центров на ключевые параметры рНЕМТ — в частности, на ток насыщения и напряжение отсечки.

**Ключевые слова:** рНЕМТ, транзистор с высокой подвижностью электронов, GaAs/AlGaAs/InGaAs, TCAD, DX-центры, глубокие донорные ловушки.

## 1. Введение

Наличие DX-центров в слоях Si-легированного  $Al_xGa_{1-x}As$ , выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ) [1], является одной из ключевых проблем при проектировании и производстве приборов на основе гетероструктур GaAs/InGaAs/AlGaAs. Несмотря на многолетние исследования, микроскопическая природа DX-центров и механизмы их воздействия на характеристики устройств остаются объектом активного изучения [2, 3]. Установлено, что DX-центры представляют собой примесные дефекты, способные существовать в трех зарядовых состояниях: однократно положительном ( $d^+$ ), нейтральном ( $d^0$ ), оба из которых связаны с мелким донорным состоянием, и однократно отрицательном (DX), соответствующем глубокому состоянию DX-центра. Переходы между этими состояниями определяются положением уровня Ферми в запрещённой зоне, существенно влияя на распределение носителей и электрические характеристики структуры.

Минимизация влияния DX-центров выступает важной задачей при разработке рНЕМТ-структур и может быть реализована как на технологическом уровне (контроль легирования, подбор состава AlGaAs), так и путём физического моделирования. Последнее позволяет количественно оценить влияние параметров ловушек и условий роста на характеристики устройств. Цель настоящего исследования — разработка и применение количественных методов моделирования влияния DX-центров на ВАХ рНЕМТ при варьировании состава донорного слоя и энергетических уровней ловушек. Для достижения поставленной цели используется двумерная гидродинамическая модель, адаптированная под особенности квантовых гетероструктур.

## 2. Математическая модель

В приборно-технологическом моделировании полупроводниковых элементов широко применяются численные методы, позволяющие решать систему базовых уравнений полупроводниковой электроники: уравнение Пуассона, а также уравнения непрерывности и переноса носителей. В данной работе для субмикронных структур использована гидродинамическая модель, реализованная в среде TCAD и подробно описанная в [4,5].

Электрофизические параметры рНЕМТ исследовались в том же программном комплексе TCAD, поддерживающем многокритериальный анализ и обладающем широкими возможностями по моделированию полупроводниковых приборов. Структурные параметры устройства, включая функциональные гетерослои, представлены в Таблице 1. При проведении расчётов основное внимание уделялось корректному учёту фундаментальных физических процессов, отражённых в [4].

Таблица 1. Тип структуры: GaAs рНЕМТ 0.5 switch

Последовательность слоёв	Толщина слоя, А <sup>(1)</sup>	Тип легирования, Концентрация, см <sup>-3</sup>
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	300	-
GaAs	500	n, 3.5·10 <sup>18</sup>
GaAs	200	n, 2.0·10 <sup>17</sup>
AlGaAs	25	n, 3.9·10 <sup>18</sup>
GaAs	50	n, 1.2·10 <sup>17</sup>
Al <sub>0.22</sub> Ga <sub>0.78</sub> As	175	n, 1.2·10 <sup>17</sup>
Al <sub>0.22</sub> Ga <sub>0.78</sub> As	125	n, 3.4·10 <sup>18</sup>
Al <sub>0.22</sub> Ga <sub>0.78</sub> As	30	-
In <sub>0.22</sub> Ga <sub>0.78</sub> As	120	-
GaAs	8000	-
GaAs подложка	полупроводник производства Ram-Xiamen ориент.(100) диаметр 100±0.4 мм, толщина 625 ± 25 мкм, p=1,0·10 <sup>14</sup>	

Для дискретизации исследуемой области транзистора сформирована адаптивная вычислительная сетка, включающая около  $5,6 \times 10^4$  узлов. В области канала InGaAs плотность сетки локально увеличена, что обеспечивает более точный расчёт распределения носителей.

Данная работа включает детальное исследование влияния глубоких донорных ловушек (DX-центров) на характеристики GaAs рНЕМТ. В качестве основы использовалась обобщённая теоретическая модель интерпретации DX-центров [6], а также экспериментальные данные, полученные методами нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) [7] и измерениями вольт-амперных характеристик (ВАХ) реальных структур, численно моделируемых в данном исследовании. Сопоставление результатов эксперимента с расчётными данными по концентрации DX-центров и их влиянию на характеристики рНЕМТ представлено в настоящей статье.

Применяемая модель для вычисления концентрации DX-центров в GaAs рНЕМТ основана на методологии, изложенной в [6, 8, 9]. По данным DLTS-измерений, проведённых для рНЕМТ-структур, изготовленных на предприятии «Светлана-Рост», при содержании Al = 0,22 в донорном слое AlGaAs концентрация DX-центров может достигать  $1,2 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Ключевым параметром универсальной модели DX-центров является эмпирический коэффициент E<sub>b</sub>, который в пределах экспериментальной погрешности можно рассматривать как универсальную константу, определяющую энергии связи DX-центров в тройных и четверных сплавах на основе цинковой

обманки [6]. В ходе численного моделирования установлено, что для исследуемой системы оптимальное значение  $E_b$  равно 0,14 эВ. Диапазон его варьирования составил 0,1–0,2 эВ с шагом 0,01 эВ при фиксированной доле Al, равной 0,22. Для каждого значения  $E_b$  рассчитаны сток-затворные и стоковые ВАХ. Также исследовано влияние вариации доли Al в донорном слое AlGaAs с диапазоном 0,15–0,3 и шагом 0,01 при фиксированном коэффициенте  $E_b = 0,14$  эВ. Для каждого значения молярной доли Al посчитаны стоковые и сток-затворные ВАХ. Свойства и параметры, используемых в работе сплавов и материалов отражены в работе [10].

Рассчитанные концентрации DX-центров в рамках настоящего исследования для вариации молярной доли Al составляют:  $1,98 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  -  $1,16 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  в диапазоне от 0,15 до 0,22 и  $1,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  -  $1,01 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  в диапазоне от 0,23 до 0,3. Концентрации DX-центров для вариации коэффициента  $E_b$  составляют:  $2,95 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  -  $1,16 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  в диапазоне от 0,1 эВ до 0,14 эВ и  $1,88 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  до  $1,08 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  в диапазоне от 0,15 эВ до 0,2 эВ.

### 3. Результаты параметрического исследования

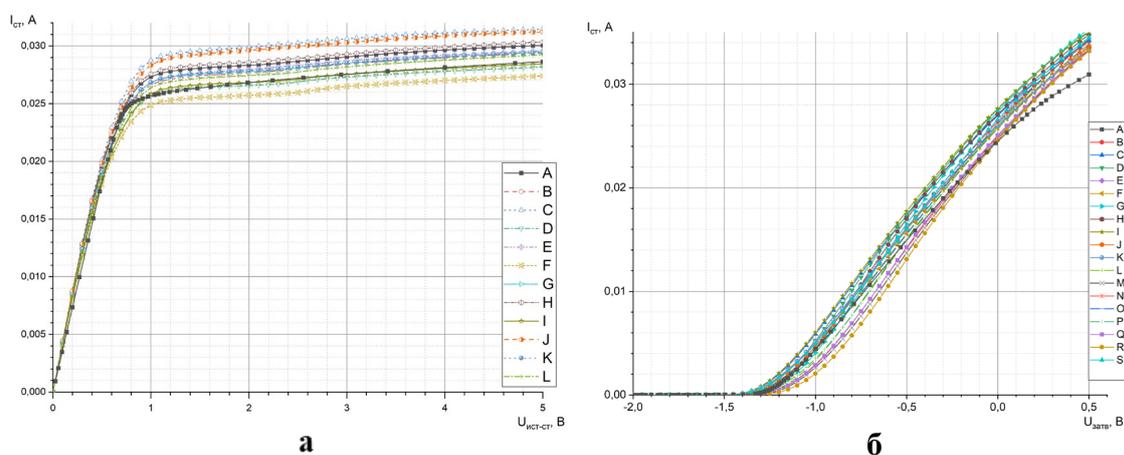
В рамках настоящей работы проведён анализ воздействия DX-центров на электрофизические параметры AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT. Сравнительному исследованию подверглись стоковые и сток-затворные ВАХ, рассчитанные для численной модели pHEMT и экспериментальные pHEMT-структуры, изготовленные на производстве АО «Светлана-Рост», с идентичными топологическими параметрами. Стандартная исследуемая численная модель предполагает долю алюминия в слое AlGaAs равную 0,22 и эмпирический коэффициент  $E_b$  равный 0,14 эВ, что соответствует концентрации DX-центров равной  $1,16 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , согласующуюся с экспериментальными измерениями.

Экспериментальная верификация стоковых (см. рис. 1 а) характеристик осуществлялась при вариации напряжения исток-сток в интервале от 0 В до 5 В при нулевом смещении на затворе. Параллельно исследование сток-затворных (см. рис. 1 б) зависимостей проводилось при фиксированном напряжении исток-сток 5 В и варьировании потенциала затвора от -2 В до 0,5 В для точного определения напряжения отсечки. Результаты анализа стоковых и сток-затворных ВАХ демонстрируют ток насыщения 28,62 мА, находящийся в пределах экспериментально зафиксированного диапазона от 27,40 мА до 31,55 мА, а также напряжение отсечки равное -1,3 В, согласующееся с экспериментальными значениями от -1,5 В до -1,19 В. Полученная корреляция между теоретическими и экспериментальными данными подтверждает адекватность применённой модели.

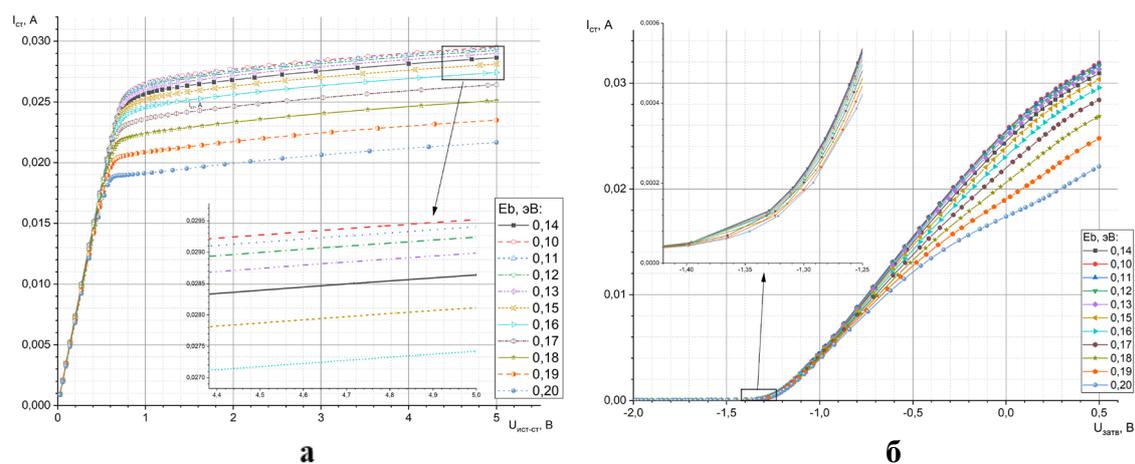
Исследованы стоковые (см. рис. 2 а) и сток-затворные (см. рис. 2 б) ВАХ при варьировании эмпирического коэффициента  $E_b$ . В диапазоне  $E_b$  от 0,1 эВ до 0,13 эВ наблюдается незначительное снижение тока насыщения с 29,48 мА до 28,96 мА, что соответствует отклонению от значения стандартной исследуемой модели на 3%–1,21%, обусловленному малой концентрацией DX-центров. При дальнейшем увеличении  $E_b$  до 0,17 эВ ток насыщения уменьшается до 27,35 мА с отклонением до 4,43%, демонстрируя усиление влияния DX-центров. Наиболее выраженная деградация параметров наблюдается в диапазоне  $E_b$  от 0,17 эВ до 0,2 эВ, где ток насыщения снижается до 19,40 мА с максимальным отклонением 32,23%, что согласуется с резким ростом концентрации DX-центров. Исследование сток-затворных характеристик выявило стабильность напряжения отсечки равного -1,3 В в диапазоне  $E_b$  от 0,1 эВ до 0,14 эВ, совпадающего со стандартным значением исследуемой модели. Однако при  $E_b \geq 0,15$  эВ наблюдается смещение напряжения отсечки до -1,38 В с отклонением до 5,03%.

Исследованы стоковые (см. рис. 3 а) и сток-затворные (см. рис. 3 б) ВАХ,

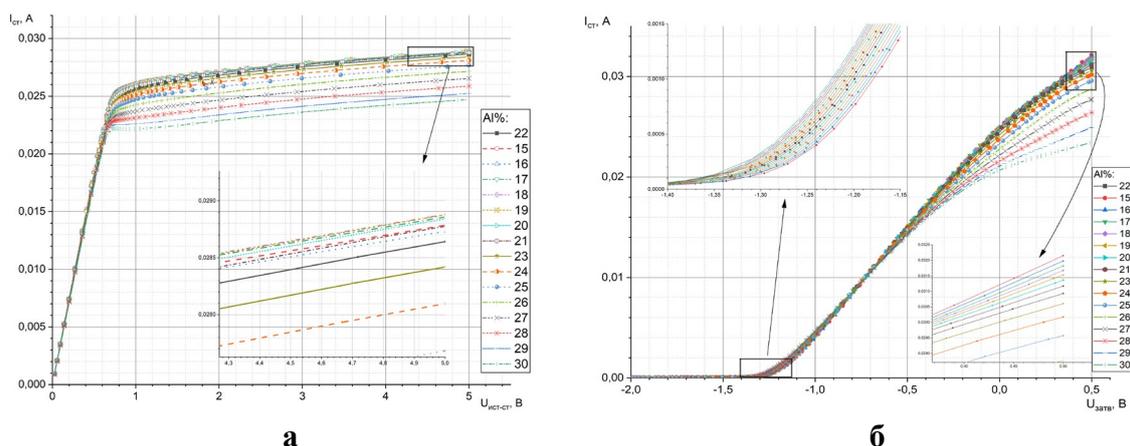
полученные при систематическом изменении молярной доли алюминия в трёхкомпонентном растворе AlGaAs в диапазоне от 0,15 до 0,3 с шагом 0,01 при фиксированном значении эмпирического коэффициента  $E_b$  равным 0,14 эВ. В интервале молярной доли Al от 0,15 до 0,21 наблюдаются незначительные колебания тока насыщения в пределах от 28,71 мА до 28,86 мА с максимальным значением тока при доле Al равной 0,18 и минимальным при доле Al равной 0,16. Отклонение от значения стандартной исследуемой модели в этой области не превышает 0,83%, что свидетельствует о слабой чувствительности параметра к составу при низких концентрациях алюминия, в частности из-за низкой концентрации DX-центров. При увеличении доли Al до 0,3 ток насыщения снижается до 24,07 мА с отклонением 15,91% от значения стандартной исследуемой модели, демонстрируя выраженную нелинейную зависимость. Анализ сток-затворных характеристик выявил стабильность напряжения отсечки равного -1,3 В внутри диапазона доли Al от 0,19 до 0,22, соответствующего стандартному значению исследуемой модели. В области доли Al от 0,15 до 0,18 напряжение отсечки варьируется от -1,27 В до -1,29 В с отклонением до 2,03%, тогда как при доле Al от 0,23 до 0,3 наблюдается его смещение до -1,37 В с максимальным отклонением равным 4,43%.



**Рисунок 1.** Стоковые и сток-затворные характеристики моделируемых и экспериментальных устройств рНЕМТ. Обозначения: А - ВАХ с использованием численной модели с учетом DX-центров; В-S - характеристики, определенные экспериментально.



**Рисунок 2.** Стоковые и сток-затворные характеристики численной модели исследуемого рНЕМТ, отображающие вариацию эмпирического коэффициента  $E_b$  от 0,1 эВ до 0,2 эВ и для различных концентраций DX-центров при постоянной молярной доле Al в донорном слое AlGaAs равной 0,22.



**Рисунок 3.** Стоковые и сток-затворные характеристики численной модели рНЕМТ, отображающие вариацию молярной доли Al в тройном растворе AlGaAs донорного слоя от 0,15 до 0,3 и для различных концентраций DX-центров при постоянном коэффициенте  $E_b$  равным 0,14 эВ.

#### 4. Заключение

В ходе проведённого исследования разработана и применена численная модель, учитывающая влияние глубоких донорных ловушек (DX-центров) на характеристики рНЕМТ на основе GaAs/AlGaAs.

На примере реальных рНЕМТ-структур сопоставлены результаты численного моделирования с экспериментальными данными, что позволило подтвердить адекватность предложенной методики расчёта. Ключевую роль в формировании локализованных состояний и, соответственно, в работе устройства играет концентрация DX-центров, которая определяется эмпирическим коэффициентом  $E_b$  и молярной долей алюминия в донорном слое AlGaAs. Варьирование этих параметров даёт возможность воздействовать на ключевые характеристики рНЕМТ, такие как стоковые и сток-затворные вольт-амперные зависимости, а также существенно влияет на ток насыщения и напряжение отсечки.

Полученные результаты открывают перспективы для более точной настройки рецептуры роста и конструктивных параметров транзисторов с целью минимизации отрицательного влияния DX-центров на рабочие характеристики рНЕМТ. В дальнейшем планируется расширить модель учётом других типов глубоких центров для оценки надёжности и долговечности устройств.

#### Список литературы

1. Mooney, P. M. (2024). DX centers in III-V alloys: recent developments. *Deep Centers in Semiconductors*, 643-665.
2. Chadi, D. J., & Chang, K. J. (1988). Theory of the atomic and electronic structure of DX centers in GaAs and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As alloys. *Physical review letters*, 61(7), 873.
3. Chadi, D. J., & Zhang, S. B. (1991). Atomic structure of DX centers: Theory. *Journal of electronic materials*, 20, 55-58.
4. А.В. Сапожников, А.Л. Дудин, И.С. Пушница, В.В. Перепеловский Параметрическое исследование псевдоморфного транзистора с высокой подвижностью электронов GaAs/AlGaAs/InGaAs в среде TCAD // XIII Всероссийская научно-техническая конференция «ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА СВЧ», 27 - 31 мая 2024 г., Санкт-Петербург, Россия, С. 565-569.
5. Sentaurus™ Device User Guide, Ver. T-2022. 03, Synopsys TCAD Sentaurus, San Jose, CA, USA, 2022.
6. Karpov S. Y. A Universal Model for DX-Center Binding Energy in Cubic III-V Compounds // *physica status solidi (b)*. – 2021. – Т. 258. – №. 5. – С. 2000596.
7. Mari R. H. DLTS characterisation of defects in III-V compound semiconductors grown by MBE : дис. – University of Nottingham, 2011.
8. Tachikawa M. et al. A simple calculation of the DX center concentration based on an L-donor model // *Japanese journal of applied physics*. – 1985. – Т. 24. – №. 10A. – С. L821.

9. Gordon L. et al. Hybrid functional calculations of DX centers in AlN and GaN //Physical Review B. – 2014. – T. 89. – №. 8. – C. 085204.
10. Adachi S. Properties of semiconductor alloys: group-IV, III-V and II-VI semiconductors. – John Wiley & Sons, 2009.