

# Особенности расчёта приборов на основе гетероструктур AlGaN/GaN в САПР приборно-технологического моделирования

Д.Г. Дроздов<sup>1</sup>, Е.М. Савченко<sup>1,2</sup>, В.О. Сиомко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП "НПП "Пульсар", pulsar@dol.ru

<sup>2</sup> МГТУ МИРЭА, mirea@mirea.ru

**Аннотация** — В статье рассматриваются особенности расчёта гетероструктур AlGaN/GaN и приборов на их основе в САПР приборно-технологического моделирования. Представлены методика расчёта, результаты измерений транзисторов на основе гетероструктур AlGaN/GaN, проведено сопоставление расчётных и экспериментальных данных.

**Ключевые слова** — AlGaN/GaN, НЕМТ, САПР TCAD.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Приборы и устройства на основе гетероструктур AlGaN/GaN находят широкое применение в современных радиоэлектронных системах. Преимуществами подобных приборов по сравнению с кремниевыми и арсенид-галлиевыми являются: высокие значения пробивного напряжения, высокие значения удельной плотности мощности, возможность работы в условиях повышенной температуры и высокого уровня ионизирующего излучения [1].

Для создания перспективных приборов и устройств необходимо использовать современные системы проектирования, в частности, системы приборно-технологического моделирования. Такие системы позволяют численно оценивать влияние различных конструктивных и технологических решений на параметры разрабатываемых устройств, что существенно уменьшает затраты на проведение экспериментов.

Большинство современных САПР приборно-технологического моделирования были созданы, в первую очередь, для расчёта приборов на основе кремниевой технологии. Модели, которые используются для расчёта кремниевых приборов прошли отработку и позволяют с высокой степенью точности рассчитывать статические и динамические характеристики. При переходе к широкозонным материалам, в частности GaN, использовать данные модели невозможно. В последнее время разработано большое число моделей для расчёта приборов на основе указанных материалов. Это требует их

проверки и корректировки по результатам сопоставления с экспериментальными данными.

Таким образом, целью данной работы является уточнение стандартной методики расчёта приборов на основе гетероструктур AlGaN/GaN в системах приборно-технологического моделирования.

## II. ОСОБЕННОСТИ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN/GaN

В отличие от традиционных гетероструктур на основе арсенида галлия гетероструктуры AlGaN/GaN обладают следующими особенностями [2]:

1. Кристаллическая структура в нитридных соединениях создаёт условия для возникновения как спонтанной, так и пьезоэлектрической поляризации. В свою очередь, суммарная спонтанная и пьезоэлектрическая поляризации и результирующие электрические поля создают условия, обеспечивающие высокую плотность носителей заряда на гетерогранице AlGaN/GaN.

2. Подвижность носителей заряда в нитриде галлия существенно отличается от подвижности в арсениде галлия.

3. Существенно большая ширина запрещённой зоны.

4. Значительно большее влияние ловушек на характеристики приборов по сравнению с приборами на основе арсенида галлия [3].

## III. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как уже отмечалось, в гетероструктурах на основе нитрида галлия наблюдается спонтанная и пьезоэлектрическая поляризации.

Особенности моделирования поляризационных эффектов рассматривались в работах [4], [5]. В этих работах представлена наиболее простая модель, использующая включение электрического заряда на границу раздела только барьерного AlGaN и буферного GaN слоев. Такой подход справедлив только для системы AlGaN/GaN, при этом толщина буферного слоя GaN должна быть более 1 мкм. При

переходе к системам с дополнительными слоями GaN, AlN, InN необходимо рассчитывать вводимый на гетерограницы заряд с учётом механических напряжений в гетероструктуре.

Расчёт подвижности в нитридных материалах возможно проводить с использованием нескольких моделей. Наиболее сложная модель учитывает влияние всех механизмов рассеяния носителей заряда, дающих вклад в общую подвижность [6]. Она позволяет отслеживать все изменения подвижности носителей заряда в объемном полупроводнике, в области двумерного газа, а также зависимость от конструкции гетероструктуры. Тем не менее, применение модели требует проведения сложных математических расчётов, поэтому на данный момент она не включена в современные САПР (Sentaurus TCAD, Silvaco TCAD и др.). В большинстве случаев в САПР включены аналитические модели расчёта подвижности. Такие модели описывают подвижность в зависимости от электрического поля, концентрации примеси, температуры. Наиболее распространёнными аналитическими моделями для нитрида галлия являются модели Альбрехта и Фарахманда, позволяющие учитывать зависимость подвижности от величины электрического поля и концентрации ионизированной примеси [6]. По результатам расчётов было показано, что указанные модели дают схожие между собой результаты, при условии, что использовалось одинаковое значение подвижности носителей заряда при низком значении электрического поля. Также стоит отметить, что модель Коэ-Томаса, разработанная для кремния, но с уточненными параметрами, даёт существенное расхождение результатов расчётов и измерений. В дальнейшем при расчётах будет использована модель Фарахманда.

Наличие квантовых эффектов в гетероструктурах существенно усложняет математические расчёты. Одним из методов их учёта является совместное решение системы уравнений Шредингера и Пуассона. Такой подход, тем не менее, не подходит для АС-анализа и анализа S-параметров, что обязательно для моделирования СВЧ НЕМТ транзисторов. Для устранения указанных недостатков были рассмотрены различные варианты учета квантовых эффектов, такие как квантовый потенциал Бома и модель градиента плотности [7]. Тем не менее, включение в расчёт указанных моделей существенно ухудшало сходимость при решении системы уравнений. Было показано, что можно учитывать влияние квантовых эффектов опосредованно, за счёт коррекции величины заряда, включаемого на гетерограницу AlGaIn/GaN.

Ловушки в нитриде галлия оказывают существенно большее влияние на параметры приборов, по сравнению с ловушками в арсениде галлия. Они влияют на переходные процессы в транзисторах, могут приводить к появлению эффекта "коллапса" тока [3]. В качестве базового набора параметров ловушек в нитриде галлия могут использоваться данные, представленные в работах [8] и [9].

Поскольку приборы на основе нитрида галлия предназначены для работы при высоких плотностях мощности ( $>1$  Вт/мм), то при расчётах необходимо обязательно учитывать эффекты саморазогрева. Моделирование саморазогрева проводится с помощью стандартного уравнения теплопроводности.

Описанные выше основные особенности проектирования гетероструктур AlGaIn/GaN и транзисторов на их основе были обобщены, результатом чего стала следующая методика моделирования:

1. Задание конструкции гетероструктуры - необходимо указать параметры слоев: толщину, концентрацию примеси, мольную долю в тройных соединениях и т.д.

2. Расчёт величины спонтанной и пьезоэлектрической поляризации между слоями. Расчёт спонтанной и пьезоэлектрической поляризации проводится с помощью аналитических выражений согласно модели Амбахера, описанной в работе [3]. С помощью полученной величины суммарной поляризации провести расчёт зарядов, которые необходимо ввести на гетерограницы.

3. Расчёт концентрации носителей с учётом решения совмещенной системы уравнений Шредингера-Пуассона для одномерного случая.

4. Определение подвижности носителей заряда при низком значении электрического поля. Поскольку подвижность связана с концентрацией носителей заряда, то для её определения используется экспериментальная зависимость, представленная, например, в работе [10]. При определении подвижности в области двумерного электронного газа необходимо также учитывать соответствующий размер неоднородностей на гетерогранице.

5. Корректировка величины встраиваемого на гетерограницу заряда до получения значения концентрации носителей в канале, соответствующей величине, полученной из решения совмещенной системы уравнений Шредингера-Пуассона.

6. Задание максимального (в нелегированном материале) значения подвижности в аналитической модели подвижности Фарахманда (Альбрехта).

7. Введение параметров для глубоких ловушечных уровней в объемном нитриде галлия. При использовании пассивирующего диэлектрика должны учитываться ловушки на границе диэлектрик/барьерный слой.

Показано, что включение в модель ловушек значительно ухудшает сходимость при решении системы уравнений с учетом лавинной генерации носителей заряда, используемой в расчётах пробивного напряжения. Решением указанной проблемы может являться применение граничных условий по току вместо условий по напряжению.

#### IV. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью проверки применимости описанных выше моделей и методики расчёта проводились измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик двух типов транзисторов, а именно: транзистора фирмы

Nitronex NPTB00004 [11] и транзистора, разработанного ФГУП "НПП "Пульсар", конструкция которого представлена на рис. 1. Исследования различных типов транзисторов и сопоставление расчётных и экспериментальных данных позволят расширить область применения разработанной методики, поскольку конструкции транзисторов, как показано далее, имеют ряд существенных отличий.

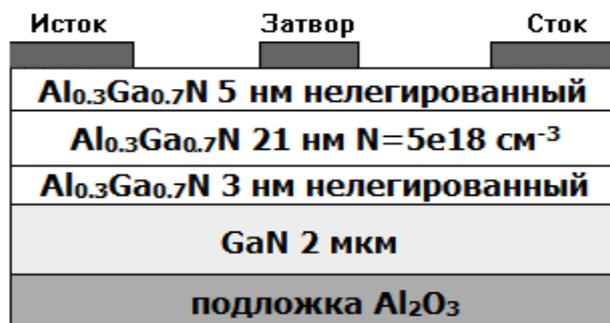


Рис. 1. Конструкция НЕМТ транзистора, разработанного ФГУП "НПП "Пульсар" (длина затвор  $L_z=0.5$  мкм, ширина затвора  $W_z=60$  мкм)

Конструкция транзистора NPTB00004, по сравнению с представленной на рис. 1, имеет следующие особенности:

- в качестве подложки используется высокоомный кремний ( $>10^4$  Ом·см);
- толщина верхнего GaN слоя = 2 нм;
- толщина барьерного слоя AlGaN = 3 нм;
- толщина легированного слоя AlGaN = 15 нм, концентрация примеси  $n=5e18$  см $^{-3}$ ;
- толщина спейсерного слоя AlGaN = 1 нм;
- толщина буферного слоя GaN = 800 нм;
- длина затвора  $L_z=0,5$  мкм.

Кроме того, данный транзистор имеет 3 затвора с единичной шириной 200 мкм.

Были выполнены следующие измерения:

- статических и емкостных характеристик диодов Шоттки сток-затвор и исток-затвор;
- статических параметров транзисторов;
- высокочастотных параметров транзисторов.

Измерения проводились на анализаторе полупроводниковых приборов Agilent B1500, анализаторе цепей Agilent E8362B, измерителе мощности Agilent U2000H.

## V. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлено сопоставление результатов расчётов и измерений обратной ветви ВАХ диодов Шоттки сток-затвор для транзистора ФГУП "НПП "Пульсар".

Расхождение результатов измерений и расчётов с использованием стандартного набора моделей для диодов Шоттки (рис. 2 кривые 1 и 2) показало необходимость доработки методики. Анализ литературных источников показал, что для диодов Шоттки на основе GaN наблюдается эффект туннелирования посредством фононов (PhAT) [12], [13].

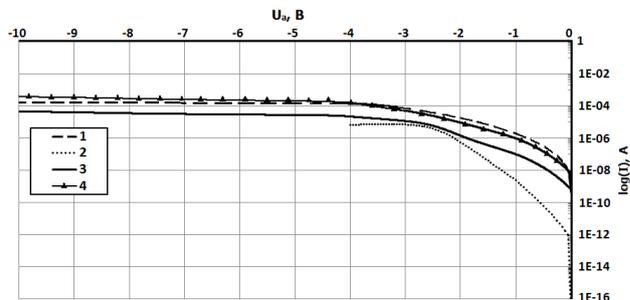


Рис. 2. Обратная ветвь ВАХ диода Шоттки сток-затвор для транзистора ФГУП "НПП "Пульсар" (1 - измерения, 2 - расчёт с использованием стандартного набора моделей, 3 и 4 - расчёты при использовании модели PhAT  $n=1e11$  см $^{-2}$  и  $n=1e12$  см $^{-2}$ , соответственно)

В САПР Silvaco TCAD [7] включена модель туннелирования посредством фононов, позволяющая описать ток с помощью процесса туннелирования с локальных уровней, расположенных в зоне проводимости вблизи границы металл-полупроводник. Для данной модели необходимо проводить калибровку, поскольку по умолчанию параметры локальных уровней на границе металл-полупроводник не указаны. Параметры модели были взяты из работы [12], плотность локальных уровней варьировалась в диапазоне  $1e10$ - $1e13$  см $^{-2}$ . На рис. 2 кривые, представленные под номерами 3 и 4, получены с учетом модели PhAT с плотностью уровней  $1e11$  и  $1e12$  см $^{-2}$ , соответственно. Видно, что результаты расчётов с использованием указанной модели с плотностью  $1e12$  см $^{-2}$  в наибольшей степени соответствуют результатам измерений.

Использование указанной модели также позволило увеличить сходимость результатов расчётов и измерений прямых вольт-амперных характеристик диодов Шоттки, а также характеристик для диодов Шоттки на основе транзистора NPTB00004.

На рис. 3 представлено сравнение результатов расчётов и измерений вольт-фарядных характеристик сток-затвор для транзистора NPTB00004.

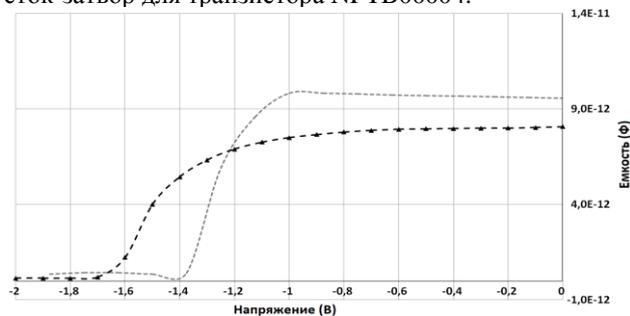


Рис. 3. Вольт-фарядные характеристики сток-затвор для транзистора NPTB00004 (серая пунктирная линия - измерения, черная линия с маркерами - моделирование)

Из анализа рис. 3 можно сделать ряд выводов: по результатам моделирования отсечка транзистора наступает при меньших значениях напряжения на затворе, что показывает неточность в определении материала затвора; меньшее значение емкости при нулевом напряжении на затворе при измерениях,

связано с тем, что измерения проводятся для прибора в корпусе.

Сопоставление результатов расчётов и измерений входных и выходных вольт-амперных характеристик исследуемых транзисторов представлено на рис. 4 и 5.

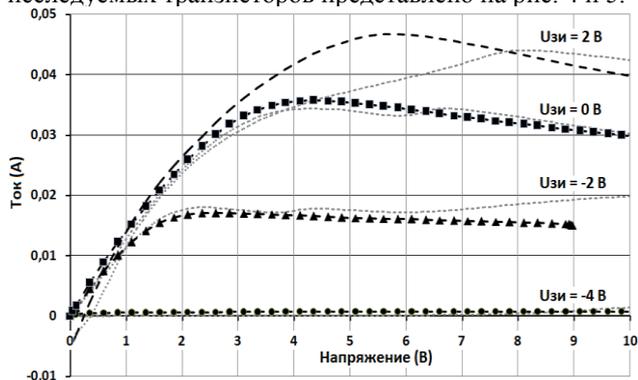


Рис. 4. Выходные вольт-амперные характеристики транзистора ФГУП "НПП "Пульсар" (серая пунктирная линия - результаты измерений, черная линия с маркерами - результаты моделирования)

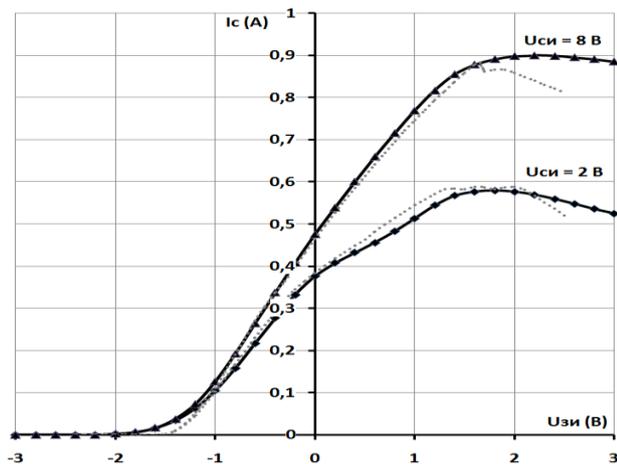


Рис. 5. Входные ВАХ транзистора NPTB00004 (серая пунктирная линия - измерения, черная линия с маркерами - моделирование)

Из сопоставления вольт-амперных характеристик стоит отметить:

- в области малых значений напряжения на затворе результаты расчётов соответствуют результатам измерений, что позволяет сделать вывод об адекватности описанных выше моделей (модели PhAT, параметры ловушек) для моделирования области отсечки;

- модель обеспечивает хорошее совпадение результатов в области напряжений на затворе, соответствующих максимальному значению крутизны;

- в области высоких напряжений на затворе наблюдается расхождение результатов расчётов и измерений, что может быть связано с некорректными значениями сопротивления стока и истока.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают - представленная методика позволяет с достаточной точностью моделировать характеристики приборов на основе гетероструктур AlGaIn/GaN с традиционной конструкцией эпитаксиальных слоев. В дальнейшем необходимо проводить исследования по оптимизации методики для расчёта гетероструктур AlGaIn/GaN более сложной конфигурации, а также с меньшей длиной затвора.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Katz A, Franco M. GaN comes of age // Microwave magazine, IEEE. 2010. V. 11. № 7. P. S24 – S34.
- [2] Mishra U.K., Parikh P., Yi-Feng Wu. AlGaIn/GaN HEMTs - An overview of device operation and applications // Proceeding of the IEEE. 2002. V. 90. № 6. P. 1022–1031.
- [3] G. Verzellesi G. Meneghesso A. Chini E. Zanoni C. Canali DC-to-RF dispersion effects in GaAs- and GaN-based heterostructure FETs: performance and reliability issues // Microelectronics Reliability. 2005. V. 45. № 9–11. P. 1585– 1592.
- [4] O. Ambacher et al. Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures // J. of Applied Physics. 1999. V. 85. № 6. P. 3222–3233.
- [5] Дорофеев А.А., Дроздов Д.Г., Савченко Е.М. Вопросы моделирования гетероструктур и транзисторов на основе нитрида галлия // Материалы научно-технической конференции: «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова. 2010. С. 194–196.
- [6] Sadeghi A.M., Arabshahi H. Influence of plasmon scattering on low field electron mobility in wurtzite and zincblend GaN // Optoelectronic and microelectronic materials and devices, 2006 Conference on. 2006. P. 148–151.
- [7] Silvaco International, ATLAS User's Manual. 2008.
- [8] Muth, J., et. al. Absorption coefficient, energy gap, exciton binding energy, and recombination lifetime of GaN obtained from transmission measurements // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. P. 2572–2574.
- [9] Walker, D., Zhang, X., Saxler, Z., Kung, P., Xj, J., Razeghi, M. AlxGa(1-x)N(0<=x<=1)ultraviolet photodetectors grown on sapphire by metal-organic chemical-vapor deposition // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70. № 8. P. 949–951.
- [10] Debdeep Jena, Ph.D. Dissertation. Polarization induced electron populations in III-V nitride semiconductors Transport, growth, and device applications // University of California, Santa Barbara. 2003.
- [11] NPTB00004 Datasheet // Nitronex corporation.
- [12] Pipinys P., Lapeika V. Analysis of reverse-bias leakage current mechanisms in metal/GaN Schottky diodes // Advances in Condensed Matter Physics. 2010.
- [13] Wei Lu, Lingquan Wang, Siyuan Gu, Aplin D.P.R., Estrada D.M., Yu P.K.L., Asbeck P.M. Analysis of reverse leakage current and breakdown voltage in GaN and InGaIn/GaN Schottky barriers // Electron Devices, IEEE Transactions on. 2011. V. 58. № 7. P. 1986–1994.