

УДК 621.383.52

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА AlGa<sub>n</sub> ГЕТЕРОПЕРЕХОДНОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

**Н. Н. Ворсин<sup>1</sup>, А. А. Гладыщук<sup>2</sup>, Т. Л. Кушнер<sup>3</sup>, Н. П. Тарасюк<sup>4</sup>, С. В. Чугунов<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> К. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры физики  
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vorsin@hotmail.com

<sup>2</sup> К. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры физики  
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: phys.gaa@tut.by

<sup>3</sup> К. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой физики  
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: kushnertl@mail.ru

<sup>4</sup> Старший преподаватель кафедры физики  
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ntarasiuk@tut.by

<sup>5</sup> Старший преподаватель кафедры физики  
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: chugunovsv@ya.ru

### Реферат

Тройное соединение AlGa<sub>n</sub> с шириной запрещенной зоны от 3,4 до 6,2 эВ является перспективным материалом для построения различных электронных приборов: диодов, транзисторов, лазеров, СВЧ-микросхем. Замена кремния на нитрид галлия позволяет в несколько раз повысить рабочую температуру, граничную частоту, уменьшить в несколько раз потери переключения и проводимости в силовых приборах. Необходимым элементом освоения новых электронных устройств является компьютерное моделирование в них физических процессов. В настоящей работе с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics разработана модель гетеропереходного полевого транзистора на основе Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, включающая его вольт-амперную характеристику и другие параметры.

**Ключевые слова:** гетеропереходный полевой транзистор, нитрид галлия, нитрид алюминия, диффузионно-дрейфовая модель, поляризация, вольт-амперная характеристика.

### SIMULATION AND DESIGN AlGa<sub>n</sub> HETEROJUNCTION FIELD-EFFECT TRANSISTOR

**N. N. Vorsin, A. A. Gladyschuk, T. L. Kushner, N. P. Tarasiuk, S. V. Chugunov**

### Abstract

AlGa<sub>n</sub> ternary alloys with a band gap of 3.4 to 6.2 eV are promising materials for the construction of various electronic devices: diodes, transistors, lasers, microwave circuits. Replacing silicon with GaN allows several times to increase the operating temperature, the cutoff frequency, and to reduce several times the switching and conduction losses in power devices. A necessary element in the development of new electronic devices is computer modeling of physical processes in them. In this work, a model of a heterojunction field-effect transistor (FET) based on Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N was developed using the COMSOL Multiphysics software, including its current-voltage characteristic and other parameters.

**Keywords:** heterojunction field-effect transistor, gallium nitride, aluminum nitride, diffusion-drift model, polarization, current-voltage characteristic.

### Введение

Гетеропереходные полевые транзисторы (далее ГПТ или в англоязычной литературе – HEMT) на основе нитрида галлия с высокой подвижностью электронов обладают хорошими характеристиками, которые обеспечиваются свойствами материала. Широкая запрещенная зона 3,4 эВ позволяет устройствам на основе GaN работать при высоких температурах. Полупроводник GaN имеет высокое значение поля пробоя 3,3 МВ/см, что является основой высоковольтных приборов на основе GaN [1, 2]. Гетеропереход на границе AlGa<sub>n</sub>/Ga<sub>n</sub> создает двумерный электронный газ (ДЭГ) достаточно высокой плотности (порядка 10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup>). Подвижность электронов, образующих ДЭГ, весьма высока. Благодаря этим качествам ГПТ на основе AlGa<sub>n</sub>/Ga<sub>n</sub> обладают низким сопротивлением канала, высокой плотностью тока в нем и высоким быстродействием.

Замена Si на Ga<sub>n</sub> в силовых приборах уменьшает потери проводимости и переключения в 2–6 раз. Сложные свойства системы материалов нитрида галлия должны быть хорошо поняты, чтобы в полной мере использовать преимущества этого полупроводника в устройствах. Моделирование на основе физики полупроводников помогает в этом, показывая количественную взаимосвязь между основными свойствами материала и поведением устройства. Оптимизация устройства в экспериментальной или производственной среде чрезвычайно дорога и затратна по времени, поэтому должна быть дополнена компьютерным моделированием.

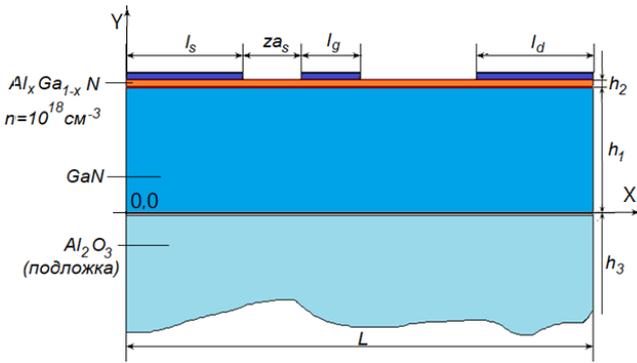
В настоящей работе описана созданная модель гетеропереходного полевого транзистора AlGa<sub>n</sub>/Ga<sub>n</sub> с простым плоским затвором,

наиболее подходящим для первых реализаций. Выбранные размеры транзистора позволяют использовать микронный техпроцесс.

### Модель гетеропереходного полевого транзистора AlGa<sub>n</sub>/Ga<sub>n</sub>

Структура моделируемого транзистора показана на рисунке 1. Она состоит из барьерного слоя AlGa<sub>n</sub> толщиной  $h_2$ , канального слоя Ga<sub>n</sub> толщиной  $h_1$ , который через промежуточный слой AlN опирается на подложку из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Толщина слоя Ga<sub>n</sub> должна быть сравнительно большой для уменьшения напряжений в верхней его части, обусловленных несогласованием в нижней части его решетки с решеткой подложки. Из-за разности ширины запрещенной зоны барьерного и канального слоев на границе их соприкосновения образуется двумерный слой электронного газа, выполняющий роль канала транзистора.

На рисунке этот слой обозначен темно-красной линией. Над каналом расположен металлический затвор Шоттки с достаточной работой выхода (предполагается Ni). Толщина канального слоя не легированного Ga<sub>n</sub>, обозначенная как  $h_1$ , варьировалась только на первом этапе работы с моделью. При этом выяснилось, что, если  $h_1 > 200$  нм, ее влияние на параметры транзистора становится пренебрежимо малыми. Поэтому в дальнейших расчетах использовалось значение  $h_1 = 400$  нм. Толщина подложки  $h_3$  в расчетах не использовалась. Надо заметить, что на практике от  $h_1$  зависит степень прорастания в вершину канального слоя дефектов, обусловленных несогласованием его кристаллической решетки с решеткой подложки, в моделировании эти дефекты не рассматривались.



**Рисунок 1** – Двумерная (X;Y) структура транзистора. Обозначены размеры – изменяемые при расчетах параметры. Толщина структуры в направлении оси Z равна 1 мкм

**Методология**

Модуль «Полупроводники» программного комплекса COMSOL Multiphysics базируется на диффузионно-дрейфовой модели процессов в полупроводниках, которая, видимо, справедлива для микронных и субмикронных размеров описываемых объемов. Данная модель выражается следующим набором уравнений.

Уравнение Пуассона дает связь между электрическим полем (E), концентрацией пространственного заряда (ρ) и электростатическим потенциалом (φ) [3].

$$\nabla^2 \varphi = -\nabla E = \rho / \varepsilon, \tag{1}$$

где ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость. Перенос носителей хорошо описывается дрейфово-диффузионной моделью, которая задается в виде уравнения для плотности тока:

$$J = qn\mu E + qD\nabla n, \tag{2}$$

- где μ – подвижность;
- q – величина заряда;
- n – концентрация зарядов;
- D – коэффициент диффузии.

Уравнение непрерывности используется для описания, зависящего от времени динамического поведения носителей зарядов.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - R + q\nabla J, \tag{3}$$

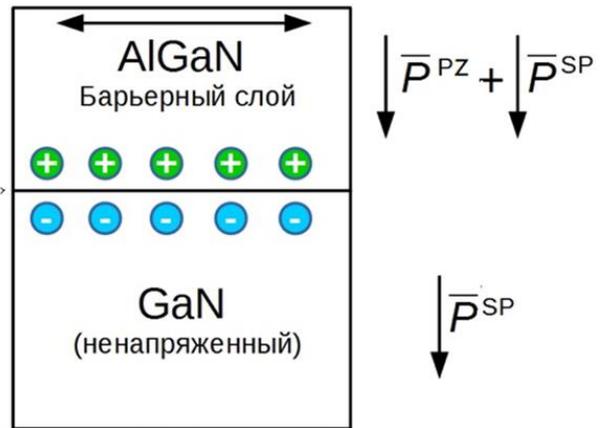
- где G – скорость генерации носителей;
- R – скорость рекомбинации соответственно.

Так как рассматривался стационарный режим работы, левая часть в уравнение (3) равна нулю.

**Поляризация материала.** Известно, что нитриды алюминия и галлия являются поляризованными материалами. При этом действуют два механизма поляризации: спонтанная, характеризуемая вектором  $\vec{P}^{SP}$  и пьезоэлектрическая, выражаемая вектором  $\vec{P}^{PZ}$ . На рисунке 2 показаны направления этих векторов. Эффекты поляризации играют важную роль в образовании ДЭГ и меры по их учету в модели являются ключевыми. Для этого использован имеющийся в COMSOL Multiphysics инструмент задания поверхностного заряда. В обоих слоях, образующих гетеропереход, действуют оба механизма поляризации. Но поскольку толщины слоев отличаются более чем в 20 раз, можно принять толстый слой GaN расслабленным, а слой AlGaN напряженным. Напряжение является растягивающим, при этом направления векторов спонтанной и пьезоэлектрической поляризации, как показано на рисунке 2, совпадают.

Модуль суммарного вектора поляризации, численно равный поверхностному заряду, определяется равенством

$$P = P_{AlGaN}^{SP} + P_{GaN}^{PZ} - P_{GaN}^{SP}. \tag{4}$$



**Рисунок 2** – Суммирование векторов поляризаций на гетеропереходе

Для векторов поляризаций в литературе имеются упрощенные формулы, выражающие их как функцию относительной доли алюминия в материале [4]. Подстановка данных формул в (4) дает используемое в модели выражение для величины поверхностного заряда, которая численно равна модулю вектора поляризации (измеряется в Кл/м²):

$$\sigma = [0,06095 \cdot x - 0,019 \cdot x \cdot (1 - x)]. \tag{5}$$

**Легирование слоев.** Барьерный слой Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N толщиной h<sub>2</sub> является источником свободных электронов для канала транзистора, поэтому он обильно легируется донорной примесью (Si) до концентрации n<sup>+</sup>=10<sup>18</sup>см<sup>-3</sup>. Канальный слой, имеющий толщину h<sub>1</sub>, должен быть максимально чистым (нелегированным), что диктуется требованием сохранения подвижности электронов. Однако чистый GaN имеет небольшую исходную электронную проводимость. Поэтому в расчетах он полагается легированным донорной примесью, дающей концентрация свободных электронов n=10<sup>15</sup>см<sup>-3</sup>.

**Металлические контакты.** Модуль «Полупроводники» комплекса COMSOL Multiphysics содержит мини-модели контактов металла с полупроводником, что избавляет от специального их моделирования. Используются два типа контактов: невыпрямляющие контакты – для истока и стока и контакт Шоттки – для затвора. Однако высота барьера Шоттки для гетероструктуры GaN/AlGaN с напряженным слоем AlGaN отличается от значений, измеренных для их соответствующих объемных (т. е. расслабленных) аналогов. Происходит снижение высоты барьера Шоттки за счет поляризационных эффектов в гетероструктурах GaN/AlGaN. Более того, обычная теория термоэлектронной эмиссии не может быть применена из-за сильной пьезоэлектрической поляризации в напряженном слое AlGaN. Высота барьера Шоттки для контакта Ni-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N уравнения модифицируется для гетероструктуры GaN/AlGaN по следующей формуле (выражается в эВ):

$$\varphi_B(Ni - Al_xGa_{1-x}N) = 0,917 + 1,784 \cdot x. \tag{6}$$

**Величина электронного сродства χ** – разность энергии нулевого уровня (вакуума) и дна зоны проводимости полупроводника. Данный параметр необходим для моделирования гетероперехода. Его значение для AlGaN зависит от доли алюминия и в модели определяется по эмпирической формуле [5] (выражается в эВ)

$$\chi = 4,1 - x. \tag{7}$$

**Квантовые эффекты.** Толщина слоя ДЭГ на гетеропереходе AlGaN/GaN сравнима или даже меньше длины волны де Бройля движущихся там электронов. Это обстоятельство требует учета квантовых эффектов в расчетах. COMSOL Multiphysics имеет для этого встроенные средства в виде подмодели системы уравнений Пуассона и Шредингера. В нашем случае движение электронов в канале транзистора может происходить только вдоль слоя ДЭГ. Поэтому результатом работы этой подмодели должна быть только величина концентрации электронов в ДЭГ, входящая в выражение (2). Квантование энергии движения в направлении, поперечном каналу, приводит к ее дискретизации и разделению зоны квантовой ямы

на счетное множество подзон. Обычно учитывается только вклад 2–3 нижних подзон. Вопрос влияния квантовых эффектов на концентрацию свободных электронов в ДЭГ исследовался отдельно.

На рисунке 3 показан типичный график зависимости концентрации свободных электронов от координаты по оси Y, направленной поперек гетероперехода. Синяя кривая относится к случаю пренебрежения эффектами квантования, красная – с учетом трех нижних подзон квантования. Видно, что учет квантовых эффектов приводит к уменьшению пика концентрации и расширению зоны ДЭГ.

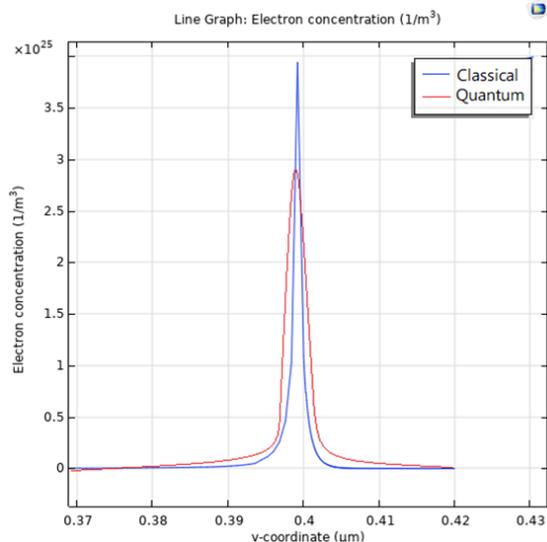


Рисунок 3 – Сравнение классической и квантовой концентрации свободных электронов в двумерном электронном газе

Думается, что этот результат – следствие погрешности расчета. Увеличение количества учитываемых подзон, вероятно, даст возрастание пика концентрации и сужением зоны ДЭГ. Однако проблемы сходимости совместного решения уравнений Пуассона и Шредингера препятствуют более точному рассмотрению. В то же время разность концентрации электронов ДЭГ, получаемых с учетом и без квантовых эффектов, оказывается небольшой и имеющей тенденцию к уменьшению с улучшением точности расчетов квантования. Из этого можно сделать вывод о том, что расчет параметров ГПТ без учета квантовых эффектов в слое ДЭГ будет вполне корректен.

**Поверхностные состояния.** Влияние поверхностных состояний на распределение заряда в структуре устройства может быть учтены с использованием соответствующей статистики распределения при расчете плотности заряда в уравнении Пуассона (путем включения поверхностных состояний через легированный слой). Поверхностные состояния обычно моделируются феноменологическим образом, на основе предположения о существовании их в виде акцептора и донора с определенной энергией ионизации. Возможно их ионизация на самом деле не следует предполагаемой ферми-статистике. В рассматриваемой модели мы пренебрегли особыми состояниями поверхности.

**Дискретизация по конечным объемам.** На поверхности раздела материалов гетероперехода имеется скачок их параметров. Разрыв может вызвать числовые проблемы, особенно для пространственной производной поляризации  $P_x$ . В нашем случае это может быть исправлено введением плавного изменения доли Al (y). Вместо этого можно использовать для дискретизации и решения уравнений метод конечных объемов, имеющийся в COMSOL Multiphysics, и выбрать прямоугольную форму сеточных элементов со стороны, параллельной границе раздела материалов.

### Результаты и их обсуждение

В ходе расчета COMSOL Multiphysics запоминает огромные таблицы результатов, из которых затем можно сформировать наглядные графики зависимости одних величин от других. Показанная на рисунке 1 двумерная модель ГПТ предполагает, что зависимость всех характеристик от третьей координаты Z отсутствует. Ширина транзистора по третьей координате принята 1 мкм.

Распределение плотности свободных электронов по оси Y в центре исследуемой структуры ( $x=2$  мкм) иллюстрирует образование

двумерного электронного газа. График данной зависимости показан на рисунке 4. Видно, что в очень узкой области, вблизи гетероперехода, концентрация свободных электронов возрастает до  $3,9 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . Это является свидетельством правильного отражения моделью физических процессов в рассматриваемой гетероструктуре.

Результаты моделирования при различных значениях доли алюминия (dol, %) в слое AlGaIn приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость концентрации электронов в двумерном электронном газе от мольной доли Al в барьерном слое

dol, %	17	21	22	23	26
n, $10^{25}, \text{ м}^{-3}$	0,50	2,75	3,10	3,90	7,10

Двумерная картина распределения электронной плотности при нулевых напряжениях стока и затвора приведена на рисунке 5. Из данной картины видно, что барьерный слой легирован донором до получения концентрации свободных электронов  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . По всей длине структуры (оси X) имеется область повышенной концентрации свободных электронов – узкая темно красная область, в которой концентрация электронов превышает величину  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Именно эта область содержит двумерный электронный газ.

В области расположения затвора имеется узкая область, помеченная синим цветом, соответствующим концентрации свободных электронов  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Таково действие контакта Шоттки. Существенная часть свободных электронов перешла из полупроводника в никелевый затвор, имеющий большую работу выхода из него электронов. Ближняя подзатворная область окрашена желтым цветом, соответствующим концентрации свободных электронов  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Однако проводящий канал, образованный ДЭГ, полностью не перекрыт: под слоем желтого цвета сохранился красный, в котором концентрация электронов около  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

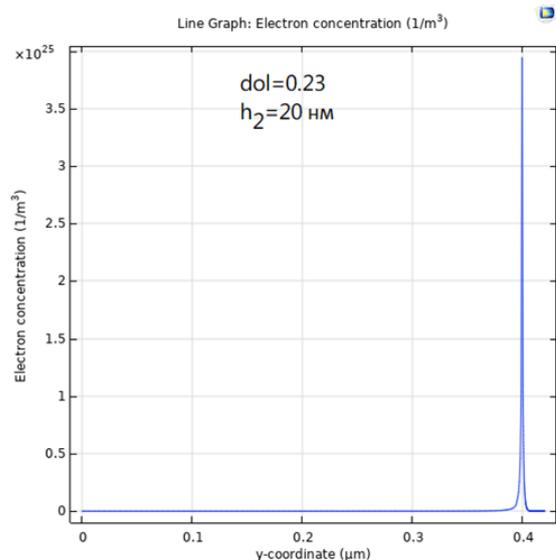


Рисунок 4 – Зависимость концентрации свободных электронов от вертикальной координаты при  $h_1 = 0,4 \text{ мкм}$ ,  $h_2 = 0,02 \text{ мкм}$ , доли Al в барьерном слое  $dol=0,23$

Картина распределения электронной плотности изменится после приложения к электродам транзистора напряжений стока и затвора. Рисунок 6 показывает результат подачи стокового напряжения 10 В. Вблизи правого края затвора, обращенного к стоку, произошло расширение обедненной до желтого цвета области, которая перекрыла канал транзистора. Однако концентрация электронов в этой области составляет порядка от  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  до  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , что соответствует заметной проводимости канала. При увеличении стокового напряжения эта область расширяется, вследствие чего стоковый ток почти не увеличивается. Наблюдается эффект насыщения стокового тока.

На рисунке 7 показана цветовая картина распределения электронной плотности при стоковом напряжении 15 В и подаче на затвор напряжения –2 В. Видно почти полное перекрытие канала в правой части подзатворной области. При этом ток канала и ток стокового электрода будет почти нулевым.

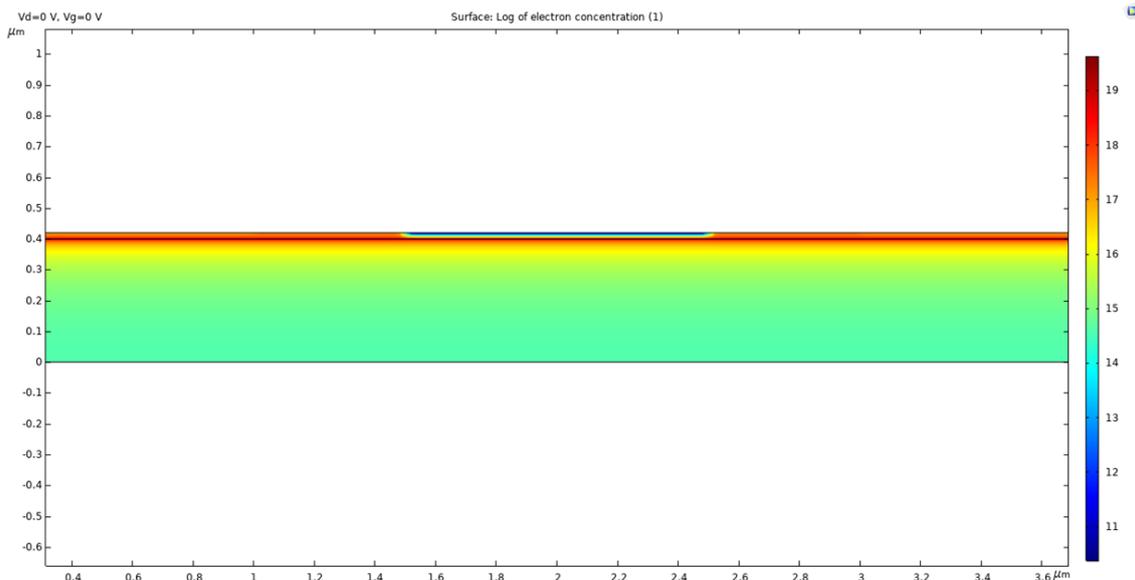


Рисунок 5 – Цветовая картина распределения концентрации свободных электронов по структуре гетеропереходного полевого транзистора при нулевых напряжениях смещения

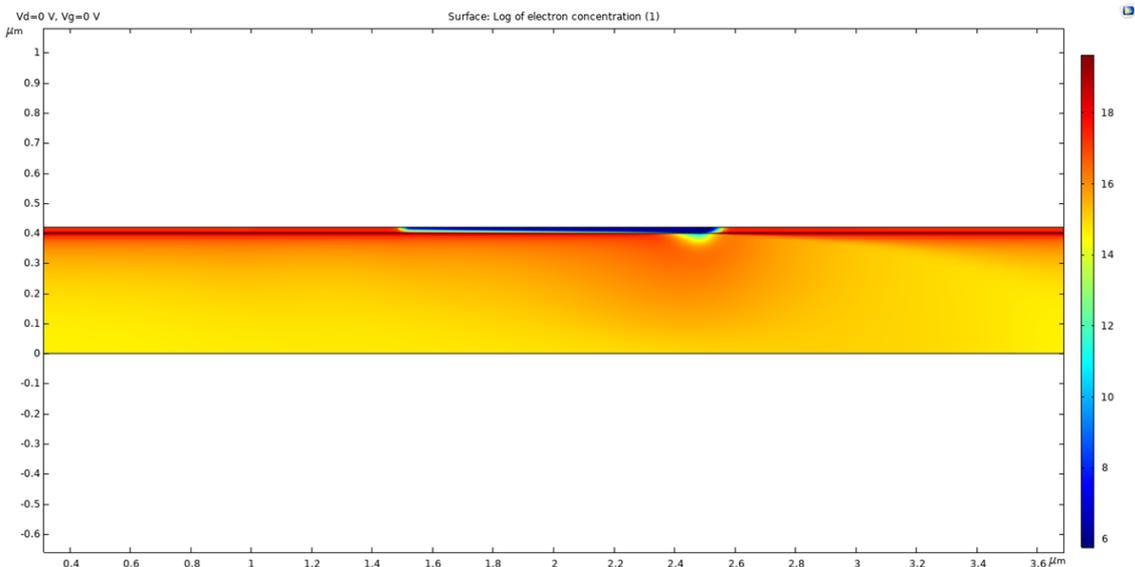


Рисунок 6 – Распределение электронной плотности при нулевом напряжении затвора и напряжении стока 10 В

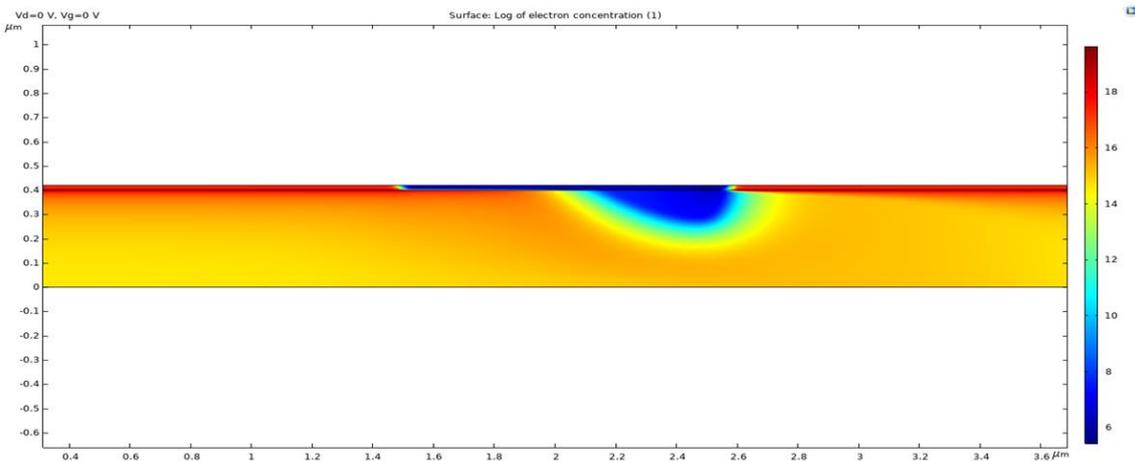


Рисунок 7 – Распределение электронной плотности при напряжении затвора -2 В и напряжении стока 15 В

Приведенные результаты расчетов свидетельствуют о работоспособности модели ГПТ и возможности получения из нее количественных характеристик транзистора, при варьировании его материалов и размеров.

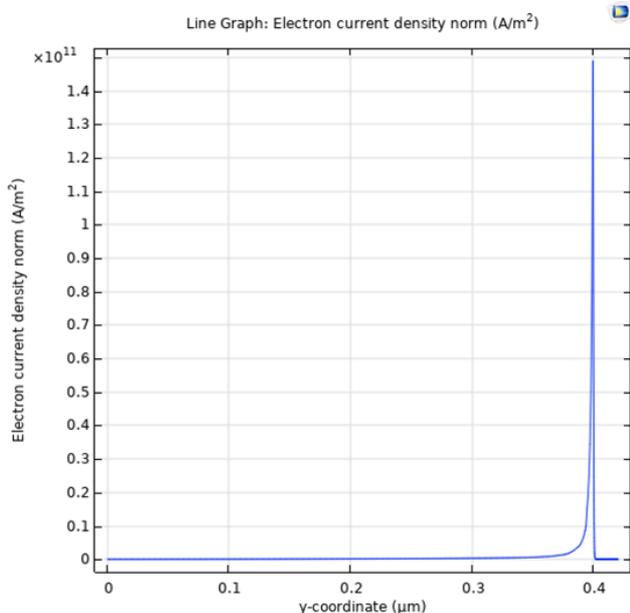


Рисунок 8 – График распределения плотности тока по высоте (оси Y) структуры транзистора

Возникает вопрос о распределении плотности тока по высоте структуры (по оси Y). На рисунке 8 показан соответствующий график, из которого видно, что весь ток сосредоточен в узкой области существования ДЭГ. Таким образом, построенная модель ГПТ правильно отражает физику процессов в нем и может быть использована для получения технических параметров транзистора.

Одним из таких параметров являются статические вольт-амперные характеристики (ВАХ), которые применяются в практике проектирования устройств, использующих транзисторы. ВАХ подразделяются на выходные, в которых выражается зависимость тока выходного электрода от напряжения на нем, входные и проходные. Последние выражают зависимость тока выходного электрода от напряжения (или тока) другого электрода. На рисунке 9 приведено семейство графиков выходных ВАХ (выходным электродом принят сток). Выходные ВАХ имеют типичную для транзисторов форму, которая характеризуется быстрым увеличением тока на начальном участке (малых напряжениях выходного электрода) и слабой зависимостью тока от напряжения при больших напряжениях на выходном электроде (область насыщения выходного тока). Построенная модель нитридного ГПТ дает ВАХ транзистора без дополнительных искусственных приемов и сшивок, используемых в [6]. Видимо, это приведет к большим затратам вычислительных ресурсов при работе модели, но и к более достоверным результатам.

Наличие графиков или таблиц ВАХ транзистора позволяет легко вычислить какой-либо малосигнальный параметр в заданной рабочей точке. Например, величина прямой проходной проводимости  $g_{21}$ , называемой крутизной проходной ВАХ, определенная по рисунку 9 в точке  $v_g = -1$  В – напряжение затвора,  $v_d = 10$  В – напряжение стока составляет  $g_{21} = 0,55$  мА/В. Столь скромная величина  $g_{21}$  не должна приводить к скептическим выводам. Дело в том, что рассматривается транзистор с толщиной по оси Z равной 1 мкм. При увеличении толщины, например, до 1 мм стоковый ток и крутизна проходной ВАХ увеличатся в 1000 раз.

На рисунке 10 показано семейство графиков проходных ВАХ. Управляющим электродом считается затвор.

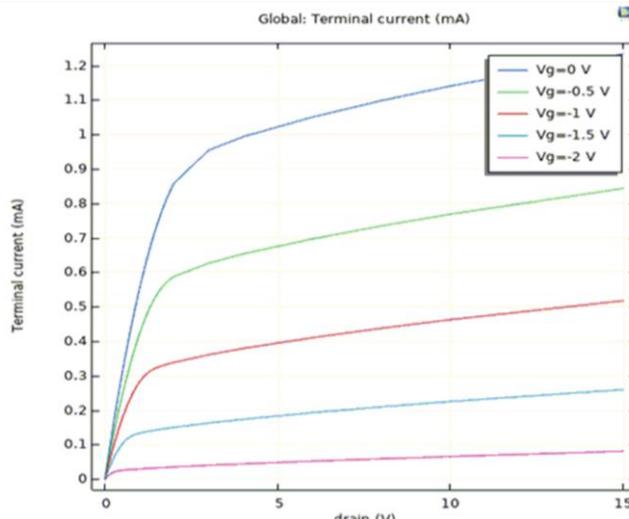


Рисунок 9 – Семейство выходных вольт-амперных характеристик моделируемого гетеропереходного полевого транзистора при  $h_2 = 0,02$  мкм,  $d_{01} = 0,22$

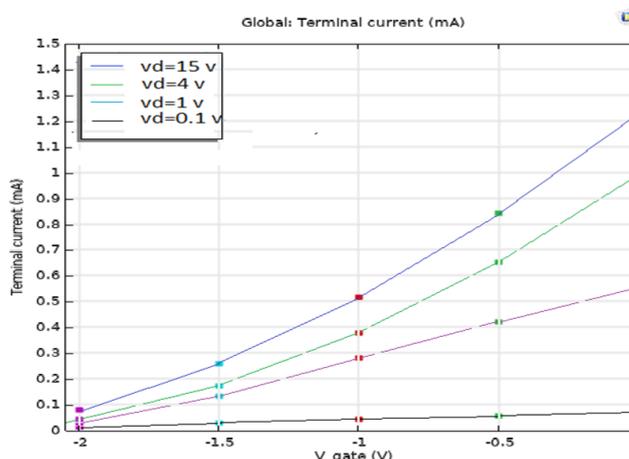


Рисунок 10 – Семейство проходных ВАХ моделируемого гетеропереходного полевого транзистора при  $h_2 = 0,02$  мкм,  $d_{01} = 0,22$

Полученная модель нитридного ГПТ позволяет оценивать его характеристики при различных геометрических параметрах структуры. В частности, представляют интерес влияние толщины барьерного слоя –  $h_2$ , длины затвора –  $l_g$  и положения затвора в пространстве между стоком и истоком –  $z_{as}$ .

Таблица 2 иллюстрирует влияние толщины барьерного слоя на концентрацию электронов в ДЭГ и величину прямой проходной проводимости транзистора. Рост концентрации ДЭГ с увеличением  $h_2$  и резкое уменьшение крутизны ВАХ вполне ожидаемы: удаление от слоя ДЭГ затвора уменьшает его влияние на концентрацию электронов и каналный ток. Однако модель позволяет получить количественные оценки этого влияния.

Таблица 2 – Влияние толщины барьерного слоя на максимальную концентрацию электронов ДЭГ и крутизну ВАХ

Толщина AlGaN $h_2$ , нм	Максимальная концентрация электронов, $10^{25}$ , $1/m^3$	$g_{21}$ , мА/В $V_g = -1$ В $V_d = 10$ В
18	3,8	0,75
20	3,9	0,55
22	4,1	0,41
30	4,3	0,18

В таблице 3 показано влияние длины затвора и его положения относительно истока на величину прямой проходной проводимости. Эти результаты нельзя назвать ожидаемыми. Из них следует, что,

уменьшая длину затвора, мы увеличиваем значения крутизны ВАХ в данной рабочей точке. С уменьшением длины затвора, конечно, будет уменьшаться время пролета под ним электронов и электроёмкость затвор-канал. И то, и другое способствуют улучшению частотных характеристик в СВЧ области. В данной работе частотные параметры ГПТ не рассматриваются.

Из таблицы 3 также видно, что смещение затвора к истоку несколько увеличивает крутизну ВАХ. Это обстоятельство нуждается в уточнении, но оно было замечено в [2], где моделировался ГПТ с Т-образным затвором.

**Таблица 3** – Влияние длины затвора и его положения на величину прямой проходной проводимости в точке  $V_g = -1$  В,  $V_d = 10$  В

Длина затвора, мкм	$g_{21}$ , мА/В
0,25 ( $z_{as}=0,5$ )	1,280
0,5 ( $z_{as}=0,5$ )	0,969
0,75 ( $z_{as}=0,5$ )	0,756
1,0 ( $z_{as}=0,5$ )	0,550
1,0 ( $z_{as}=0,25$ )	0,719
1,0 ( $z_{as}=0,75$ )	0,558

### Заключение

Созданная в COMSOL Multiphysics модель нитридного гетеропереходного полевого транзистора дает правдоподобные результаты и позволяет оптимизировать изготовление таких приборов по параметрам размеров и легирования областей. Мультифизичность среды COMSOL Multiphysics должна позволить получать на основе созданной модели электрические, тепловые и другие характеристики гетеропереходного полевого транзистора. В настоящей работе не затрагивается вопрос частотных параметров транзистора, поскольку не задаются необходимые для этого величины: скорость движения электронов под затвором, сопротивления контактов, статистика дефектов решетки канального слоя. По мере накопления данных об этих параметрах они могут вводиться в модель и давать соответствующие результаты.

### Список цитированных источников

1. Куэй, Р. Электроника на основе нитрида галлия: пер. с англ. / Р. Куэй; под ред. А. Г. Васильева. – Москва: Техносфера, 2011. – 592 с.
2. Zine-eddine, T. Design and analysis of 10 nm T-gate enhancement-mode MOS-HEMT for high power microwave applications / T. Zine-eddine, H. Zahra, M. Zitouni // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. – 2019. – Vol. 4, № 1. – P. 180–187.
3. Введение в физику полупроводников : пер. с англ. / под ред. В. Л. Бонч-Бруевича. – Москва : Изд-во иностранной литературы, 2011. – 430 с. : ил.
4. Исследование поляризации нитридных соединений (Al, Ga, AlGa)N и зарядовой плотности различных интерфейсов на их основе / И. А. Супрядкина [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Том 47, вып. 12. – С. 1647–1652.
5. Mizuno, I., Nihashi, T., Nagai, T., Development of UV image intensifier tube with GaN photocathode / I. Mizuno, T. Nihashi, T. Nagai, // Optics and Photonics in Global Homeland Security IV. – 2008. – Vol. 6945 IN.
6. ATLAS, 2D device simulator, SILVACO International, Santa Clara, User's Manual. – 2019.

### References

1. Kuej, R. Elektronika na osnovе nitridа galliya: per. s angl. / R. Kuej; pod red. A. G. Vasil'eva. – Moskva: Tekhnosfera, 2011. – 592 s.
2. Zine-eddine, T. Design and analysis of 10 nm T-gate enhancement-mode MOS-HEMT for high power microwave applications / T. Zine-eddine, H. Zahra, M. Zitouni // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. – 2019. – Vol. 4, № 1. – R. 180–187.
3. Vvedenie v fiziku poluprovodnikov : per. s angl. / pod red. V. L. Bonch-Bruevicha. – Moskva : Izd-vo inostrannoј literatury, 2011. – 430 s. : il.
4. Issledovanie polarizacij nitridnyh soedinenij (Al, Ga, AlGa)N i zaryadovoj plotnosti razlichnyh interfejsov na ih osnove / I. A. Supryadkina [i dr.] // Fizika i tekhnika polupro-vodnikov. – 2013. – Tom 47, vyp. 12. – S. 1647–1652.
5. Mizuno, I., Nihashi, T., Nagai, T., Development of UV image intensifier tube with GaN photocathode / I. Mizuno, T. Nihashi, T. Nagai, // Optics and Photonics in Global Homeland Security IV. – 2008. – Vol. 6945 IN.
6. ATLAS, 2D device simulator, SILVACO International, Santa Clara, User's Manual. – 2019.

Материал поступил 28.02.2023, одобрен 05.03.2023, принят к публикации 06.03.2023