

УДК 621.383.52

**Николай Николаевич Ворсин<sup>1</sup>, Анатолий Антонович Гладышук<sup>2</sup>,  
Татьяна Леонидовна Кушнер<sup>3</sup>, Евгений Викторович Луценко<sup>4</sup>,  
Геннадий Петрович Яблонский<sup>5</sup>**

<sup>1,2</sup> канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. физики

Брестского государственного технического университета

<sup>3</sup> канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф. физики

Брестского государственного технического университета

<sup>4</sup> канд. физ.-мат. наук, доц., зав. центром «Широкозонная нано- и микроэлектроника»  
Института физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси

<sup>5</sup> д-р физ.-мат. наук, проф., науч. руководитель центра

«Широкозонная нано- и микроэлектроника»

Института физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси

**Nikolai Vorsin<sup>1</sup>, Anatolii Gladyschuk<sup>2</sup>, Tatsiana Kushner<sup>3</sup>,**

**Evgenii Lutsenko<sup>4</sup>, Gennadii Yablonskii<sup>5</sup>**

<sup>1,2</sup> Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Physics of Brest State Technical University

<sup>3</sup> Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Physics of Brest State Technical University

<sup>4</sup> Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor,  
Head of Centre «Wide-band nano and micro-electronics» Stepanov Institute of Physics  
of National Academy of Sciences of Belarus

<sup>5</sup> Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,  
Scientific Supervisor of Centre «Wide-band Nano and Microelectronics»

of the Stepanov Institute of Physics

of National Academy of Sciences of Belarus

e-mail: <sup>1</sup>vorsin@gmail.com; <sup>2</sup>gaa.phys@tut.by; <sup>3</sup>phys@bstu.by;

<sup>4</sup>e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by; <sup>5</sup>g.yablonskii@ifanbel.bas-net.by

## МОДЕЛИРОВАНИЕ AlGaN ГЕТЕРОПЕРЕХОДНОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Тройное соединение AlGaN 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 GaN 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 физических процессов в них. В настоящей работе с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics разработана модель гетеропереходного полевого транзистора (ГПТ) на основе Alx\_Gax\_IN, включающая его ВАХ и другие параметры.

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

### Modeling AlGaN Heterojunction Field-Effect Transistor

AlGaN 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 Alx\_Gax\_IN was developed using the COMSOL Multiphysics software, including its CVC and other parameters.

**Key words:** Heterojunction field-effect transistor, gallium nitride, aluminum nitride, diffusion-drift model, electron density gradient method, polarization, current-voltage characteristic (volt-ampere characteristic).

### Введение

Гетеропереходные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (ГПТ, в англоязычной литературе – HEMT – High Electron Mobility Transistor) на основе нитрида галлия 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 напряженности поля пробоя 3,3 МВ/см, что является основой высоковольтных приборов на основе указанного соединения [1; 2]. Гетеропереход на границе AlGaIn/GaN создает двумерный электронный газ (далее – ДЭГ) высокой плотности порядка  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Также весьма высока подвижность электронов, образующих ДЭГ. Благодаря этим качествам ГПТ на основе AlGaIn/GaN обладают низким сопротивлением канала, высокой плотностью тока в нем и высоким быстродействием.

Замена кремния (Si) на GaN в силовых приборах уменьшает потери проводимости и переключения в 2–6 раз. Сложные свойства системы материалов на основе нитрида галлия должны быть хорошо поняты, чтобы в полной мере использовать в устройствах преимущества этого полупроводника. 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 ГПТ на основе AlGaIn/GaN с простым плоским затвором и размерами, наиболее подходящими для первых реализаций. Кроме того, выбранные размеры транзистора позволяют использовать хорошо освоенный микронный технологический процесс.

### Методика эксперимента

Структура моделируемого транзистора показана на рисунке 1. Она состоит из барьерного слоя AlGaIn толщиной  $h_2$ , канального слоя GaN толщиной  $h_1$ , который через промежуточный слой AlN опирается на подложку. Толщина слоя  $h_1$  должна быть сравнительно большой для уменьшения напряжений в верхней его части, обусловленных рассогласованием 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 1 этот слой обозначен темно-красной линией. Над каналом расположен металлический затвор Шоттки (предположительно, никелевый) с достаточной работой выхода.

Толщина канального слоя нелегированного GaN, 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 рассогласованием его кристаллической решетки с решеткой подложки, в расчетах эти дефекты не рассматривались. На рисунке 1 обозначены параметры, размеры которых использовались при расчетах. Толщина структуры в направлении оси Z принята равной 1 мкм.

Модуль «Полупроводники» программного обеспечения COMSOL Multiphysics базируется на диффузионно-дрейфовой модели процессов в полупроводниках, которая справедлива для микронных размеров описываемых объемов. Кроме того, имеется методика учета квантоворазмерных эффектов – метод градиента электронной плотности, которая позволяет учесть квантовые эффекты в субмикронных областях. В сово-

купности COMSOL Multiphysics является удобным инструментом моделирования полупроводниковых приборов микронных и субмикронных размеров. Рассматриваемая модель сформирована на основе определенных уравнений, представленных далее.

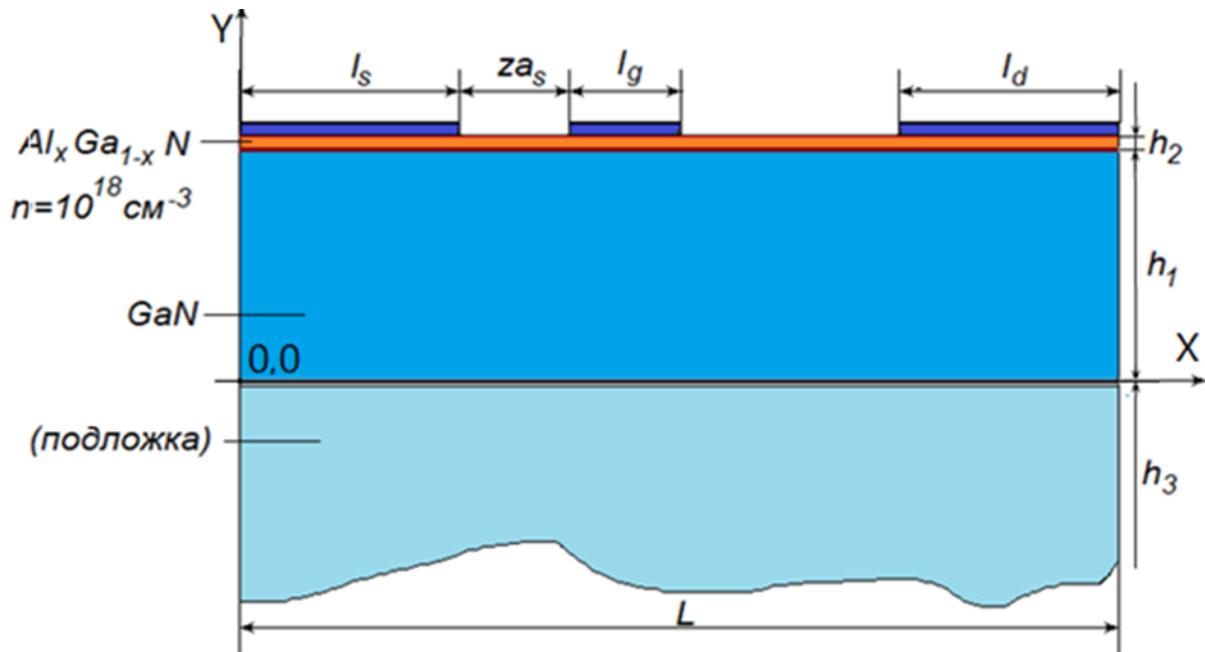


Рисунок 1 – Двумерная (X,Y) структура транзистора

Уравнение Пуассона дает связь между электрическим полем  $E$ , плотностью пространственного заряда  $\rho$  и электростатическим потенциалом  $\varphi$  [3].

$$\nabla^2 \cdot \varphi = -\nabla E = \rho/\epsilon, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость.

Плотность заряда  $\rho$  определяется вкладом концентраций дырок  $p$ , электронов  $n$ , ионизированных атомов донора  $N_d$  и ионизированных атомов акцептора  $N_a$  соответственно:

$$\rho = q(p + n + N_d - N_a). \quad (2)$$

Перенос носителей заряда описывается соотношениями, заданными в виде уравнений непрерывности тока:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dn}{dt} = \frac{-\nabla \cdot \vec{j}_n}{-q} - R_n + G_n \\ \frac{dp}{dt} = \frac{-\nabla \cdot \vec{j}_p}{+q} - R_p + G_p \end{array} \right. , \quad (3)$$

где  $t$  – время,  $j_n$  и  $j_p$  – плотности тока электронов и дырок соответственно,  $R_n$ ,  $G_n$ ,  $R_p$  и  $G_p$  – скорости рекомбинации и генерации электронов и дырок соответственно.

Плотности тока электронов  $j_n$  и дырок  $j_p$  выражаются в компактной форме через квазиуровни Ферми электронов и дырок  $E_{fn}$  и  $E_{fp}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} j_n = qn\mu_n \nabla E_{fn} + qn \left( (E_c - E_{fn})\mu_n + Q_n \right) \frac{\nabla T}{T} \\ j_p = -qp\mu_p \nabla E_{fp} - qp \left( (E_v - E_{fp})\mu_p + Q_p \right) \frac{\nabla T}{T}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок,  $E_c, E_v$  – дно зоны проводимости и потолок валентной зоны соответственно,  $Q_n, Q_p$  являются неравновесным вкладом электронов и дырок в коэффициент термодиффузии,  $T$  – абсолютная температура.

Дно зоны проводимости  $E_c$  и потолок валентной зоны  $E_v$ , в свою очередь, связаны с электрическим потенциалом  $\varphi$ , сродством к электрону  $\chi$  и шириной запрещенной зоны  $E_g$  следующими соотношениями:

$$E_c = -V - \chi \quad E_v = E_c - E_g. \quad (5)$$

Необходимо заметить, что в полупроводниковом модуле COMSOL Multiphysics все переменные уровней энергии ( $E_{fn}, E_{fp}, E_c, E_v, \chi, E_g$ ) масштабируются по элементарному заряду и выражаются в единицах электрического потенциала.

Как следует из системы уравнений (4), для вычисления плотностей токов необходимо иметь значения концентраций свободных носителей заряда. В теории дрейфа-диффузии концентрации свободных носителей  $n, p$  связаны с квазиуровнями Ферми  $E_{fn}, E_{fp}$  следующими соотношениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} n = N_c F_{1/2} \left( \frac{E_{fn} - E_c}{U_T} \right) \\ p = N_v F_{1/2} \left( \frac{-E_{fp} + E_v}{U_T} \right), \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $N_c, N_v$  – эффективная плотность состояний зоны проводимости и валентной зоны,  $F_{1/2}$  – интеграл Ферми – Дирака,  $U_T$  – температурный потенциал ( $U_T = \frac{k_B T}{q}$ ), здесь  $k_B$  – постоянная Больцмана. Таким образом, система уравнений (1–5) замыкается и позволяет вычислить плотности токов и токи всех электродов транзистора при заданной его геометрии и потенциалах электродов.

На степень точности такого расчета влияет то обстоятельство, что в нитридном ГПТ область вблизи перехода, содержащая свободные электроны, очень узкая. Совокупность находящихся в такой области свободных электронов, называемая двумерным электронным газом, при вычислении концентрации электронов в нем требует учета квантовых явлений. Наиболее экономной вычислительной процедурой этого учета в COMSOL Multiphysics является метод градиента электронной плотности, при котором в рассмотрение вводятся так называемые квантовые потенциалы для электронов  $V_n$  и дырок  $V_p$ , изменяющие систему уравнений (6). С учетом введенных параметров система примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} n = N_c F_{1/2} \left( \frac{E_{fn} - E_c + V_n}{U_T} \right) \\ p = N_v F_{1/2} \left( \frac{-E_{fp} + E_v + V_p}{U_T} \right). \end{array} \right. \quad (7)$$

Расчет квантовых потенциалов выполняется COMSOL Multiphysics в виде линейной процедуры, не требующей циклических итераций, что и обеспечивает экономию вычислений, в сравнении с поиском самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шредингера.

В процессе моделирования были учтены процессы поляризации. Известно, что нитриды алюминия и галлия являются поляризованными материалами. При этом действуют два механизма поляризации: спонтанная, характеризуемая вектором  $P_{sp}$ , и пьезоэлектрическая, выражаемая вектором  $P_{pz}$ .

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 «ненапряженным», а слой AlGaN – «напряженным».

Это напряжение является растягивающим, при котором направление векторов спонтанной и пьезоэлектрической поляризации совпадают, как показано на рисунке 2. Модуль суммарного вектора поляризации, численно равный поверхностному заряду, определится равенством

$$P = P_{AlGaN}^{sp} + P_{GaN}^{pz} - P_{GaN}^{sp}. \quad (8)$$

Для векторов поляризации, согласно [4,] имеются упрощенные формулы, выражающие их как функцию относительной доли алюминия в материале.

Подстановка данных формул в (8) дает используемое в модели выражение для величины поверхностного заряда, которая численно равна модулю вектора поляризации:

$$\sigma = [0.06095 \cdot x - 0.019 \cdot x \cdot (1 - x)]. \quad (9)$$

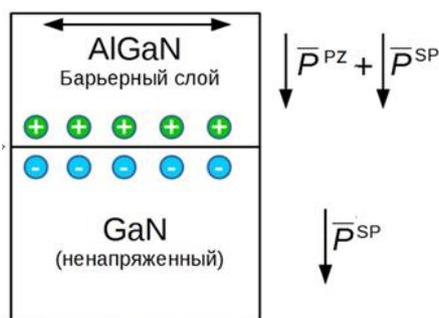


Рисунок 2 – Суммирование векторов поляризации на гетеропереходе

Легирование слоев учтено следующим образом. Барьерный слой  $Al_xGa_{1-x}N$  толщиной  $h_2$  является источником свободных электронов для канала транзистора, поэтому он легируется донорной примесью кремния до концентрации  $n_+ = 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Канальный слой, имеющий толщину  $h_1$ , должен быть максимально чистым, что диктуется требованием сохранения подвижности электронов.

Этот слой полагается нелегированным. Однако чистый GaN имеет небольшую исходную электронную проводимость, поэтому в расчетах он полагается легированным донорной примесью, дающей концентрацию свободных электронов  $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Модуль «Полупроводники» программного обеспечения COMSOL Multiphysics содержит мини-модели контактов металла с полупроводником, что избавляет от специального их моделирования.

Использованы два типа контактов: невыпрямляющие контакты для истока и стока и контакт Шоттки – для затвора.

Однако высота барьера Шоттки для гетероструктуры AlGaIn/GaN с «напряженным» слоем AlGaIn отличается от значений, измеренных для их соответствующих объемных «ненапряженных» аналогов.

В гетероструктурах AlGaIn/GaN происходит снижение высоты барьера Шоттки за счет поляризационных эффектов.

Более того, обычная теория термоэлектронной эмиссии не может быть применена из-за сильной пьезоэлектрической поляризации в напряженном слое AlGaIn.

Высота барьера Шоттки для контакта Ni-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, выражаемая в электрон-вольтах, вычисляется для гетероструктуры AlGaIn/GaN по следующей формуле:

$$\varphi_B(Ni-Al_xGa_{1-x}N) = 0,917 + 1,784 \cdot x. \quad (10)$$

Для моделирования рассматриваемого гетероперехода должна быть задана величина электронного сродства  $\chi$  – разность энергии нулевого уровня (вакуума) и дна зоны проводимости полупроводника.

Его значение для AlGaIn зависит от доли алюминия и в модели определяется в электрон-вольтах по эмпирической формуле, приведенной в [5]:

$$\chi = (4,1 - x). \quad (11)$$

Толщина слоя ДЭГ на гетеропереходе AlGaIn/GaN сравнима или даже меньше длины волны де Бройля электронов, формирующих ДЭГ. Как уже отмечалось, это обстоятельство требует учета квантовых эффектов в расчетах.

COMSOL Multiphysics имеет для этого два встроенных средства. Первое из них – подмодель системы уравнений Пуассона и Шредингера, второе – метод градиента электронной плотности.

В нашем случае движение электронов в канале транзистора может происходить только вдоль слоя ДЭГ. Поэтому результатом работы этих подмоделей должна быть только величина концентрации электронов в ДЭГ, входящая в уравнения (3) – (5).

Согласно первой подмодели, квантование энергии движения в направлении, поперечном каналу, приводит к ее дискретизации и разделению зоны квантовой ямы на счетное множество подзон.

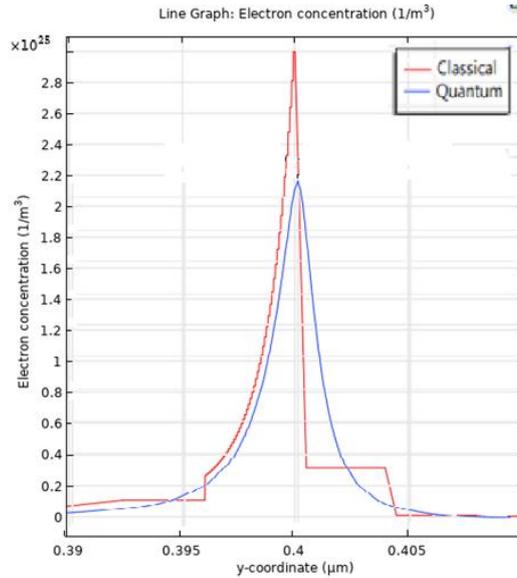
Обычно учитывается только вклад 2–3 нижних подзон.

Механизм первой подмодели можно применить отдельно, определив концентрацию электронов в ДЭГ, например, для нулевых напряжений на электродах транзистора. Затем полученное осредненное значение концентрации подставляется в уравнения для ВАХ.

Второй инструмент – метод градиента электронной концентрации – значительно более экономный по требуемым вычислительным ресурсам и легко встраивается в единую программу вычисления характеристик транзистора.

На рисунке 3 показан график зависимости концентрации свободных электронов от координаты по оси Y в модели центральной части затвора.

Более высокая кривая относится к случаю пренебрежения эффектами квантования, более низкая – получена по методу градиента плотности.



**Рисунок 3 – Зависимости концентрации свободных электронов от координаты по оси Y в центральной части затвора**

Видно, что учет квантовых эффектов приводят к уменьшению пика концентрации и расширению зоны ДЭГ на барьерный слой. Однако на величину канального тока это не окажет влияния, поскольку подвижность электронов в барьерном слое более чем на порядок хуже, чем в канальном. В то же время разность концентрации электронов ДЭГ, получаемых без и с учетом квантовых эффектов оказывается небольшой и имеющей тенденцию к уменьшению с улучшением точности расчетов квантования. Из этого можно сделать вывод, что расчет параметров ГПТ может проводиться даже без учета квантовых эффектов в слое ДЭГ.

Модель подвижности имеет большое значение при расчетах характеристик транзистора, оказывая влияние не только на динамические, но и на статические параметры. Нами использована модель подвижности Коги – Томаса, которая отражает насыщение скорости носителей заряда под действием электрического поля простой формулой для подвижности носителей. Данная формула содержит всего два параметра: низкополевая подвижность –  $\mu_{lf}$  и скорость насыщения –  $v_{sat}$ . Формула для динамической подвижности имеет следующий вид:

$$\mu_d = \frac{\mu_{lf}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu_{lf} E_{\leftrightarrow}}{v_{sat}}\right)^2}} \quad (12)$$

Символом  $E_{\leftrightarrow}$  обозначена компонента вектора напряженности электрического поля, параллельная скорости носителей. Модель Коги – Томаса также учитывает рассеяние носителей поверхностью канала. Если обозначить объемную подвижность материала как  $\mu_{ss}$ , то приповерхностная подвижность определится формулой:

$$\mu_s = \frac{\mu_{ss}}{\left(\frac{E_y}{E_{ss}}\right)^4}, \quad (13)$$

где  $E_y$  – перпендикулярная каналу компонента напряженности поля,  $E_{ss}$  – общая напряженность поля в области канала. Таким образом, в знаменателе формулы (13) стоит косинус наклона вектора напряженности к нормали поверхности в четвертой степени.

Полная подвижность, как обычно, определится следующей формулой:

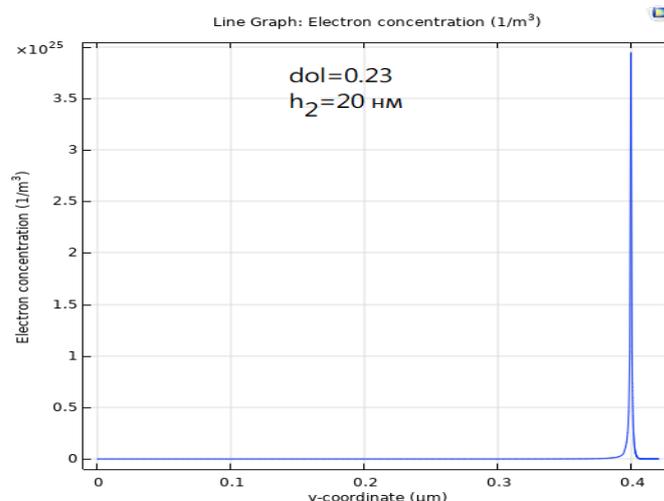
$$\mu = \frac{\mu_d \mu_s}{\mu_d + \mu_s}. \quad (14)$$

**Поверхностные состояния.** Влияние поверхностных состояний на распределение заряда в структуре устройства может быть учтено 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.

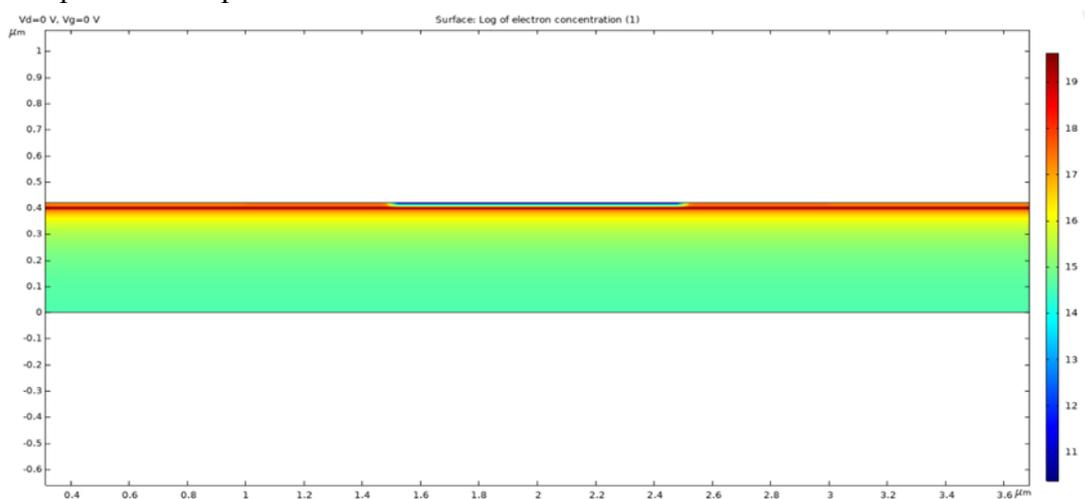
### Результаты и их обсуждение

В ходе расчета COMSOL Multiphysics содержит огромные массивы результатов моделирования, 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 принималась равной 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 гетероструктуре.



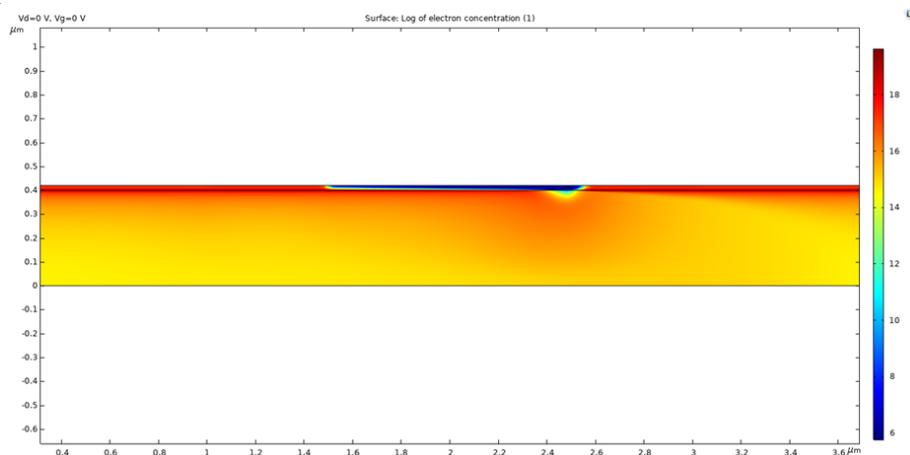
**Рисунок 4 – Зависимость плотности электронного газа от вертикальной координаты при  $h_1 = 0,4$  мкм,  $h_2 = 0,02$  мкм, доли Al в барьерном слое  $dol = 0,23$**

Двумерная картина распределения электронной плотности при нулевых напряжениях стока и затвора приведена на рисунке 5. Из данного распределения 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, соответствующая 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 слой, в котором концентрация электронов имеет значение около  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ .



**Рисунок 5 – Цветовая картина распределения концентрации свободных электронов по структуре ГПТ при нулевых напряжениях смещения**

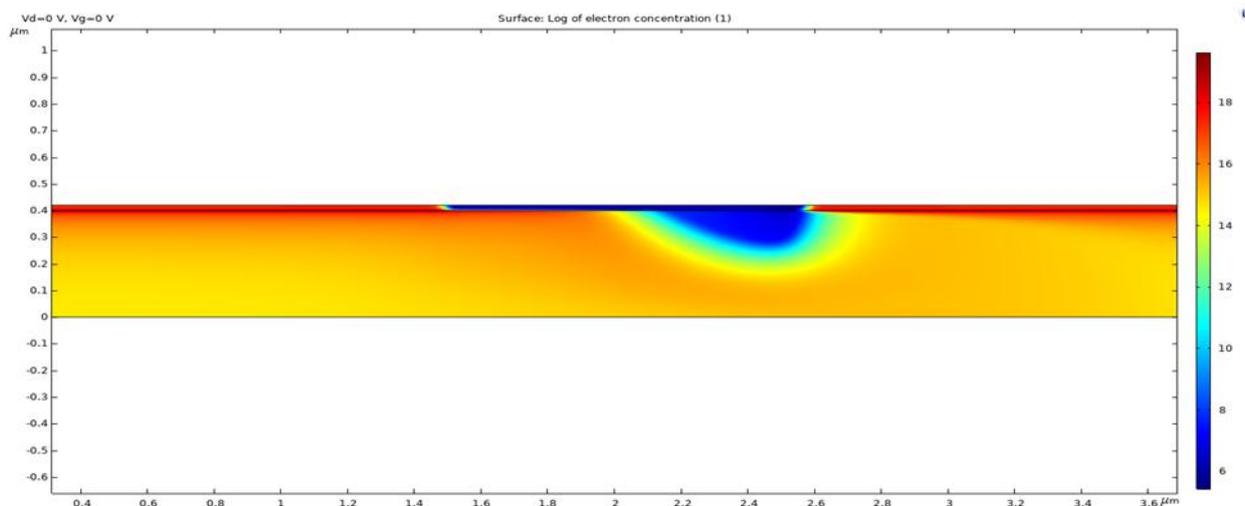
Картина распределения электронной плотности изменится после приложения к электродам транзистора напряжений стока и затвора. Рисунок 6 показывает результат подачи стокового напряжения 10 В. Вблизи правого края затвора, обращенного к стоку, произошло расширение обедненной до желтого цвета области, которая перекрыла канал транзистора.



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

Однако концентрация электронов в этой области составляет  $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , что соответствует заметной проводимости канала. При увеличении стокового напряжения эта область расширяется, вследствие чего стоковый ток почти не увеличивается. Это объясняется эффектом насыщения стокового тока.

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



**Рисунок 7 – Распределение электронной плотности при напряжении затвора  $-2 \text{ В}$  и напряжении стока  $15 \text{ В}$**

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

Возникает вопрос о распределении плотности тока по высоте структуры (по оси  $Y$ ). На рисунке 8 показан соответствующий график распределения плотности тока по высоте структуры транзистора, 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 или обнаружения зависимостей между параметрами.

Одними из таких зависимостей являются статические вольт-амперные характеристики (ВАХ), которые применяются в практике проектирования устройств, использующих транзисторы. Все 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 (при малых напряжениях выходного электрода) и слабой зависимостью тока от напряжения при больших напряжениях на выходном электроде (в области насыщения выходного тока). Почти горизонтальный ход кривых зависимости тока от напряжения в области насыщения дополнительно обусловлен выбранной моделью подвижности, при которой увеличение стокового напряжения приводит к увеличению напряженности электрического поля в канале и уменьшению в нем подвижности электронов.

Построенная модель нитридного ГПТ дает ВАХ транзистора без дополнительных искусственных приемов и сшивок, используемых в других системах моделирования, например Silvaco [6]. Видимо, это приводит не только к большим затратам вычислительных ресурсов при работе модели, но и к более достоверным результатам.

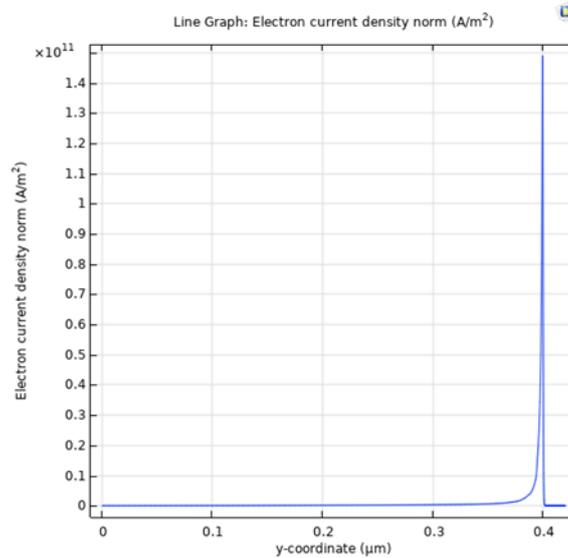


Рисунок 8 – График распределения плотности тока по глубине (оси Y) структуры транзистора

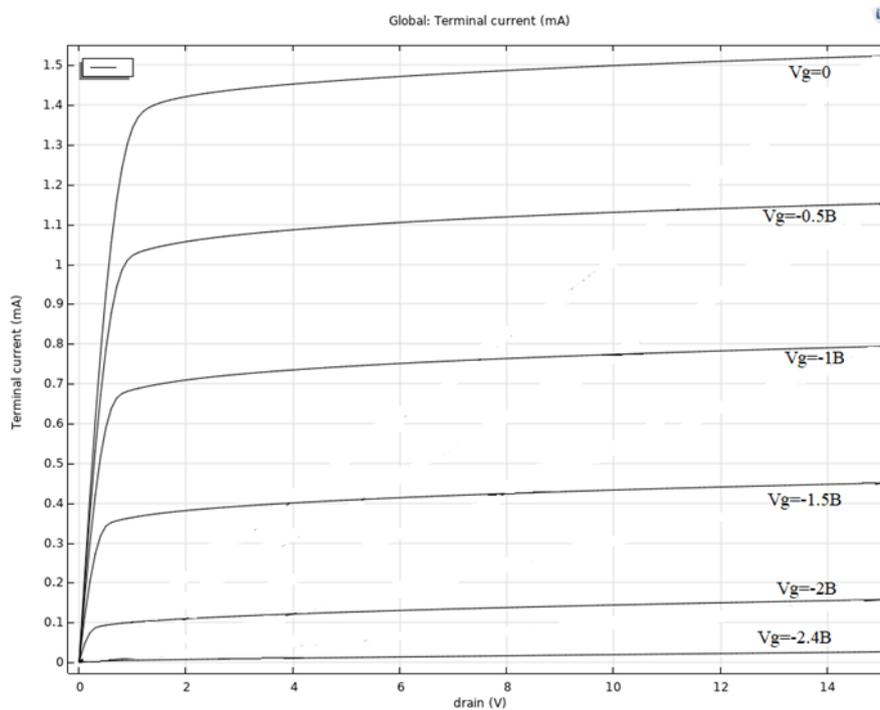


Рисунок 9 – Семейство выходных ВАХ моделируемого гетеропереходного транзистора при  $h_2 = 0,02$  мкм, доле алюминия  $d_{01} = 0,22$

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, опреде-

ленная 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 1 000 раз.

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

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 –  $z_{as}$ , других факторов.

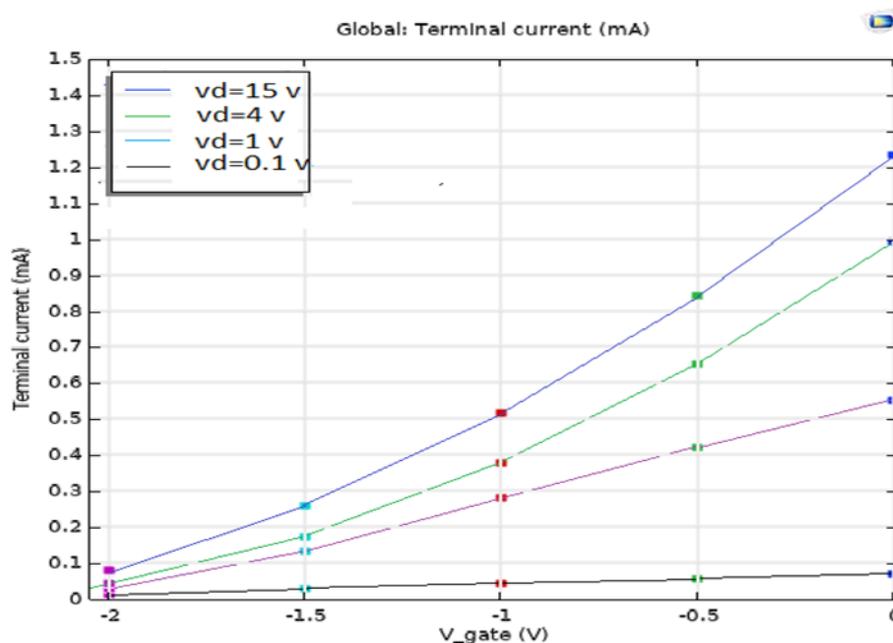


Рисунок 10 – Семейство проходных ВАХ моделируемого гетеропереходного транзистора при  $h_2 = 0,02$  мкм, доле алюминия  $doi = 0,22$

### Заключение

Созданная в COMSOL Multiphysics модель нитридного ГПТ дает правдоподобные результаты и позволяет оптимизировать изготовление таких приборов по параметрам размеров и степени легирования областей. Мультифизичность среды COMSOL Multiphysics должна позволить получать на основе созданной модели электрические, тепловые и другие характеристики ГПТ. 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 ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Куэй, Р. Электроника на основе нитрида галлия : пер. с англ. / Р. Куэй ; под ред. А. Г. Васильева. – М. : Техносфера, 2011. – 592 с.

2. Zine-eddine, T. Design and analysis of 10 nm T-gateenhancement-mode MOS-HEMT for high power microwave applications. / T. Zine-eddine, H. Zahra, M. Zitouni // J. of Sci.: Adv. Mater. Devices. – 2019. – Nr 4. – P. 180–187.

3. Данлэп, У. Введение в физику полупроводников : пер. с англ. / У. Данлэп ; под ред. В. Л. Бонч-Бруевича. – М. : Изд-во иностр. лит., 2011. – 430 с.

4. Исследование поляризаций нитридных соединений (Al,Ga,AlGa)N и зарядовой плотности различных интерфейсов на их основе / И.А. Супрядкина [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, вып. 12. – С. 1647–1652.

5. Development of UV image intensifier tube with GaN photocathode / I. Mizuno [et al.] // Proc. of SPIE. Optics and Photonics in Global Homeland Security IV. – 2008. – Vol. 69451N.

6. SILVACO International ATLAS : User's Manual. Simulation of an SEU Event in 2D. Copyright 2019 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://dokumen.tips/documents/atlas-users-manual.html?page=1>. – Date of access: 06.10.2024.

#### REFERENCES

1. Kuej, R. Eliktronika na osnovie nitrida gallija : pier. s angl. / R. Kuej ; pod ried. A. G. Vasil'jeva. – М. : Tiekhnosfiera, 2011. – 592 s.

2. Zine-eddine, T. Design and analysis of 10 nm T-gateenhancement-mode MOS-HEMT for high power microwave applications. / T. Zine-eddine, H. Zahra, M. Zitouni // J. of Sci.: Adv. Mater. Devices. – 2019. – Nr 4. – P. 180–187.

3. Danlep, U. Vviedienije v fiziku poluprovodnikov : pier. s angl. / U. Danlep ; pod ried. V. L. Bonch-Brujevicha. – М. : Izd-vo inostr. lit., 2011. – 430 с.

4. Issliedovanije poliarizacij nitridnikh sojedinenij (Al,Ga,AlGa)N i zariadovoj plotnosti razlichnykh interfejsov na ikh osnovie / I. A. Supriadkina [i dr.] // Fizika i tiekhnika poluprovodnikov. – 2013. – Т. 47, vyp. 12. – S. 1647–1652.

5. Development of UV image intensifier tube with GaN photocathode / I. Mizuno [et al.] // Proc. of SPIE. Optics and Photonics in Global Homeland Security IV. – 2008. – Vol. 69451N.

6. SILVACO International ATLAS : User's Manual. Simulation of an SEU Event in 2D. Copyright 2019 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://dokumen.tips/documents/atlas-users-manual.html?page=1>. – Date of access: 06.10.2024.

*Рукапіс наступіў у рэдакцыю 18.10.2024*