

**Николай Николаевич Ворсин¹, Анатолий Антонович Гладышук²,
Татьяна Леонидовна Кушнер³, Евгений Викторович Луценко⁴**

^{1,2}канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. физики

Брестского государственного технического университета

³канд. физ.-мат. наук, доц., зав. каф. физики

Брестского государственного технического университета

⁴канд. физ.-мат. наук, доц., зав. центром «Широкозонная нано- и микроэлектроника»

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

Nikolai Vorsin¹, Anatolii Gladyschuk², Tatsiana Kushner³, Evgenii Lutsenko⁴

^{1,2}Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Physics of Brest State Technical University

³Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,

Head of the Department of Physics of Brest State Technical University

⁴Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,

Head of Centre «Wide-band nano and micro-electronics» B. I. Stepanov Institute of Physics

of National Academy of Sciences of Belarus

e-mail: ¹vorsin@gmail.com; ²gaa.phys@tut.by; ³phys@bstu.by; ⁴e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИСХОДНО ЗАКРЫТОГО ALGAN ГЕТЕРОПЕРЕХОДНОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Нитрид галлия (GaN) обладает многими превосходными физическими свойствами: широкую запрещенную зону 3,4 эВ, большим критическим полем пробоя 3,3 МВ/см, высокую скорость насыщения для электронов $2,5 \cdot 10^7$ см/с и хорошую теплопроводность до 1,5 Вт/(смК). Благодаря этим свойствам устройства на основе GaN являются весьма перспективными для широкого применения в полупроводниковых приборах включая высокоскоростную и мощную электронику. В работе с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics разработана модель исходно закрытого гетеропереходного полевого транзистора (ГПТ) на основе AlxGax-1N, включающая его вольтамперную характеристику (ВАХ) и другие параметры.

Ключевые слова: Гетеропереходный полевой транзистор (ГПТ), нитрид галлия (GaN), нитрид алюминия (AlN), диффузионно-дрейфовая модель, метод градиента электронной плотности, поляризация, исходно закрытый транзистор, вольтамперная характеристика (ВАХ), исходно закрытый транзистор.

Modeling and Investigation of the Initially Closed ALGAN Heterojunction Field-Effect Transistor

Gallium nitride (GaN) has many excellent physical properties: a wide band gap of 3,4 eV, a large critical breakdown field of 3,3 MV/cm, a high saturation velocity for electrons of $2,5 \cdot 10^7$ cm/s, and good thermal conductivity of up to 1,5 W/(cmK). These properties make GaN-based devices very promising for a wide range of applications in semiconductor devices, including high-speed and high-power electronics. In this work, using the COMSOL Multiphysics software, a model of an initially closed heterojunction field-effect transistor (HJFET) based on AlxGax-1N was developed, including its current-voltage characteristic (CVC) and other parameters.

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

Введение

Будучи полупроводником с широкой запрещенной зоной, нитрид галлия (GaN) обладает высоким напряжением пробоя и высокой проводимостью двумерного электронного газа (ДЭГ) на гетеропереходе [1]. Хотя есть примеры привычного построения GaN транзисторов с изолированным затвором [2], весьма заманчивым является использование высокой проводимости ДЭГ для формирования канала транзистора. Действительно, первые образцы подобных транзисторов в сравнении с кремниевыми

позволили уменьшить все виды потерь, увеличить частоту работы преобразователей, улучшить теплоотдачу за счет более высокой рабочей температуры.

Единственное неудобство применения силовых гетеропереходных полевых транзисторов (ГПТ) состоит в том, что они являются исходно открытыми приборами, т. е. при нулевом напряжении на затворе транзистор открыт для стокового тока. Это качество не является непреодолимым препятствием для построения силовых преобразователей, но создает неудобство в построении их схемы и конструкции. В свое время такая ситуация стала препятствием для распространения мощных транзисторов со статической индукцией (СИТ) в построении на них силовых преобразователей.

В работе на основе построенной модели исследуется исходно закрытый ГПТ с затвором в виде р-п-перехода, (т. н. р-затвор). Данный тип транзистора является весьма подходящим для практического использования.

Структура моделируемого ГПТ

Форма и размеры структуры ГПТ с р-затвором показана на рисунке 1. Она состоит из барьерного слоя AlGaN толщиной h_2 , канального слоя GaN толщиной h_1 , который через промежуточный слой AlN опирается на подложку. Толщина слоя GaN – 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 слой двумерного электронного газа (ДЭГ), выполняющий роль канала транзистора. На рисунке 1 этот слой обозначен темнокрасной линией. Над барьерным слоем расположен р-затвор – это сильно легированный акцептором слой GaN, который образует с барьерным слоем р-п-переход.

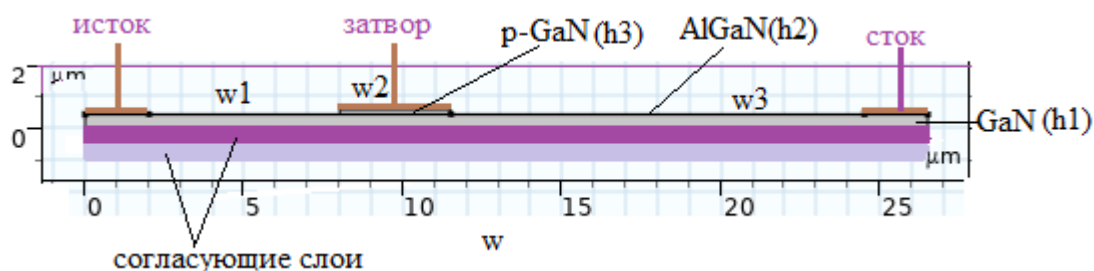


Рисунок 1 – Структура и геометрические параметры модели ГПТ

Толщины слоев h и длины компонент w , а также концентрации примесей и доля алюминия в барьерном слое являются варьируемыми параметрами, которые могут изменяться перед запуском модели на расчет. Идея данного ГПТ состоит в том, что обедненный свободными носителями слой затворного р-п-перехода захватывает подзатворный участок барьерного слоя, обездвиживает имеющиеся там электроны и создает разрыв в слое двумерного электронного газа (ДЭГ), который является электропроводным каналом транзистора. В результате слой ДЭГ разрывается в подзатворной области, и транзистор оказывается запертым при нулевом напряжении на затворе. При подаче на затвор положительного относительно канала напряжения толщина обедненного слоя р-п-перехода уменьшается, в подзатворной области барьерного слоя появляются свободные электроны, которые переходят в слой GaN, создавая там ДЭГ. Электропроводность канала восстанавливается.

Методология моделирования

Модуль «полупроводники» программного комплекса COMSOL Multiphysics базируется на диффузионно-дрейфовой модели процессов в полупроводниках. Данная

модель справедлива для микронных размеров описываемых объемов. Для меньших объемов комплекс содержит методику учета квантоворазмерных эффектов – метод градиента электронной плотности, которая позволяет учесть квантовые эффекты в субмикронных областях.

Таким образом, получается удобный инструмент моделирования полупроводниковых приборов микронных и субмикронных размеров. Получаемая модель описывается следующим набором уравнений.

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

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

где ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость, ρ – плотность заряда (она определяется вкладом концентраций дырок (p), электронов (n), ионизированных атомов донора N_d и ионизированных атомов акцептора N_a):

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

Элементарный заряд обозначен через q. Перенос носителей заряда описывается соотношениями, заданными в виде уравнений непрерывности тока:

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

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

Плотность тока электронов j_n и дырок j_p выражаются в компактной форме через квазиферми-уровни электронов и дырок: E_{fn} и E_{fp}:

$$\left. \begin{aligned} \vec{j}_n &= qn\mu_n \nabla E_{fn} + qn \left((E_c - E_{fn})\mu_n + Q_n \right) \frac{\nabla T}{T} \\ \vec{j}_p &= -qp\mu_p \nabla E_{fp} - qp \left((E_v - E_{fp})\mu_p + Q_p \right) \frac{\nabla T}{T} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок, E_c, E_v – энергии дна зоны проводимости и потолка валентной зоны соответственно, Q_n, Q_p являются неравновесным вкладом электронов и дырок в коэффициент термодиффузии, T – температура (К).

Дно зоны проводимости – E_c и E_v – потолок валентной зоны, в свою очередь, связаны с электрическим потенциалом φ, сродством к электрону χ и шириной запрещённой зоны E_g следующими соотношениями:

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

В полупроводниковом модуле комсола все переменные уровней энергии (E_{fn}, E_{fp}, E_c, E_v, χ, E_g) масштабируются по элементарному заряду и выражаются в единицах электрического потенциала (В).

Как следует из (4), для вычисления плотностей токов необходимо знание концентраций свободных носителей заряда.

В теории дрейфа-диффузии концентрации свободных носителей n, p связаны с квазиферми-уровнями E_{fn}, E_{fp} следующими соотношениями:

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

где N_c , N_v – эффективная плотность состояний зоны проводимости и валентной зоны, $F_{1/2}$ является интегралом Ферми – Дирака, U_T – температурный потенциал ($U_T = \frac{k_B T}{q}$). Таким образом, система уравнений (1) – (6) замыкается и позволяет вычислить плотности токов и токи всех электродов транзистора при заданной его геометрии и потенциалах электродов.

Сомнения в точности такого расчета создает то, что в нитридном ГПТ область вблизи перехода, содержащая свободные электроны, очень узкая. Совокупность находящихся в ней свободных электронов называют двумерным электронным газом (ДЭГ), а вычисление концентрации электронов в ДЭГ требует учета квантовых явлений. Наиболее экономной вычислительной процедурой этого учета «в комсоло» является метод градиента электронной плотности, при котором в рассмотрение вводятся т. н. квантовые потенциалы для электронов – V_n и дырок – V_p , видоизменяющие уравнения (6):

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

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

Поляризация материала. Известно, что нитриды алюминия и галия являются поляризованными материалами. При этом действуют два механизма поляризации: спонтанная, характеризуемая вектором P^{sp} , и пьезоэлектрическая, выражаемая вектором P^{pz} . 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, то можно принять толстый слой GaN расслабленным, а тонкий слой AlGaIn напряженным. Это напряжение является растягивающим, при котором направление векторов спонтанной и пьезоэлектрической поляризации совпадают. Модуль суммарного вектора поляризации, численно равный поверхностному заряду, определится равенством

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

Для векторов поляризации в литературе [4] имеются упрощенные формулы, выражающие их как функцию относительной доли алюминия в материале. Подстановка этих формул в (8) дает используемое в модели выражение для величины поверхностного заряда, которая численно равна модулю вектора поляризации:

$$\sigma = [0.06095 \cdot x - 0.019 \cdot x \cdot (1 - x)] [\text{Кл} \cdot \text{м}^{-2}]. \quad (9)$$

Легирование. Барьерный слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ толщиной h_2 является источником свободных электронов для канала транзистора.

Для улучшения электропроводности канала степень его легирования донорной примесью (Si) желательна быть большой. Однако необходимо иметь в виду, что для размещения затворного р-п-перехода в барьерном слое степень легирования затвора должны быть еще больше, причем значительно больше.

Однако предел легирования ограничен растворимостью примеси. Кроме того, необходимо учесть тот факт, что сильное легирование областей р-п-перехода делает его тонким и электрически не прочным. С учетом этого концентрация донорной примеси в барьерном слое выступала в качестве одного из параметров, варьируемого в диапазоне от 10^{16} см^{-3} до 10^{17} см^{-3} .

Степень легирования затвора акцепторной примесью (Mg) также являлась варьируемым параметром от 10^{18} см^{-3} до 10^{20} 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 $n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Металлические контакты. Модуль «полупроводники» комплекса COMSOL Multiphysics содержит мини-модели контактов металла с полупроводником, что избавляет от специального их моделирования. Используются невыпрямляющие контакты.

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

$$\chi = (4.1 - x) [\text{эВ}]. \quad (10)$$

Квантовые эффекты. Толщина слоя ДЭГ на гетеропереходе AlGaIn/GaN сравнима или даже меньше длины волны де Бройля движущихся там электронов. Как уже отмечалось, это обстоятельство требует учета квантовых эффектов в расчетах. Для этого использовался метод градиента электронной концентрации значительно более экономный по требуемым вычислительным ресурсам и легко встраивающийся в единую программу вычисления характеристик транзистора.

Модель подвижности имеет большое значение при расчетах характеристик транзистора. Она оказывает влияние не только на динамические, но и на статические параметры.

В расчетах использована модель подвижности Коги – Томаса, которая отражает насыщение скорости носителей заряда под действием электрического поля простой формулой для подвижности носителей.

Эта формула содержит всего два параметра: подвижность при слабом поле – μ_f и скорость насыщения – v_{sat} .

Формула для подвижности имеет следующий вид:

$$\mu_d = \frac{\mu_f}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu_f E_{\leftrightarrow}}{v_{\text{sat}}}\right)^2}}. \quad (11)$$

Символом E_{\leftrightarrow} обозначена параллельная скорости носителей компонента электрического поля.

Модель Когі – Томаса такжэ ўлічвае рассеяніе носіцеляў паверхняю канала. Калі абазначыць аб'ёмную падвыжнось матэрыяла як μ_{ss} , то прыповерхнасная падвыжнось вызначыцца формулай:

$$\mu_s = \frac{\mu_{ss}}{\left(\frac{E_y}{E_{ss}}\right)^4}, \quad (12)$$

дзе E_y – перпендыкулярная каналу кампанента напружаннасьці поля, E_{ss} – агульная напружаннасьць поля ў абласці канала.

Такім образом, у знаменателе (12) стоіць косінус нахіла вектара напружаннасьці к нармалі паверхні ў 4 ступені.

Поўная падвыжнось, як звычайна, вызначыцца наступнай формулай:

$$\mu = \frac{\mu_d \mu_s}{\mu_d + \mu_s}. \quad (13)$$

Паверхнасныя стаянія. Вліяніе паверхнасных стаяніяў на распаўсюджванне зарада ў структуры ўстройства можа быць ўлічана з існаваннем адпаведнай статыстыкі распаўсюджвання пры расчыне шчынасці зарада ў ураўненні Пуасона (путем уключэння паверхнасных стаяніяў праз легіраваны слой).

Паверхнасныя стаянія звычайна мадэліруюцца феноменалагічным образом на аснове прадпаложэння аб існаванні іх ў выглядзе акцептара і донора з вызначанай энергіяй іанізацыі.

Возможна, іх іанізацыя на самым справе не следуе прадпаложанай фермі-статыстыцы. У расчыняемай мадэлі мы пренебрегли особымі стаяніямі паверхні.

Дыскретызацыя па канечным аб'ёмам. На паверхні раздэла матэрыялаў гетэроперахода імаецца скачок іх параметраў.

Разрыв можа вызваць лічбыя праблемы, асабліва для прастранствавой прадводнай палярызацыі P_x .

У нашым справе гэта можа быць ісправлена ўведзеннем плаўнага змянення долі $Al(y)$.

Вместо гэтаго можна існаваць для дыскретызацыі і рашэння ураўненняў метад канечных аб'ёмаў, імаючыся ў камсоле, і выбраць прамуюгольную форму сеточных элементаў са старонай, параллельнай граніцы раздэла матэрыялаў.

Этот метод и был использован.

Результаты и их обсуждение

В ходе расчыне COMSOL Multiphysics запамінае агромныя таблицы рэзультаў, з якіх затым можна сфарміраваць наглядныя графікі залежнасці адных велічынь ад другіх.

Паказанная на рысунке 1 двумерная мадэль ГПТ прадпаложает, што залежнасць усіх характэрыстык ад трэцяй каардынацы Z адсутствуе. Шырына транзістора па трэцяй каардынаце раўна 1 мкм.

С ўлічэннем процыворэчывых тэбаваўняў к ўрвню легіраванія бар'ернага слоя была выбрана кампромісная велічыня канцэнтрацыі донорнай прымесі – 10^{16} см^{-3} . Усе далейшыя рэзультаўныя атрыманы для гэтаго бар'ернага слоя.

Залежнасць канцэнтрацыя свабодных электронаў ў канале транзістора ад канцэнтрацыі акцепторнай прымесі ў затворе.

Данная залежнасць атрыманая путем многакратнага «прогона» мадэлі пры нулевых велічынях напружэнняў змяшчэння. В кождым з іх фарміраваўся графік залежнасці канцэнтрацыі электронаў ў цэнтры падзатворнай абласці як функцыя вертыкальнай каардынацы. Для прымера на рысунке 2 паказаны рэзультаўныя трых про-

гонов при концентрации донорной примесе в барьерном слое $n_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Видно, что ДЭГ практически не затрагивается затворным p-n-переходом, если концентрация акцептора в затворе p_3 равна или меньше $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Концентрация свободных электронов в ДЭГ при этом составит $1,4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Увеличивая легирование затвора, можно снизить электронную плотность в ДЭГ, но заметное снижение до 10^{17} см^{-3} (т. е. на три порядка) получается начиная с величины $p_3 = 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Ясно, что при таком уровне легирования будет невозможно получить достаточную для практики величину пробивного напряжения затворного перехода.

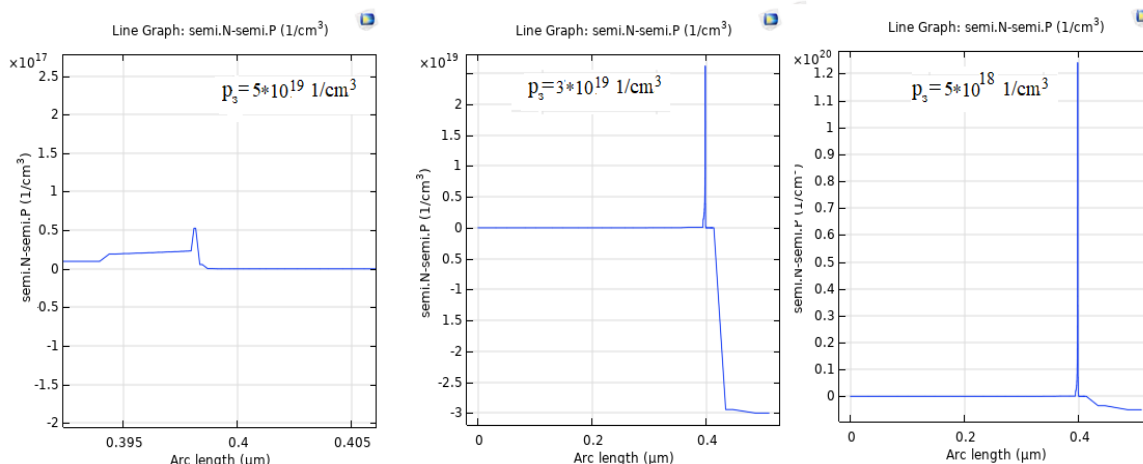


Рисунок 2 – Концентрация свободных электронов в подзатворной области при различных величинах степени легирования затвора

На рисунке 3 показана зависимость концентрации свободных электронов в центре подзатворной области на вершине канального слоя (n) от концентрации акцепторов в затворе (p).

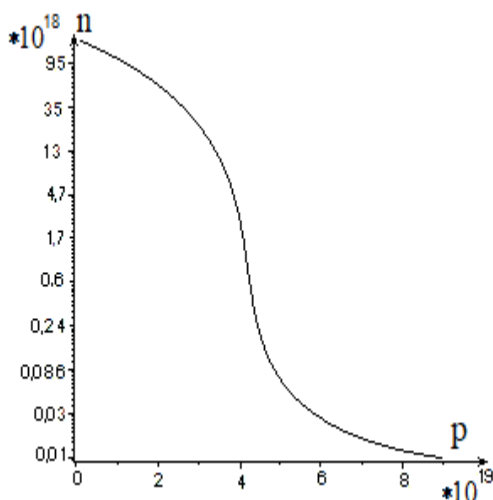


Рисунок 3 – Зависимость концентрации свободных электронов в ДЭГ от концентрации акцептора в затворе

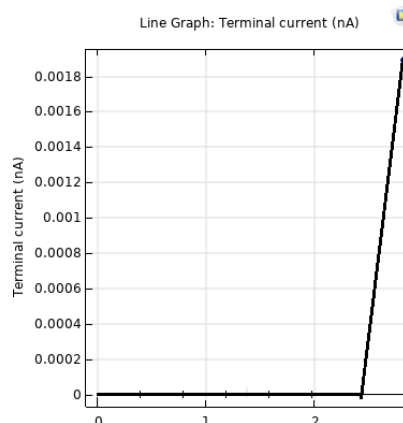


Рисунок 4 – Входная ВАХ транзистора ($U_d = 0$)

Из графика (рисунок 3) видно, что для полного уничтожения проводимости канала требуется легирование затвора на уровне $7 - 8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. При этом наверно

заметную величину будет иметь туннельный ток затвора, в результате чего заметную величину составит входная проводимость транзистора.

Данная модель не включает в себя физику туннельного эффекта и не учитывает его. На рисунке 4 показан график входной ВАХ транзистора. Как видно, в пределах напряжений на затворе от 0 до 2,5 В – это типичная ВАХ р-п-перехода с исчезающе малыми токами, порядка 10^{-12} А. Таким образом, по величине входной проводимости ГПТ с р-затвором можно отнести к высокоомным приборам.

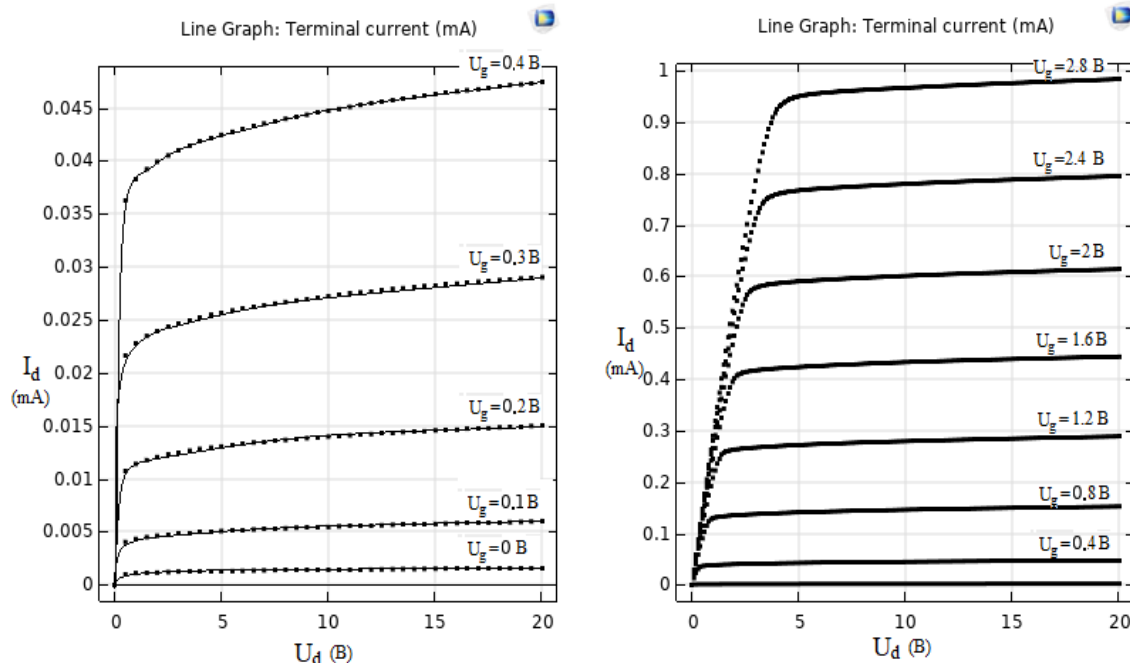


Рисунок 5 – Выходные ВАХ, построенные моделью транзистора

Выходные ВАХ представляют большой интерес у проектировщиков устройств. На рисунке 5 представлены графики построенных моделью выходных вольтамперных характеристик. График слева описывает случай малых напряжений на затворе, а график справа охватывает весь интервал рабочих затворных напряжений. Получаются типичные «транзисторные» ВАХ с крутым в начале и пологим в дальнейшем участками, однако ток стока (I_d) при нулевом затворном напряжении хотя и очень мал, но в ноль не обращается.

В такой ситуации не вполне ясно, как определить пороговое напряжение транзистора. Можно использовать распределение границ энергетических зон и определить пороговое напряжение как нормированное на элементарный заряд расстояние между дном зоны проводимости и уровнем Ферми.

На рисунке 6 приведена диаграмма зонных границ в районе канала транзистора. Если следовать предлагаемой методике, то величина порогового напряжения составит 0,6 В.

Возможно, больше информации о величине порогового напряжения даст вид прямой проходной ВАХ (зависимость стокового тока от напряжения на затворе). График данной зависимости показан на рисунке 7.

Видно, что при небольших величинах стокового напряжения ВАХ имеют точку перегиба приблизительно при $U_g \sim 0,6$ В. Эту величину и можно принять в качестве порогового напряжения.

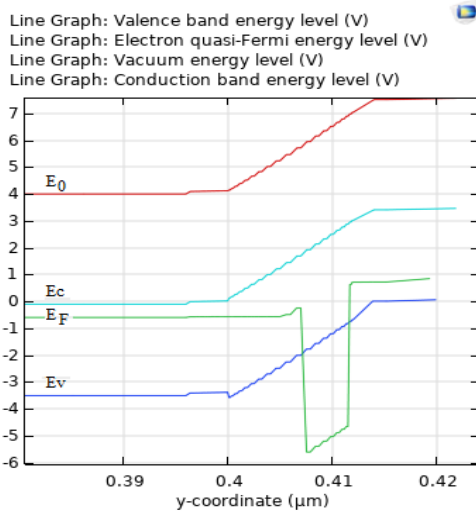


Рисунок 6 – Распределение зонных границ полупроводника в районе канала (0,4 мкм)

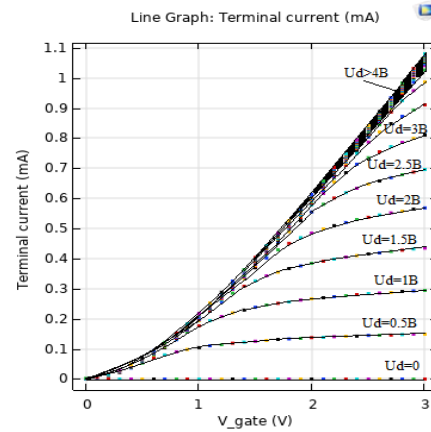


Рисунок 7 – Графики прямой проходное ВАХ транзистора

Заключение

Построенная в COMSOL Multiphysics модель нитридного ГПТ с р-затвором дает правдоподобные результаты. При необходимости ее можно использовать для оптимизации в ходе изготовления таких приборов по параметрам размеров и степени легирования областей. Помимо прочего из полученной модели вытекают и пороки данного типа транзисторов – необходимость сильного легирования затвора, что приводит к малым значениям его пробивного напряжения, низкому значению порогового напряжения и, следовательно, чувствительности к помехам, а также сложности изготовления.

Мультифизичность среды COMSOL Multiphysics должна позволить получать на основе созданной модели электрические, тепловые и др. характеристики ГПТ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Куэй, Р. Электроника на основе нитрида галлия / Р. Куэй. – М. : Техно-сфера, 2011. – 587 с.
2. Zineedine, T. Design and analysis of 10 nm T-gate enhancement-mode MOS-HEMT for high power microwave applications / T. Zineedine, H. Zahra, M. Zitouni // J. of Sci. Adv. Mater. Devices. – 2019. – № 4. – P. 180–187.
3. Данлэп, У. Введение в физику полупроводников : пер. с англ. / У. Данлэп. – 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, № 12. – С. 1647–1652.
5. Gate leakage suppression and breakdown voltage enhancement in p-GaN GJT transistors using metal / graphene gates / G. Zhou [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 2019. – Vol. 67. – P. 875–880.
6. Нормально-закрытый транзистор с затвором р-типа на основе гетероструктур AlGaIn / GaN / В. И. Егоркин [и др.] // Известия вузов. Электроника. – 2020. – Т. 25, № 5. – С. 391–401.
7. Development of UV image intensifier tube with GaN photocathode / I. Mizuno [et al.] // Proc. of SPIE. – 2008. – Vol. 6945. – P. 69451N-1 – 69451N-11.

REFERENCES

1. Kuei, R. Ehlektronika na osnove nitrida galliya / R. Kuei. – M. : Tekhno-sfera, 2011. – 587 s.
2. Zineeddine, T. Design and analysis of 10 nm T-gate enhancement-mode MOS-HEMT for high power microwave applications / T. Zineeddine, H. Zahra, M. Zitouni // J. of Sci. Adv. Mater. Devices. – 2019. – № 4. – P. 180–187.
3. Danlep, U. Vvedenie v fiziku poluprovodnikov : per. s angl. / U. Danlep. – M. : Izd-vo inostr. lit., 2011. – 430 s.
4. Issledovanie polarizatsii nitridnykh soedinenii (Al, Ga, AlGa)N i zaryadovoi plotnosti razlichnykh interfeisov na ikh osnove / I. A. Supryadkina [i dr.] // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. – 2013. – T. 47, № 12. – С. 1647–1652.
5. Gate leakage suppression and breakdown voltage enhancement in p-GaN GJT transistors using metal / graphene gates / G. Zhou [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 2019. – Vol. 67. – P. 875–880.
6. Normal'no-zakrytyi tranzistor s zatvorom p-tipa na osnove geterostruktur AlGaIn / GaN / V. I. Egorkin [i dr.] // Izvestiya vuzov. Elektronika. – 2020. – T. 25, № 5. – S. 391–401.
7. Development of UV image intensifier tube with GaN photocathode / I. Mizuno [et al.] // Proc. of SPIE. – 2008. – Vol. 6945. – P. 69451N-1 – 69451N-11.

Рукапіс настуніў у рэдакцыю 27.10.2025