

МОДЕЛИРОВАНИЕ НИТРИДНОГО ГЕТЕРО-ПЕРЕХОДНОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

С. В. ЧУГУНОВ, А. С. ЧУГУНОВ

(Брестский государственный технологический университет);

Э. В. ЧУГУНОВА

(Гимназия № 4 г. Бреста)

В данной работе мы предлагаем рассмотреть результаты моделирования нитридного гетеро-переходного полевого транзистора (ГПТ) или HEMT-транзисторы на основе гетероструктур AlGaIn/GaN, реализованную в модуле Semiconductor Module программного продукта COMSOL Multiphysics. Для этого мы использовали мультифизический интерфейс уравнения Шредингера-Пуассона, который позволяет моделировать все возможные системы с квантово-ограниченными носителями заряда, такими как квантовые ямы, провода и точки.

Ключевые слова: *полевой транзистор, уравнение Шредингера, уравнение Пуассона, моделирование.*

В последние десятилетия активно разрабатываются нитридные гетеро-переходные полевые транзисторы (ГПТ) или HEMT-транзисторы, представляющие собой транзисторы, в которых для создания канала проводимости используется гетеропереход, т. е. область контакта двух полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны. В этой области возникает излом и разрыв зонных границ, в результате которого в тонкой области дно зоны проводимости узкозонного полупроводника опускается ниже уровня ферми, что приводит к образованию тонкого электропроводящего слоя. Как часто говорят, в этом слое образуется двумерный электронный газ (ДЭГ). Т.к. соединение GaN обладает высокой подвижностью электронов, удастся создать гетероструктурные полевые транзисторы AlGaIn/GaN с уникальными характеристиками, а именно: с высокими значениями выходной мощности, рабочей частоты и температурного диапазона функционирования [1].

В данной работе представлено моделирование транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктур AlGaIn/GaN с помощью программного продукта «COMSOL Multiphysics».

«COMSOL Multiphysics» - мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных (PDE), при решении которых используется

метод конечных элементов [2]. Программное обеспечение запускает конечноэлементный анализ вместе с сеткой учитывающей геометрическую конфигурацию тел и контролем ошибок с использованием разнообразных численных решателей. С этим программным пакетом можно расширять стандартные модели, использующие одно дифференциальное уравнение, в мультифизические модели для расчета связанных между собой физических явлений. Так, объединяя модели электродинамического и полупроводникового блоков, удастся получить модели устройств оптоэлектроники, объединив полупроводниковую модель с электротехнической, можно получить модель электронного узла. Расчет не требует глубокого знания математической физики и метода конечных элементов. Это возможно благодаря встроенным физическим режимам, где коэффициенты PDE задаются в виде понятных физических свойств и условий, таких как: теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, объемная мощность и т. п. в зависимости от выбранного физического раздела. Преобразование этих параметров в коэффициенты математических уравнений происходит автоматически. Взаимодействие с программой возможно стандартным способом – через графический интерфейс пользователя (GUI), либо программированием с помощью скриптов на языке COMSOL Script или языке MATLAB.

Помимо возможности построения сложных разнородных моделей «COMSOL Multiphysics» обладает прекрасными возможностями визуализации результатов полученных решений, что представляется весьма важным качеством. Что же касается инструментов моделирования, то они одинаковы во всех программных продуктах – это составление системы уравнений моделируемого процесса, графоаналитическое задание граничных и начальных условий и последующее численное решение полученных уравнений.

При моделировании ГПТ необходимо учитывать, что размеры полупроводниковых структур современной микро- и нанoeлектроники составляют 10...100 нм. Такой диапазон линейных размеров элементов – это фундаментальный физический раздел, за нижней границей которого резко меняются все свойства твердого тела, включая электропроводность. В полной мере начинают проявляться квантовые эффекты, и физика электропроводности требует учет квантовых эффектов. В частности, функционирование ГПТ основано на электропроводности заполненной электронами квантовой ямы, которая возникает вблизи границы гетероперехода и имеет толщину несколько нанометров. Для определения концентрации электронов в яме совершенно необходим учет квантовых эффектов в ней [3].

Для описания различных процессов, происходящих на квантовом уровне в полупроводниках, необходимо составить и совместно решить такие уравнения

как: уравнение Пуассона (1), уравнения Шредингера (2), уравнение непрерывности тока (3) [3]:

$$\nabla \cdot (\vec{D}) = \rho, \quad (1)$$

$$-\frac{\hbar}{2m} \Delta \psi + V = \varepsilon \psi, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (q \mu_n \nabla E_{Fn}) = 0, \quad (3)$$

где $\hbar$ – приведенная постоянная Планка, m – эффективная масса, q – элементарный заряд, D – электрическое смещение, V – функция потенциала φ , ψ – волновая функция со связанной с ней энергией E , μ_n – подвижностью электрона, n – плотность электронов и E_{Fn} – квазиуровень Ферми электронов.

Для описания формирования канала в ГПТ эту систему уравнений необходимо решить для неравновесного случая.

Уравнение Пуассона (1) связывает электростатический потенциал с пространственным зарядом. Значительные поляризационные эффекты в III-нитридах требуют уравнение Пуассона (1), которое необходимо решить для электрического поля смещения:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} + \vec{P}, \quad (4)$$

где ε , $\vec{E}$ и $\vec{P}$ представляют соответственно диэлектрическую проницаемость, напряженность электрического поля и вектор поляризации. В отсутствие переменного во времени магнитного поля электрическое поле может быть выражено в виде:

$$\vec{E} = -\nabla \varphi \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в (1), получаем:

$$\varepsilon \nabla^2 \varphi = -\rho + \nabla \vec{P}. \quad (6)$$

Распределение заряда в полупроводнике является нелинейной функцией потенциала φ через плотности подвижных носителей заряда p и n и концентрацию примесей ионизированных доноров N_D^+ и акцепторов N_D^- :

$$\rho(\varphi) = p(\varphi) - n(\varphi) + N_D^+(\varphi) - N_D^-(\varphi). \quad (7)$$

Нелинейности вводятся выражениями, используемыми для расчета плотности носителей и концентрации ионизированной примеси.

Мультифизический интерфейс «уравнения Шредингера-Пуассона» создает двунаправленную связь между физическим интерфейсом электростатики и физической уравнения Шредингера. В результате получаем интерфейс для моделирования движения носителей заряда в системах с т.н. размерным квантованием. Электрический потенциал из электростатики вносит вклад в член потенциальной энергии в уравнение Шредингера. Статистически взвешенная сумма плотностей вероятности собственных состояний уравнения Шредингера вносит обратный вклад в плотность пространственного заряда в уравнения электростатики. Комсол поддерживает все пространственные конфигурации области решений: 1D, 1D осевая симметрия, 2D, 2D осевая симметрия, и 3D. Более того, имеется специальный тип исследования «Шредингера-Пуассона» позволяющий получить самосогласованное решение соответствующих уравнений [2].

Когда предопределенный мультифизический интерфейс уравнений Шредингера-Пуассона добавляется из ветви «Полупроводники» окна «Model Wizard» (мастер модели) или «Add Physics», интерфейсы «Уравнение Шредингера» и «Электростатика» добавляются в построитель моделей. При этом автоматически добавляется узел «Multiphysics Couplings», который включает функцию мультифизической связи Шредингера-Пуассона.

Интерфейс «Уравнение Шредингера» решает уравнение Шредингера как общую задачу квантовой механики и получает волновые функции электрона или дырки в квантоворазмерной области полупроводника в виде огибающих волновых функций. Интерфейс «Электростатика» получает эти результаты и использует их для расчета плотности пространственного заряда и электрического поля, включая распределение потенциала. Распределение потенциала определяет потенциальную энергию зарядов и передает эту информацию обратно в решатель уравнения Шредингера, замыкая кольцо обратной связи между решателями. Выход из петли прямая-обратная связь происходит при достижении заданной точности согласованного решения, которое должно сходиться.

Формулировка самосогласованного решения стационарная, но возможно его использование совместно с другими физиками в частотной области при анализе слабых сигналов.

Такова общая схема моделирования квантоворазмерных структур в Комсоле.

Мультифизический интерфейс уравнения Шредингера-Пуассона, доступен начиная с COMSOL Multiphysics версии 5.4.

В данной работе мы предлагаем рассмотреть результаты моделирования НЕМТ-транзистора на основе гетероструктур AlGaIn/GaN, реализованную в модуле Semiconductor Module программного продукта COMSOL Multiphysics.

Для расчетов была выбрана гетероструктура, геометрия которой показана на рисунке 1.

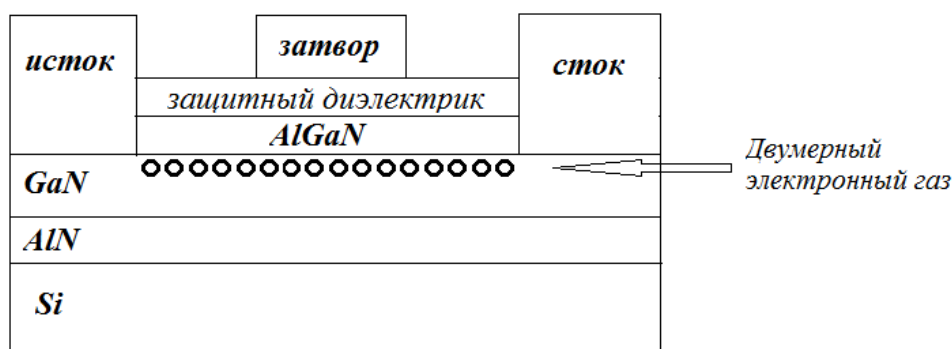


Рисунок 1. – Схема транзистора

В качестве рабочей модели был взят транзистор с минимальным количеством слоев: (сверху – вниз): металлические контакты, защитный диэлектрик, слой n-легированного AlGaN, n-нелегированный GaN с 2-мерным электронным газом (ДЭГ), подложка. Такая упрощенная модель не содержит барьера AlN между каналным GaN и барьерным AlGaN слоями, не учитывает влияние множества переходных слоев реальных HEMT.

Тройной сплав GaN, AlN и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, обеспечивает большой непрерывный диапазон значения ширины запрещенной зоны с небольшим связанным изменением постоянной решетки, где x мольная доля алюминия в слое. Энергия ширины запрещенной зоны $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ моделируется эмпирическим уравнением (8) и показывает нелинейное увеличение ширины запрещенной зоны с увеличением содержания Al [4]:

$$E_g(x) = x \cdot E_g(\text{AlN}) + (1-x) \cdot E_g(\text{GaN}) - x \cdot (1-x) \text{ эВ} \quad (8)$$

В модели можно изменять широкий спектр различных параметров, таких как: температуру, мольную долю алюминия, легирование слоев, подвижность электронов и дырок, электронное сродство, эффективные массы электронов и дырок и т. д.

Полученную модель можно исследовать относительно огромного количества различных характеристик и отображать найденные зависимости на графиках.

На рисунке 2, показан скриншот рабочей области программы с распределением концентрации электронов по структуре и вольтамперная характеристика исследуемого транзистора при различных напряжениях на затворе (рисунок 3).

Разумеется, полученная нами модель HEMT транзистора является упрощенной и не содержит различные буферные слои, не учитывает пьезоэффект и т. д. В наши планы входит доработка существующей модели, ее расширение и максимальное приближение к действующим устройствам, ведь моделирование таких структур необходимо для создания и оптимизации нитридных сверхвысокочастотных транзисторов на этапах получения структуры транзисторов на подложке.

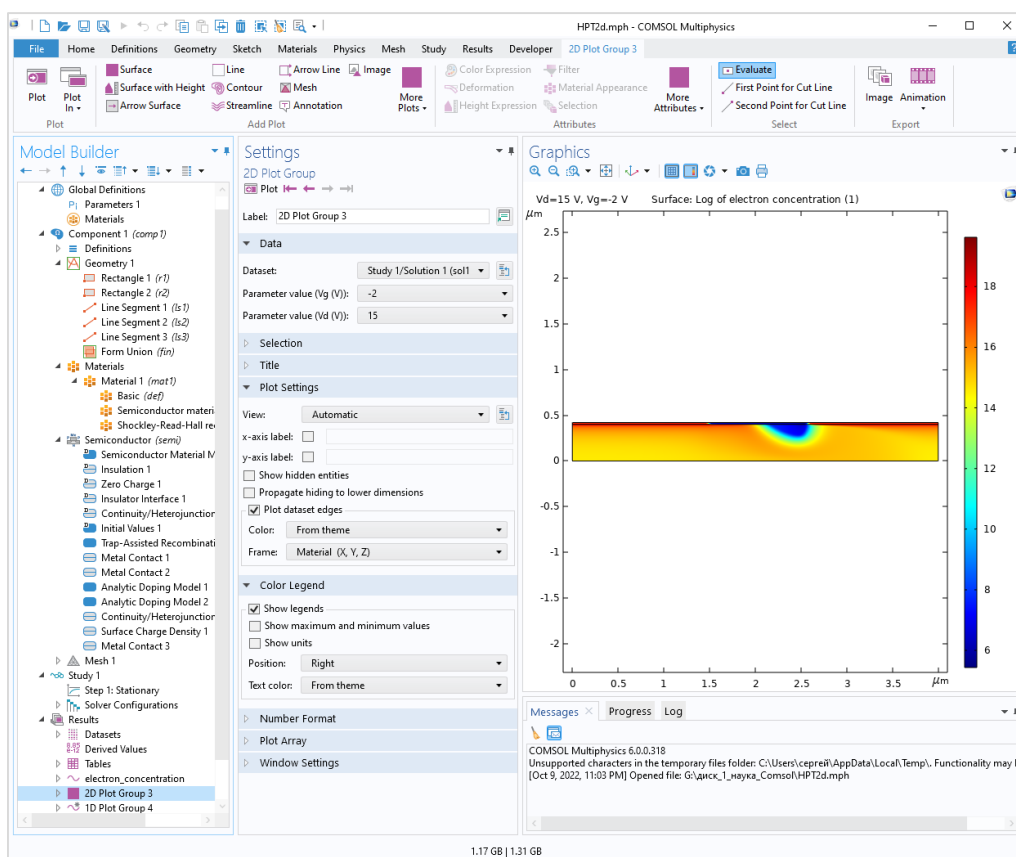


Рисунок 2. – Скриншот рабочей области программы с распределением концентрации электронов по структуре

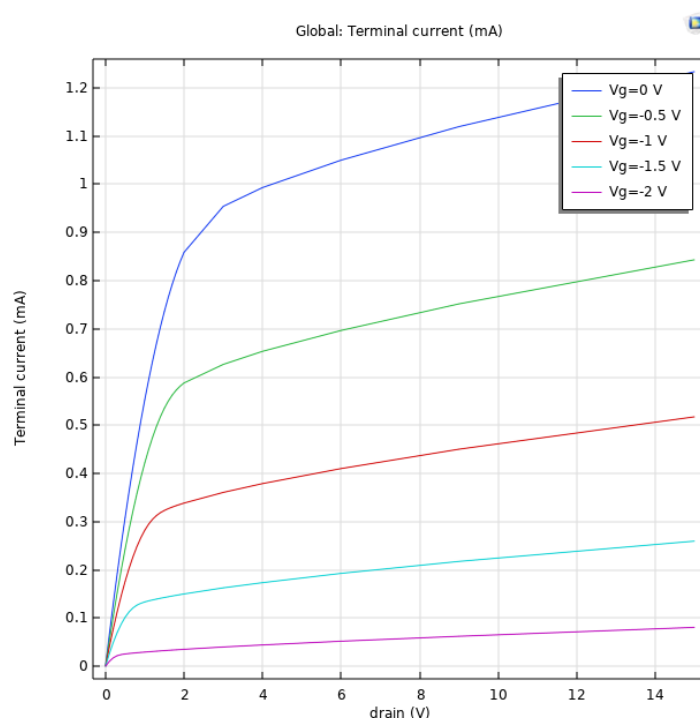


Рисунок 3. – Вольтамперная характеристика моделируемого транзистора при различных напряжениях на затворе

ЛИТЕРАТУРА

1. Luscombe, J. H. Electron confinement in quantum nanostructures: Self-consistent Poisson-Schrödinger theory / J. H. Luscombe, A. M. Bouchard, and M. Luban // Phys. Rev. B. – 1992. – Vol. 46, No. 16. – P. 10262.
2. Чугунов, С. В. Моделирование нанопроволоки GaAs в программной среде Comsol Multiphysics / А. С. Чугунов, А. В. Матиевская, С. В. Чугунов // Современные проблемы математики и вычислительной техники : материалы XII Республиканской научной конференции молодых ученых и студентов, Брест 18–19 ноября 2021 г. / Брест. гос. тех. ун-т ; редкол.: В. А. Головки (гл. ред.) [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2021. – С. 62–65.
3. Тихомиров, В. Г. Оптимизация параметров НЕМТ-гетероструктур GaN/AlN/AlGaIn для СВЧ транзисторов с помощью численного моделирования / В. Г. Тихомиров [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, вып. 2. – С. 245–249.
4. Ворсин, Н. Н. Аналитические соотношения для ВАХ НЕМТ на основе GaN / Н. Н. Ворсин [и др.] // Вестник БрГУ. – 2018. – Т. 4. – С. 26–31.