

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЯ AlGaN**

*Н. Н. Ворсин, А. А. Гладышук, Т. Л. Кушнер, С. В. Чугунов, Н. П. Тарасюк  
Учреждение образование «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь*

Гетеропереходные полевые транзисторы (далее ГПТ) на основе нитрида галлия с высокой подвижностью электронов обладают хорошими характеристиками, которые обеспечиваются свойствами материала. Величина ширины запрещенной зоны 3,4 эВ позволяет устройствам на основе GaN работать при высоких температурах. GaN имеет высокое значение поля пробоя 3,3 МВ/см, что является основой высоковольтных приборов на основе GaN [1].

Гетеропереход на границе AlGaN/GaN создает двумерный электронный газ (далее ДЭГ) высокой плотности порядка  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Подвижность электронов, образующих ДЭГ, весьма высока. Благодаря этим качествам ГПТ на основе AlGaN/GaN обладают низким сопротивлением канала, высокой плотностью тока в нем и высоким быстродействием.

Сложные свойства системы материалов нитрида галлия должны быть хорошо поняты, чтобы в полной мере использовать преимущества этого полупроводника в устройствах. Однако оптимизация устройства в экспериментальной или производственной среде чрезвычайно дорога. Компьютерное моделирование на основе физики полупроводников помогает в этом, показывая количественную взаимосвязь между основными свойствами материала и поведением устройства.

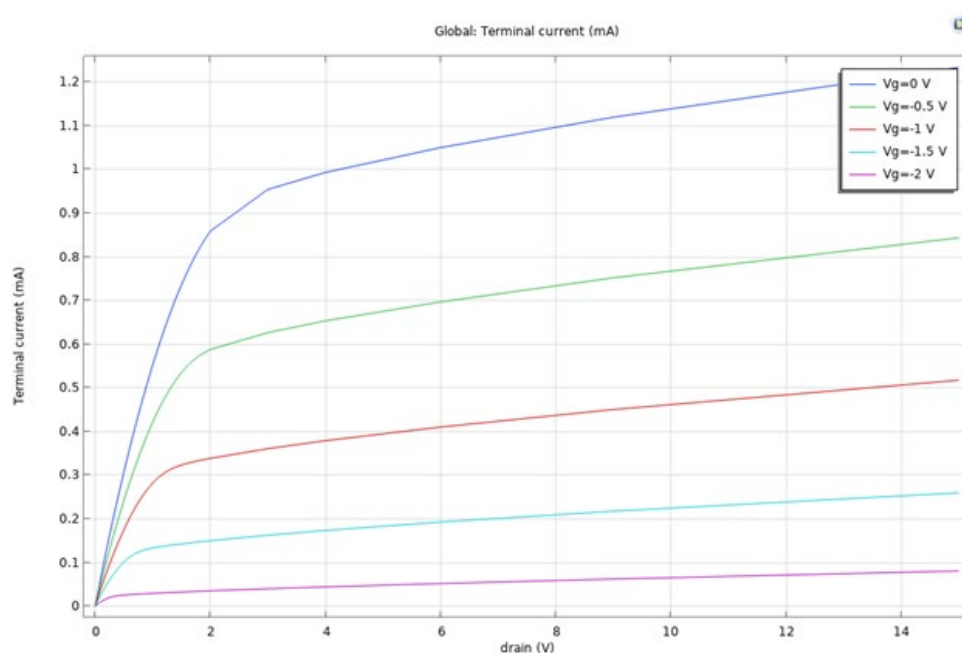
На кафедре физики Брестского государственного технического университета в рамках задания ГПНИ «Разработка и исследование технологий роста нитридных гетероструктур технологий изготовления компонентов и устройств опто-, СВЧ- и силовой электроники на основе полупроводниковых материалов и структур» выполняется научно-исследовательская работа «Моделирование физических процессов в р-і-п и Шоттки диодах и транзисторах на основе гетероструктур AlGaN» [2].

В ходе выполняемой НИР проведено моделирование квантовых явлений в тонких полупроводниковых слоях, осуществлена коррекция модели нитридного гетеропереходного полевого транзистора на основе AlGaN с учетом влияния квантово-механических эффектов при вычислении концентрации электронов в двумерном электронном газе.

Вследствие того, что электропроводящим каналом гетеропереходного полевого транзистора является очень тонкий слой, содержащий свободные электроны, известный как двумерный электронный газ, малая толщина слоя делает необходимым учет в нем квантовых эффектов (размерное квантование).

Разработанная модель с учетом квантовых эффектов в ДЭГ позволяет уточнить основные параметры транзистора.

В рамках диффузионно-дрейфового представления о физических процессах в полупроводниках создана компьютерная модель гетеропереходного полевого транзистора на основе AlGaN, позволяющая получить его вольтамперные характеристики при заданных размерах и параметрах полупроводника (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Вольтамперные характеристики, построенные моделирующей программой, для одного из гетеропереходных полевых транзисторов [3]**

Обычно при поиске самосогласованного решения используется приближение треугольной потенциальной ямы. Это упрощает решение. В нашем случае моделирование осуществлялось программой, которой безразличен закон изменения потенциала. В отличие от известных ранее моделей использована экспоненциальная модель квантовой ямы (рисунок 2).

Подстановка данного потенциала в уравнение Шредингера позволяет получить волновые функции осреднённого электрона ДЭГ. Квантово-механическое описание многочастичных ансамблей, как правило, основывается на приближении Хартри-Фока, в котором многочастичная волновая функция заменяется на волновую функцию одной некоторой осреднённой частицы, которая движется в поле остальных частиц. Ключевым элементом приближения при рассмотрении ансамбля электронов является электронная плотность, через которую выражается потенциал поля межчастичного взаимодействия. При этом возникает задача поиска так называемого самосогласованного поля электронной плотности и накладываемых на него квантовых ограничений. Данная задача решается итерационным методом, с негарантированной сходимостью, системы уравнений Пуассона – для электронной плотности и Шредингера – для осреднённого электрона.

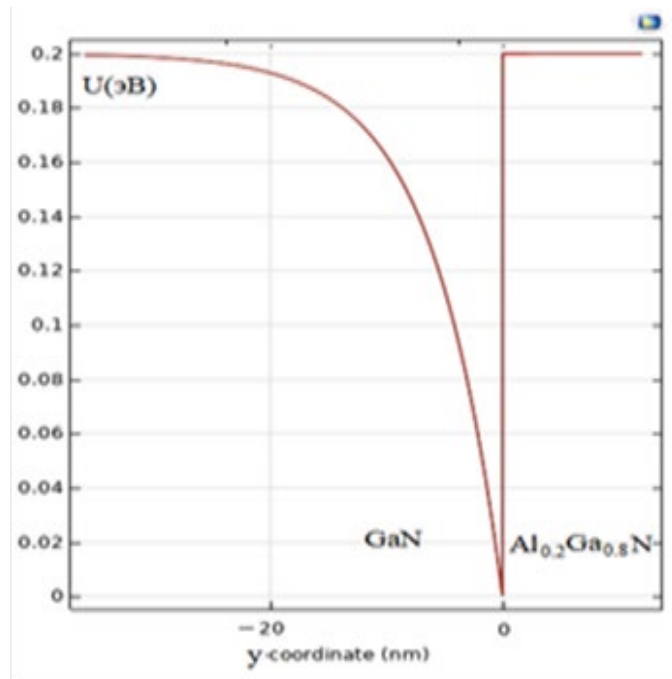


Рисунок 2 – Форма модели потенциальной ямы в области гетероперехода

Размерное квантование приводит к разбиению непрерывной энергетической шкалы электронов ДЭГ на отдельные подзоны (рисунок 3). Построенная модель учитывает эффекты поляризации, присущие нитриду галлия, позволяет задавать долю алюминия в барьерном слое, степень легирования областей, включает в себя процессы генерации и рекомбинации свободных носителей заряда.

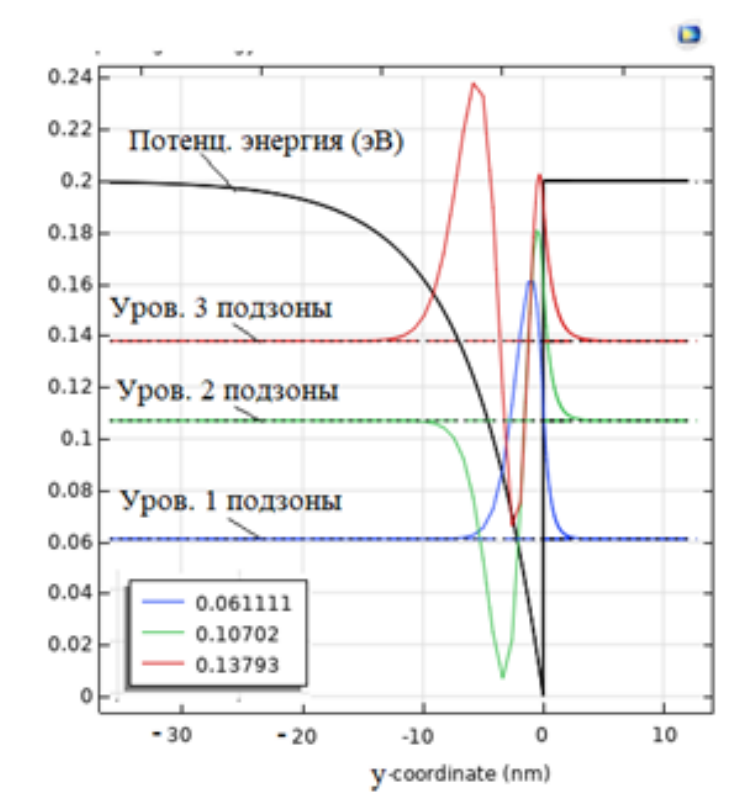


Рисунок 3 – Графики волновых функций трех нижних подзон, привязанные к соответствующим энергетическим уровням

Из данных графиков видно, что заметная часть огибающих волновых функций оказывается в области барьерного слоя (AlGaN). Так как подвижность электронов в барьерном слое в десятки раз хуже, в сравнении с канальным слоем (GaN), соответствующая доля электронов практически не будет участвовать в проводимости ДЭГ.

Результаты показывают неплохое соответствие построенной модели параметрам нитридных транзисторов, приведенным в литературных источниках, и могут быть использованы для проектирования нитридного гетеропереходного полевого транзистора на основе AlGaN и последующего его изготовления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроника на основе нитрида галлия / пер. с англ. Р. Куэй ; под ред. А. Г. Васильева. – М. : Техносфера, 2011. – 592 с.
2. Modeling AlGaN p-i-n photodiodes / N. Vorsin [et al.] // Доклады БГУИР. – Т. 19, № 8. – 2021. – С. 50–57.
3. Моделирование и разработка AlGaN гетеропереходного полевого транзистора / Н. Н. Ворсин [и др.] // Вестник БрГТУ. – 2023. – № 1 (130). – С. 76–82.
4. Zine-eddine, T. Design and analysis of 10 nm T-gate enhance-ment-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.

### МИКРОСТРУКТУРА СПЛАВА Al-7 МАСС. % ВІ ПРИ БЫСТРОЙ ЗАКАЛКЕ

*В. И. Гладковский<sup>1</sup>, А. И. Пинчук<sup>1</sup>, В. Г. Шепелевич<sup>2</sup>, В. М. Шилько<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь*

*<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь*

Как известно, метод быстрой закалки из расплава заключается в охлаждении струи жидкого металла на внешней (закалка на диске) или внутренней (центробежная закалка) поверхностях вращающихся барабанов или в прокатке расплава между холодными валками, изготовленными из материалов с высокой теплопроводностью.

Сплавы алюминия, содержащие индий, свинец и висмут (Al-In, Al-Pb и Al-Bi), изучены недостаточно, что вызвано их ограниченным применением в промышленности. Однако в последние два десятилетия несколько групп исследователей проявили к ним научный интерес, обусловленный перспективами их практического использования [1–4]. Механические и эксплуатационные характеристики определяются как химическим составом, так и размером, морфоло-