

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСХОДНО ОТКРЫТОГО  
ГЕТЕРОПЕРЕХОДНОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА  
НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ**

**Н. Н. Ворсин, А. А. Гладышук, Т. Л. Кушнер, Н. П. Тарасюк,  
С. В. Чугунов**

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь,  
phys@bstu.by

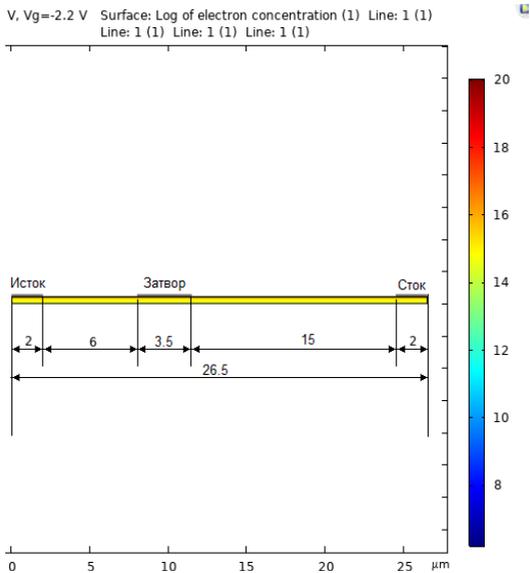
*AlGaIn ternary alloys with a band gap of 3.4 to 6.2 eV are promising materials for the construction of various electronic devices: diodes, transistors, lasers, microwave circuits. Replacing silicon with GaN allows several times to increase the operating temperature, the cutoff frequency, and to reduce 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 heterojunction field-effect transistor based on  $Al_xGa_{x-1}N$  was developed.*

Гетеропереходные полевые транзисторы (далее – ГПТ, в англоязычной литературе – НЕМТ) на основе нитрида галлия обладают некоторыми характеристиками, которые недостижимы для приборов на основе кремния [1]. Наличие у полупроводника GaN запрещённой зоны величиной 3,4 эВ позволяет устройствам на основе этого соединения работать при высоких температурах. Кроме того, GaN имеет высокое значение напряжённости поля пробоя, примерно 3,3 МВ/см. Это на порядок выше по сравнению с аналогичным параметром у кремния, что позволяет создавать на основе GaN так называемые высоковольтные приборы.

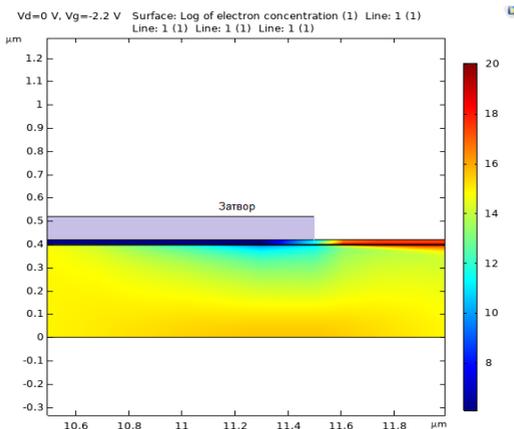
Гетеропереход на границе AlGaIn/GaN создаёт двумерный электронный газ (далее – ДЭГ) высокой плотности, порядка  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Высокая подвижность электронов, образующих ДЭГ позволяет утверждать, что ГПТ на основе AlGaIn/GaN могут быть использованы для создания мощных высокоскоростных приборов, так как обладают низким сопротивлением канала и высокой плотностью тока [2]. В настоящей работе описана созданная компьютерная модель ГПТ AlGaIn/GaN с простым плоским затвором и размерами, использованными в опытном производстве.

Структура и размеры (в микронах) моделируемого транзистора показана на рисунке 1. Она состоит из, канального слоя GaN толщиной 0,4 мкм, который через промежуточный слой AlN опирается на подложку. Толщина этого слоя должна быть сравнительно большой для уменьшения напряжений в верхней его части, обусловленных рассогласованием кристаллической структуры в нижней части его решётки с решёткой подложки. Сверху на канальный слой нанесён барьерный слой AlGaIn толщиной 0,02 мкм. На рисунке 1

канальный слой обозначен жёлтым цветом, барьерный слой – красным (почти незаметным). Рисунок 2 иллюстрирует структуру в увеличенном виде у правого края затвора.



**Рисунок 1 – Размеры структуры ГПТ**



**Рисунок 2 – Цветовая картина «распрямления» электронной плотности у правого края затвора**

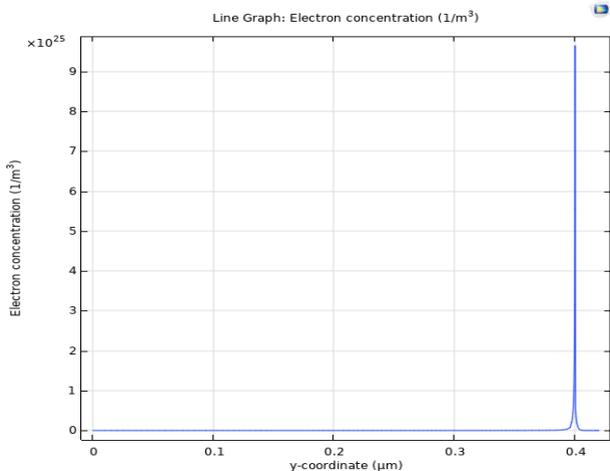
Из-за разности ширины запрещённой зоны барьерного и канального слоев на границе их соприкосновения образуется двумерный слой электронного газа, выполняющий роль канала транзистора. На рисунках с цветовым пред-

ставлением концентрации свободных электронов этот слой окрашен в темно-красный цвет. Над каналом расположен металлический затвор Шоттки (предполагается Ni) с достаточной работой выхода.

Гексагональная кристаллическая структура GaN приводит к эффектам внутренней поляризации в материале и появлению внутреннего электрического поля [3]. Эти эффекты учитываются в модели путём введения в неё связанных зарядов на поверхностях раздела. Предварительно рассчитываются модули векторов собственной и пьезоэлектрической поляризации, затем в модель вводится соответствующий поверхностный заряд [4].

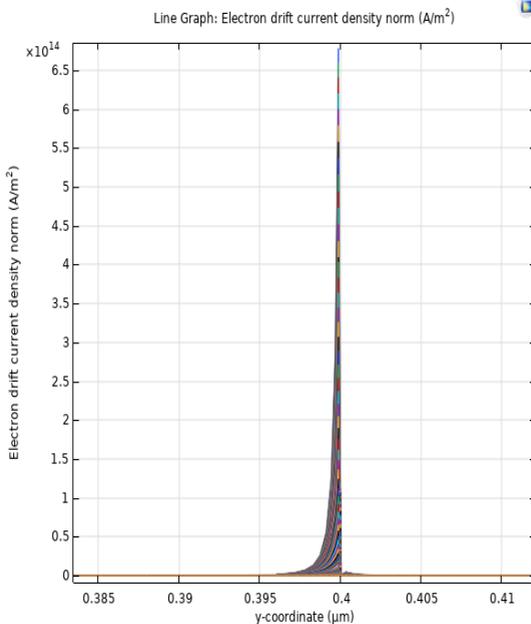
Результаты моделирования представлены ниже в виде графиков некоторых зависимостей. На рисунке 3 показана зависимость концентрации свободных электронов от вертикальной координаты. Видно, что на вершине канального слоя имеет резкий пик, соответствующий наличию в этой области ДЭГ.

Если проинтегрировать распределение плотности свободных электронов по всей высоте структуры, то получим так называемую листовую плотность электронного газа. Этот параметр легко измеряется, и его экспериментальное значение составляет  $9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Значение этой же физической величины, получаемое путём интегрирования, равно  $7,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , что можно считать хорошим соответствием измерению.



**Рисунок 3 – Распределение плотности свободных электронов по вертикальной координате**

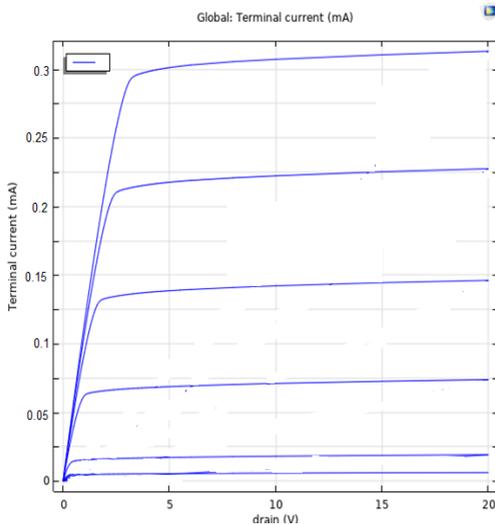
На рисунке 4 показаны графики плотности канального (стокового) тока, как функция вертикальной координаты. Поскольку представлены графики для всех возможных напряжений смещения, вся область двумерного газа оказывается «заполненной» графиками. Однако, видно, что ток течет только в области двумерного газа.



**Рисунок 4 – Распределение плотности канального тока по вертикальной координате**

Оценить точность моделирования позволяют также вольтамперные характеристики транзистора, поскольку являются легко измеряемыми. На рисунке 5 представлены графики выходных ВАХ, выдаваемых моделью. Форма кривых типична для транзисторов, величины стокового тока несколько отличаются от полученных экспериментальных данных, однако, погрешность не превышает 20 %.

Созданная компьютерная модель нитридного ГПТ даёт результаты, близкие к экспериментальным данным, что позволяет оптимизировать изготовление таких приборов по параметрам размеров и изучить влияние легирования областей структуры на некоторые параметры. Применение моделирования на этапе подготовки опытных образцов, элементной базы электроники, является эффективным. Моделирование и оптимизация играют существенную роль в технологии при создании новых материалов, гетероструктур, электронных устройств на их основе.



**Рисунок 5 – Графики семейства выходных ВАХ, рассчитанных компьютерной моделью**

### **Список использованной литературы**

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. Zahra, H. Zitouni, M. Design and analysis of 10 nm T-gate enhancement-mode MOS-HEMT for high power microwave applications. / T. Zine-eddine, H. Zahra, M. Zitouni // J. of Sci.: Adv. Mater. Devices. – 2019 – № 4. – P. 180–187.
3. Супрядкина, И. А., Абгарян, К. К., Бажанов, Д. И., Мутигуллин, И. В. 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. – Том 47, вып. 12. – С. 1647–1652.
4. Моделирование и разработка AlGaN гетеропереходного полевого транзистора / Н. Н. Ворсин, А. А. Гладышук, Т. Л. Кушнер [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 1 (130). – С. 76–82.