

УДК 621.383.52

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ AlGaN

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

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

Аннотация: 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 повысить рабочую температуру, граничную частоту, уменьшить в несколько раз потери переключения и проводимости в силовых приборах. Компьютерное моделирование физических процессов является необходимым элементом освоения новых электронных устройств. В настоящей работе представлены результаты моделирования мощного полевого транзистора на основе полупроводникового соединения AlGaN.

Ключевые слова: гетеропереходный транзистор, нитрид галлия, нитрид алюминия, диффузионно-дрейфовая модель, градиент электронной плотности, поляризация, вольтамперная характеристика.

I. ВВЕДЕНИЕ

Гетеропереходные полевые транзисторы (в англоязычной литературе – HEMT) на основе нитрида галлия обладают определенными характеристиками, которые недостижимы для приборов на основе кремния [1]. Наличие у полупроводника GaN запрещенной зоны величиной 3,4 эВ позволяет устройствам на основе этого соединения работать при высоких температурах. Кроме того, GaN имеет высокое значение напряженности 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 AlGaN/GaN создает двумерный электронный газ (далее – ДЭГ) высокой плотности, порядка 10^{13} см⁻². Высокая подвижность электронов, образующих ДЭГ позволяет утверждать, что гетеропереходные полевые транзисторы (далее – ГПТ) на основе AlGaN/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 AlGaN/GaN с простым плоским затвором и размерами, использованными в опытном производстве.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

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 механических напряжений в верхней его части, обусловленных рассогласованием кристаллической структуры его решетки в нижней части с решеткой подложки.

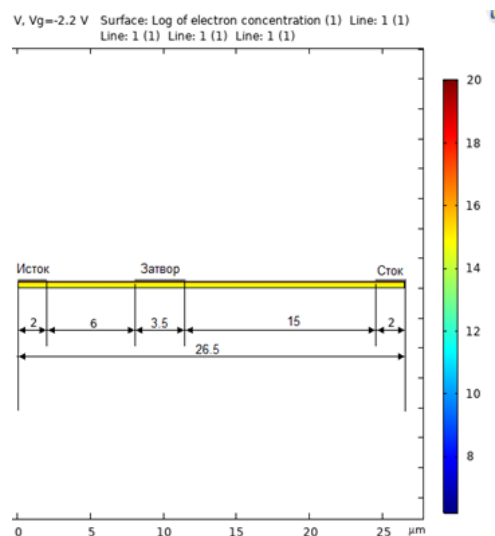


Рисунок 1. Размеры структуры гетеропереходного полевого транзистора

Сверху на каналный слой нанесен барьерный слой AlGaIn толщиной 0,02 мкм. На рисунке 1 каналный слой обозначен желтым цветом, барьерный слой – красным (почти незаметным). Рисунок 2 иллюстрирует структуру в увеличенном виде у правого края затвора.

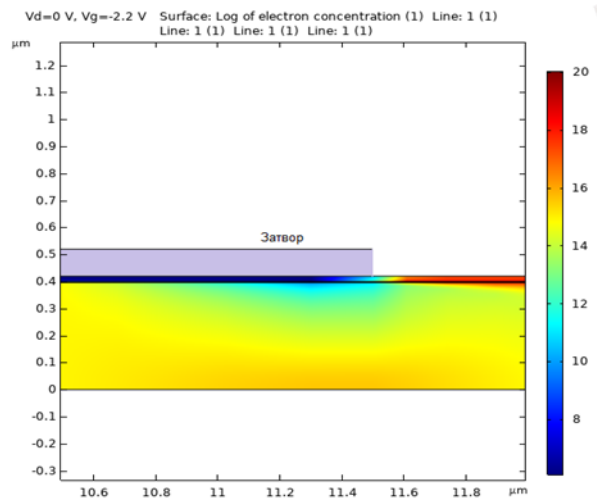


Рисунок 2. Цветовая картина электронной плотности у правого края затвора

Из-за разности ширины запрещенной зоны барьерного и каналного слоев на границе их соприкосновения образуется двумерный слой электронного газа, выполняющий роль канала транзистора. На рисунках с цветовым представлением концентрации свободных электронов этот слой окрашен в темно-красный цвет. Над каналом расположен металлический затвор Шоттки с достаточной работой выхода (предполагается никелевый).

Гексагональная структура кристаллической решетки GaN приводит к эффектам внутренней поляризации в материале и появлению внутреннего электрического поля [3]. Эти эффекты учитываются в модели путем введения в нее 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 каналного 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 $9,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Значение этой же физической величины, получаемое путем интегрирования, равно $7,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, что можно считать хорошим соответствием экспериментальному результату.

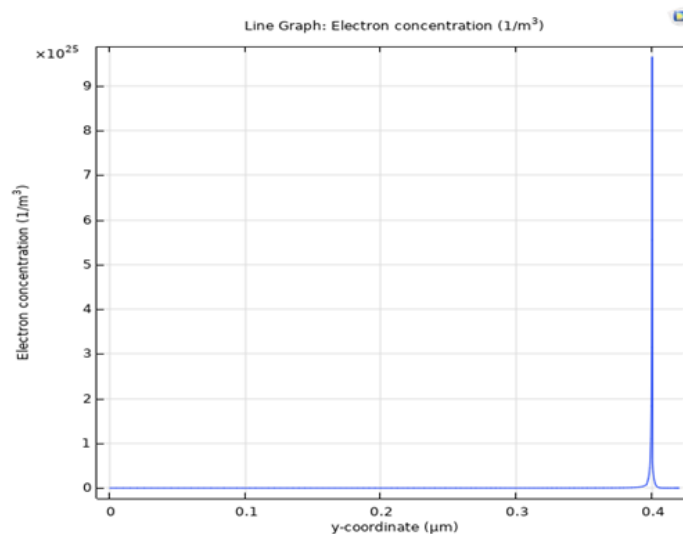


Рисунок 3. Распределение плотности свободных электронов по вертикальной координате

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

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 %.

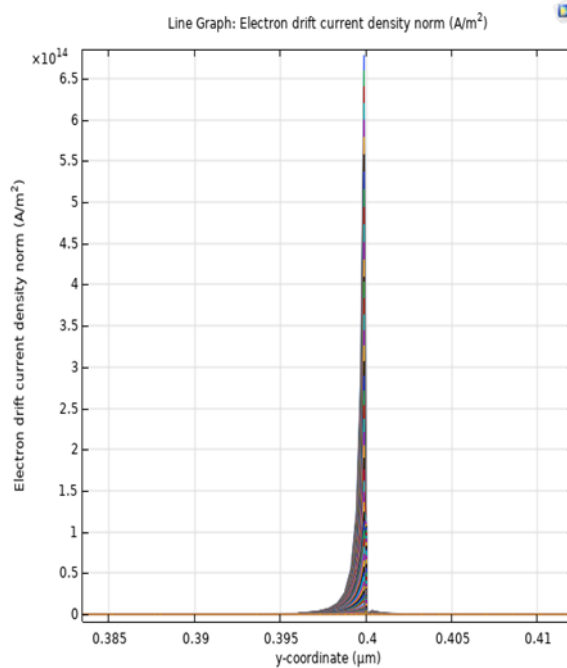


Рисунок 4. Распределение плотности канального тока по вертикальной координате

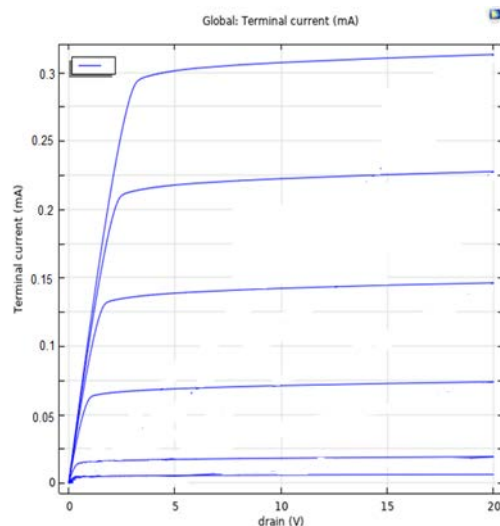


Рисунок 5. Графики семейства выходных ВАХ, рассчитанных компьютерной моделью

Модуль «Полупроводники» программного обеспечения COMSOL Multiphysics содержит мини модели контактов металла с полупроводником, что избавляет исследователей от специального их моделирования. Используются два типа контактов: невыпрямляющие контакты для истока и стока, а также контакт Шоттки – для затвора. Отметим, что 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 AlGa_{0.3}N.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная компьютерная модель гетеропереходного полевого транзистора на основе соединения AlGa_{0.3}N дает результаты, близкие к экспериментальным данным, что позволяет оптимизировать изготовление таких приборов по параметрам размеров и изучить влияние легирования областей структуры на некоторые физические характеристики. Применение моделирования на этапе подготовки опытных образцов, элементной базы электроники, является эффективным как в области фундаментальных, так и прикладных исследований. Моделирование и оптимизация играют существенную роль в физике и технологиях при создании новых материалов, гетероструктур, электронных устройств на их основе [5].

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования проводятся при выполнении НИР «Моделирование физических процессов в p-i-n и Шоттки диодах и транзисторах на основе гетероструктур AlGa_{0.3}N», по заданию 2.1 «Разработка и исследование технологий роста нитридных гетероструктур, технологий изготовления компонентов и устройств опто-, СВЧ- и силовой электроники на основе полупроводниковых материалов и структур» в рамках ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограммы «Опто- и СВЧ- электроника» на 2021-2025 годы. Финансирование осуществляет Министерство образования Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Электроника на основе нитрида галлия / Р. Куэй: пер. с англ. под ред. А. Г. Васильева. – М.: Техносфера, 2011. 592 с.
- [2] Design and analysis of 10 nm T-gate enhancement-mode MOS-HEMT for high power microwave applications. / T. Zine-eddine [et al.] // J. of Sci.: Adv. Mater. Devices. 2019. № 4. P. 180–187.
- [3] Исследование поляризаций нитридных соединений (Al, Ga, AlGa)_{0.3}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 AlGa_{0.3}N гетеропереходного полевого транзистора / Н. Н. Ворсин [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. 2023. № 1 (130). С. 76–82.
- [5] Vorsin, N. Modeling AlGa_{0.3}N p-i-n photodiodes / N. Vorsin, A. Gladyschuk, T. Kushner [et al.] // Doklady BGUIR.. – Vol. 19, No 8. – 2021. – С. 50–57.

MODELING AlGa_{0.3}N HETEROJUNCTION FIELD-EFFECT TRANSISTOR

N. Vorsin, A. Gladyschuk, T. Kushner, N. Tarasiuk, S. Chugunov

Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus, phys@bstu.by

Abstract: AlGa_{0.3}N 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 Al_xGa_{1-x}N was developed using the COMSOL Multiphysics software, including its CVC and other parameters.

Keywords: Heterojunction field-effect transistor, gallium nitride, aluminum nitride, diffusion-drift model, electron density gradient, polarization, current-voltage characteristic.