МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОГО ИСХОДНО ОТКРЫТОГО ГЕТЕРОПЕРЕХОДНОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Н. Н. Ворсин¹, А. А. Гладыщук¹, Т. Л. Кушнер¹, Н. П. Тарасюк¹, С. В. Чугунов¹, Э. В. Чугунова²

 Брестский государственный технический университет, ул. Московская, 267, 224017, Брест, Беларусь, e-mail: phys@bstu.by
ГУО «Брестский областной лицей имени П.М.Машерова», пр. Машерова, 25, 224030, Брест, Беларусь, e-mail: mail@brestobllicey.by

Гетеропереходные полевые транзисторы (ГПТ) (в англоязычной литературе – HEMT) на основе нитрида галлия обладают хорошими характеристиками, недостижимыми в кремниевых приборах [1]. Широкая запрещённая зона GaN – 3,4 эВ позволяет устройствам работать при высоких температурах, кроме того, GaN имеет высокое значение напряжённости поля пробоя 3,3 MB/см, что на порядок больше этого параметра в Si и позволяет создавать высоковольтные приборы. Гетеропереход на границе AlGaN/GaN создаёт двумерный электронный газ (ДЭГ) высокой плотности, порядка 10^{13} см⁻². Подвижность электронов, образующих ДЭГ, весьма высока. Благодаря этим качествам ГПТ на основе AlGaN/GaN обладают низким сопротивлением канала, высокой плотностью тока в нем, что необходимо для создание мощных высокоскоростных приборов [2]. В настоящей работе описана созданная компьютерная модель ГПТ AlGaN/GaN с простым плоским затвором и размерами, использованными в опытном производстве.

Ключевые слова: гетеропереход; транзистор; компьютерная модель.

MODELING OF A POWERFUL INITIALLY OPEN HETEROJUNCTION FIELD-EFFECT TRANSISTOR BASED ON GALLIUM NITRIDE

N. N. Vorsin¹, A. A. Gladyshuk¹, T. L. Kushner¹, N. P. Tarasyuk¹, S. V. Chugunov¹, E. V. Chugunova

¹⁾ Brest State Technical University, Moskovskaya str. 267, 224017, Brest, Belarus ²⁾ SEI "Brest Regional Lyceum named after P.M. Masherov", Masherova str. 25, 224030 Brest, Belarus Corresponding author: N. N. Vorsin (phys@bstu.by)

Heterojunction Field-Effect Transistors (HEMT) based on gallium nitride have good characteristics unattainable in silicon devices [1]. The wide band gap of GaN – 3.4 eV allows the devices to operate at high temperatures, in addition, GaN has a high value of the breakdown field strength of 3.3 MV/cm, which is an order of magnitude greater than this parameter in Si and allows creating high-voltage devices. The heterojunction at the Al-GaN/GaN boundary creates a two-dimensional electron gas (2 DEG) of high density, about 10^{13} cm⁻². The mobility of electrons forming the 2 DEG is very high. Due to these qualities, HEMT based on AlGaN/GaN have low channel resistance, high current density in it, which is necessary for creating powerful high-speed devices [2]. In this paper, a computer model of an AlGaN/GaN HEMT with a simple flat gate and dimensions used in pilot production is described.

Key words: heterojunction; transistor; computer model.

введение



Рис. 2. Цветовая картина распрямления электронной плотности у правого края затвора

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 верхней его части. обусловленных рассогласованием в нижней части его решётки с решёткой подложки. Сверху на канальный слой нанесён барьерный слой AlGaN толщиной 0,02 мкм. На рисунке 1 канальный слой – жёлтый, барьерный – красный, но его почти не заметно. На рисунке 2 все показано в увеличенном виде 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 представлением концентрации свободных электронов этот слой окрашен в темнокрасный цвет. Над каналом расположен металлический затвор Шоттки с достаточной работой выхода (предполагается Ni).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основой моделирования процессов в ГПТ является дрейф-диффузионное их описание, которое вполне приемлемо для данных размеров структуры. Однако в тонкой области ДЭГ необходим учёт квантовых эффектов, что сделано применением к этой области метода градиента электронной плотности.

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 рассчитывается модуль вектора собственной и пьезоэлектрической поляризации, затем в модель вводится соответствующий поверхностный заряд.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования представлены ниже в виде графиков важных зависимостей. На рисунке 3 показана зависимость концентрации свободных электронов от вертикальной координаты. Видно, на вершине канального слоя имеет резкий пик, соответствующий наличию там ДЭГ. Если проинтегрировать распределение плотности свободных электронов по всей высоте структуры, то получим т.н. листовую плотность электронного газа. Эта величина легко измеряется, и ее экспериментальное значение составляет 9×10^{12} см⁻². Получаемое путём интегрирования значение равной $7,3 \times 10^{12}$ см⁻², что можно считать хорошим соответствием измерению.

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



свободных электронов по вертикальной координате



Рис. 5. Графики семейства выходных ВАХ, рассчитанных моделью

Вольтамперные характеристики транзистора являются легко измеряемыми и позволяют оценить точность моделирования. На рисунке 5 представлены графики т.н. выходных ВАХ, выдаваемых моделью. Форма кривых типична для транзисторов, величины стокового тока несколько отличаются от полученных экспериментально, однако. погрешность не превышает 20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная компьютерная модель мощного нитридного ГПТ даёт близкие к экспериментальным результаты и позволяет оптимизировать изготовление таких приборов по параметрам размеров и легирования областей. Мультифизичность использованной для моделирования среды COMSOL Multiphysics должна позволить получать на основе созданной модели электрические, тепловые и др. характеристики ГПТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. Куэй, Р. Электроника на основе нитрида галлия / Р. Куэй. М.: Техносфера, 2011. 592 с.
- Zine-eddine, 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. Sci. Adv. Mater. Devices. – 2019. – Vol. 4(1). –P. 180–187.
- Супрядкина, И.А. Исследование поляризаций нитридных соединений (Al,Ga,AlGa)N и зарядовой плотности различных интерфейсов на их основе / И.А. Супрядкина [и др.] // ФТП. 2013. – Т. 47, № 12. – С. 1647–1652.