

## ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ GaN ДЛЯ СИЛОВЫХ И СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ

А. Д. Юник<sup>1</sup>, к. т. н. Я. А. Соловьёв<sup>1</sup>, к. ф.-м. н. Е. В. Луценко<sup>2</sup>,  
к. ф.-м. н. Н. В. Ржеуцкий<sup>2</sup>, А. А. Павлючик<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»;

<sup>2</sup>Государственное научное учреждение «Институт физики имени Б. И. Степанова  
Национальной академии наук Беларуси»;

<sup>3</sup>ОАО «Минский НИИ Радиоматериалов»

Республика Беларусь, г. Минск

AYunik@integral.by

*Представлены результаты исследований по созданию гетероструктур AlGaIn/GaN методом молекулярно-пучковой эпитаксии для транзисторов с высокой подвижностью электронов на подложках сапфира и карбида кремния. Подвижность электронного газа полученных гетероструктур составила  $2000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  при концентрации  $1,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , а слоевое сопротивление  $230\text{--}270 \text{ Ом/кв}$ , что позволило изготовить на их основе транзисторы с максимальной плотностью тока стока более  $1 \text{ А/мм}$ , максимальной крутизной около  $160 \text{ мСм/мм}$ , частотами  $F_t \approx 10,5 \text{ ГГц}$  и  $F_{\text{max}} \approx 21,7 \text{ ГГц}$ .*

*Ключевые слова: гетероструктура AlGaIn/GaN; молекулярно-пучковая эпитаксия; транзистор с высокой подвижностью электронов.*

Уникальные свойства нитридов, такие как большая ширина запрещенной зоны, высокая электрическая прочность, высокая скорость насыщения электронов, обуславливают перспективы их применения в следующем поколении электроники. Образующаяся на гетерогранице AlGaIn/GaN область двумерного электронного газа позволяет создавать транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT). Растущие требования к снижению энергопотребления и уменьшению габаритов электронной аппаратуры обуславливают актуальность использования таких транзисторов в новом поколении силовой электроники. Силовые AlGaIn-транзисторы с двумерным электронным газом являются одним из самых перспективных классов приборов, способных заменить мощные кремниевые полевые транзисторы в компактных импульсных источниках питания, DC–DC- и AC–DC-преобразователях, "умных" сетях электропитания, электроприводах и т.д. На базе AlGaIn/GaN-гетероструктур также могут быть созданы мощные СВЧ-транзисторы, что проблематично для гетероструктур на основе GaAs, стандартно использующихся в твердотельной СВЧ-электронике. Нитридные транзисторы с двумерным электронным газом находят наиболее широкое применение в аэрокосмических системах СВЧ-связи и радаров, системах радиоэлектронной борьбы и т.д.

В настоящий момент в области нитридных технологий основная борьба идет за увеличение удельной мощности и, как следствие, мощности СВЧ-устройств. Основным сдерживающим фактором при этом является отведение тепла от локальной области разогрева под затвором. При этом увеличение напряжения может привести и к увеличению мощности транзисторов. Для этого необходимо обеспечить выращивание нитридных слоев с высоким пробивным напряжением без посторонних примесей. В этом случае аммиачная молекулярно-пучковая эпитаксия (МВЕ) имеет преимущество перед стандартной технологией газофазного осаждения из металлоорганических соединений (MOCVD), а значит, для силовых и СВЧ-транзисторов большой мощности наиболее подходящими являются транзисторные гетероструктуры, выращенные на подложках SiC аммиачной МВЕ. Однако для силовой электроники с мощностью до  $100\text{--}300 \text{ Вт}$  также подойдут дешевые высококачественные гетероструктуры GaN на подложках сапфира.

Целью данной работы являлось создание технологии выращивания транзисторных гетероструктур на основе AlGaIn/GaN с помощью аммиачной молекулярно-пучковой эпитаксии с улучшенными характеристиками для последующего создания на их основе пригодных силовых и СВЧ-транзисторов с высокой подвижностью электронов.

Формирование гетероструктур проводилось на подложках сапфира (0001) и карбида кремния диаметром 50,8 мм с разориентацией поверхности  $0,2^\circ$  в реакторе STE3N2 (SemTEq) в режиме  $\text{NH}_3$  МВЕ. Характеристики двумерного электронного газа полученных гетероструктур контролировались с помощью системы бесконтактного измерения подвижности носителей заряда (LEI).

Гетероструктуры, полученные на подложках из сапфира, имели следующий состав:  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{AlN}$  (800 нм) /  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$  (280 нм) /  $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$  (420 нм) / GaN (200 нм) / AlN (1 нм) /  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$  (25 нм); на подложках карбида кремния: SiC / AlN (400 нм) /  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$  (300 нм) /  $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$  (800 нм) / GaN (200 нм) / AlN (1 нм) /  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$  (25 нм).

На подложках сапфира были выращены транзисторные гетероструктуры AlGaN/GaN со свойствами электронного газа, приближающиеся к свойствам гетероструктур на подложках карбида кремния. По результатам замера подвижность электронного газа полученных структур составила  $2000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  при концентрации  $1,2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , а слоевое сопротивление 260—270 Ом/кв [1, 2], что соответствует уровню лучших мировых аналогов [3].

Перенос данной технологии выращивания на подложки карбида кремния позволил создать транзисторные гетероструктуры с двумерным электронным газом со слоевым сопротивлением 230 Ом/кв, подвижностью электронного газа более  $2000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  при концентрации  $> 1,3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , что также соответствует мировому уровню [3].

На основе гетероструктур AlGaN/GaN, выращенных на подложках сапфира и SiC, была изготовлена структура нормально-открытого полевого транзистора с затвором Шоттки. Для формирования омических контактов использовалась последовательность металлических слоев Ti/Al/Ni/Au, а для затвора Шоттки — Ni/Au. Расстояние исток-сток составило 6 мкм, длина затвора 2 мкм, ширина затвора 100 мкм.

В результате измерений статических электрических характеристик изготовленного транзистора были получены следующие значения: максимальная плотность тока стока более 1 А/мм, максимальная крутизна около 160 мСм/мм, граничная частота  $F_t \approx 10,5$  ГГц, максимальная частота усиления мощности  $F_{\text{max}} \approx 21,7$  ГГц. Очевидно, что полученные характеристики не являются лучшими для данного класса гетероструктур, однако они позволяют говорить о возможности изготовления работоспособных приборов высокого качества.

Таким образом, с помощью аммиачной молекулярно-пучковой эпитаксии были сформированы гетероструктуры AlGaN/GaN на подложках сапфира и карбида кремния для СВЧ- и силовых транзисторов с высокой подвижностью электронов со свойствами электронного газа на уровне лучших мировых аналогов, что позволило изготовить на основе данных структур транзисторы высокого качества.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Lutsenko E.V., Rzhetski M.V. et al. Investigation of photoluminescence, stimulated emission, photoreflectance and 2DEG properties of double heterojunction AlGaN/GaN/AlGaN HEMT heterostructures grown by ammonia MBE. *Phys. Stat. Sol. A*. 2018, vol. 215, iss. 9, 1700602.
2. Alyamani A., Lutsenko E.V. et al. AlGaN/GaN high electron mobility transistor heterostructures grown by ammonia and combined plasma-assisted ammonia molecular beam epitaxy. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, N 58, SC1010.
3. Arendarenko A.A., Oreshkin V.A., Sveshnikov Y.N., Tsyplenkov I.N. Trends in the epitaxial nitride compounds technology. *Modern Electronic Materials*, 2016, N 2, p. 33-40.

A. D. Yunik, Ja. A. Solovjov, E. V. Lutsenko, M. V. Rzhetski, A. A. Pavlyuchik

#### GaN-based heterostructures for power and microwave high electron mobility transistors

*The paper presents the research results on the creation of AlGaN/GaN heterostructures by molecular beam epitaxy for high electron mobility transistors on sapphire and silicon carbide substrates. Electron gas mobility of the obtained heterostructures was  $2000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  at the density of  $1,2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , and the layer resistance was 230—270 Ohm/sq, which made it possible to produce transistors with a maximum drain current density more than 1 A/mm, a maximum slope about 160 mS/mm, and frequencies  $F_t \approx 10,5$  GHz and  $F_{\text{max}} \approx 21,7$  GHz.*

*Keywords: AlGaN/GaN heterostructure; molecular-beam epitaxy, high electron mobility transistor.*