

ФОРМИРОВАНИЕ ALGAN/GAN ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ СИЛОВОЙ И СВЧ ЭЛЕКТРОНИКИ С ПОМОЩЬЮ АММИАЧНОЙ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ

Юник А.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Соловьёв Я.А. – канд. техн. наук, доцент

Аннотация. В докладе представлены результаты в создании гетероструктур AlGa_N/Ga_N молекулярно-пучковой эпитаксией для транзисторов с высокой подвижностью электронов на подложках сапфира и карбида кремния. Подвижность электронного газа полученных гетероструктур составила ~ 2000 см²/В·с при концентрации ~ 1.2-1.3·10¹³ см⁻², а слоевое сопротивление – 230-270 Ом/кв, что позволило изготовить на их основе транзисторы с максимальной плотностью тока стока более 1 А/мм, максимальной крутизной около 160 мСм/мм, частотами F₁ ~ 8,4 ГГц и F_{max} ~ 15,8 ГГц.

Ключевые слова: гетероструктура AlGa_N/Ga_N, молекулярно-пучковая эпитаксия, транзистор с высокой подвижностью электронов, двумерный электронный газ.

Введение. 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 AlGa_N/Ga_N область двумерного электронного газа (2DEG) 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 AlGa_N-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 AlGa_N/Ga_N гетероструктур возможно также создание мощных СВЧ транзисторов, 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 является отведение тепла от локальной области разогрева под затвором. При этом увеличение напряжения может привести и к увеличению мощности транзисторов. Для этого необходимо обеспечить рост нитридных слоев с высокими пробивными напряжениями без посторонних примесей. В этом случае аммиачная молекулярно-пучковая эпитаксия (МВЕ) имеет преимущество перед стандартной технологией газофазного осаждения из металлоорганических соединений (MOCVD). В этой связи для больших мощностей силовых и СВЧ транзисторов наиболее подходящими являются транзисторные гетероструктуры, выращенные на подложках SiC аммиачной МВЕ. Однако для силовой электроники с мощностью до 100 - 300 Вт также подойдут дешевые высококачественные гетероструктуры Ga_N на подложках сапфира.

Целью данной работы являлось создание технологии роста транзисторных гетероструктур на основе AlGa_N/Ga_N с помощью аммиачной молекулярно-пучковой

эпитаксии с улучшенными характеристиками для последующего создания на их основе пригодных силовых и СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов.

Основная часть. Формирование гетероструктур проводилось на подложках сапфира (0001) и карбида кремния диаметром 50,8 мм с разориентацией поверхности $0,2^\circ$ в реакторе STE3N2 (SemiTEq) аммиачной молекулярно-пучковой эпитаксией. Детали высокотемпературного роста гетероструктур описаны в [1, 2]. Характеристики двумерного электронного газа полученных гетероструктур контролировались с помощью системы бесконтактного измерения подвижности носителей заряда (LEI).

Гетероструктуры, полученные на подложках из сапфира имели дизайн, представленный на рисунке 1: Al_2O_3 / 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).



Рисунок 1 – Дизайн гетероструктуры на подложке из сапфира

Гетероструктуры, полученные на подложках из карбида кремния имели дизайн, представленный на рисунке 2: 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).



Рисунок 2 – Дизайн гетероструктуры на подложке из карбида кремния

На подложках сапфира были выращены транзисторные гетероструктуры AlGaIn/GaN со свойствами электронного газа, приближающиеся к свойствам гетероструктур, на подложках карбида кремния. По результатам измерений подвижность электронного газа гетероструктур составила $\sim 2000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при концентрации $\sim 1,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, слоиое сопротивление – 260-270 Ом/кв [1, 2], что соответствует уровню лучших мировых аналогов [3].

Перенос данной технологии роста на подложки карбида кремния позволил создать транзисторные гетероструктуры с двумерным электронным газом со слоевым сопротивлением 230 Ом/кв, подвижностью электронного газа более 2000 см²/В·с при концентрации более 1.3·10¹³ см⁻², что также соответствует мировому уровню [3].

На основе гетероструктур AlGaIn/GaN, выращенных на подложках 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. Получено сопротивление омических контактов порядка 2-4·10⁻⁵ Ом·см². Расстояние исток-сток составило 6 мкм, длина затвора – 2 мкм, ширина затвора – 50 мкм.

Результаты измерения статических электрических характеристик изготовленного транзистора показали значения максимальной плотности тока стока более 1 А/мм, максимальной крутизны – около 160 мСм/мм и частот F_t ~8,4 ГГц, F_{max} ~ 15,8 ГГц. Полученные характеристики позволяют говорить о возможности изготовления работоспособных приборов высокого качества.

Заключение. Таким образом, с помощью аммиачной молекулярно-пучковой эпитаксии были сформированы гетероструктуры AlGaIn/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 (подвижность двумерного электронного газа ~ 2000 см²/В·с при концентрации ~1.2 - 1.3·10¹³ см⁻², слоевое сопротивление – 230-270 Ом/кв), что позволило изготовить на их основе транзисторы с максимальной плотностью тока стока более 1 А/мм, максимальной крутизной около 160 мСм/мм, частотами F_t ~ 8,4 ГГц и F_{max} ~ 15,8 ГГц для длины затвора 2 мкм.

Список литературы

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

UDC 621.382

FORMATION OF AlGaIn/GaN HETEROSTRUCTURES FOR POWER AND MICROWAVE ELECTRONICS USING AMMONIA MOLECULAR-BEAM EPITAXY

Yunik A.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Solovjov Ya.A. – PhD, associate professor

Annotation. The report presents the results in the creation of AlGaIn/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 cm²/V·s at density of ~ 1.2 - 1.3·10¹³ cm⁻², and the layer resistance was 230-270 Ohm/ sq, which made possible to fabricate transistors with maximum drain current density more than 1 A/mm, maximum slope about 160 mS / mm, frequencies F_t ~ 8.4 GHz and F_{max} ~ 15.8 GHz.

Keywords. AlGaIn /GaN heterostructure, molecular-beam epitaxy, high electron mobility transistor, two-dimensional electron gas.