

Слои GaN с пониженной плотностью дислокаций для НЕМТ транзисторов, выращенные NH₃-МВЕ с использованием высокотемпературных буферных слоев AlN/AlGaN

С. И. Петров^{1,*}, А. Н. Алексеев¹, Д. М. Красовицкий², В. П. Чалый², В. Г. Сидоров³, В. В. Мамаев^{1,3}
 ЗАО «НТО», Россия, 194156, Санкт-Петербург, Пр. Энгельса, 27
 ЗАО «Светлана-Рост», Россия, 194156, Санкт-Петербург, Пр. Энгельса, 27
 Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
 Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 (Статья поступила 21.09.2013; Подписана в печать 23.04.2014)

Использование многослойного буферного слоя, включающего слой AlN, выращенный при температуре более 1150 °С, позволило понизить плотность дислокаций в слое GaN на 1,5–2 порядка до значений $9 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ по сравнению с аналогичным слоем GaN, выращенным на тонком низкотемпературном зародышевом слое AlN. Уменьшение плотности дислокаций привело к увеличению подвижности электронов в слоях GaN до 600–650 см²/В·с, что согласуется с данными расчетов и свидетельствует о высоком кристаллическом совершенстве полученных слоев.

PACS: 55.Eq, 74.78.Fk, 81.15.-z, 81.16.-c УДК: 621.315.592

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, гетероструктуры GaN/AlGaN, плотность дислокаций, подвижность, НЕМТ.

ВВЕДЕНИЕ

Нитриды металлов третьей группы являются перспективными материалами для различных применений. Это обусловлено их прямозонной структурой и тем, что ширина запрещенной зоны этих материалов перекрывает весь видимый и значительную часть ультрафиолетового диапазона, что позволяет создавать на их основе оптоэлектронные приборы, работающие в указанных диапазонах. Кроме того, сильные поляризонные эффекты, высокая термическая и радиационная стойкость, высокие пробивные поля делают эти материалы привлекательными в высокотемпературной сильноточной электронике. Основными приложениями, которые определяют направления исследований условий выращивания и свойств нитридов металлов третьей группы, являются оптоэлектронные приборы видимого и ультрафиолетового диапазонов, а также мощные и малощумящие полевые транзисторы, работающие на сверхвысоких частотах. Несмотря на успехи при создании приборов, в технологии нитридов до сих пор остаются «узкие места», требующие ее постоянного развития. Высокие цены на «темплеты», изготовленные методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОГФЭ) или по технологии ELOG (наращивание слоя нитрида галлия в окнах маски из двуокиси кремния), а также высокие цены на недавно появившиеся подложки из объемного GaN приводят к необходимости с целью снижения стоимости приборов выращивать данные материалы на подложках, рассогласованных по параметрам решеток и коэффициентам термического расширения. Это приводит к высокой плотности дислокаций в выращенных

структурах и, как следствие, к низкому качеству приборов. Поэтому снижение плотности дислокаций в III-N гетероструктурах при выращивании их на инородных подложках остается одной из основных технологических проблем при разработке дешевых технологий создания приборов на основе материалов III-N.

Основными методами выращивания приборных III-N гетероструктур являются метод МОГФЭ и молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). Метод МЛЭ по сравнению с МОГФЭ имеет ряд достоинств, так как допускает диагностику роста *in situ* при помощи отражательной дифракции быстрых электронов (ОДБЭ), позволяет получать более резкие гетерограницы, обеспечивает более высокую чистоту камеры роста и возможность совмещения с другими вакуумными ростовыми и исследовательскими камерами. Но плотность дислокаций в слоях, полученных этим методом, на 1–2 порядка выше по сравнению с МОГФЭ; это связано с принципиально меньшей температурой роста, увеличение которой ограничено термическим разложением материала растущего слоя и недостаточно высоким отношением потоков элементов пятой и третьей группы (V/III). Низкие температуры роста приводят к недостаточной поверхностной подвижности атомов и худшему сращиванию зародышевых блоков на начальной стадии роста, что является причиной увеличения плотности дислокаций в слоях нитрида галлия до $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и более низким значениям подвижности электронов (250–490 см²/(В·с) при концентрации $(3-8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [1]), по сравнению с подвижностью электронов в слоях, выращенных методом МОГФЭ (500–700 см²/(В·с) при концентрации $(6-8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [2]). Приведенные значения подвижности являются типичными при комнатной температуре в слоях GaN, выращенных на инородных подложках (сапфир или SiC) с использованием различных буферных слоев (GaN, AlGaN или AlN). Для

*E-mail: petrov@semiteq.ru

сравнения отметим, что абсолютно рекордные значения подвижности электронов в слоях нитрида галлия, выращенных методом МЛЭ, составляют $936 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ для «темплейтов» МОГФЭ и $1150 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (концентрация электронов $(9\text{--}20)\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) для «темплейтов» ELOG [3].

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Цель настоящей работы состояла в выращивании кристаллически-совершенных слоев нитрида галлия с пониженной плотностью дислокаций и высокой подвижностью электронов методом МЛЭ на инородных подложках с использованием аммиака в качестве источника активного азота, а также в снижении стоимости гетероструктур для изготовления СВЧ полевых транзисторов.

Слои нитрида галлия и многослойные гетероструктуры выращивались на подложках сапфира ориентации (0001) в Прикладной лаборатории ЗАО «Научное и технологическое оборудование» («НТО») в Санкт-Петербурге на отечественной установке МЛЭ STE3N, разработанной и изготовленной в указанном ЗАО. Уникальные особенности данной установки — расширенные диапазоны температуры подложки и соотношения потоков элементов V/III. Благодаря модернизации узла нагрева образца, криопанелям увеличенной площади и усиленной системе откачки, в ростовой камере обеспечивался вакуум не хуже $5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ при температурах подложки до 1200°C и потоках аммиака до $400 \text{ см}^3/\text{мин}$, что позволило заметно улучшить свойства слоев GaN, AlN и многослойных гетероструктур AlN/AlGaIn/GaN для изготовления СВЧ-транзисторов. В качестве основного инструмента для контроля *in situ* скорости роста и состояния ростовой поверхности использовалась лазерная интерферометрия, а на начальных стадиях роста применялся метод ОДБЭ. Свойства выращенных структур исследовались методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Подвижность и концентрация электронов измерялись методом Ван-дер-Пау.

Поскольку термическое разложение AlN происходит при более высоких температурах, чем разложение GaN, было предложено выращивать на начальном этапе относительно «толстый» (более 100 нм) буферный слой AlN при максимальной высокой температуре с целью обеспечения повышенной поверхностной подвижности атомов, улучшения сращивания зародышевых блоков и снижения плотности дислокаций. На следующем этапе в качестве переходных слоев между буферным слоем AlN и слоем GaN было предложено использовать выращивание сверхрешетки AlN/AlGaIn и градиентного слоя AlGaIn для снижения внутренних механических напряжений и компенсации рассогласования параметров решеток.

В результате оптимизации ростового процесса буферный слой AlN толщиной более 200 нм выращи-

вался при температурах $1100\text{--}1150^\circ\text{C}$, а сверхрешетка и градиентный слой при температурах $900\text{--}920^\circ\text{C}$, что привело к улучшению свойств всей многослойной гетероструктуры AlN/AlGaIn/GaN и слоя GaN в частности. На рис. 1 представлено полученное с помощью просвечивающего растрового электронного микроскопа (ПРЭМ) изображение гетероструктуры, состоящей из слоев AlN, сверхрешетки AlN/AlGaIn, градиентного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ со значениями x от 0,3 до 0,1 и слоя GaN. Измерена полная плотность дислокаций различного типа в слоях гетероструктуры $(2\text{--}4)\cdot 10^{10}$, $(4\text{--}6)\cdot 10^9$ и $(8\text{--}10)\cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ для слоев AlN, AlGaIn и GaN, соответственно. Для сравнения следует отметить, что плотность дислокаций в слоях GaN, выращенных при температуре менее 900°C на традиционно используемом тонком (10–20 нм) буферном слое AlN, составляла $(7\text{--}9)\cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

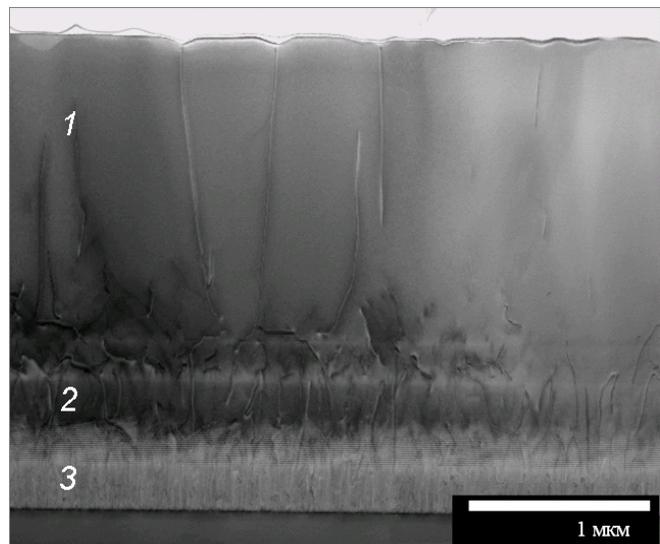


Рис. 1: Изображение скола многослойной гетероструктуры AlN/AlGaIn/GaN полученное с помощью просвечивающего растрового электронного микроскопа; указаны слои и полные плотности дислокаций: 1 — GaN; $8\text{--}10\cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$; 2 — AlGaIn; $4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$; 3 — AlN; $2\text{--}4\cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$

В слое GaN выращенной гетероструктуры при помощи ПЭМ была отдельно определена плотность дислокаций различного типа. Направление (0002) было использовано для определения винтовых и смешанных дислокаций, а направление $(\bar{1}2\bar{1}0)$ для определения краевых и смешанных дислокаций. При этом получены значения $2\cdot 10^8$, $4\cdot 10^8$ и $4\cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ для винтовых, краевых и смешанных дислокаций, соответственно (рис. 2).

На рис. 3 представлены результаты электрических измерений для гетероструктур, выращенных предложенным методом. Из анализа рисунка следует, что теоретическое значение максимально достижимой подвижности электронов растет при уменьшении плотности дислокаций. Полученный экспериментальный результат для подвижности электронов и плотности дислокаций в исследованных слоях нитрида галлия под-

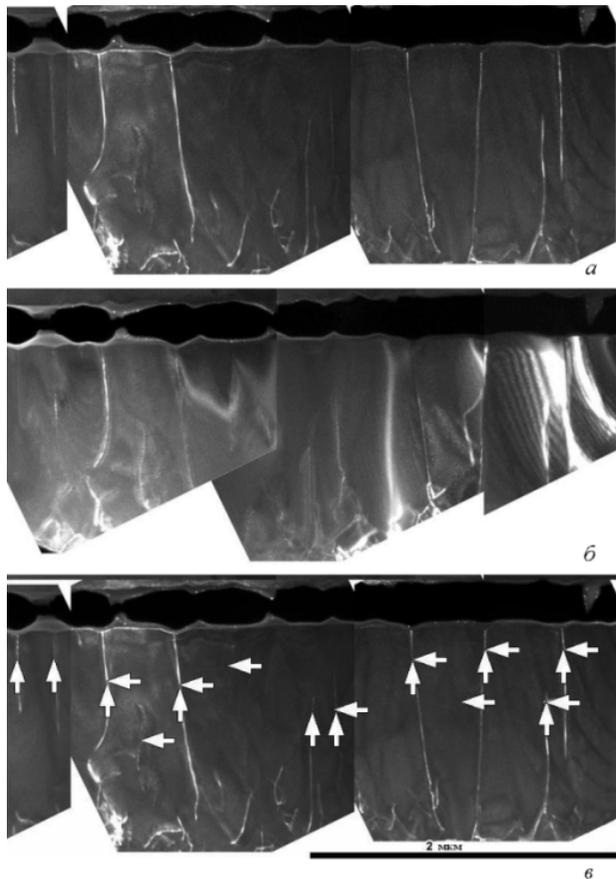


Рис. 2: ПЭМ изображение гетероструктуры AlN/AlGaIn/GaN в двух направлениях — (0002)(а) и (1-2 10)(б), а также в совмещенном виде (в); показаны винтовые и краевые дислокации (вертикальные и горизонтальные стрелки соответственно)

тверждает правильность предположения авторов статьи [5], что рассеяние электронов при их концентрации менее $(3-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ определяется заряженными дислокациями.

Уменьшение плотности дислокаций в слоях до уровня $(8-10) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ привело к увеличению подвижности электронов в слаболегированных кремнием сло-

ях нитрида галлия до $600-650 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при концентрациях электронов $(3-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что подтверждает высокое кристаллическое совершенство слоев, выращенных по предложенной в данной работе технологии, и демонстрирует возможности установки МЛЭ STE3N, созданной в ЗАО «НТО». Предложенная технология позволила получать методом МЛЭ слои нитрида галлия с электрическими параметрами, сравнимыми с лучшими достижениями для этих слоев, выращенных методом МОГФЭ. Действительно, полученные значения плотности дислокаций и подвижности электронов в слоях нитрида галлия встают в один ряд с лучшими мировыми значениями для метода МЛЭ и соответствуют хорошему уровню для таких слоев, выращенных методом МОГФЭ.

Шероховатость поверхности полученных слоев GaN, измеренная с помощью АСМ, также соответствует лучшим значениям для слоев, выращенных методом МЛЭ на сапфире (1-2 нм).

Выращенные гетероструктуры были использованы для изготовления транзисторных структур с двумерным электронным газом. Транзисторы, созданные на их основе в ЗАО «Светлана-Рост», продемонстрировали рабочие параметры мирового уровня [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведено исследование влияния условий выращивания и конструкции буферного слоя на свойства слоев и гетероструктур в системе GaN-AlN. В результате использования многослойного буферного слоя, включающего высокотемпературный слой AlN (температура роста более $1100 \text{ }^\circ\text{C}$), плотность дислокаций в слое GaN была понижена на 1,5-2 порядка до значений $(8-10) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ по сравнению с таковой в аналогичном слое GaN, выращенном на тонком низкотемпературном зародышевом слое AlN. Уменьшение плотности дислокаций привело к увеличению подвижности электронов в слоях GaN до $600-650 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, что свидетельствует о высоком кристаллическом совершенстве полученных слоев.

[1] Webb J. B., Tang H., Bardwell J. A., Moisa S., Peters C., MacElwee T. J. of Cr. Gr. **230**. P. 584. (2001).
 [2] Nakamura S., Mukai T., Senoh M. J. Appl. Phys. **71**. P. 5543. (1992).
 [3] Koblmüller G., Wu F., Mates T., Speck J. S., Fernández-Garrido S., Calleja E. Appl. Phys. Lett. **91**. P. 221905-1. (2007).
 [4] Akasaki I., Amano H. Jpn. J. Appl. Phys. **45**. P. 9001.

(2006).
 [5] Ng Hock M., Doppalapudi Dharanipal, Moustakas T. D., Weimann N. G., Eastman L. F. Appl. Phys. Lett. **73**. P. 821. (1998).
 [6] Алексеев А., Красовицкий Д., Петров С., Чалый В. Наноиндустрия. № 1. С. 20. (2011).

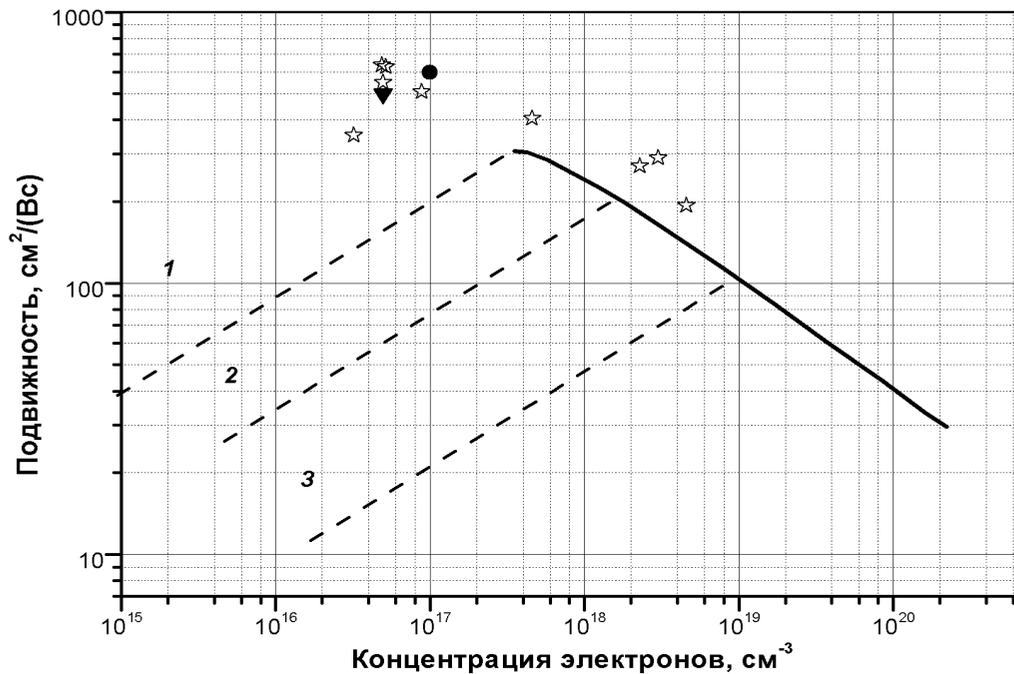


Рис. 3: Сравнение экспериментальной зависимости (звездочки) холловской подвижности электронов от их концентрации в слоях GaN легированных Si с рекордными опубликованными данными [1, 4] и теоретическими (линии) зависимостями работы [5] для различных значений плотности дислокаций, см^{-2} : $8 \cdot 10^9$ (1), $2 \cdot 10^{10}$ (2), $7 \cdot 10^{10}$ (3). Толщина слоев GaN — 1,5 мкм, метод выращивания — МЛЭ; Приведены значения подвижности для метода МЛЭ [1] (треугольник) и МОГФЭ [4] (круг)

Low dislocations density GaN layers for HEMT transistors, grown by NH_3 -MBE using a high temperature buffer layer AlN / AlGaN

S. I. Petrov^{1, a}, A. N. Alexeev¹, D. M. Krasovitsky², V. P. Chaly², V. V. Mamaev^{1,3}, V. G. Sidorov³

¹SemiTEq JSC Engels av., 27, building 5, Saint-Petersburg, 194156, Russia

²Svetlana-Rost JSC Engels av., 27, building 5, Saint-Petersburg, 194156, Russia

³St.Petersburg State Polytechnical University Polytechnicheskaya st., 29, Saint-Petersburg, 195251, Russia

E-mail: ^apetrov@semiteq.ru

The growth of «thick» (200 nm) AlN layers on sapphire at 1150 °C using STE3N MBE system is shown to be the key step to obtain high quality GaN-based heterostructures. An appropriate sequence of AlGaN transition layers grown on such an AlN both allows to reduce dislocation density in GaN down to $9 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ in comparison with GaN layers grown on «thin» (10 nm) low temperature AlN nucleation layer. Maximum electron mobility in 1.5 μm thick GaN silicon doped layer reaches 600–650 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ at electron concentrations $(3-5) \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

PACS:55.Eq, 74.78.Fk, 81.15.-z, 81.16.-c

Keywords: molecular beam epitaxy, heterostructures GaN/AlGaN, dislocation density, mobility, HEMT.

Received 21.09.2013.

Сведения об авторах

1. Петров Станислав Игоревич — канд. физ.-мат. наук, начальник прикладной лаборатории ЗАО «Научное и технологическое оборудование».
2. Алексеев Алексей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, генеральный директор ЗАО «Научное и технологическое оборудование».

3. Красовицкий Дмитрий Михайлович — канд. физ.-мат. наук, главный конструктор ЗАО «Светлана-Рост».
4. Чалый Виктор Петрович — канд. физ.-мат. наук, генеральный директор ЗАО «Светлана-Рост».
5. Мамаев Виктор Викторович — аспирант кафедры физики полупроводников и наноэлектроники радиофизического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; тел.: +7(960) 276-41-07 e-mail: vites88@mail.ru.
6. Сидоров Валерий Георгиевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники радиофизического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; тел.: (812) 552-9671.