

## Получение слоев GaN с пониженной плотностью дислокаций методом молекулярно-лучевой эпитаксии

© А.Н. Алексеев, Д.М. Красовицкий\*, С.И. Петров<sup>¶</sup>, В.П. Чалый\*

ЗАО „НТО“,  
194156 Санкт-Петербург, Россия  
\* ЗАО „Светлана-Рост“,  
194156 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 25 апреля 2012 г. Принята к печати 25 апреля 2012 г.)

Использование многослойного буферного слоя, включающего высокотемпературный слой AlN, выращенный при температуре более 1100°C, 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 выращиванием на тонком невысокотемпературном зародышевом слое AlN. Уменьшение плотности дислокаций привело к значительному увеличению подвижности электронов в слоях GaN, до значений  $600 - 650 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , что согласуется с данными расчетов и свидетельствует о высоком кристаллическом совершенстве полученных слоев.

### 1. Введение

Благодаря своим уникальным свойствам нитриды металлов третьей группы (III–N) весьма перспективны для создания различных полупроводниковых приборов. Ширина запрещенной зоны этих прямозонных полупроводников перекрывает весь видимый и значительную часть ультрафиолетового диапазона, что представляет базу для создания оптоэлектронных приборов в указанных областях спектра. Высокая термическая и радиационная стойкость, большие пробивные поля, ярко выраженные поляризационные эффекты делают эти материалы привлекательными в высокотемпературной сильноточной электронике. Однако технологические трудности получения нитридов металлов III группы долгое время препятствовали практической реализации всех преимуществ этих материалов, и лишь в последнее время наблюдается стремительный прогресс в технологии выращивания нитридов и изготовления приборов на их основе.

Одной из самых острых технологических проблем является отсутствие достаточно дешевых подложек для гомоэпитаксиального наращивания. Гетероэпитаксия нитридов на подложках из материалов, в той или иной мере рассогласованных по параметрам кристаллической решетки и коэффициентам термического расширения, несмотря на применение специальных процедур на начальных стадиях роста, приводит к достаточно высокой плотности дислокаций, что усложняет задачу получения приборных гетероструктур. Основными методами выращивания приборных гетероструктур из нитридов металлов III группы являются газофазная эпитаксия из металло-органических соединений (МОГФЭ) и молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). В методе МЛЭ условие сохранения высокого вакуума для обеспечения пролета частиц без столкновений (режима баллистического пролета) не позволяет увеличить отношение V/III до значений, сравнимых с МОГФЭ, и увеличение температуры роста ограничено термическим разложе-

нием материала. Вместе с тем метод МЛЭ обладает рядом достоинств по сравнению с МОГФЭ, а именно позволяет осуществлять *in situ* диагностику роста при помощи отражательной дифракции быстрых электронов (ОДБЭ, RHEED), получать более резкие гетерограницы, обеспечивает более высокую чистоту камеры роста и возможность совмещения с другими вакуумными ростовыми и исследовательскими камерами.

Таким образом, характерные температуры роста в МЛЭ значительно ниже по сравнению с МОГФЭ. Это приводит к недостаточной поверхностной подвижности атомов и худшему сращиванию зародышевых блоков на начальной стадии роста, что в свою очередь приводит к увеличению плотности дислокаций. Плотность дислокаций в GaN, выращенных методом МОГФЭ, находится в диапазоне  $10^8 - 10^9 \text{ см}^{-2}$  ( $10^7 \text{ см}^{-2}$  с использованием технологии ELOG), в то же время для МЛЭ это значение находится в диапазоне  $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , что приводит к меньшим значениям подвижности в GaN, выращенном методом МЛЭ, по сравнению с МОГФЭ. Типичные значения подвижности электронов в слоях GaN, выращенных методом МЛЭ на сапфире или SiC с использованием различных буферных слоев (GaN, AlGaN или AlN), составляют  $250 - 350 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , а для МОГФЭ —  $500 - 700 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Высокое значение подвижности электронов  $560 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  было получено в работе [1] методом МЛЭ с использованием буферного слоя AlN, полученного при помощи магнетронного распыления. Одно из лучших значений подвижности электронов в GaN, выращенном методом МОГФЭ, составляет  $900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  [2]. Кроме того, недавно за счет оптимизации условий роста были получены высокие значения подвижности электронов — более  $1100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  в GaN, выращенном МЛЭ [3,4], но эти слои были получены с использованием низкодислокационных „заготовок“, выращенных МОГФЭ.

Цель настоящей работы состояла в выращивании методом МЛЭ кристаллически совершенных слоев GaN

<sup>¶</sup> E-mail: petrov@semiteq.ru

с пониженной плотностью дислокаций и высокой подвижностью электронов.

## 2. Экспериментальная часть

Слои GaN и многослойные гетероструктуры выращивались на подложках  $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$  в ЗАО „Светлана-Рост“ и Прикладной лаборатории ЗАО „НТО“ на отечественных установках МЛЭ STE3N, разработанных и созданных в ЗАО „НТО“ (SemiTEq). Уникальными особенностями данной установки являются расширенный диапазон температур подложки и отношений V/III. В частности, благодаря криопанелям увеличенной площади и усиленной системе откачки в ростовой камере обеспечивается вакуум не хуже  $5 \cdot 10^{-3}$  Па при увеличении температуры подложки до  $970^\circ\text{C}$  при потоке аммиака  $400 \text{ см}^3/\text{мин}$ . В результате дополнительной модернизации узла нагрева образца диапазон достижимых температур подложки был увеличен до  $1200^\circ\text{C}$ , что позволило заметно улучшить характеристики слоев AlN и многослойных гетероструктур AlN/AlGaIn/GaN.

В качестве основного инструмента для *in situ* контроля скорости роста и состояния ростовой поверхности использовалась лазерная интерферометрия. Кроме того, на начальных стадиях роста активно использовалась отражательная дифракция быстрых электронов ОДБЭ (RHEED).

Свойства выращенных образцов исследовались при помощи просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ), холловских измерений и атомно-силовой микроскопии (AFM).

## 3. Результаты и обсуждение

Как было указано во Введении, для увеличения поверхностной подвижности атомов на начальном этапе роста и, как следствие, улучшения срачивания зародышевых блоков и снижения плотности дислокаций необходимо увеличение температуры роста. При этом увеличение температуры выше температуры заметного термического разложения GaN приводит к ухудшению морфологии поверхности, что делает невозможным использование в МЛЭ ростовых температур, характерных для МОГФЭ. Вместе с тем термическое разложение AlN начинает происходить при гораздо больших температурах по сравнению с GaN, что позволяет увеличить температуру роста до достаточно высоких значений, при которых, однако, термического разложения AlN еще не происходит. В связи с этим было предложено выращивать на начальном этапе роста относительно „толстый“ слой AlN при экстремально высокой для МЛЭ температуре. Кроме того, при выращивании на „толстых“ слоях AlN слоев AlGaIn или GaN необходимо использовать специальные технологические приемы для снижения влияния напряжений, вызванных различием в параметрах решетки.

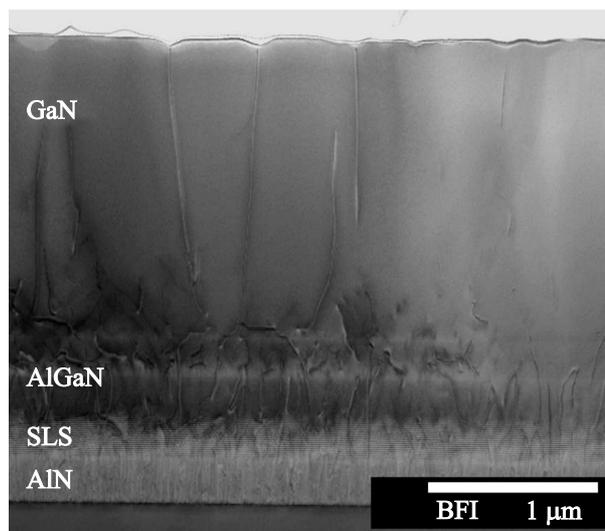


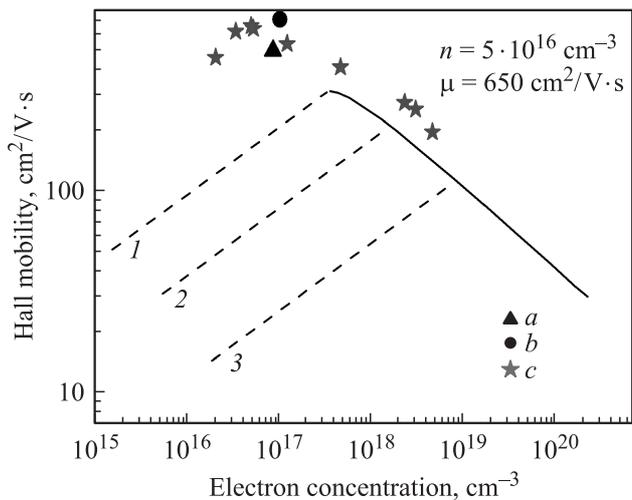
Рис. 1. STEM изображение многослойной гетероструктуры AlN/SLS/AlGaIn/GaN.

Выращивание на начальной стадии роста слоев AlN толщиной более 200 нм при экстремально высокой для МЛЭ температуре  $1100\text{--}1150^\circ\text{C}$ , а затем выращивание переходных областей AlGaIn, включая сверхрешетки, при температуре  $900\text{--}920^\circ\text{C}$  привело к улучшению свойств всей многослойной гетероструктуры AlN/AlGaIn/GaN и слоя GaN в частности.

На рис. 1 представлено изображение гетероструктуры, состоящей из слоев AlN, сверхрешетки (SLS) AlN/AlGaIn,  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ , градиентного слоя AlGaIn и GaN, полученное при помощи сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (STEM). При помощи STEM было установлено, что плотность дислокаций находится на уровне  $(2\text{--}4) \cdot 10^{10}$ ,  $(4\text{--}6) \cdot 10^9$  и  $9 \cdot 10^8\text{--}1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$  для слоев AlN, AlGaIn и GaN соответственно. Для сравнения плотность дислокаций в слое GaN, выращенном на тонком (10–20 нм) слое AlN, полученном при умеренной температуре ( $< 900^\circ\text{C}$ ), находится на уровне  $10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

Таким образом, плотность дислокаций в слое GaN, выращенном на многослойном буферном слое, который начинается с высокотемпературного слоя AlN, была понижена на 1.5–2 порядка по сравнению с выращиванием на тонком невысокотемпературном зародышевом слое AlN. Кроме того, при помощи просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) была определена плотность различных типов дислокаций в слое GaN. Отражение  $g = (0002)$  было использовано для определения винтовых и смешанных дислокаций, а  $g = (-12\text{--}20)$  для определения краевых и смешанных дислокаций. Было установлено, что плотность дислокаций составляет  $\sim 2 \cdot 10^8$ ,  $\sim 4 \cdot 10^8$  и  $\sim 4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$  для винтовых, краевых и смешанных дислокаций соответственно.

Уменьшение плотности дислокаций привело к значительному увеличению подвижности электронов в слоях



**Рис. 2.** Зависимость подвижности электронов от их концентрации в слоях GaN, выращенных методами МЛЭ (а) [1], МОГФЭ (b) [4] и методом МЛЭ на установках STE3N в данной работе (c). Штриховые линии соответствуют расчетным значениям для различной плотности дислокаций [5]  $N_{\text{dis}}$ ,  $\text{см}^{-2}$ : 1 —  $8 \cdot 10^9$ , 2 —  $2 \cdot 10^{10}$ , 3 —  $7 \cdot 10^{10}$ .

GaN (рис. 2). Максимальная подвижность электронов в слабо легированном слое GaN толщиной 1.5 мкм находится на уровне  $600\text{--}650 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при концентрации электронов  $(3\text{--}5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Экспериментальные значения подвижности и плотности дислокаций согласуются с данными расчетов, сделанными в работе [5].

Приведенные значения плотности дислокаций и подвижности электронов находятся среди лучших значений, полученных на сегодня методом МЛЭ, и соответствуют хорошему уровню для слоев GaN, выращенных методом МОГФЭ, что свидетельствует о высоком кристаллическом совершенстве полученных слоев. Шероховатость поверхности полученных гетероструктур также соответствует лучшим значениям для нитридных слоев, выращенных методом МЛЭ на сапфире (rms 1–2 нм).

#### 4. Заключение

Исследовано и описано влияние 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  $1100^\circ\text{C}$ ), плотность дислокаций в слое GaN была понижена на 1.5–2 порядка (до значений  $9 \cdot 10^8\text{--}1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ ) по сравнению с выращиванием на тонком невысокотемпературном зародышевом слое AlN. Уменьшение плотности дислокаций привело к значительному увеличению подвижности электронов в слоях GaN, до значений  $600\text{--}650 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , что согласуется с данными расчетов и свидетельствует о высоком кристаллическом совершенстве полученных слоев.

#### Список литературы

- [1] J.B. Webb, H. Tang, J.A. Bardwell, S. Moisa, C. Peters, T. MacElwee. *J. Cryst. Growth*, **230**, 584 (2001).
- [2] S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh. *J. Appl. Phys.*, **71**, 5543 (1992).
- [3] G. Koblmüller, F. Wu, T. Mates, J.S. Speck, S. Fernandez-Garrido, E. Calleja. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 221 905 (2007).
- [4] I. Akasaki, H. Amano. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45**, 9001 (2006).
- [5] H.M. Ng, D. Doppalapudi, T.D. Moustakas, N.G. Weimann, L.F. Eastman. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 821 (1998).

Редактор Л.В. Беляков

#### Molecular-beam epitaxial growth of GaN layer with low dislocation density

A.N. Alexeev, D.M. Krasovitsky\*, S.I. Petrov, V.P. Chaly\*

SemiTEq JSC,  
194156 St. Petersburg, Russia  
\* Svetlana-Rost JSC,  
194156 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The growth of „thick“ (200 nm) AlN layers on sapphire at  $1100\text{--}1150^\circ\text{C}$  using STE3N MBE system is shown to be the key step of obtain high quality GaN-based heterostructures. An appropriate sequence of AlGaIn transition layers growth on such an AlN both allows to reduce dislocation density in GaN (down to  $9 \cdot 10^8\text{--}1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ ) 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  $600\text{--}650 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  at electron concentrations  $(3\text{--}5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .