

06

## Хлоридная газофазная эпитаксия GaN на Si: структурные и люминесцентные характеристики слоев

© В.Н. Бессолов, В.М. Ботнарюк, Ю.В. Жиляев,  
Е.В. Коненкова, Н.К. Полетаев, С.Д. Раевский,  
С.Н. Родин, С.Л. Смирнов, Ш. Шарофидинов,  
М.П. Щеглов, Hee Seok Park, Masayoshi Koike

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
Samsung Electron-Mechanics Co., Ltd, Suwon, Gyunggi-Do, Korea

Поступило в Редакцию 6 января 2006 г.

Исследованы структурные и люминесцентные свойства слоев GaN, выращенных газофазным методом в хлоридной системе (HVPE) либо в атмосфере водорода, либо в атмосфере аргона на двухдюймовой Si(111) подложке с буферными слоями AlN. Показано, что замена атмосферы водорода на атмосферу аргона в процессе роста GaN слоя приводит к снижению шероховатости поверхности. Установлено, что отношение интенсивностей донорно-акцепторной и экситонной полос люминесценции уменьшается с уменьшением температуры роста GaN слоя. Полуширина кривой качания рентгеновской дифракции (FWHM) для лучших слоев GaN (0002) была 420 arcsec, а FWHM экситонной полосы люминесценции при 77 K — 48 meV.

PACS: 78.66.-w, 81.05.Hd

Приборы нитрид-галлиевой электроники создаются в основном на сапфировых и карбид-кремниевых подложках. Однако высокая стоимость подложек из карбида кремния и низкая проводимость сапфировых подложек являются серьезным препятствием в создании нитрид-галлиевых приборов на их основе. Кремниевые подложки имеют хорошую проводимость, большие размеры, низкую стоимость и, несмотря на значительные трудности получения нитрид-галлиевых слоев, связанные с различием постоянных решетки и коэффициентов термического расширения Si и GaN, в последние годы привлекают внимание исследователей для целей интеграции нитрид-галлиевой и кремниевой электроники. Тонкие (до 2  $\mu\text{m}$ ) нитрид-галлиевые слои для

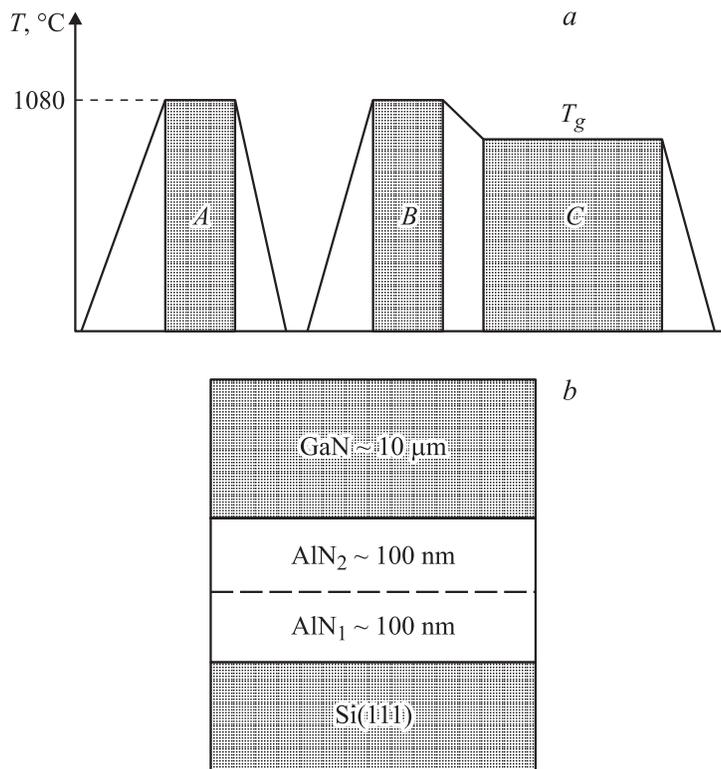
оптоэлектронных и электронных приборов на кремниевой подложке выращиваются методами газофазной металлоорганической (MOCVD) и молекулярно-пучковой (MBE) эпитаксии [1]. Метод хлоридной газофазной эпитаксии (HVPE) позволяет выращивать толстые (более  $10\ \mu\text{m}$ ) слои GaN на сапфировой подложке. В последние годы предпринимаются попытки получения слоев нитрида галлия на кремниевой подложке этим методом с использованием буферного AlN слоя, полученного как другими методами (высоочастотного распыления [2], MBE [3], MOCVD [4]), так и методом HVPE [5]. Данная работа посвящена исследованию структурных и люминесцентных свойств слоев GaN, выращенных HVPE либо в атмосфере водорода, либо в атмосфере аргона на Si(111) подложке с буферными слоями AlN.

Эпитаксиальное выращивание GaN слоев осуществлялось на предварительно очищенной Si(111) подложке диаметром 50 mm, которая вращалась в потоке водорода с частотой 10–60 rev./min [5].

Вначале в атмосфере водорода выращивались два буферных слоя AlN толщиной 10 nm. Затем в атмосфере либо водорода, либо инертного газа (аргона) выращивали основной слой GaN толщиной 10–20  $\mu\text{m}$ . Температура эпитаксии буферных слоев была  $1080^\circ\text{C}$ , а основного слоя изменялась в интервале  $950\text{--}1050^\circ\text{C}$  (рис. 1, *a*). Скорость потоков HCl и  $\text{NH}_3$  была 1.7 и 2.4 l/min соответственно.

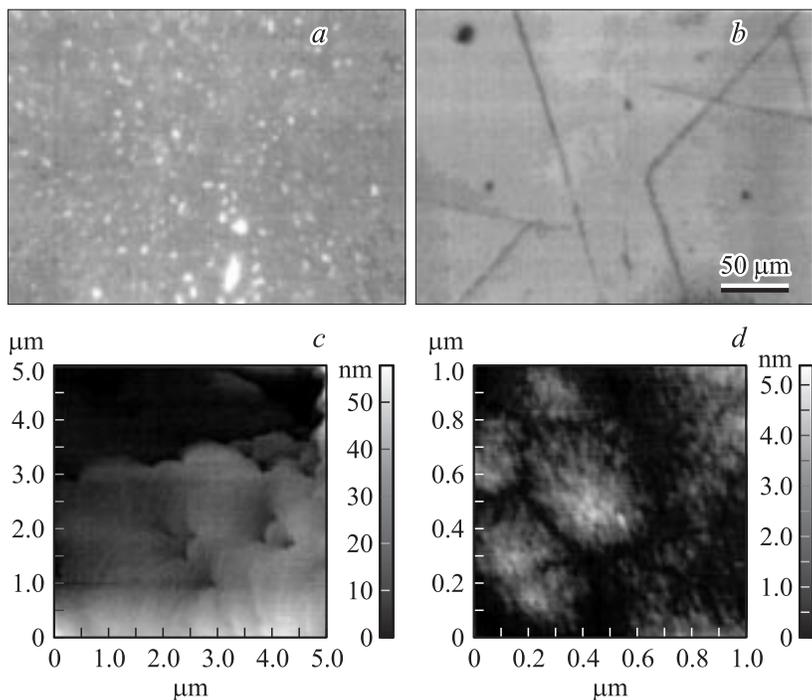
Структурные и оптические характеристики слоев GaN таких структур (рис. 1, *b*) выяснялись методами рентгеновской дифрактометрии, фотолюминесценции и атомно-силовой микроскопии. Анализ рентгеноструктурных параметров слоя проводился на базе трехкристального рентгеновского спектрометра. Кривые качания регистрировались для симметричного (0002) брэгговского рефлекса в режиме двухкристальной ( $\omega$ )-скан. схемы дифракции. Фотолюминесценция возбуждалась импульсным азотным лазером (длина волны излучения  $\lambda = 337\ \text{nm}$ ) при 77 K. Поверхность слоев GaN анализировали с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) на приборе компании NT-MDT с использованием стандартных кремниевых кантилеверов в режиме полуконтактной моды.

Выращивание буферных слоев в два этапа (рис. 1) должно приводить к уменьшению напряжений, возникающих из-за различия постоянных решеток и коэффициентов термического расширения AlN слоя и Si подложки. Экспериментальные результаты доказывают, что такая методика позволяет осуществить ориентированный рост как буферного, так и



**Рис. 1.** Температурно-временной режим эпитаксии (а) и схематическое изображение GaN/Si(111) структуры с AlN<sub>1</sub> и AlN<sub>2</sub> буферными слоями (b).

основного слоев структуры, однако полностью устранить возникающие напряжения не удастся, что приводит к проявлению трещин в слое GaN (рис. 2). Рентгеноструктурные исследования показали, что кривые качания для брэгговского рефлекса (0002), измеренные в центре двухдюймовой структуры, имеют рекордное для слоев GaN, выращенных на кремниевой подложке HVPE методом, значение:  $\omega_\theta = 420$  arcsec, а разброс по площади структуры составляет менее 15%. Отметим, что величина  $\omega_\theta$  для GaN, выращенного на Si подложке методом MOCVD, имеет близкое значение [6].

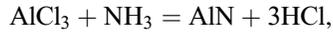


**Рис. 2.** Изображение, полученное в оптическом (*a, b*) и атомно-силовом (*c, d*) микроскопах, поверхности GaN слоя, выращенного в различных атмосферах: *a, c* — H<sub>2</sub>; *b, d* — Ar.

Выращивание основного слоя либо в атмосфере водорода, либо в атмосфере инертного газа (аргона) позволило выявить разные величины полной амплитуды высоты поверхности GaN слоя. Действительно, сравнение изображений (рис. 2), полученных с помощью атомно-силовой микроскопии, показывает, что при эпитаксии в аргоне полная амплитуда высоты поверхности GaN слоя была на площади  $1 \times 1 \mu\text{m}$  около 5 nm и примерно в 2–3 раза меньше, чем при эпитаксии в водороде (рис. 2, *d*).

Идея смены атмосферы водорода на атмосферу аргона базируется на различиях в механизмах протекания реакций синтеза нитрида галлия

и нитрида алюминия [7]. Действительно, если рассмотреть основные реакции, протекающие в зоне роста:

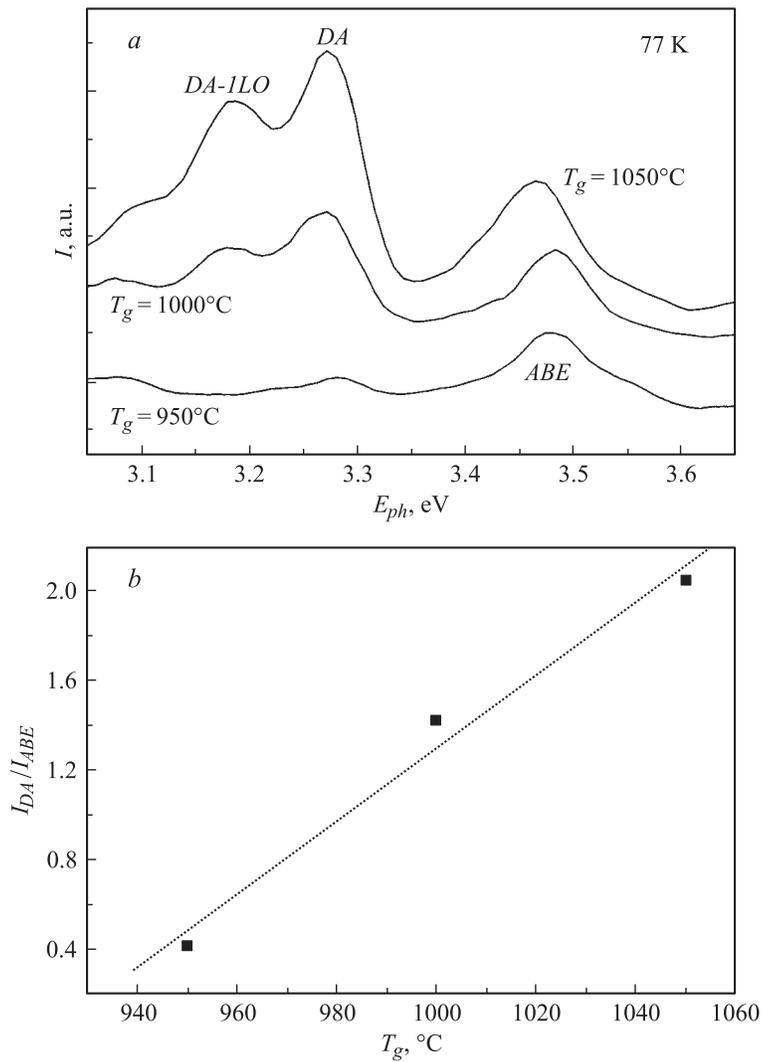


то можно заметить, что в правой части реакции синтеза AlN отсутствует молекулярный газообразный водород ( $\text{H}_2$ ), в то время как при синтезе GaN он образуется.

Итак, для синтеза AlN слоя термодинамический анализ не определяет существенных различий при росте AlN в водороде или инертном газе, в то время как для синтеза GaN переход с водородной атмосферы к росту в атмосфере инертного газа приводит к изменению скорости реакции и, как следствие, к преимущественному росту слоя в направлении тангенциальном к поверхности.

Фотолюминесцентные исследования при 77 К слоев GaN, выращенных как в атмосфере водорода, так и в атмосфере инертного газа, показали, что спектры слоев содержат три полосы коротковолновой люминесценции с максимумами  $h\nu_{\text{max}} = 3.46, 3.28, 3.18 \text{ eV}$  (рис. 3, *a*) и одну полосу длинноволновой люминесценции с  $h\nu = 2.26 \text{ eV}$ . Коротковолновые полосы в спектрах фотолюминесценции связывали с пиками экситона (3.46 eV) и пиками донорно-акцепторной рекомбинации (3.28 и 3.18 eV) [2], а длинноволновую полосу — со структурными дефектами [8]. Смена атмосферы в реакторе не приводит к существенному изменению в спектрах фотолюминесценции, но соотношение интенсивностей пиков экситонной и донорно-акцепторной люминесценции зависит от температуры выращивания GaN слоя: при температуре роста 950°C интенсивность экситонной люминесценции слоя была выше, чем донорно-акцепторной, а при температурах роста 1000–1050°C — ниже. Отношение интенсивностей донорно-акцепторной и экситонной полос люминесценции уменьшается с уменьшением температуры роста GaN слоя (рис. 3, *b*). Величина интенсивности и полуширина пика экситонной фотолюминесценции изменяются по поверхности двухдюймовой структуры не более чем на 10%.

Таким образом, монокристаллические слои GaN были выращены методом HVPE на двухдюймовой Si(111) подложке. Слои имели следующие параметры: толщина слоев — 10–20  $\mu\text{m}$ , FWHM  $\sim 420 \text{ arcsec}$ ,



**Рис. 3.** Фотолуминесцентные спектры GaN/Si слоев, выращенных в атмосфере аргона при различных температурах (a); зависимость отношения интенсивностей донорно-акцепторной и экситонной полос люминесценции от температуры роста (b).

FWHM коротковолновой люминесценции — 50 meV (77 K), полная амплитуда высоты поверхности около 5 nm.

Наши результаты показывают, что замена атмосферы водорода на атмосферу аргона в процессе роста GaN слоя приводит к получению более гладких эпитаксиальных слоев, перспективных для целей нитрид-галлиевой электроники.

Работа была частично поддержана грантом РФФИ (04-02-17635) и контрактом Samsung Electro-Mechanics Co. Ltd. (N66/1-2004). Один из авторов (Е.В. Коненкова) считает своим приятным долгом поблагодарить Фонд содействия отечественной науке за финансовую поддержку.

## Список литературы

- [1] *Dadgar A.* et al. // *Phys. stat. sol. C.* 2003. V. 0. P. 1940.
- [2] *Yu P.W.* et al. // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 89. P. 1692.
- [3] *Zhang J.X.* et al. // *J. Crystal Growth.* 2005. V. 282. P. 137.
- [4] *Honda Y.* et al. // *Phys. stat. sol. C.* 2005. V. 2. P. 2126.
- [5] *Бессолов В.Н.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 2005. Т. 31. В. 21. С. 30.
- [6] *Mo C.* et al. // *J. Crystal Growth.* 2005. V. 280. P. 335.
- [7] *Koukitu A.* et al. // *J. Crystal Growth.* 2005. V. 281. P. 47.
- [8] *Reshchikov M.A.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 78. P. 3041.