

06

## Эпитаксия нитрида галлия в полуполярном направлении на кремнии

© В.Н. Бессолов, Ю.В. Жилияев, Е.В. Коненкова, Н.К. Полетаев,  
Ш. Шарофидинов, М.П. Щеглов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: bes@triat.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 июня 2011 г.

Излагается идея нового технологического метода выращивания слоев нитрида галлия на кремниевой подложке ориентации (100). Экспериментально показано, что создание специально ориентированного тонкого 600 nm слоя нитрида алюминия методом газофазной эпитаксии в хлоридной системе (HVPE) позволяет получить рост нитрида галлия в полуполярном направлении. Полуширина кривой качания рентгеновской дифракции для лучших слоев  $\omega_{\theta}(0004) = 30 \text{ arcmin}$ ; в спектрах фотолуминесценции GaN при 77 K проявляются экситонная и донорно-акцепторные полосы рекомбинации.

Структуры на основе нитрида галлия играют важную роль при создании приборов оптоэлектроники, таких как светодиоды и лазеры. В настоящее время такие структуры преимущественно выращивают на подложках  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и SiC, а в последнее время проявляется интерес к получению нитрида галлия и на кремнии. Это обусловлено перспективами интеграции нитрид-галлиевой и кремниевой электроники, возможностью использования подложек больших (до 200 mm) размеров, их низкой стоимостью, хорошей электрической и тепловой проводимостью. Вюрцитная структура нитрида галлия, как правило, обладает значительным внутренним электрическим полем из-за пьезоэлектрической и спонтанной электронной поляризации, что играет отрицательную роль в работе светоизлучающих приборов, поэтому в последние годы появляется все больше работ, связанных с изучением нитрида галлия, выращенного как в неполярных, так и в полуполярных направлениях. Полуполярный нитрид галлия в основном выращивают методами газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) и молекулярно-пучковой эпитаксии (MBE) на подложках  $m\text{-Al}_2\text{O}_3$  [1], 4H-SiC (11–20) [2], и Si (113) [3]. В последнее время появились

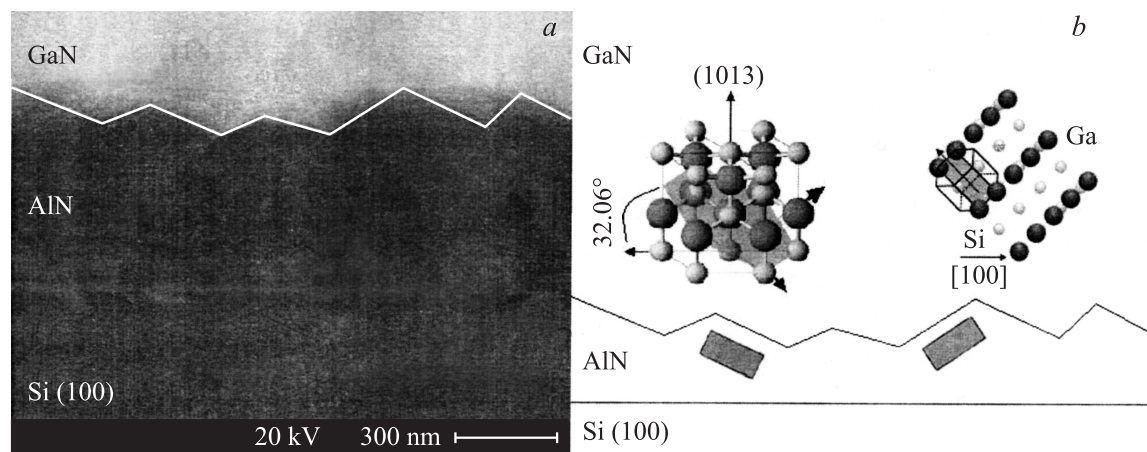
работы по получению методом МOCVD полуполярного нитрида галлия на Si(100) с использованием промежуточного слоя 3C-SiC [4]. Метод газофазной эпитаксии в хлоридной системе (HVPE) используется при эпитаксиальном выращивании толстых ( $> 10 \mu\text{m}$ ) слоев нитрида галлия на кремниевой подложке в полярном [5] и неполярном [6] направлениях, однако случаи применения этого метода в полуполярном направлении нам не встречались. Как известно, несоответствие постоянных решетки между Si(100) и AlN составляет 15%, между Si(100) и GaN — 17% [7], что затрудняет ориентированный рост слоя и является причиной высокой плотности дефектов галлия и высокого уровня деформации слоя GaN, вследствие чего возрастает вероятность возникновения трещин. Для подавления этого процесса формируют различные промежуточные слои: ZnO [8], 3C-SiC [9].

Целью данной работы являлось изучение возможности получения полуполярных толстых слоев GaN, выращенных методом HVPE на подложке Si(100) с промежуточным буферным слоем AlN.

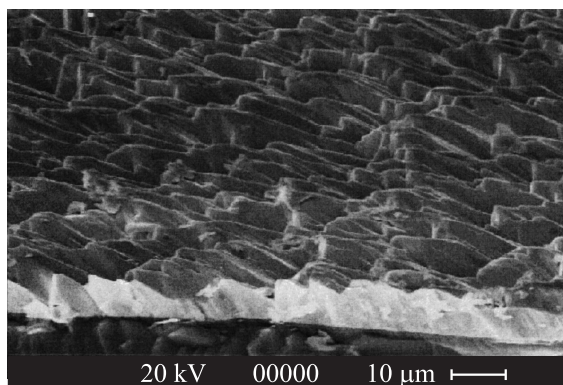
Для достижения поставленной цели методом HVPE выращивали в атмосфере водорода структуру GaN/AlN/Si(100) при температурах эпитаксии AlN и GaN — 950 и 1050°C соответственно.

Для выяснения картины формирования эпитаксиального слоя GaN и оценки качества получаемых полупроводниковых структур использовались методы оптической и сканирующей электронной (SEM) микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и фотолюминесценции. При рентгеноструктурных измерениях кривые качания регистрировались в рефлексах (0002) и (0004) —  $\text{CuK}\alpha_1$  на базе трехкристального спектрометра. Фотолюминесценция GaN возбуждалась импульсным азотным лазером (длина волны излучения  $\lambda = 337 \text{ nm}$ ). Измерения проводились при 77 К.

Как известно, эпитаксиальный рост нитрида галлия на кремниевой подложке при высоких температурах затруднен из-за реакции кремния с галлием [10]. Обычно выращивают тонкий буферный слой AlN, который при эпитаксии методом МOCVD на подложках Si(111) Si(100) принимает преимущественно ориентацию (0001) [11]. При эпитаксии методом HVPE на подложке Si(100) в слое AlN присутствует множество отдельных кристаллических включений с иными ориентациями как гексагональной, так и кубической модификаций. При относительно низкой температуре роста (950°C) структура слоя становится менее упорядоченной, однако размеры этих блоков увеличиваются за счет



**Рис. 1.** SEM-изображение скола структуры GaN/AlN/Si(100) (a) и схематическое изображение процесса роста слоя GaN в полуполярном направлении.



**Рис. 2.** SEM-изображение поверхности слоя GaN, выращенного в полуполярном направлении.

невысокой скорости роста слоя. Поверхность слоя AlN приобретает вид ограниченных блоков, состоящих из нанокристаллов с плоскостями типа  $c$ -AlN(111),  $h$ -AlN (1102),  $h$ -AlN(10–12),  $h$ -AlN(10–13) и т.п. (рис. 1, *a*). Недавно авторы [12] отмечали, что при магнетронном распылении нитрида алюминия на кремниевую подложку возможно формирование слоя полуполярной ориентации AlN(10–13).

Рост слоя GaN проводился при температуре эпитаксии  $T = 1050^\circ\text{C}$ , при которой в традиционных условиях метода HVPE обычно формируются слои гексагональной модификации [5], однако наличие ограниченной блочной поверхности AlN (рис. 1, *b*) влияет на механизм роста слоя GaN (рис. 1, *a*). Рентгенодифракционные исследования показали, что формируется эпитаксиальный слой гексагональной структуры  $h$ -GaN с наклоном плоскостей (0001) к поверхности подложки  $\sim 20$ – $25^\circ$ , причем величина наклона зависит от условий (температура, скорость роста) эпитаксии слоя AlN. На основании изучения интенсивности рентгеновских пиков и изображения скола слоя в SEM (рис. 1, *a*) мы полагаем, что, по-видимому, так же, как и в работе [12], плоскость этого слоя соответствует GaN(10–13). Полушина кривой качания кососимметричного рефлекса (0004) слоя GaN имела величину  $\omega_\theta = 30$  arcmin. Электронная микроскопия поверхности слоев (рис. 2) показала, что слои имеют характерную структуру, подобную той, что наблюдали авторы [13] и при эпитаксии GaN (10–13) методом HVPE на подложке

$m$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и при гомоэпитаксии слоев GaN(10–12) на подложке нитрида галлия, специально приготовленной для эпитаксии в направлении (10–12) [14]. Для структуры GaN/AlN/Si(100) (рис. 2) экспериментальное значение угла наклона (около 25°) для плоскости GaN(10–13) меньше, чем табличное значение угла между плоскостями GaN(10–13) и GaN(0002), равное ~ 32°, и это, по нашему мнению, связано с наличием дефектов при формировании буферного слоя AlN, который играет существенную роль при эпитаксии в неполярном направлении. Следует отметить, что измеренные углы соответствуют плоскостям (10–14) или (10–15), однако авторы полагают, что гетероэпитаксия при больших несоответствиях решеток слоя GaN и подложки Si(100) происходит через формирование ориентированных островковых нанокристаллов AlN и нитрид галлия с  $\omega_\theta = 30 \text{ arcmin}$  должен иметь колончатую структуру, которая может приводить к уменьшению величины угла наклона. На этой стадии исследований можно лишь утверждать, что при определенных условиях в методе HVPE может происходить рост слоя GaN в полуполярном направлении при эпитаксии на Si(100).

В спектрах фотолюминесценции при 77 К слоев GaN наблюдаются хорошо различимые полосы люминесценции с максимумами  $h\nu_{\text{max}} = 3.47, 3.27, 3.18 \text{ eV}$ . Для слоев GaN, выращенных на сапфировой подложке методом HVPE, подобные полосы в спектрах фотолюминесценции тоже наблюдали, и их связывали с пиками экситонов, связанных на акцепторе (3.47 eV), и двух пиков донорно-акцепторной рекомбинации (3.27 eV и 3.18 eV) [15].

Таким образом, продемонстрирован новый метод выращивания слоев нитрида галлия в полуполярном направлении на подложке Si(100) за счет специально ориентированного тонкого 600-nm слоя нитрида алюминия. Установлено, что предложенный подход к выращиванию нитрида галлия в неполярном направлении на кремниевой подложке перспективен при формировании 'templates' для получения структур нитрид-галлиевой электроники.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-03-00433-а).

## Список литературы

- [1] Baker T.J. et al. // Jpn. Appl. Phys. Part 2. 2006. V. 45. P. L154.
- [2] Wagner B.P. et al. // J. Crystal Growth. 2006. V. 290. P. 504.

- [3] *Tanikawa T.* et al. // *Phys. Stat. Sol.* 2008. V. 5. P. 2966.
- [4] *Abe Y.* et al. // *Materials Science Forum.* 2009. V. 600–603. P. 1281.
- [5] *Бессолов В.Н.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 2006. Т. 32. В. 15. С. 60.
- [6] *Polyakov A.Y.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 94. P. 022114.
- [7] *Dadgar A.* et al. // *New J. Physics.* 2007. V. 9. P. 389.
- [8] *Ji X.H., Zhai J.W.* // *J. Electronic Materials.* 2008. V. 37. P. 573.
- [9] *Abe Y.* et al. // *J. Crystal Growth.* 2011. V. 318. P. 460.
- [10] *Ishikawa* et al. // *J. Crystal Growth.* 1998. V. 189–190. P. 178.
- [11] *Joblot S.* et al. // *J. Crystal Growth.* 2005. V. 280. P. 44.
- [12] *Jhong S.B.* et al. // *Next-Generation Electronics International Symposium.* Kaohsiung, Taiwan, 2010. P. 96.
- [13] *Wet T.B.* et al. // *J. Electrochemical Society.* 2010. V. 157. P. H721.
- [14] *Wernicke T.* et al. // *Phys. Status Solidi B.* 2011. V. 248. P. 547.
- [15] *Yu. P.W.* et al. // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 89. P. 1692.