

06

Полуполярные GaN-слои на наноструктурированной Si(100)-подложке

© В.Н. Бессолов¹, Е.В. Коненкова¹, Т.А. Орлова¹, С.Н. Родин¹,
М.П. Щеглов¹, Д.С. Кибалов², В.К. Смирнов²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
Россия

² ООО „Квантовый кремний“, Москва, Россия
E-mail: bes.triat@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 19 февраля 2018 г.

Предложен новый метод синтеза GaN в полуполярном направлении на подложке Si(100), на поверхности которой сформирована V-образная наноструктура с суб-100 nm размером элементов. Показано, что применение наноструктурированной подложки в методе газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений позволяет формировать слои, направление роста которого отклонено от полярного направления на угол около 62° при минимальной полуширине рентгенодифракционной кривой качания GaN(10 $\bar{1}$ 1) $\omega_\theta \sim 60$ arcmin.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.12.46290.17260

Приборы нитрид-галлиевой электроники создаются в основном на основе структур, синтезированных в направлении [0001] оси с гексагонального кристалла GaN. Однако использование (0001)-плоскости GaN в оптоэлектронных приборах приводит к появлению эффекта Штарка из-за сильной пьезоэлектрической поляризации. Для того чтобы избежать негативного влияния этого эффекта, в последние годы создаются оптоэлектронные приборы на основе неполярных и полуполярных структур GaN. В настоящее время предпринимаются попытки синтезировать полуполярный GaN в основном на подложках из сапфира [1], SiC [2] и кремния [3,4]. Синтез полуполярного GaN осуществляется как на подложках Si(11 h) (где $h = 2-7$) [1,5], так и на разориентированных подложках Si(100) [6,7], а также с использованием буферных слоев 3C-SiC [8,9]. В работах [10-12] для синтеза полупо-

лярного GaN использовались литографические структуры микронного масштаба на поверхности Si(100).

Единственным известным примером синтеза GaN с использованием структуры с суб-100 nm размером элементов на поверхности Si(100) — nanopatterned silicon (NP-Si(100)) — является работа [13], где авторы с помощью электронно-лучевой литографии на локальном участке пластин Si(100) сформировали массив нанополосок с периодом 100 nm, на котором вырастили слои полярного GaN с более чем на порядок величины сниженными напряжениями. Синтез полуполярного GaN на NP-Si(100), судя по литературным данным, не проводился.

В настоящей работе сообщается о новом методе синтеза полуполярных слоев нитрида галлия на подложке NP-Si(100), на поверхности которой V-образные канавки сформированы на основе WOS-наномаски (wave-ordered structure) [14,15]. WOS-наномаска является результатом процесса самоформирования на поверхности монокристаллического кремния, слоев аморфного кремния и периодических нанополосок нитрида кремния под действием наклонного потока ионов азота. Период данной нелитографической наномаски задается в интервале $\lambda = 30-150$ nm. Процессы травления кремния (жидкостные и/или плазмохимические) через WOS-наномаску позволяют формировать NP-Si(100) с различной геометрией наноэлементов. Следует отметить, что сама WOS-наномаска является асимметричной структурой, поскольку SiN-нанополоски располагаются наклонно с одной стороны склонов канавки. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведен результат последовательного применения анизотропного плазмохимического и изотропного кислотного травления кремния через WOS-наномаску с целью формирования nanoхребтов треугольного сечения. Видно, что в данной структуре выражена асимметрия, унаследованная от WOS-наномаски.

В настоящей работе был использован аналогичный двухстадийный процесс, включающий плазмохимическое и кислотное травление, для создания наноструктуры в виде плотного массива V-образных наноканавок на поверхности Si(100). На первой стадии проводилось анизотропное плазмохимическое травление кремния через WOS-наномаску с периодом $\lambda = 80$ nm с формированием кремниевых нанополос. Для придания наноэлементам треугольной формы сечения на следующей стадии применялось кислотное травление кремния в растворе HF/HNO₃. На поверхности Si(100) WOS-наномаска была ориентирована вдоль на-

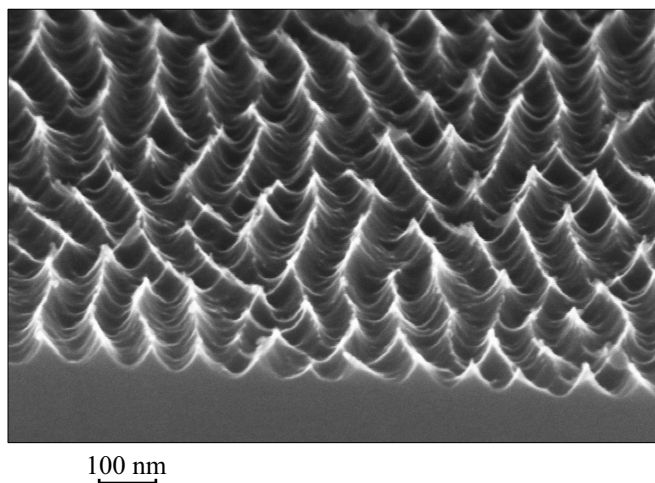


Рис. 1. РЭМ-изображение $NP-Si(100)$ в виде массива нанохребтов с поперечным сечением, близким к треугольному, периодом $\lambda = 80$ nm и высотой 45 nm.

правления [110]. На рис. 1 показано полученное методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) изображение структуры $NP-Si(100)$, использованной в последующих экспериментах по эпитаксии.

Слои полуполярного GaN на подложках $NP-Si(100)$ были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на модифицированной установке EpiQuip с горизонтальным реактором и индукционно нагреваемым графитовым подложкодержателем [16]. Водород использовался в качестве несущего газа, а аммиак, триметилгаллий и триметилалюминий — в качестве прекурсоров. Структуры состояли из слоя AlN толщиной ~ 20 nm и нелегированного слоя GaN толщиной $\sim 1 \mu m$.

Образцы GaN/AlN/Si(100) исследовались методами рентгеновской дифрактометрии (РД) и РЭМ.

Изучение эпитаксиальных структур с помощью РЭМ (рис. 2, *a, b*) показало, что поверхность и поперечное сечение слоя имеют характерную структуру полуполярного GaN. Результаты РД указывают на наличие равномерно упорядоченных слоев GaN, направление роста которых отклоняется от полярного направления оси c на угол около 62°

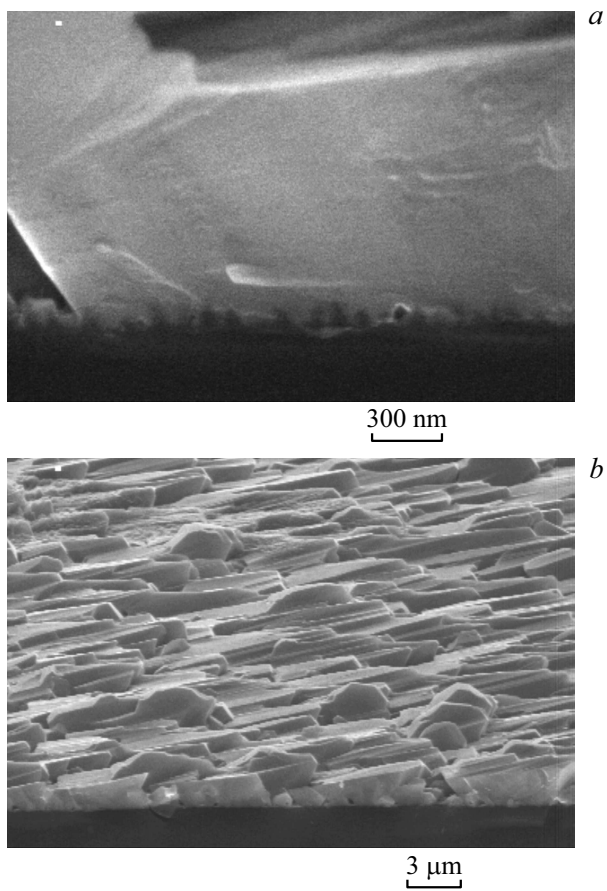


Рис. 2. РЭМ-изображения скола (*a*) и поверхности (*b*) структуры GaN/AlN/NP-Si(100).

(рис. 2, *a, b*). Полуширина РД-кривой качания (FWHM) для рефлекса $(10\bar{1}1)$ GaN имела значение $\omega_{\theta} \sim 60$ arcmin.

В работах [11,12] представлены результаты формирования слоев полуполярного GaN $(1\bar{1}01)$ на поверхности V-образных микроканалов с гранями (111) на пластине Si(100). На противоположных склонах

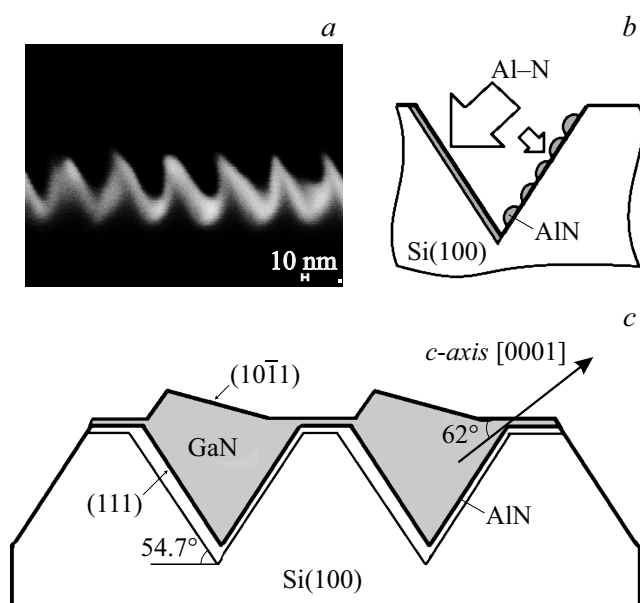


Рис. 3. Схема формирования GaN ($10\bar{1}1$) на поверхности NP -Si(100). *a* — РЭМ-изображение поперечного сечения структуры с периодом $\lambda \sim 90$ nm и размером маркера 10 nm, полученной последовательным плазмохимическим и кислотным травлением Si через WOS-наномаску; *b* — схема зародышеобразования AlN-слоя; *c* — схема синтеза полуполярного GaN.

V -образных микроканавок происходил рост полуполярного GaN($1\bar{1}01$), но по причине микронного размера канавок слой GaN представлял собой массив монокристаллических микрополос.

Согласно экспериментальным данным, применение наноструктурированной V -образной поверхности Si(100) с суб-100 nm периодом приводит к росту слоя полуполярного GaN. На рис. 3 изображена предлагаемая схема формирования ($10\bar{1}1$) GaN на поверхности NP -Si(100). Видно (рис. 3, *a*), что асимметрия канавок NP -Si как следствие асимметрии WOS-наномасок присутствует. Это означает, что в массиве одни склоны V -наноканавок имеют преимущество по площади в выходе грани Si(111) по сравнению с противоположными

склонами. Зародышеобразование гексагонального AlN происходит преимущественно на гранях Si(111) [17]. Как известно, формирование гетероэпитаксиального слоя AlN на обеих сторонах наноканавки начинается с образования зародышей, которые разрастаются и образуют сплошной первичный слой (дальнейший рост слоя будет уже гомоэпитаксиальным). Скорость гомоэпитаксиального роста будет существенно выше скорости гетероэпитаксиального. Наноразмерность канавок, в которых расстояние между наклонными стенками меняется от ~ 20 до ~ 80 nm с глубиной до 45 nm (т.е. среднее отношение ширина/глубина ~ 1), по нашему мнению, обеспечивает как снижение потоков атомов Al и N к поверхности, так и быстрый диффузионный обмен атомов Al и N между соседними противоположными стенками V-наноканавки. За счет последнего даже при небольшой разнице в площади поверхности грани Si(111) на одной из сторон V-канавок на соответствующих их сторонах в массиве быстрее сформируется гомоэпитаксиальный слой AlN (рис. 3, b). Последующий синтез GaN будет происходить уже только на сплошном слое AlN, и образуется слой, направление роста которого перпендикулярно плоскости грани Si(111) и отклонено на угол 62° от оси c полярного направления (рис. 3, c). Таким образом, наличие описанных выше подложек NP-Si(100) в сочетании с небольшой скоростью поставки реагентов к поверхности приводит к синтезу полуполярного слоя GaN на всей площади подложки (рис. 2, b).

Гетероэпитаксия GaN на подложке Si(100) с V-образной структурированной поверхностью с суб-100 nm размерами элементов приводит к конкуренции при зарождении AlN на стенках канала и последующему росту слоя GaN в одном полуполярном направлении.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00208.

Список литературы

- [1] Wang T. // *Semicond. Sci. Technol.* 2016. V. 31. P. 093003.
- [2] Akasaka T., Kobayashi Y., Makimoto T. // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90. P. 121919.
- [3] Liu J.-M., Zhang J., Lin W.-Y., Ye M.-X., Feng X.-X., Zhang D.-Y., Ding S., Xu C.-K., Liu B.-L. // *Chin. Phys. B.* 2015. V. 24. P. 057801.
- [4] Dadgar A. // *Phys. Status Solidi B.* 2015. V. 252. P. 1063–1068.

- [5] Ravash R., Blaesing J., Dadgar A., Krost A. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 97. P. 142102.
- [6] Hikosaka T., Narita T., Honda Y., Yamaguchi M., Sawakia N. // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 84. P. 4717–4719.
- [7] Abe Y., Komiyama J., Isshiki T., Suzuki S., Yoshida A., Ohishi H., Nakanishi H. // *Mater. Sci. Forum.* 2009. V. 602-603. P. 1281–1284.
- [8] Dinh D.V., Presa S., Akhter M., Maaskant P.P., Corbett B., Parbrook P.J. // *Semicond. Sci. Technol.* 2015. V. 30. P. 125007.
- [9] Bessolov V., Kalmykov A., Konenkova E., Kukushkin S., Myasoedov A., Poletaev N., Rodin S. // *J. Cryst. Growth.* 2017. V. 457. P. 202–206.
- [10] Honda Y., Kawaguchi Y., Ohtake Y., Tanaka S., Yamaguchi M., Sawaki N. // *J. Cryst. Growth.* 2001. V. 230. P. 346–350.
- [11] Chen G.T., Chang S.P., Chui J.I., Chang M.N. // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. P. 241904.
- [12] Chen L., Payne J., Strate J., Li C., Zhang J.-M., Yu W.-J., Di Z.-F., Wang X. // *Chin. Phys. B.* 2015. V. 24. P. 118102.
- [13] Huang C.C., Chang S.J., Kuo C.H., Wu C.H., Ko C.H., Wann C.H., Cheng Y.C., Lind W.J. // *J. Electrochem. Soc.* 2011. V. 158. P. H626–H629.
- [14] Smirnov V.K., Kibalov D.S., Orlov O.M., Graboshnikov V.V. // *Nanotechnology.* 2003. V. 14. P. 709–715.
- [15] Smirnov V.K., Kibalov D.S. // *Proc. of the XXI Int. Conf. „Ion-surface interactions“.* Yaroslavl, Russia, 2013. V. 1. P. 62–66.
- [16] Рожавская М.М., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Трошков С.И., Брунков П.Н., Цацульников А.Ф. // *ФТП.* 2013. Т. 47. В. 3. С. 414–419.
- [17] Lee S.C., Sun X.Y., Hersee S.D., Brueck S.R.J. // *J. Cryst. Growth.* 2005. V. 279. P. 289–292.