

06

Эпитаксия полуполярного GaN на подложке Si(001) с буферным слоем SiC

© В.Н. Бессолов, Е.В. Коненкова, С.А. Кукушкин, А.В. Мясоедов,
А.В. Осипов, С.Н. Родин, М.П. Щеглов, Н.А. Феоктистов

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

Поступило в Редакцию 11 декабря 2013 г.

Предложен новый метод синтеза полуполярного нитрида галлия на кремниевой подложке с помощью технологии твердофазной эпитаксии нанокристаллов 3C-SiC. Показано, что применение буферных слоев 3C-SiC и AlN позволяет формировать эпитаксиальные слои полуполярного нитрида галлия с отклонением слоя от полярного положения оси c вюрцитного кристалла на угол $48-51^\circ$ при минимальной полуширине рентгенодифракционной кривой качания $\omega_\theta \sim 24'$. Наблюдавшийся изгиб цилиндрического характера в структуре GaN/AlN/3C-SiC/Si(001) объясняется анизотропной деформацией полуполярного GaN на кремнии.

Структуры на основе III-нитридных полупроводниковых соединений широко применяются в современной оптоэлектронике [1]. Важное физическое свойство III-нитридов с вюрцитной кристаллической структурой состоит в том, что в гетероструктурах слои этих соединений в направлении вдоль оси c характеризуются наличием спонтанной и пьезоэлектрической поляризации, что приводит к внутреннему электрическому полю, существенно снижающему квантовую эффективность светодиодов [2]. Однако существует целый ряд кристаллографических направлений, для которых компоненты спонтанной и пьезоэлектрической поляризации уменьшаются или даже становятся равными нулю. Такие направления могут соответствовать не только неполярной, но и полуполярной ориентации [3]. В связи с этим появилось большое число работ, посвященных росту полуполярного нитрида галлия. Среди различных материалов подложек (Al_2O_3 , SiC, Si) кремний является наиболее привлекатель-

ным. Прежде всего, это обусловлено возможностью использования подложек большого диаметра (до 300 mm), их низкой стоимостью, высокой электрической и тепловой проводимостью. Однако большое рассогласование параметров решеток Si(111) и GaN(0001) (17%) и различие между коэффициентами термического расширения (КТР) Si и GaN (35% [4], 50% [5]) приводят к значительным растягивающим напряжениям в толстых слоях GaN, растущих на кремниевой подложке, и, как следствие, к образованию трещин в этих слоях [5].

В последние годы эпитаксиальные слои полуполярного GaN синтезируют методом эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) на профилированных подложках Si(001) [6]. В этой технологии поверхность Si(001) предварительно маскируют и обрабатывают в химическом травителе. В этом случае, благодаря анизотропной скорости травления для различных кристаллографических направлений, можно оголить плоскость типа Si(111) и на этой плоскости синтезировать слой GaN(1 $\bar{1}$ 01) [6]. В работе [7] показано, что на немаскированной кремниевой подложке с буферными слоями AlGaIn/GaN методом МОГФЭ возможен синтез полуполярных слоев GaN на поверхностях Si(112), Si(113), Si(114), Si(115), Si(116). Метод хлоридно-гидридной газофазной эпитаксии (ХГЭ) в отличие от метода МОГФЭ имеет более высокую скорость роста и успешно используется при росте полуполярных толстых слоев нитрида галлия на подложке *r*-Al₂O₃ [8] и на подложках Si(001) [9] и Si(210) [10].

В данной работе сообщается о новом методе синтеза полуполярных слоев GaN на разориентированных подложках Si(001), на поверхности которых предварительно с помощью технологии твердофазной эпитаксии [11] формируются нанокристаллы 3C-SiC.

Синтез слоев GaN осуществлялся в два этапа на подложках Si(001) толщиной 300 μ m с различной разориентацией поверхности (2, 4 и 7°). На первом этапе с помощью технологии твердофазной эпитаксии был сформирован слой 3C-SiC толщиной около 50 nm, затем на втором этапе методом ХГЭ при температуре подложки 1080°С синтезировался буферный слой AlN толщиной ~ 300–1000 nm, как это было описано нами в [10]. После этого этим же методом при температуре подложки 1050°С выращивались основные слои GaN с толщинами от 3 до 15 μ m. В методе твердофазной эпитаксии формирование квазиступенчатого слоя карбида кремния происходит без процесса маскирования поверхности. Метод базируется на предварительном внедрении в кристал-

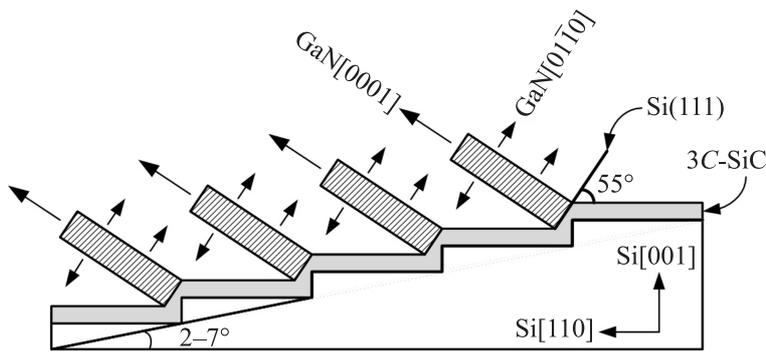


Рис. 1. Схематическое изображение процесса синтеза полуполярного GaN на сформированной квазиповерхности 3C-SiC(111).

лическую решетку кремниевой матрицы атомов углерода из оксида углерода (CO). Если отклонить плоскость Si(001) по направлению [110], а затем нагреть ее до температур выше 600°C, то поверхность, согласно термодинамике, покрывается ступенями, у которых верхележащая грань ступени будет являться плоскостью (001) и которые будут ограничены плоскостями (110). Молекулы CO устремляются перпендикулярно ступеням в глубь Si, и происходит реакция взаимодействия Si с CO с образованием SiC, при этом ступень (110) Si превращается в ступень (111) 3C-SiC [11]. Как известно, угол между плоскостями (111) и (001) в кубическом кристалле составляет 55° (рис. 1).

При эпитаксии слоев AlN и GaN методом ХГЭ на такой поверхности 3C-SiC/Si(001) происходит синтез полуполярного GaN, который возникнет на монокристаллических гранях 3C-SiC(111) слоя толщиной порядка 50 nm (рис. 1).

Структуры GaN/AlN/SiC/Si(001) исследовались методами рентгеновской дифрактометрии (РД), растровой электронной (РЭМ), просвечивающей электронной (ПЭМ) и атомно-силовой (АСМ) микроскопии. Результаты РД указывают на наличие равномерно упорядоченных слоев GaN с отклонением слоя от полярного положения оси с вюрцитного кристалла на угол около 42° для подложки Si(001) с разориентацией 7°. Анализ микроэлектроннограммы (рис. 2), снятой с области интерфейса гетероструктуры GaN/AlN/3C-SiC/Si(001), показал, что полярная ось *c*

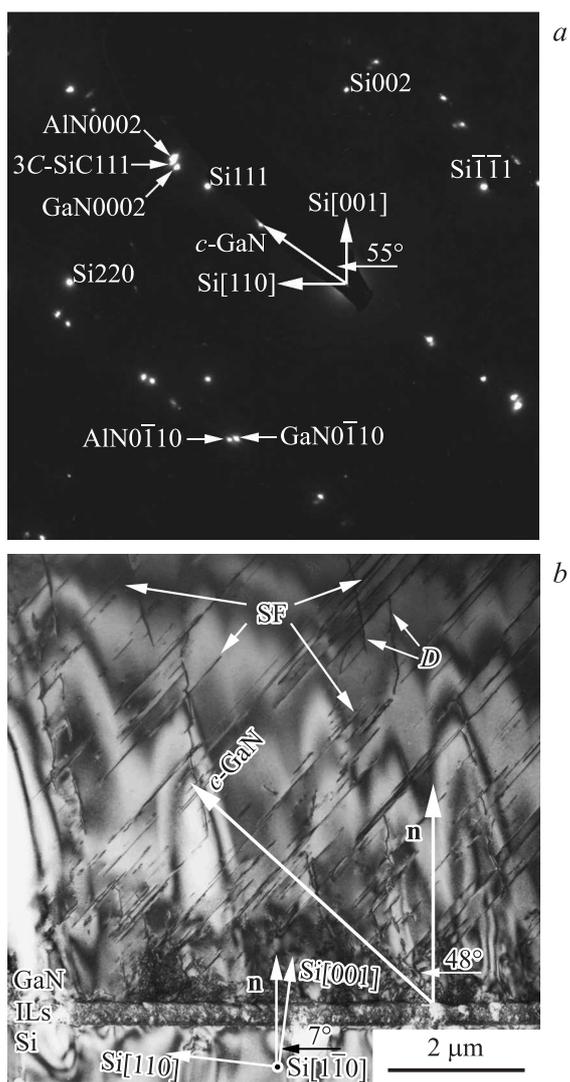


Рис. 2. Микроэлектронграмма (a) и ПЭМ-изображение (b) гетероструктуры GaN/AlN/3C-SiC/Si(001). В слое нитрида галлия стрелками отмечены дефекты упаковки (SF), дислокации (D) и ILs — промежуточные слои AlN и 3C-SiC.

Зависимости радиусов кривизны гетероструктуры в направлении разориентации подложки (R_a) и перпендикулярном к нему (R_b) от толщины слоя GaN

Толщина слоя нитрида галлия, μm	Разориентация подложки, deg	Эксперимент	
		R_a , m	R_b , m
~ 2	2	-1.6	-1.8
10	4	-0.4	-1.6
14	7	-0.25	-1.4

нитрида галлия параллельна направлению [111] кремниевой подложки, т.е. отклонение слоя от полярного положения оси c вюрцитного кристалла составляет около 55° без учета разориентации подложки (рис. 2, *a*). ПЭМ-изображение структуры показало, что угол между нормалью к подложке и перпендикуляром к линиям, представляющим собой изображение дефектов упаковки, составляет 48 и 51° для структур, синтезированных на подложках с разориентацией 7 и 4° соответственно (рис. 2, *b*), что согласуется с результатами анализа микроэлектроннограммы. Совокупность результатов РД и ПЭМ позволит предположить, что комбинированная технология твєдофазной эпитаксии 3C-SiC и ХГЭ GaN на разориентированной подложке Si(001) позволяет синтезировать полуполярный GaN($10\bar{1}2$).

Структуры GaN/AlN/3C-SiC/Si(001) по результатам РД имели изгиб цилиндрического характера. При этом измерения значений радиусов кривизны гетероструктуры в направлении разориентации подложки и перпендикулярном к нему показали существенные изменения лишь в одном из направлений в зависимости от толщины слоя GaN (см. таблицу). Значения полуширин рентгенодифракционных кривых качания (FWHM) для рефлекса $10\bar{1}2$ в слоях GaN для всех структур практически не отличались и имели значение $\omega_\theta \sim 24 \text{ arcmin}$.

Исследования структур с помощью РЭМ (рис. 3, *a*) показали, что поверхность и скол слоя имеют характерную структуру для полуполярного GaN [9,10]. АСМ поверхности слоя GaN показала, что в направлении $\langle 2\bar{1}10 \rangle$ проявляются параллельные линии трещин слоя, что свидетельствует об анизотропном характере деформации структуры (рис. 3, *b*).

Таким образом, нами экспериментально показано, что совокупность методов твердофазной эпитаксии карбида кремния на подложках Si(001)

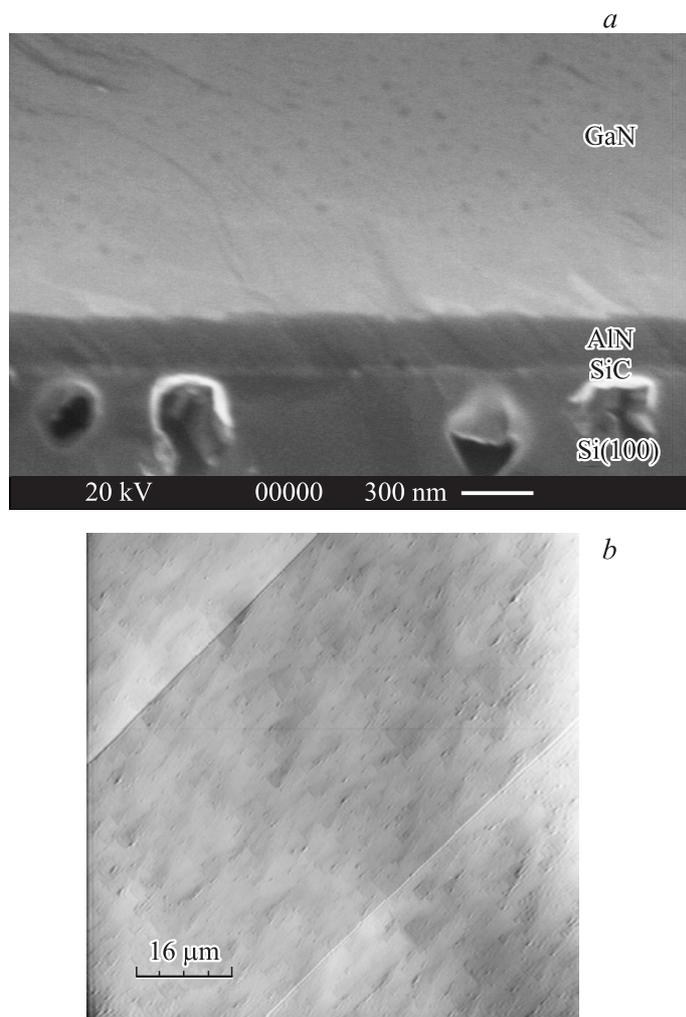


Рис. 3. РЭМ-изображение скола (a) и АСМ-изображение поверхности (b) структуры GaN/AlN/3C-SiC/Si(001).

и ХГЭ нитрида галлия позволяет формировать эпитаксиальные слои GaN(10 $\bar{1}$ 2) с полушириной кривой качания $\omega_{\theta} \sim 24'$. Изгиб цилиндрического характера в структуре GaN/AlN/3C-SiC/Si(001) связан с анизотропной деформацией полуполярного слоя GaN на кремниевой подложке.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-02-12040-офи-м, 13-08-00074-а).

Авторы выражают глубокую признательность С.Г. Жукову за работу по синтезу образцов SiC на Si, а также А.А. Ефимову и А.С. Гращенко за АСМ-измерения поверхности пленок SiC и GaN.

Список литературы

- [1] Nakamura S., Fasol G., Pearton S.J. // The Blue Laser Diode. New York: Springer, 2000. P. 510.
- [2] Seo I.J., Kolmer H., Off J., Sohmer A., Scholz F., Hangleiter A. // Phys. Rev. B. 1998. V. 57. P. R9435–R9438.
- [3] Romanov A.E., Baker T.J., Nakamura S., Speck J.S. // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. P. 023 522.
- [4] Reeber R.R., Wang K. // Mat. Res. Soc. Symp. 2000. V. 622. P. T6.35.1.
- [5] Liu L., Edgar J.H. // Mater. Sci. Eng. R. 2002. V. 37. P. 61–127.
- [6] Tanikawa T., Hikosaka T., Honda Y., Yamaguchi M., Sawaki N. // Phys. Status Solidi C. 2008. V. 5. P. 2966–2968.
- [7] Ravash R., Blasing J., Dadgar A., Krost A. // Appl. Phys. Letter. 2010. V. 97. P. 142 102.
- [8] Strittmatter A., Northrup J., Johnson N.M., Kisin M.V., Spiberg P., El-Ghorrury H., Usikov A., Syrkin A. // Phys. Status. Solidi. B. 2011. V. 248. P. 561–573.
- [9] Бессолов В.Н., Жилев Ю.В., Коненкова Е.В., Полетаев Н.К., Шарофидинов Ш., Щеглов М.П. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 1. С. 21–26.
- [10] Bessolov V.N., Konenkova E.V., Shcheglov M.P., Sharofidinov Sh., Kukushkin S.A., Osipov A.V., Nikolaev A.E. // Phys. Status Solidi. C. 2013. V. 10. P. 433–436.
- [11] Kukushkin S.A., Osipov A.V. // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. P. 024 909-1.