

УДК 538.911

ДЕФОРМАЦИЯ ПОЛУПОЛЯРНОГО И ПОЛЯРНОГО НИТРИДА ГАЛЛИЯ, СИНТЕЗИРОВАННОГО НА ПОДЛОЖКЕ КРЕМНИЯ

© 2022 г. В. Н. Бессолов¹, М. Е. Компан¹, Е. В. Коненкова¹*, С. Н. Родин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: lena@triat.ioffe.ru

Поступила в редакцию 14.02.2022 г.

После доработки 28.02.2022 г.

Принята к публикации 23.03.2022 г.

Представлены результаты исследования деформации полуполярного GaN(11–22) выращенного на наноструктурируемой подложке Si(113) и полярного GaN(0001) – на плоской подложке Si(111). Показано, что эпитаксия полуполярной структуры по сравнению с полярной приводит к снижению деформации слоя, и обусловлена меньшим различием коэффициентов термического расширения подложки и нитрида галлия в полуполярном направлении кристалла, чем в полярном.

DOI: 10.31857/S0367676522070109

В последнее время значительные усилия направляются на создание и исследование структур на основе AlN и GaN, которые перспективны для создания новых каналов связи с высокой скоростью передачи данных для интернет-коммуникаций [1].

В последние годы каналы связи в видимом свете, которые используют диапазон 400–790 ТГц, рассматриваются как перспективные устройства для уменьшения перегрузки полосы пропускания в каналах связи [2]. Оптоэлектронные приборы с использованием полярной плоскости GaN обладают сильным внутренним поляризационным полем, что приводит к пространственному разделению электронов и дырок в квантовых ямах и уменьшению их излучательной рекомбинации и не обладают достаточным быстродействием для каналов связи в видимом свете. Одним из возможных путей повышения быстродействия и эффективности люминесценции квантово-размерных структур является выращивание III-нитридных излучателей вдоль полуполярных ориентаций. Из всех полуполярных ориентаций (11–22) GaN, возможно, является лучшим выбором для получения светодиодов с более длинной длиной волны для высокоскоростных применений [1].

Полуполярные (11–22) GaN слои, выращенные на сапфире m-плоскости, позволили получить высокоэффективные светодиоды InGaN/GaN пригодные для применения их в каналах связи в видимом свете [3]. В настоящее время предпринимаются попытки синтезировать полуполярные нитриды галлия и алюминия [4, 5], в которых

предлагается для синтеза использовать наклонную грань Si(111).

Полуполярный GaN(11–22) на кремнии удалось получать за счет роста на структурированных кремниевых Si(113) подложках с полосатыми канавками [6].

В работе [7] синтезирован GaN(11–22) на микроструктурированных подложках Si(113) с рисунком периодических квадратных окон, который показал низкую плотность дефектов и хорошие оптические свойства. Недавно наша группа получила полуполярные GaN(10–11) и AlN(10–12) на наноструктурированных V-образных Si(100) подложках, которые показали неплохие рентгеноструктурные характеристики [8, 9], однако полуполярные GaN(11–22) слои являются наиболее привлекательными для светодиодов [10].

Данная работа посвящена изучению деформации слоев полуполярного GaN(11–22) при эпитаксии на подложке Si(113), на поверхности которой сформирована наноструктура с размером элементов <100 нм (темплейт NP-Si(113)). Для выполнения поставленной цели формировался темплейт с периодом 75 нм, высотой наклонных узких прямоугольных нанохребтов 75 нм с нанополосками аморфного нитрида кремния SiN на вершинах (рис. 1).

В ходе технологического эксперимента в одинаковых температурно-временных режимах выращивались два образца – полуполярные слои GaN(11–22) на NP-Si(113) и, для сравнения, полярный GaN(0001) на плоской подложке Si(111). Слои AlN и GaN были выращены методом

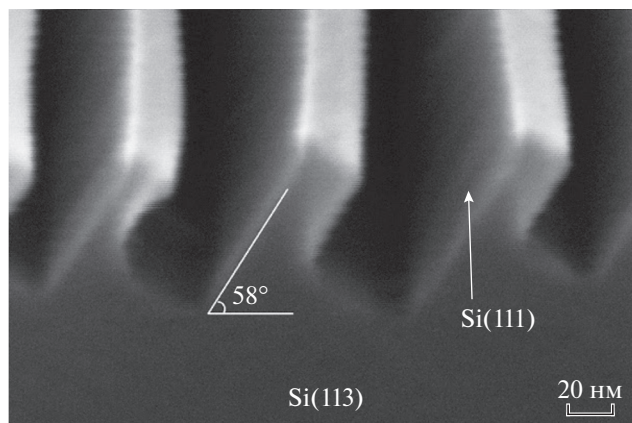


Рис. 1. РЭМ изображение скола NP-Si(113) подложки.

МОСVD на модифицированной установке EpiQuip с горизонтальным реактором и индукционно нагреваемым графитовым подложкодержателем. Водород использовался в качестве несущего газа, а аммиак, триметилгаллий и триметилалюминий – в качестве прекурсоров. Структуры состояли из слоя AlN толщиной 20–30 нм и нелегированного слоя GaN толщиной ~1 мкм. Структурные характеристики слоев GaN определялись методами рентгеновской дифрактометрии, растворовой электронной микроскопии, комбинационного рассеяния света (КРС). КРС изучалось с помощью рамановского спектрометра MRS 320. Источником света являлся гелий-неоновый лазер с длиной волны излучения 632.8 нм. Исследования проводились при комнатной температуре аналогично [11].

Рентгенодифракционный анализ слоев показал, что слои имеют полуширину кривой рентгеновской дифракции $\omega_{\theta} \sim 30$ угл. мин для GaN(11–22) и $\omega_{\theta} \sim 22$ угл. мин для GaN(0002).

Исследование гетероструктур GaN(11–22)/NP-Si(113) и GaN(0001)/Si(111) с помощью КРС позволило выявить различие в деформации структур при эпитаксии на плоской подложке Si(111) и на темплейте NP-Si(113). Спектры КРС, измеренные в области фононной моды $E_2(\text{high})$, для слоев GaN, выращенных на NP-Si(113) и Si(111), в целом соответствовали тому, что можно было ожидать и содержали линии, принадлежащие кремниевой подложке, линии $E_2(\text{high})$, обусловленные нитридом галлия. Положение линии $E_2(\text{high})$ зависело от структуры и составляло 563.3 см^{-1} для GaN(0001)/Si(111) и 565.2 см^{-1} для GaN(11–22)/NP-Si(113) (рис. 2).

Различие в положении линий $E_2(\text{high})$ для этих структур можно объяснить следующим образом. Из данных по КРС хорошо видно, что положение пика линии $E_2(\text{high})$ для слоев GaN сдвинуто в

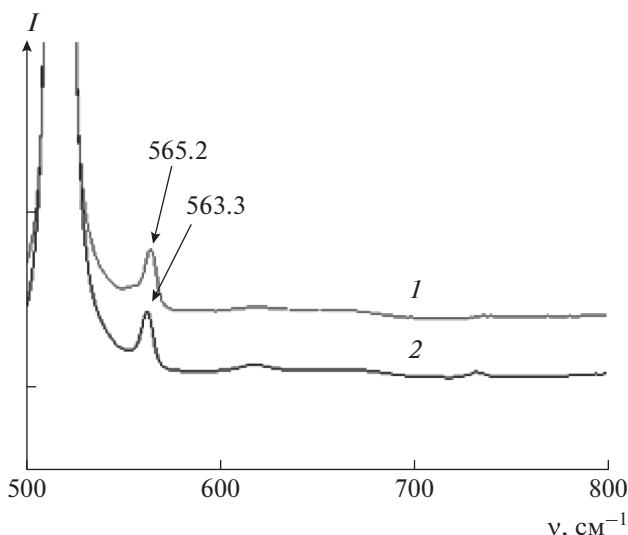


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния света структур GaN(11–22)/Si(113), обозначен 1, и GaN(0001)/Si(111), обозначен 2.

низкочастотную сторону по отношению к его положению в недеформированном слое (при оценке принималось, что для ненапряженной структуры положение $E_2(\text{high}) = 568 \text{ см}^{-1}$), что свидетельствует о наличии деформации растяжения GaN в плоскости, параллельной плоскости подложки. Для слоев GaN(0001) и GaN(11–22) по выражению $\Delta\omega = K\sigma$, где $K = 4.2 \text{ см}^{-1} \cdot \text{ГПа}^{-1}$, оценивалась величина продольных упругих напряжений $-\sigma$. Оказалось, что величины σ существенно различаются: $\sigma_{(0001)} - 1.12 \text{ ГПа}$ и $\sigma_{(11-22)} - 0.67 \text{ ГПа}$, соответственно, для GaN(0001)/Si(111) и GaN(11–22)/NP-Si(113) структур.

Полученные величины упругих напряжений включают в себя остаточные упругие напряжения $\sigma_{\Delta\alpha}$, которые возникают при температуре эпитаксии GaN = 1030°C, и напряжения $\sigma_{\Delta\alpha}$, которые возникают при охлаждении структур GaN(0001)/Si(111) и GaN(11–22)/NP-Si(113). Поскольку зарождение и рост слоя GaN происходит на плоскости Si(111) или на гранях Si(111) мы полагаем, что остаточные упругие напряжения при температуре эпитаксии $\sigma_{\Delta\alpha}$ будут одинаковы для обоих типов структур, а напряжения, которые возникают при охлаждении могут различаться из-за различия коэффициентов термического расширения плоскостей сопряжения: GaN(0001)/Si(111) и GaN(11–22)/NP-Si(100).

Действительно, величины упругих напряжений структур GaN(0001)/Si(111) и GaN(11–22)/NP-Si(113), которые возникают при охлаждении, зависят от различия коэффициентов термического расширения GaN и Si $\Delta\alpha = \alpha_{\text{GaN}} - \alpha_{\text{Si}}$ для плоскостей сопряжения. Как известно, коэффициен-

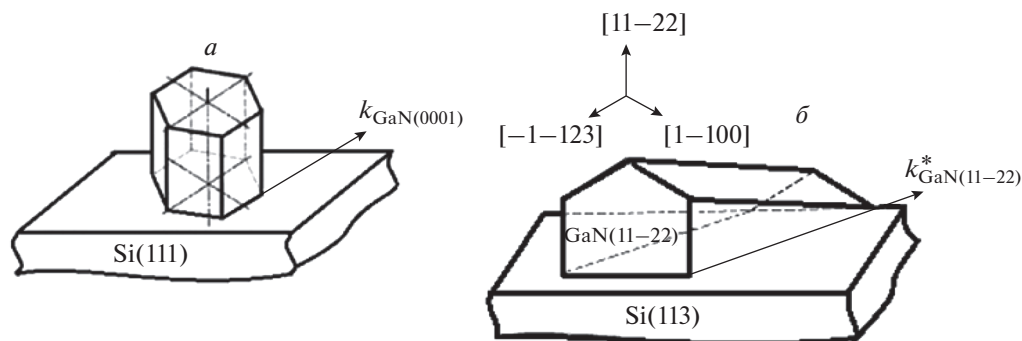


Рис. 3. Схематическое изображение соотношений коэффициентов термического расширения слоев GaN(0001) (а) и GaN(11–22) (б) на подложках кремния.

ты термического расширения Si $k_{Si} = 3.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [12], а в GaN из-за анизотропии кристаллов коэффициенты различаются: в направлении осей, $\langle a \rangle - k_{\text{GaN}(a)} = 5.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [13] и $\langle c \rangle - k_{\text{GaN}(c)} = 3.17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [14]. Тогда, согласно [15], напряжение, возникающее в гетероструктуре из-за разницы коэффициентов термического растяжения, можно оценить из выражения

$$\sigma_{\Delta\alpha} \approx \frac{E}{1-\nu} \times \Delta \propto \Delta T, \quad (1)$$

где $E = 295 \text{ ГПа}$ и $\nu = 0.25$, а ΔT – разница между температурой эпитаксии и комнатной. Оказалось, что упругие напряжения, которые могут возникать при охлаждении полярной структуры составляют величину $\sigma_{\Delta\alpha(0001)} = -0.79 \text{ ГПа}$ тогда напряжения, которые возникли при температуре эпитаксии для полярной структуры составят величину и $\sigma_{\Delta\alpha(0001)-} = -0.33 \text{ ГПа}$. Основываясь на нашем предположении о равенстве величин упругих напряжений, возникающих при температуре эпитаксии из-за использования при зарождении плоскости Si(111) и грани Si(111) определим величину $\sigma_{\Delta\alpha}$ для полуполярной структуры, которая оказалась -0.34 ГПа .

Поскольку в настоящее время известны коэффициенты термического расширения только в направлении $\langle a \rangle$ и $\langle c \rangle$, то при охлаждения полуполярного GaN(11–22) слоя на кремниевой подложке предлагается ввести эффективный коэффициент термического расширения полуполярного слоя в направлении $\langle 11-22 \rangle - k_{\text{GaN}(11-22)}^*$, который должен быть в интервале $k_{\text{GaN}(c)} < k_{\text{GaN}(11-22)}^* < k_{\text{GaN}(a)}$ (рис. 3б). Очевидно, что если положить $k_{\text{GaN}(11-22)}^* = 4.47 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, то тогда величина $\sigma_{\Delta\alpha(11-22)} = -0.34 \text{ ГПа}$ и совпадает с экспериментально полученной величиной напряжения для полуполярного слоя.

Итак, применение наноразмерной структурированной подложки Si(113) при формировании

слоя полуполярного GaN(11–22) на темплейте предпочтительней, чем полярного GaN(0001) на подложке Si(111) из-за меньшей деформации в процессе охлаждения структуры от температуры роста до комнатной.

Авторы благодарят В.К. Смирнова за предоставление темплейтов. Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-00096).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haggar J.I.H., Cai Y., Ghataora S.S. et al. // ACS Appl. Electron. Mater. 2020. V. 2. No. 8. P. 2363.
2. Bao Q., Zhu T., Zhou N. et al. // J. Cryst. Growth. 2015. V. 419. P. 52.
3. Quan Z., Dinh D.V., Presa S. et al. // IEEE Photonics J. 2016. V. 8. No. 5. P. 1.
4. Honda Y., Kameshiro N., Yamaguchi M., Sawaki N. // J. Cryst. Growth. 2002. V. 242. No. 1–2. P. 82.
5. Bessolov V., Zubkova A., Konenkova E. et al. // Phys. Stat. Sol. B. 2019. V. 256. No. 2. Art. No. 1800268.
6. Tanikawa T., Hikosaka T., Honda Y. et al. // Phys. Stat. Sol. C. 2008. V. 5. No. 9. P. 2966.
7. Yu X., Hou Y., Shen S. et al. // Phys. Stat. Sol. C. 2016. V. 13. No. 5–6. P. 190.
8. Бессолов В.Н., Компан М.Е., Коненкова Е.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 11. С. 3; Bessolov V.N., Kompan M.E., Konenkova E.V. et al. // Tech. Phys. Lett. 2019. V. 45. No. 6. P. 529.
9. Бессолов В.Н., Компан М.Е., Коненкова Е.В., Пантелеев В.Н. // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 2. С. 12; Bessolov V.N., Kompan M.E., Konenkova E.V., Panteleev V.N. // Tech. Phys. Lett. 2020. V. 46. No. 1. P. 59.
10. Shen S., Zhao X., Yu X. et al. // Phys. Stat. Sol. A. 2020. V. 217. No. 7. Art. No. 1900654.
11. Аксъянов И.Г., Компан М.Е., Кулькова И.В. // ФТТ. 2010. Т. 52 № 9. С. 1724; Aksyanov I.G., Kompan M.E., Kul'kova I.V. // Phys. Solid State. 2010. V. 52. No. 9. P. 1850.

12. *Katona T.M., Speck J.S., Denbaars S.P.* // Phys. Stat. Sol. A. 2002. V. 194. No. 2. P. 550.
13. *Qian W., Skowronski M., Rohrer G.S.* // MRS Online Proc. Library. 1996. V. 423. P. 475.
14. *Maruska H.P., Tietjen J.J.* // Appl. Phys. Lett. 1969. V. 15. No. 10. P. 327.
15. *Dai Y., Li S., Gao H. et al.* // J. Mater. Sci. Mater. Electron. 2016. V. 27. No. 2. P. 2004.

Deformation of semipolar and polar gallium nitride synthesized on a silicon substrate

V. N. Bessolov^a, M. E. Kompan^a, E. V. Konenkova^a, *, S. N. Rodin^a

^a *Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021 Russia*

**e-mail: lena@triat.ioffe.ru*

The results of a study of the deformation of semipolar GaN(11–22) grown on a nanostructured Si(113) substrate and polar GaN(0001) grown on a Si(111) are presented. It is shown that the epitaxy of the semipolar structure in comparison with the polar one leads to a decrease in the deformation of the layer and is due to a smaller difference in the coefficients of thermal expansion of the substrate and gallium nitride in the semipolar direction of the crystal than in the polar one.