

УДК 621.315.592

Морфология поверхности AlN-слоев, выращенных на наноструктурированном темплайте SiN_x/Si(100)

© В.Н. Бессолов¹, Е.В. Коненкова^{1,¶}, С.Н. Родин¹, А.В. Соломникова²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, 197022 Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: lena@triat.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 7 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 28 февраля 2024 г.

Принята к публикации 28 февраля 2024 г.

Морфология AlN-слоев, выращенных методом химического осаждения из металлорганических соединений на наноструктурированных подложках NP-Si(001), покрытых SiN_x, изучалась атомно-силовой микроскопией. Слои AlN, выращенные на темплайте SiN_x/NP-Si(100), демонстрируют шероховатость поверхности в 3.8 раза меньше, чем полученные на NP-Si(100), и близки к величине шероховатости для слоя AlN, выращенного на плоской подложке Si(111). Предложена модель, объясняющая различия в формировании морфологии поверхности AlN-слоев на подложке NP-Si(100) и темплайте SiN_x/NP-Si(100).

Ключевые слова: нитрид алюминия, нитрид кремния, нано-структурированная подложка кремния.

DOI: 10.61011/FTP.2024.01.57628.6003

1. Введение

В последние десятилетия к AlN обращено большое внимание из-за уникального сочетания его замечательных свойств. Этот полупроводник благодаря широкой запрещенной зоне (6.2 эВ) имеет высокое напряжение пробоя, большую теплопроводность и высокую пьезоэлектрическую постоянную, а также имеет большой потенциал для разработки мощных электронных [1], ультрафиолетовых фотонных [2] и акустических [3] полупроводниковых устройств. Из-за ограниченного размера и высокой стоимости объемных подложек AlN-слои обычно выращивают на чужеродных подложках, таких как сапфир и кремний (Si) [4]. Кремниевые подложки привлекательны главным образом из-за больших размеров и интеграции нитрид-галлиевой и кремниевой электроники [5].

Однако выращивание высококачественного AlN на подложках Si является весьма сложной задачей. Во-первых, большое несоответствие решеток (~ 19%) между AlN и Si(111) обычно приводит к высокой плотности пронизывающих дислокаций и начальному растягивающему напряжению. Во-вторых, огромное несоответствие коэффициентов теплового расширения (~ 43%) между AlN и Si приводит к образованию трещин при охлаждении структуры от температуры эпитаксии до комнатной [6]. Поэтому толщина слоев AlN, выращенных на Si, как правило, не превышает 1 мкм и недостаточна для подавления проникающих от гетерограницы дислокаций [7]. В последние годы для гетероэпитаксии AlN на наиболее используемой в кремниевой электронике подложке Si(100) предложено формировать поверхность подложки, как правило, в виде прямоугольных или

треугольных хребтов микронного и наномикронного размеров [8]. При формировании структурированной поверхности после нанесения маски и химического травления можно оголить плоскости Si(111) и Si($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$) и выращивать слои под определенным углом, например под углом 54°, и таким образом сформировать полуполярные (10 $\bar{1}\bar{1}$) слои на кремниевой подложке [8].

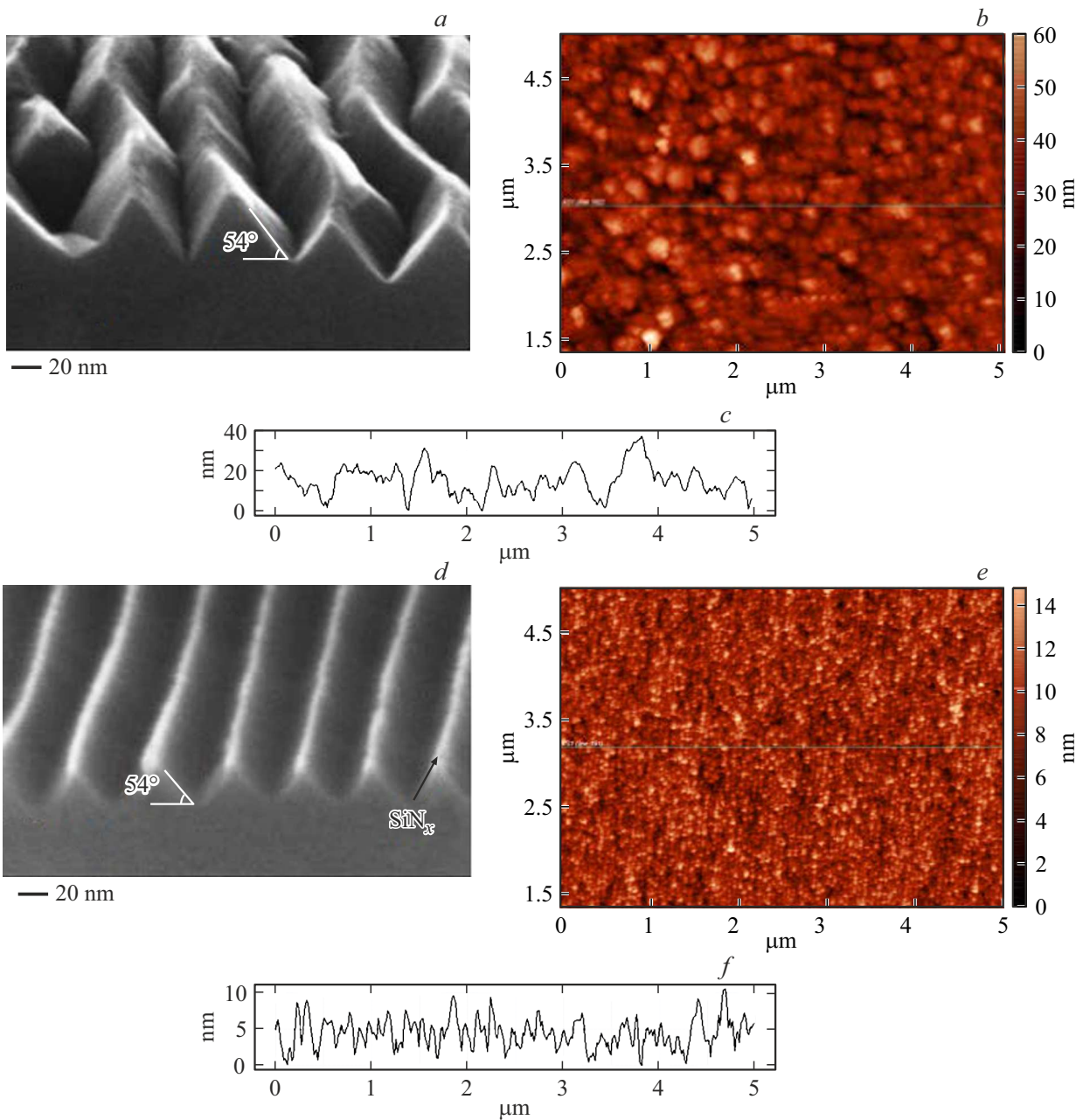
Для улучшения качества слоев AlN при зарождении на плоских кремниевой или сапфировой подложках используют предварительное формирование тонких буферных слоев SiN_x. Так, при эпитаксии полуполярного AlGaN(11 $\bar{2}\bar{2}$) на плоской *m*-Al₂O₃ подложке использование буферного SiN_x-слоя привело к уменьшению дефектов упаковки базисной плоскости [9,10].

Установлено, что SiN_x может существовать в ряде кристаллографических вариаций, а модификация β-Si₃N₄ известна как наиболее стабильная [11] и характеризуется гексагональной элементарной ячейкой с параметрами решетки $a = b = 7.63 \text{ \AA}$, $\alpha = 60^\circ$ и $c = 2.91 \text{ \AA}$ [12], которая успешно применяется при селективной эпитаксии GaN-слоев на сапфировой подложке [13].

В данной работе мы сравнивали морфологию поверхности слоев AlN, выращенных методом химического осаждения из металлорганических соединений (MOCVD) на плоских Si(111)-подложках, на V-образных наноструктурированных подложках Si(100) без нанесения и с нанесением нанометрового буферного SiN_x-слоя.

2. Технология

Наноструктурированные подложки формировались аналогично [14]. При бомбардировке поверхности крем-



РЭМ-изображение: *a* — подложки NP-Si(100), *d* — темплейта $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NP-Si}(100)$; АСМ-изображение и профиль поверхности структур: *b, c* — $\text{AlN}/\text{NP-Si}(100)$; *e, f* — $\text{AlN}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NP-Si}(100)$.

ниевой подложки ионами азота происходит формирование эмбриональных волн с малой нанометровой амплитудой [14]. Затем в результате химического щелочного травления формировались подложки с наноструктурированной поверхностью NP-Si(100) (рисунок, *a*) и после бомбардировки NP-Si(100) в потоке N^+ — темплейты $\text{SiN}_x/\text{NP-Si}$. Видно, что у темплейтов на вершинах нанорезбов проявляются SiN_x в виде светлых полосок (рисунок, *d*), которые имеют разную толщину SiN_x на вершине и склонах.

Слой AlN на NP-Si(100), темплейтах $\text{SiN}_x/\text{NP-Si}(100)$ и плоских Si(111)-подложках толщиной ~ 200 нм были

выращены методом MOCVD аналогично [15]. Поверхности образцов изучались с помощью сканирующего зондового микроскопа SolverNEXT. Слои AlN выращивались на плоской подложке Si(111) и на подложках V-образного профиля — NP-Si(100), которые имели хребты высотой ~ 40 нм и грани Si(111) и Si(1 $\bar{1}\bar{1}$) двух типов: без покрытия (рисунок, *a*) и с SiN_x (рисунок, *d*).

3. Результаты и обсуждение

На рисунке, *a–f* показаны топографические особенности морфологии поверхности AlN в гетероструктурах

Среднее квадратичное значение (RMS) и среднее значение шероховатости (RA) слоев AlN, выращенных на разных подложках

| Подложка темплейт | Среднеквадратичное значение (RMS), нм | Среднее значение шероховатости (RA) |
|------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Si(111) | 1.996 | 1.470 |
| NP-Si(100) | 8.574 | 6.726 |
| SiN _x /NP-Si(100) | 2.214 | 1.757 |

AlN/NP-Si(100) и AlN/Si₃N₄/NP-Si(100), которые показывают, что поверхность AlN, выращенного на темплейте, имеет более гладкую поверхность, чем на подложке NP-Si(100). Среднее квадратичное значение (RMS) и среднее значение шероховатости (RA) слоев AlN, выращенных на подложке Si(111), наноструктурированной подложке NP-Si(100) и темплейте SiN_x/NP-Si(100), приведены в таблице.

Видно, что величины RMS, RA слоя, выращенного на подложке Si(111), близки к величинам RMS, RA слоев, полученных на темплейте (см. таблицу), и отличаются от величины RMS и RA слоя, выращенного на NP-Si(100)-подложке.

Как известно, при MOCVD эпитаксии AlN-слоев обнаружено, что начальное соотношение V/III контролирует полярность и морфологию поверхности. Слои AlN, выращенные при высоких начальных соотношениях V/III, демонстрируют N-полярность, но с шероховатой поверхностью, в то время как выращенные при низких начальных соотношениях V/III имеют полярность Al и гладкую поверхность [16]. В наших экспериментах отношение V/III оставалось постоянным при росте слоев на подложках и темплейте.

Различие в морфологии поверхности мы связываем с различием длины поверхностной диффузии атомов на наноструктурированной подложке и темплейте. Действительно, длину поверхностной диффузии λ_s можно выразить через E_{ad} — энергетический барьер адсорбции, E_d — потенциальный энергетический барьер диффузии [17]:

$$\lambda_s = \lambda_e e^{\frac{E_{ad}-E_d}{k_B T}}, \quad (1)$$

где k_B — коэффициент Больцмана, λ_e — эффективная дистанция скачка на поверхности или расстояние между двумя соседними узлами решетки.

Значение ($E_{ad}-E_d$) для поверхности Si(111) составляет величину 0.55 эВ/атом, а для поверхности Si(111), покрытой Si₃N₄, — 0.62 эВ/атом [18]. Из этих данных следует, что при формировании зародыша AlN на гранях подложки и темплейта величина λ_s должна быть больше на SiN_x/NP-Si(100), чем на NP-Si(100). Это должно привести к более быстрому росту в области наноканавок темплейта и к уменьшению средней высоты рельефа, что и наблюдаем в эксперименте. Отметим, что для гетероструктур AlN/3C-SiC/Si(111), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, шероховатость поверх-

ности AlN-слоя снижается при уменьшении скорости роста [19].

4. Заключение

Таким образом, величина шероховатости слоя AlN, выращенного на темплейте SiN_x/NP-Si(100) в 3.8 раза меньше, чем выращенного на NP-Si(100), и близка к этим величинам для слоя AlN, выращенного на плоской подложке Si(111).

Благодарности

Авторы благодарят В.К. Смирнова за предоставление NP-Si(100)-подложек и Т.А. Орлову за полезные дискуссии.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Wang, W.D. Hu, J. Wang, X.D. Wang, S.W. Wang, X.S. Chen, W. Lu. Appl. Phys. Lett., **100**, 123501 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.3695154>
- [2] Y. Taniyasu, M. Kasu, T. Makimoto. Nature, 441, 325 (2006). <https://doi.org/10.1038/nature04760>
- [3] F. Jose, R. Ramaseshan, S.T. Sundari, S. Dash, A.K. Tyagi, M.S.R.N. Kiran, U. Ramamurty. Appl. Phys. Lett., **101**, 254102 (2012). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4772204>
- [4] I.S. Ezubchenko, M.Y. Chernykh, I.O. Mayboroda, I.N. Trun'kin, I.A. Chernykh, M.L. Zanaveskin. Crystallogr. Rep., **65** (1), 122 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1063774520010071>
- [5] Y. Sun, K. Zhou, M. Feng, Z. Li, Y. Zhou, Q. Sun, J. Liu, L. Zhang, D. Li, X. Sun, D. Li, Sh. Zhang, M. Ikeda, H. Yang. Light.: Sci. Appl., **7** (1), 13 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0008-y>
- [6] Z.-Z. Zhang, J. Yang, D.-G. Zhao, F. Liang, P. Chen, Z.-S. Liu. Chin. Phys. B, **32** (2), 028101 (2023). <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ac6b2b>
- [7] A. Bardhan, S. Raghavan. J. Cryst. Growth, **578**, 126418 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2021.126418>
- [8] В.Н. Бессолов, Е.В. Коненкова. ЖТФ, **93** (9), 1235 (2023). <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.09.56211.31-23>
- [9] M. Monavarian, N. Izyumskaya, M. Müller, S. Metzner, P. Veit, N. Can, S. Das, Ü. Özgür, F. Bertram, J. Christen, H. Morkoç, V. Avrutin. J. Appl. Phys., **119** (14), 145303 (2016). <https://doi.org/10.1063/1.4945770>
- [10] X. Luo, X. Zhang, Y. Qian, R. Fang, B. Chen, Y. Shen, Sh. Xu, J. Lyu, M.-J. Lai, G. Hu, Y. Cui. Appl. Surf. Sci., **608** (SC), 155262 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155262>
- [11] F.L. Riley. J. Am. Ceram. Soc., **83** (2), 245 (2000). <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01182.x>
- [12] D. du Boulay, N. Ishizawa, T. Atake, V. Streltsov, K. Furuya, F. Munakata. Acta Cryst. B, **60** (4), 388 (2004). <https://doi.org/10.1107/S010876810401393X>

- [13] В.В. Лундин, А.Ф. Цацульников, С.Н. Родин, А.В. Сахаров, С.О. Усов, М.И. Митрофанов, Я.В. Левицкий, В.П. Евтихий. *ФТП*, **52** (10), 1237 (2018).
<https://doi.org/10.21883/FTP.2018.10.46467.8861>
- [14] V.K. Smirnov, D.S. Kibalov, O.M. Orlov, V.V. Graboshnikov. *Nanotechnology*, **14** (7), 709 (2003).
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/14/7/304>
- [15] В.Н. Бессолов, Е.В. Коненкова, Т.А. Орлова, С.Н. Родин, А.В. Соломникова. *ЖТФ*, **92** (5), 720 (2022).
<https://doi.org/10.21883/JTF.2022.05.52376.12-22>
- [16] W. Luo, L.Li, Zh.Li, Q. Yang, D. Zhang, X. Dong, D. Peng, L. Pan, Ch. Li, B. Liu, R. Zhong. *J. Alloys Compd.*, **697**, 262 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.126>
- [17] I. Bryan, Z. Bryan, S. Mita, A. Rice, J. Tweedie, R. Collazo, Z. Sitar. *J. Cryst. Growth*, **438**, 81 (2016).
<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.12.022>
- [18] L.L. Levenson, A. B. Swartzlander, A. Yahashi, H. Usui, I. Yamada. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **8**, 1447 (1990).
<https://doi.org/10.1116/1.576855>
- [19] А.В. Бабаева, В.К. Неволин, В.Н. Стаценко, С.Д. Федотова, К.А. Царик. *Изв. РАН. Механика твердого тела*, **1**, 102 (2020). <https://doi.org/10.31857/S0572329920010043>

Редактор Г.А. Оганесян

Surface morphology of AlN layers grown on a nano-structured SiN_x/Si(100) template

V.N. Bessolov¹, E.V. Konenkova¹, S.N. Rodin¹,
A.V. Solomnikova²

¹ Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg Electrotechnical University „LETI“,

197022 St. Petersburg, Russia

Abstract The morphology of AlN layers grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition on nano-structured NP-Si(001) substrates coated with SiN_x has been studied using atomic force microscopy. The AlN layers grown on the SiN_x/NP-Si(100) template demonstrate a surface roughness 3.8 times less than those obtained on NP-Si(100), and are close to the roughness value for the AlN layer grown on a flat Si(111) substrate. It has been proposed a model to explain the differences in the formation of the surface morphology of AlN layers on the NP-Si(100) substrate and the SiN_x/NP-Si(100) template.