

ТОЛСТЫЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ НИТРИДА ГАЛЛИЯ НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ

Ш.Ш. Шарофидинов^{1-3*}, А.А. Головатенко^{2,3}, И.П. Никитина³, Н.В. Середова^{2,3},
М.Г. Мынбаева¹⁻³, В.Е. Бугров¹, М.А. Одноблюдов⁴, С.И. Степанов⁴,
В.И. Николаев¹⁻⁴

¹Университет ИТМО, Кронверкский пр. 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия

²ООО «Совершенные кристаллы», Политехническая ул. 28, Санкт-Петербург, 194064, Россия

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Политехническая ул. 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия

⁴СПбПУ, Политехническая ул. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

*e-mail: shukrillo71@mail.ru

Аннотация. В работе исследовалась возможность роста качественных толстых слоев GaN на кремниевой подложке в реакторе хлорид-гидридной эпитаксии (ХГЭ), разработанном для подложек диаметром до 76 мм. Для предотвращения реакции GaN и кремния осаждался слой AlN методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС). Проведена характеристика выращенных слоев методами фотолюминесценции, рентгеновской дифрактометрии, растровой электронной микроскопии (РЭМ) и методом измерения вольт-фарадных характеристик с использованием ртутного зонда. Продемонстрирована возможность получения гладких слоев до 10 мкм, большие фрагменты которых не имеют трещин. Установлено, что для лучших образцов полуширина кривой качания составила ~ 500 arcsec.

1. Введение

На протяжении последнего десятилетия технология роста GaN на кремниевой подложке была в центре внимания научных групп, занимающихся эпитаксиальным ростом нитридных полупроводников [1-3]. Тому есть несколько причин. Во-первых, это связано с экономическим фактором, а именно, с необходимостью получения светоизлучающих и силовых эпитаксиальных структур на наиболее дешевых подложках [1]. Во-вторых, развитие технологии «GaN-на-кремнии» открывает путь к интеграции структур на основе GaN с кремниевой электроникой [2]. И, наконец, кремниевые подложки могут быть использованы для получения собственной подложки GaN методом ХГЭ [3]. Собственная подложка GaN перспективна для дальнейшего развития нитрид галлиевой электроники и уже сейчас позволяет выращивать высококачественные гетероструктуры для лазеров и сверхъярких светодиодов [4].

Препятствием для успешной эпитаксии GaN на кремнии является химическая реакция между галлием и кремнием при ростовых температурах выше 900 °С, вызванная диффузией кремния в растущий слой [5-7]. Решить данную проблему можно за счет понижения температуры роста, однако, при температурах ниже 900 °С невозможно получить слои GaN высокого качества. Поэтому, было разработано несколько подходов, позволяющих осуществлять высокотемпературный рост GaN за счет устранения контакта с кремнием [8-10].

Еще одной существенной проблемой является большое рассогласование постоянных решетки (17%), а также коэффициентов термического расширения GaN ($5.59 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и кремния ($3.77 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Это приводит к изгибу и растрескиванию выращиваемых слоев. Решить данную проблему удастся, например, за счет осаждения промежуточного слоя из сверхрешетки AlN/GaN, которая демпфирует возникающие напряжения, предотвращая растрескивание [10]. Также известен способ, заключающийся в создании слоя SiC на поверхности кремниевой подложки, что позволяет уменьшить рассогласование постоянных решетки GaN и подложки [11].

Максимальная толщина слоя GaN без трещин, получаемая с применением сверхрешеток методом ГФЭ МОС согласно последним данным компании-лидера в технологии «GaN-на-кремнии» [12] достигает 8 мкм. Вместе с тем есть достижения и в получении более толстых слоев (вплоть до нескольких миллиметров) [3], однако, при этом речь идет об отделении слоя от стартовой подложки в процессе роста. Для получения таких толстых слоев используют метод ХГЭ, который может обеспечить высокую скорость роста (~ 100 мкм/час и более) и хорошее структурное качество. Кремниевая подложка и в этом случае имеет преимущество по сравнению с традиционной сапфировой подложкой. Дело в том, что для отделения слоя от сапфира требуется ряд сложных технологических операций [13-16], в то время как кремний легко удаляется путем химического травления. Последующий рост на отделенном слое позволяет гипотетически сформировать так называемый квази-объемный кристалл нитрида галлия без трещин практически любой толщины. Однако, в реальной ситуации таким путем, как описано в [3] удалось получить крайне малое число кристаллов, т.е. нельзя считать проблему полностью решенной.

В данной работе мы рассматриваем возможный промежуточный вариант между доступным МОС-гидридным темплэйтом GaN/Si и дорогой квази-объемной подложкой нитрида галлия, ставя задачу получения толстых слоев на подложках кремния, с толщиной более чем достигнуто в [12], ориентируясь на высокоскоростной ХГЭ процесс. Нами были исследованы возможности роста ХГЭ-рост толстых слоев GaN (до 10 мкм) на кремниевой подложке с использованием буферного слоя AlN, полученного методом ГФЭ МОС. Ранее в [7] мы исследовали аналогичный процесс с использованием буферного слоя AlN, выращенного методом ХГЭ, где удалось подавить диффузию кремния в слой GaN и получить слой GaN без трещин, но лишь при толщинах менее 1 мкм, при этом выращенные слои имели огрубленную морфологию поверхности.

2. Методика и результаты экспериментов

Для роста слоев нитрида галлия использовались кремниевые подложки ориентации (111). Чтобы избежать реакции GaN с кремнием, в реакторе ГФЭ МОС был нанесен подслой AlN толщиной 100 нм. Полученные пластины AlN/Si использовались далее для роста толстого слоя GaN методом ХГЭ. Время роста GaN на пластинах AlN/Si варьировалось от 2 до 10 минут. Рост осуществлялся в атмосфере аргона при давлении около 1 атм. и температуре 1050 °С. Полученные образцы были исследованы методами фотolumинесценции, рентгеновской дифрактометрии, растровой электронной микроскопии и методом измерения вольт-фарадных характеристик с использованием ртутного зонда.

Для исследования морфологии поверхности и определения толщины полученных слоев, а также был использован растровый электронный микроскоп JSM-7100F. По снимкам поверхности с гладкой морфологией можно судить о том, что рост GaN происходил в режиме двумерного роста (Рис. 1а), не наблюдалось, отмеченных ранее в [7] характерных для трехмерного роста «пирамид», как показано на Рис. 1б.

Установлено, что скорость роста GaN равнялась ~ 60 мкм/час. Толщина слоев определялась по сколу (Рис. 1в). На сколе при большем увеличении (Рис. 1г) можно видеть наличие сплошного однородного подслоя AlN толщиной ~ 100 нм без особенностей, описанных в [6], связанных с химическим взаимодействием между галлием и кремнием.

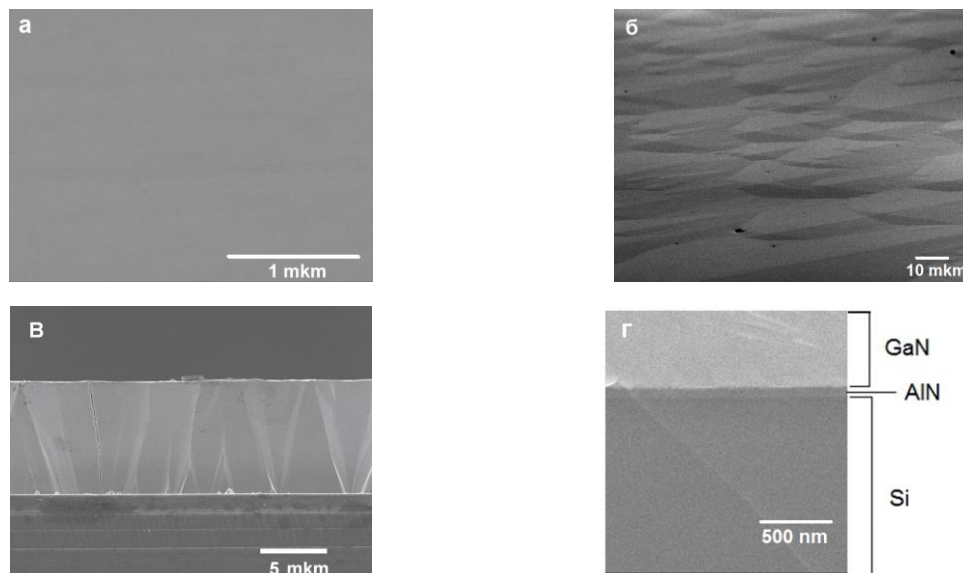


Рис. 1. РЭМ изображения слоя GaN на пластинах AlN/Si: а) гладкая морфология поверхности слоя GaN; б) вид поверхности GaN при неоптимальном выборе ростовых параметров в случае трехмерного роста; в) скол образца; г) увеличенное изображение скола в области подслоя AlN.

На рисунке 2 приведена типичная кривая качания рентгеновской дифракции (0002) для выращенных толстых слоев GaN. Кривая качания может быть представлена в виде суперпозиции двух пиков с полушириной 800-1000 arcsec и 450-550 arcsec. Наличие двух пиков, скорее всего, связано с неоднородностью слоя по глубине, различием качества слоя GaN вблизи интерфейса и у поверхности. Это представление хорошо согласуется с известным фактом улучшения структурного качества выращиваемого слоя GaN по мере увеличения толщиной [17].

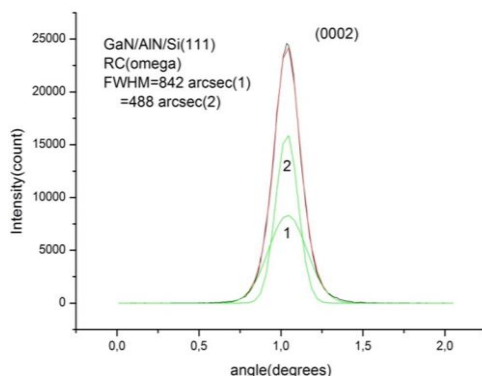


Рис. 2. Рентгеновская кривая качания для слоя GaN, выращенного на пластине AlN/Si.

Концентрация и распределение электрически активных примесей в выращенных слоях определялось из вольт-фарадных характеристик (С-V) с использованием ртутного зонда, как барьера Шоттки к поверхности эпитаксиальной структуры. Измерения концентрации электрически активных примесей показали, что полученные слои имеют

электронный тип проводимости с концентрацией некомпенсированных доноров на уровне $(2-6) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

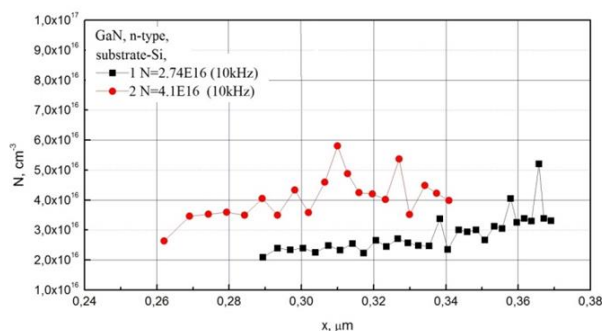


Рис. 3. Профиль распределения концентрации N_d-N_a , измеренный в двух точках, для слоя GaN, выращенного на AlN/Si.

Измерения фотолюминесценции проводились с помощью спектрометра Ocean Optics USB4000-UV-VIS. В качестве источника возбуждения использовался азотный лазер. Для всех образцов наблюдался пик краевой люминесценции GaN с максимумом 3.45 эВ и полушириной ~ 30 мэВ при $T=100$ К, что говорит о хорошем оптическом качестве слоя. В тоже время форма пика с характерной длинноволновой частью скорее свидетельствует о наличии примеси в небольших концентрациях, аналогичный спектр наблюдался ранее в GaN:Si в работе [18].

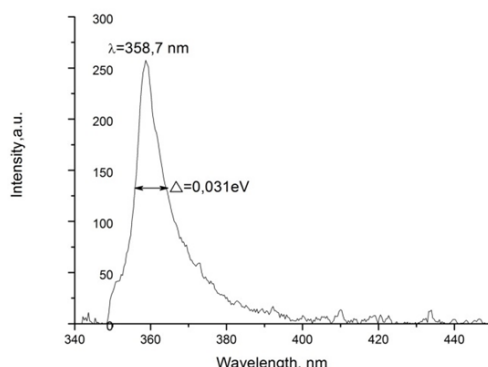


Рис. 4. Спектр фотолюминесценции слоя GaN на пластине AlN/Si при $T = 100$ К.

3. Выводы

Установлено, что подслоя AlN, осажденный в МОС-гидридном реакторе, является предпочтительным для предотвращения реакции между галлием и кремнием при росте GaN. Совместным использованием МОС-гидридной эпитаксии и ХГЭ на кремниевой подложке могут быть получены слои GaN толщиной до 10 мкм с гладкой морфологией поверхности и небольшой плотностью трещин и, возможно, без них. Качество слоев, судя по результатам рентгеновской дифрактометрии, сопоставимо с лучшими на сегодня результатами для слоев GaN, выращенных на кремнии [19].

Работа была выполнена в рамках программы развития Университета ИТМО, поддержана из централизованных средств НИУ ИТМО (тема № 414647), и кроме того частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 13-08-00809, 12-08-00397) в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

Литература

[1] В. Zhang, Y. Liu // *Chinese Science Bulletin* **59** (2014) 1251.

- [2] J. W. Chung, K. Ryu, B. Lu, Tomás Palacios // *Proceedings of the European Solid-State Device Research Conference 2010 (ESSDERC)*.
- [3] M. Lee, D. Mikulik, J. Kim, Y. Tak, J. Kim, M. Shim, Y. Park, U. Chung, E. Yoon, S. Park // *Applied Physics Express* **6** (2013) 125502.
- [5] M.J. Cich, R.I. Aldaz, A. Chakraborty, A. David, M.J. Grundmann, A. Tyagi, M. Zhang, F.M. Steranka, M.R. Krames // *Applied Physics Letters* **101** (2012) 223509
- [5] H. Ishikawa, K. Yamamoto, T. Egawa, T. Soga, T. Jimbo, M. Umeno // *Journal of Crystal Growth* **189** (1998) 178.
- [6] Y. Honda, M. Okano, M. Yamaguchi, N. Sawaki // *Physica Status Solidi C* **2** (2005) 2125.
- [7] М.Г. Мынбаева, А.А. Головатенко, А.И. Печников, А.А. Лаврентьев, К.Д. Мынбаев, В.И. Николаев // *Физика и техника полупроводников* **48(11)** (2014) 1573.
- [8] T. Takeuchi, H. Amano, K. Hiramatsu, N. Sawaki, I. Akasaki // *Journal of Crystal Growth* **115** (1991) 634.
- [9] A Strittmatter, A Krost, J Bläsing, D Bimberg // *Physica Status Solidi A* **176** (1999) 61.
- [10] A. Watanabe, T. Takeuchi, K. Hirose, H. Amano, K. Hiramatsu, I. Akasaki // *Journal of Crystal Growth* **128** (1993) 391.
- [11] V.N. Bessolov, E.V. Konenkova, S.A. Kukushkin, A.V. Myasoedov, S.N. Rodin, A.V. Osipov, M.P. Shcheglov // *Materials Physics and Mechanics* **21** (2014) 71.
- [12] [http:// www.azzurro-semiconductors.com](http://www.azzurro-semiconductors.com)
- [13] E. Richter, U. Zeimer, S. Hagedorn, M. Wagner, F. Brunner, M. Weyers, G. Trankle // *Journal of Crystal Growth* **312** (2010) 2537.
- [14] K. Fujito, S. Kubo, H. Nagaoka, T. Mochizuki, H. Namita, S. Nagao // *Journal of Crystal Growth* **311** (2009) 3011.
- [15] V. Nikolaev, A. Golovatenko, M. Mynbaeva, I. Nikitina, N. Seredova, A. Pechnikov, V. Bougrov, M. Odnobludov // *Physica Status Solidi C* **11** (2014) 502.
- [16] D. Artemiev, V. Bougrov, M. Odnoblyudov, A. Romanov // *Physica Status Solidi C* **10** (2013) 89.
- [17] N. Faleev, H. Temkin, I. Ahmad, M. Holtz, Yu. Melnik // *Journal of Applied Physics* **98** (2005) 123508.
- [18] E.F. Schubert, I.D. Goepfert, W. Grieshaber // *Journal of Applied Physics Letters* **71** (1997) 921.
- [19] A. Pinos, W.S. Tan, A. Chitnis, A. Nishikawa, L. Groh, C.Y. Hu, S. Murad, S. Lutgen // *Physica Status Solidi C* **11** (2014) 624.

THICK GaN LAYERS ON SILICON SUBSTRATE

Sh.Sh. Sharofidinov^{1-3*}, A.A. Golovatenko^{2,4}, I.P. Nikitina¹, N.V. Seredova^{1,2},
M.G. Mynbaeva¹⁻³, V.E. Bougrov¹, M.A. Odnobludov⁴, S.I. Stepanov⁴, V.I. Nikolaev¹⁻⁴

¹ITMO University, Kronverkskiy 49, Saint-Petersburg, 197101, Russia

²Perfect Crystals LLC, Polytechnicheskaya 28, Saint-Petersburg, 194064, Russia

³Ioffe Institute, Polytechnicheskaya 26, Saint-Petersburg, 194021, Russia

⁴St. Petersburg Technical University, Polytechnicheskaya 29, Saint-Petersburg, 195251, Russia

*e-mail: shukrillo71@mail.ru

Abstract. In the article we report on results of epitaxial growth of GaN on Si substrate in the new HVPE reactor. The reactor was designed for growth of GaN on substrates with diameter up to 76 mm. Thin layer of AlN were deposited in MOCVD reactor in order to prevent

reaction between Ga and Si. 10-micron-thickness flat GaN layers were fabricated on MOCVD AlN/Si by HVPE. The GaN layers were characterized by PL, XRD, SEM and mercury probe. The FWHM of XRD rocking curves for GaN peak (0002) was about 500 arcsec, that is similar for the best samples MOCVD GaN/Si.

Acknowledgements

The research was performed in the framework of the development program at ITMO University under the support from ITMO funding (project No 414647) and in addition the research was in part supported by Russian foundation for basic research (grants 13-08-00809, 12-08-0039) at Ioffe Institute RAS.

References

- [1] B. Zhang, Y. Liu // *Chinese Science Bulletin* **59** (2014) 1251.
- [2] J. W. Chung, K. Ryu, B. Lu, Tomás Palacios // *Proceedings of the European Solid-State Device Research Conference 2010 (ESSDERC)*.
- [3] M. Lee, D. Mikulik, J. Kim, Y. Tak, J. Kim, M. Shim, Y. Park, U. Chung, E. Yoon, S. Park // *Applied Physics Express* **6** (2013) 125502.
- [5] M.J. Cich, R.I. Aldaz, A. Chakraborty, A. David, M.J. Grundmann, A. Tyagi, M. Zhang, F.M. Steranka, M.R. Krames // *Applied Physics Letters* **101** (2012) 223509.
- [5] H. Ishikawa, K. Yamamoto, T. Egawa, T. Soga, T. Jimbo, M. Umeno // *Journal of Crystal Growth* **189** (1998) 178.
- [6] Y. Honda, M. Okano, M. Yamaguchi, N. Sawaki // *Physica Status Solidi C* **2** (2005) 2125.
- [7] M.G. Mynbaeva, A.A. Golovatenko, A.I. Pechnikov, A.A. Lavrent'ev, K.D. Mynbaev, V.I. Nikolaev // *Semiconductors* **48(11)** (2014) 1535.
- [8] T. Takeuchi, H. Amano, K. Hiramatsu, N. Sawaki, I. Akasaki // *Journal of Crystal Growth* **115** (1991) 634.
- [9] A Strittmatter, A Krost, J Bläsing, D Bimberg // *Physica Status Solidi A* **176** (1999) 61.
- [10] A. Watanabe, T. Takeuchi, K. Hirosawa, H. Amano, K. Hiramatsu, I. Akasaki // *Journal of Crystal Growth* **128** (1993) 391.
- [11] V.N. Bessolov, E.V. Konenkova, S.A. Kukushkin, A.V. Myasoedov, S.N. Rodin, A.V. Osipov, M.P. Shcheglov // *Materials Physics and Mechanics* **21** (2014) 71.
- [12] [http:// www.azzurro-semiconductors.com](http://www.azzurro-semiconductors.com)
- [13] E. Richter, U. Zeimer, S. Hagedorn, M. Wagner, F. Brunner, M. Weyers, G. Trankle // *Journal of Crystal Growth* **312** (2010) 2537.
- [14] K. Fujito, S. Kubo, H. Nagaoka, T. Mochizuki, H. Namita, S. Nagao // *Journal of Crystal Growth* **311** (2009) 3011.
- [15] V. Nikolaev, A. Golovatenko, M. Mynbaeva, I. Nikitina, N. Seredova, A. Pechnikov, V. Bougrov, M. Odnobludov // *Physica Status Solidi C* **11** (2014) 502.
- [16] D. Artemiev, V. Bougrov, M. Odnoblyudov, A. Romanov // *Physica Status Solidi C* **10** (2013) 89.
- [17] N. Faleev, H. Temkin, I. Ahmad, M. Holtz, Yu. Melnik // *Journal of Applied Physics* **98** (2005) 123508.
- [18] E.F. Schubert, I.D. Goepfert, W. Grieshaber // *Journal of Applied Physics Letters* **71** (1997) 921.
- [19] A. Pinos, W.S. Tan, A. Chitnis, A. Nishikawa, L. Groh, C.Y. Hu, S. Murad, S. Lutgen // *Physica Status Solidi C* **11** (2014) 624.