

Особенности структурного взаимодействия в гетероструктурах (AlGaIn)N / GaN как дислокационных фильтров

© И.П. Сошников[¶], Н.Н. Леденцов, А.Ф. Цацульников, А.В. Сахаров,
В.В. Лундин, Е. Заварин, А.В. Фомин, D. Litvinov*, E. Hahn*, D. Gerthsen*

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

* Университет Карлсруэ, Карлсруэ, Германия

(Получена 1 июня 2004 г. Принята к печати 16 июня 2004 г.)

Проведены исследования структурных взаимодействий прорастающих дислокаций и слоев AlGaIn и InGaIn в гетероструктурах на основе GaN. Показано, что наиболее эффективная фильтрация дислокаций наблюдается на слоях InGaIn промежуточного состава. Оценки структурных напряжений, создаваемых дислокациями и нанодоменами, показывают хорошее согласие теории и эксперимента.

1. Введение

Гетероструктуры на основе GaN являются базой для оптоэлектроники в сине-зеленой и ультрафиолетовой областях спектра [1–5]. Однако развитие технологии таких приборов сдерживается вследствие проблемы высокой плотности прорастающих дислокаций в структурах [4–6], так как такие дислокации являются сильным каналом безызлучательной рекомбинации электронно-дырочных пар.

В литературе представлены исследования нескольких типов фильтров прорастающих дислокаций, в частности, латерального эпитаксиального зарастания [6,7] (LEO — lateral epitaxial overgrowth), сверхрешеток AlGaIn/GaN [8,9]. Однако дислокационные фильтры на основе сверхрешеток AlGaIn/GaN являются слабыми и плохо ограничивают рост проникающих дислокаций, что, по-видимому, связано с протяженностью (размытостью) гетерограниц при выращивании методом MOCVD. Техника дислокационных фильтров (ДФ) на основе LEO-структур также встречает проблемы при выращивании, в частности необходимость остановки роста и формирования промежуточных слоев в другой камере. Amano и Akasaki [6] проводили исследования влияния температуры роста GaN на формирование дислокаций и показали, что такие фильтры могут приводить к аннигиляции некоторой части дислокаций при их высокой плотности. В то же время на примере гетероструктур на основе GaAs и Si с нановключениями InGaAs и SiGe [10,11] соответственно известно, что дислокационные фильтры на основе слоев с нановключениями материала с сильным различием параметров решетки могут давать хорошие результаты. Однако формирование дислокационных фильтров на базе гетероструктур со слоями InGaIn и (или) комбинации с ДФ на основе AlGaIn-слоев и сверхрешеток пока изучены слабо. Поэтому в представленной работе проводится исследование структурного взаимодействия прорастающих дислокаций с различными комбинациями слоев в гетероструктурах (AlGaIn)N / GaN, выращенных методом MOCVD.

2. Эксперимент

Эксперименты по выращиванию проводились на установке AIXTRON AIX 2000/HT. В качестве подложек использовались стандартные полированные пластины сапфира. Общая ростовая схема гетероструктур приведена на рис. 1 и включает слои GaN, основного дислокационного фильтра и двух слоев Al_{0.18}Ga_{0.82}N / GaN (8 / 300 нм). Выращенная серия гетероструктур включает различные комбинации слоев (AlGaIn)N, в том числе отдельные (разделенные) слои AlGaIn и InGaIn различного состава. Отметим, что в серии применялись слои InGaIn и AlGaIn с градиентным составом, выращенные при пониженной температуре и с прерыванием роста. Кроме того, проверялась техника зарастания слоя InGaIn слоем GaN с низкой скоростью, что обеспечивает возможность эффективной миграции адатомов по поверхности. Отметим, что интегральное содержание индия в слоях выдерживалось примерно равное.

Структурная характеристика образцов проводилась методами просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе CM200FEG (Philips). Подготовка образцов для ПЭМ исследований осуществлялась по стандартной методике с использованием на финишной стадии травления ионами Ag⁺ с энергией 4 кэВ. Обработка получен-

GaN, ~10 nm
AlGaIn, ~8 nm
GaN, ~300 nm
AlGaIn, ~8 nm
GaN, ~300 nm
DRT layer
GaN, ~2300 nm
Sapphire

Рис. 1. Обобщенная схема выращенных гетероструктур.

[¶] E-mail: Ipsosh@beam.ioffe.ru

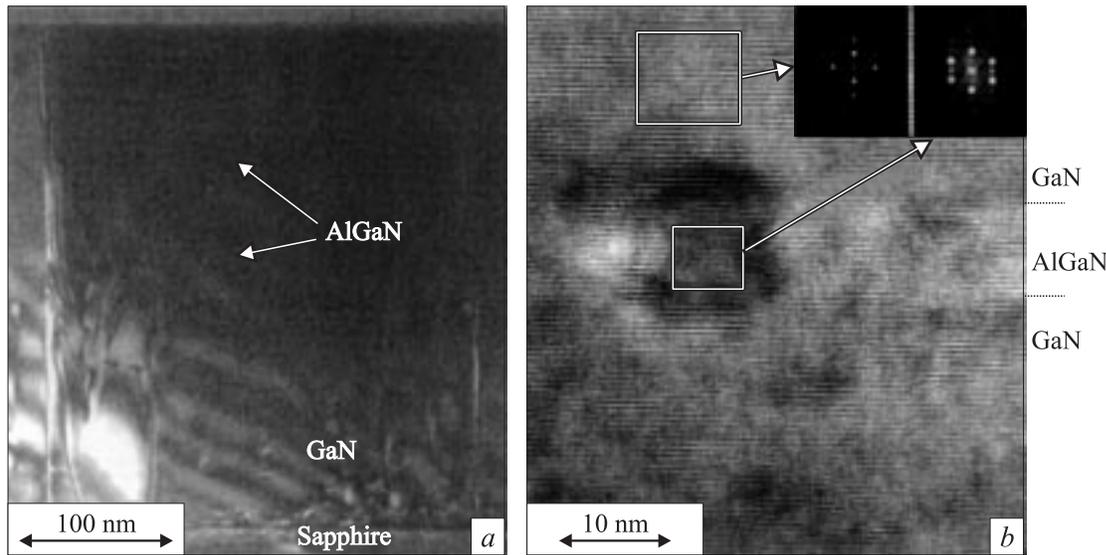


Рис. 2. Темнопольное (а) и высокоразрешающее (b) электронно-микроскопические изображения поперечного сечения (112̄0) образца с AlGaIn-слоями в GaN-матрице.

ных изображений проводилась с помощью программного комплекса DiAnaTEM [12].

3. Результаты и обсуждение

Проведенные исследования показывают, что в образцах, содержащих слои (AlGa)N, наблюдается развитие прорастающих дислокаций через эти слои (рис. 1). Кроме того, в слоях (AlGa)N обнаружено образование нановключений с характерными размерами порядка 10 нм. Фурье-образы от высокоразрешающих изображений

основной решетки и нановключения приведены на вставках рис. 2. Сопоставление полученных фурье-образов показывает, что нановключения имеют кубическую структуру сфалеритного типа.

Исследование гетероструктур со слоями InGaIn, имеющими различные толщины и состав, показывают, что наиболее эффективный дислокационный фильтр получается при осаждении слоя InGaIn „низкого“ состава (около $x \approx 0.10$) (рис. 3). При этом наблюдается формирование нанодоменов InGaIn на верхней границе прорастающих дислокаций.

Увеличение содержания индия в слое до $x \approx 0.2-0.3$ приводит к обратному эффекту: образуются нанодомены с сильным обогащением по индию и большими размерами. Такие нанодомены могут провоцировать образование новых дефектов.

Структурные напряжения, создаваемые прорастающими дислокациями, оцениваются по формуле [13,14]

$$\tau_{\text{eff}} = S\varepsilon \left[\frac{2G(1+\nu)}{1-\nu} \right] - \left(\ln \frac{\beta h}{b} + 1 \right) \times \frac{Gb(1-\nu \cos^2 \alpha) \cos \phi}{4\pi h(1-\nu)},$$

где G — модуль сдвига, b — вектор Бюргера дислокации, ε — упругая деформация, S — фактор Шмидта ($S = \cos \gamma \cdot \cos \phi$), h — длина дислокации, α — угол между вектором Бюргера и линией дислокации, ϕ — угол между плоскостью скольжения и нормалью к границе раздела, γ — угол между вектором Бюргера дислокации и лежащим в плоскости границы раздела перпендикуляром к пересечению плоскости скольжения и границы раздела, β — параметр ядра дислокации, ν — коэффициент Пуассона.

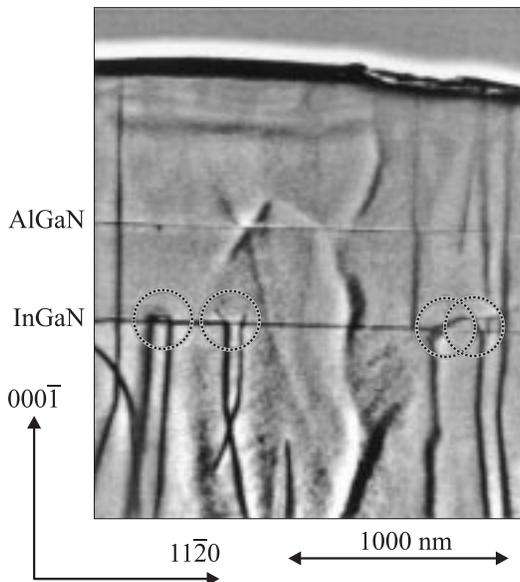


Рис. 3. (2200) темнопольное электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения в плоскости (112̄0) образца со слоем InGaIn с содержанием индия $x \approx 0.1$.

Оценка структурных напряжений, создаваемых нановключениями InGaN, может быть сделана в рамках представлений Трейси и Гибсона [15,16]. Сопоставление оценок структурных напряжений от дислокаций и нановключений показывает, что эти величины сравниваются при некотором промежуточном значении содержания In. При превышении содержания In структурные напряжения, создаваемые нанодоменами InGaN, превышают величину структурных напряжений от дислокаций. Следствием этого является образование новых дислокаций.

4. Заключение

Таким образом, в работе проведены исследования структурных взаимодействий прорастающих дислокаций и слоев AlGaIn и InGaN в гетероструктурах на основе GaN.

Продемонстрировано образование в слоях AlGaIn нановключений кубической фазы с характерными размерами порядка 10 нм. Гетероструктуры AlGaIn/GaN демонстрируют низкую эффективность как дислокационные фильтры.

Показано, что наиболее эффективная фильтрация дислокаций наблюдается на слоях InGaIn с содержанием индия порядка 10%. Повышение эффективного содержания индия в слоях InGaIn приводит к генерации новых дислокаций.

Сопоставление структурных напряжений, создаваемых прорастающими дислокациями и слоями InGaIn, показывает, что наибольшая эффективность ДФ достигается при согласовании указанных величин.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и программы научного сотрудничества ФТИ-ITRI.

Список литературы

- [1] S. Nakamura, G. Fasol, S.J. Pearton. *The Blue Laser Diode*, Springer, 2000.
- [2] S. Nakamura. Proc. SPIE (18th Congr. Int. Commission for Optics, July 1999), **3749**, 2 (1999).
- [3] I.L. Krestnikov, N.N. Ledentsov, A. Hoffmann, D. Bimberg, A.V. Sakharov, W.V. Lundin, A.F. Tsatsul'nikov, A.S. Usikov, Zh.I. Alferov, Yu.G. Musikhin, D. Gerthsen. Phys. Rev. B, **66**, 155 310 (2002).
- [4] X. Hu, J. Deng, N. Pala, R. Gaska, M.S. Shur, C.Q. Chen, J. Yang, G. Simin, M.A. Khan, J.C. Rojo, L.J. Schowalter. Appl. Phys. Lett., **82**, 1299 (2003).
- [5] M.S. Shur, A.D. Bykhovski, R. Gaska, M.A. Khan, J.W. Yang. Appl. Phys. Lett., **76**, 3298 (2000).
- [6] H. Amano, I. Akasaki. Opt. Mater., **19**, 219 (2001).
- [7] H. Marchand, X.H. Wu, J.P. Ibbetson, P.T. Fini, P. Kozodoy, S. Keller, J.S. Speck, S.P. DenBaars, U.K. Mishra. Appl. Phys. Lett., **73**, 747 (1998).
- [8] D. Huang, M.A. Reshchikov, F. Yun, T. King, A.A. Baski, H. Morkoç. Appl. Phys. Lett., **80**, 216 (2002).
- [9] M.D. Craven, S.H. Lim, F. Wu, J.S. Speck, S.P. DenBaars. Appl. Phys. Lett., **81**, 1201 (2002).

- [10] E. Bellet-Amalric, C. Adelman, E. Sarigiannidou, J.L. Rouvière, G. Feuillet, E. Monroy, B. Daudin. J. Appl. Phys., **95**, 1127 (2004).
- [11] Ю.Б. Болховитянов, О.П. Пчеляков, Л.В. Соколов, С.И. Чикичев. ФТП, **37** (5), 513 (2003).
- [12] И.П. Сошников, О.М. Горбенко, А.О. Голубок, Н.Н. Леденцов. ФТП, **35** (3), 361 (2001).
- [13] J.W. Matthews, A.E. Blackleslee. J. Cryst. Growth, **27**, 11 (1974).
- [14] D.C. Houghton. J. Appl. Phys., **70**, 2136 (1991).
- [15] M.M.J. Treacy, J.M. Gibson. J. Vac. Sci. Technol., **B4**, 1458 (1986).
- [16] D. Gerthsen, E. Hahn, B. Neubauer, V. Potin, A. Rosenauer, M. Schowalter. Phys. Status Solidi C, **0** (6), 1668 (2003).

Редактор Л.В. Беляков

Particulars of a structural interaction in the (AlGaIn)N/GaN heterostructure dislocation filteres

I.P. Soshnikov, N.N. Ledentsov, A.F. Tsatsul'nikov, A.V. Sakharov, W.V. Lundin, E.A. Zavarin, A.V. Fomin, D. Litvinov*, E. Hahn*, D. Gerthsen*

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences
194021 St. Petersburg, Russia
* University of Karlsruhe, Germany

Abstract The work is devoted to an investigation of structural interactions between transparency dislocations and AlGaIn (or InGaIn) layers in III-N heterostructures. It has been demonstrated that InGaIn layers having an intermediate composition serve as the most effective dislocation filters. Estimations of structural stresses generated by dislocations and nanodomains show good agreement between the theory and experiment.