

**СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ $p-n$ СТРУКТУРЫ,
ВЫРАЩЕННЫЕ ХЛОРИД–ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИЕЙ НА
СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОДЛОЖКАХ GaN/Al₂O₃**

**М.Г. Мынбаева^{1-3*}, А.И. Печников², Ш.Ш. Шарофидинов¹⁻³, В.Е. Бугров¹,
К.Д. Мынбаев^{1,3}, С.И. Степанов⁴, М.А. Одноблюдов⁴, В.И. Николаев¹⁻⁴,
А.Е. Романов^{1,3}**

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

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

*e-mail: mgm@mail.ioffe.ru

Аннотация. Показана возможность использования подложек GaN/Al₂O₃ с внутренними полостями, сформированных газофазной эпитаксией с использованием металлоорганических соединений (ГФЭ МОС), для выращивания методом хлорид–гидридной эпитаксии (ХГЭ) светоизлучающих структур на основе $p-n$ переходов. В рамках работы выполнена всесторонняя характеристика выращенных эпитаксиальных слоев ХГЭ $n-$ и $p-$ типа проводимости и сформировавшихся электронно–дырочных переходов. Полученные результаты демонстрируют возможности метода ХГЭ в части создания элементов приборных структур на основе GaN.

1. Введение

Светодиоды и лазерные диоды, создаваемые на основе нитридных гетероструктур, уже давно нашли коммерческое применение, но поиск путей повышения их эффективности продолжается. В настоящий момент исследования в этой области направлены на решение нескольких проблем. Так, например, для нитридных светодиодных структур, получаемых эпитаксией на гетероподложках, остается характерной высокая плотность дефектов, прежде всего, проникающих дислокаций. Кроме того, эффект полного внутреннего отражения на границе «GaN/подложка» и «подложка/окружающая среда» ограничивает эффективность вывода света из светодиодного кристалла. Для решения этих проблем было предложено вводить в объем светодиодной структуры скрытые полости (англ. *voids*) (см., например, [1–4]). Такие полости служат эффективным способом борьбы с дислокациями, распространяющимися в гетероэпитаксиальном материале, поскольку создают в процессе эпитаксиального наращивания условия, принуждающие дислокации к взаимной реакции и аннигиляции [5]. Введённые на границе раздела GaN/подложка полости также являются структурными элементами, повышающими эффективность вывода света из нитридных светодиодных чипов, как правило, создаваемых на основе множественных квантовых ям, и выращиваемых газофазной эпитаксией с использованием металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) [1–4]. В рамках настоящей работы исследовалась возможность использования в

расфокусированного электронного пучка. На Рис. 1(a) и (b) приведены полученные СЭМ и МКЛ изображения ГФЭ МОС структуры с внутренними полостями. Из Рис. 1(b) следует, что области эпитаксиальной структуры, соответствующие сформированным полостям, выказывают более высокую интенсивность КЛ.

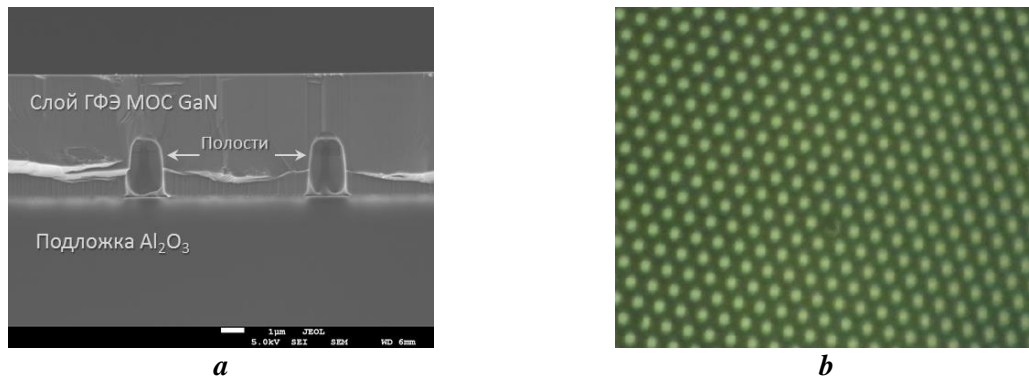


Рис. 1. Изображение СЭМ поперечного скола ГФЭ МОС GaN/Al₂O₃ подложки с внутренними полостями (a) и изображение МКЛ, полученное с поверхности подложки при 300 К (b).

Методом фотолюминесценции (ФЛ) при температуре 2 К была выполнена сравнительная характеристика сформированной ГФЭ МОС подложки GaN/Al₂O₃ и выращенного на ней ХГЭ слоя *n*-типа проводимости. Для возбуждения ФЛ использовался азотный лазер с длиной волны 337.1 нм, излучение лазера модулировалось с частотой 100 Гц. На Рис. 2 приводятся сравнительные результаты характеристики слоя ХГЭ *n*-типа проводимости и исходной ГФЭ МОС подложки GaN/Al₂O₃. Можно видеть, что спектр ФЛ, полученный от подложки, имел вид уширенной полосы с двумя выраженными максимумами, по положению соответствовавшими рекомбинации свободного экситона (FE) и экситона, связанного на нейтральном доноре (DBE) [8]. В свою очередь, в спектре ФЛ, полученном от ХГЭ слоя толщиной 4.5 мкм, наблюдался узкий пик с положением максимума, соответствовавшим энергии FE, и слабо выраженное «плечо», спектральное положение которого соответствовало DBE.

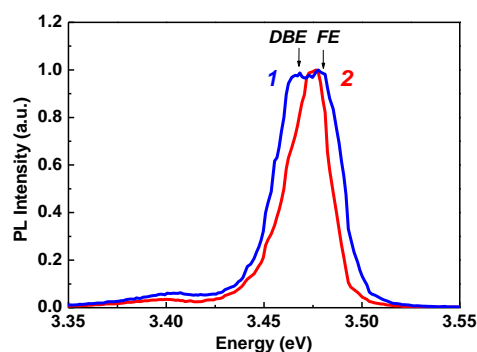


Рис. 2. Спектры ФЛ ГФЭ МОС подложки GaN/Al₂O₃ (1) и ХГЭ слоя GaN толщиной 4.5 мкм, выращенного на этой подложке (2).

В Таблице 1 приведены значения полуширин пиков, которые оценивались по результатам разложения спектров ФЛ на гауссовы составляющие (на рисунке не показано).

Можно предположить, что различие в спектрах ФЛ материала, полученного методами ГФЭ МОС и ХГЭ, было связано с отличием в концентрации примесей,

Вместе с тем, исследования двухслойных ХГЭ структур методом МКЛ показали, что в p -слое ХГЭ GaN преобладала синяя люминесценция, которая, как известно, связана с донорно-акцепторным переходом в легированном Mg материале (Рис. 3(b)). Доминирование донорно-акцепторной рекомбинации в легированном слое GaN также указывает на достижение эффективной активации магния как акцептора. Анализ зависимости ненормированной интенсивности полос в спектрах МКЛ (Рис. 3(b)) от энергии электронного пучка показал, что максимум интенсивности синей полосы (2.9 эВ) в p -области наблюдался на глубине проникновения электронов ~ 800 нм, т.е. в области p - n перехода.

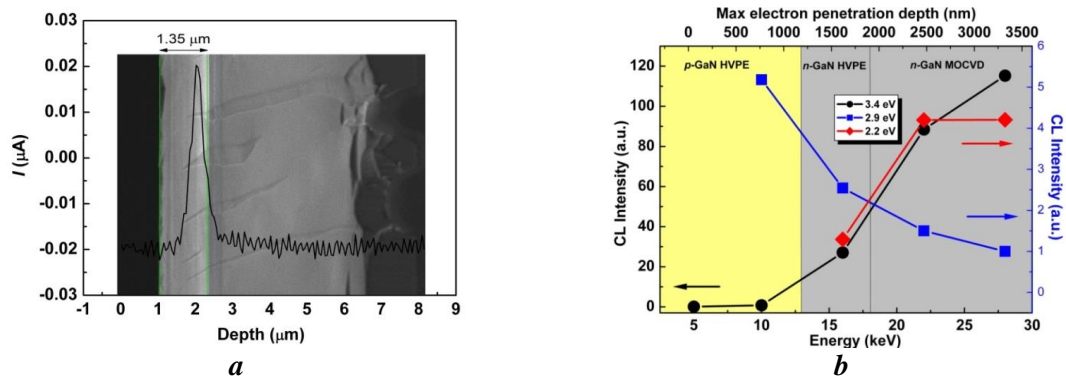


Рис. 3. Вид сигнала ТИЭЗ, наложенного на изображение СЭМ образца с p - n переходом (a); зависимость интенсивности отдельных полос КЛ от энергии электронного пучка (нижняя шкала) и от максимальной глубины проникновения электронов (верхняя шкала) (b).

Формирование в ХГЭ структуре физического p - n перехода подтверждалось наблюдением электролюминесценции (ЭЛ) в исследуемых образцах. Результаты исследования ЭЛ представлены на Рис. 4.

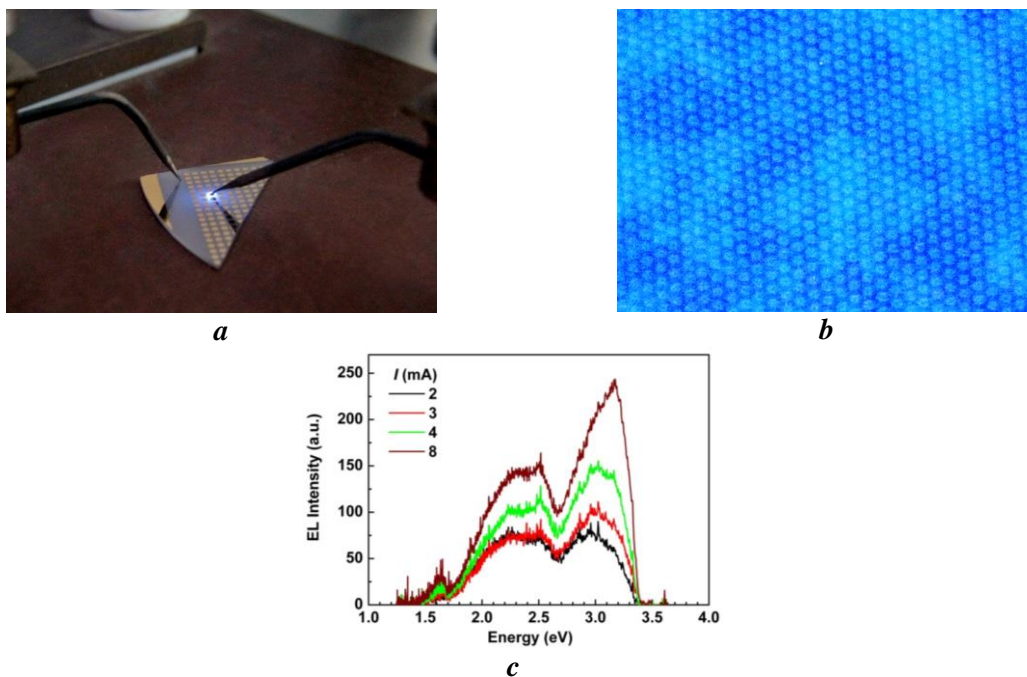


Рис. 4. Вид тестового образца светоизлучающего элемента на основе p - n перехода (a), изображение МКЛ, полученное при энергии электронного пучка 10 кэВ с поверхности p - n -структуры, выращенной ХГЭ на ГФЭ МОС подложке (b), и спектры ЭЛ, полученные при различных значениях токов возбуждения (c).

ХГЭ слоях n -типа проводимости, выращиваемых на структурированных подложках, может быть существенно снижена, — до значения в 10^7 см⁻² [15].

Заключение

Представленные в работе результаты характеризации подложек GaN/Al₂O₃ с внутренними пустотами, созданных методом ГФЭ МОС, и выращенных на них ХГЭ эпитаксиальных слоёв n - и p -типа проводимости показали, что данные подложки могут быть успешно использованы для создания светоизлучающих элементов на основе p - n структур. Формирование p - n структур в рамках рассматриваемой технологии происходило *in situ* в условиях хлорид-гидридного эпитаксиального процесса, без проведения дополнительных отжигов для активации. Качество материала, выращиваемого на структурированных подложках ГФЭ МОС GaN/Al₂O₃, оказывается достаточно высоким для использования ХГЭ эпитаксиальных структур в приборных приложениях. Полученные результаты демонстрируют потенциальные возможности метода хлорид-гидридной эпитаксии в части создания элементов приборных структур на основе GaN.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-29-00086).

Литература

- [1] C.-H. Chiu, C.-C. Lin, H.-V. Han, C.-Y. Liu, Y.-H. Chen, Y.-P. Lan, P. Yu, H.-C. Kuo, T.-C. Lu, S.-C. Wang, C.-Y. Chang // *Nanotechnology* **23** (2012) 045303.
- [2] Y.-C. Huang, C.-F. Lin, S.-H. Chen, J.-J. Dai, G.-M. Wang, K.-P. Huang, K.-T. Chen, Y.-H. Hsu // *Optics Express* **19**(S1) (2011) A57.
- [3] J.Z. Liu, M.D.B. Charlton, C.H. Lin, K.Y. Lee, C. Krishnan, M.C. Wu // *IEEE Journal of Quantum Electronics* **50** (2014) 314.
- [4] M. Ali, O. Svensk, L. Riuttanen, M. Kruse, S. Suihkonen, A.E. Romanov, P.T. Törmä, M. Sopanen, H. Lipsanen, M.A. Odnoblyudov, V.E. Bougrov // *Semiconductor Science and Technology* **27** (2012) 082002.
- [5] T. Lang, M. A. Odnoblyudov, V. E. Bougrov, A. E. Romanov, S. Suihkonen, M. Sopanen, H. Lipsanen // *Physica Status Solidi A* **203** (2006) R76.
- [6] M. Ali, A.E. Romanov, S. Suihkonen, O. Svensk, P.T. Törmä, M. Sopanen, H. Lipsanen, M.A. Odnoblyudov, V.E. Bougrov // *Journal of Crystal Growth* **315** (2011) 188.
- [7] Yu.V. Melnik, A.E. Nikolaev, S. Stepanov, I.P. Nikitina, K. Vassilevski, A. Ankudinov, Yu. Musikhin, V.A. Dmitriev // *Material Science Forum* **264–268** (1998) 1121.
- [8] M.A. Reshchikov, H. Morkoc // *Journal of Applied Physics* **97** (2005) 061301.
- [9] М.Э. Рудинский, А.А. Гуткин, П.Н. Брунков // *Физика и техника полупроводников* **46** (2012) 775.
- [10] M. Mynbaeva, M. Kayambaki, K. Mynbaev, K. Zekentes // *Semiconductor Science and Technology* **23** (2008) 075039.
- [11] A.Y. Polyakov, I.H. Lee, N.B. Smirnov, A.V. Govorkov, E.A. Kozhukhova, S.J. Pearton // *Journal of Applied Physics* **109** (2011) 123701.
- [12] K. Kumakura, T. Makimoto, N. Kobayashi, T. Hashizume, T. Fukui, H. Hasegawa // *Applied Physics Letters* **86** (2005) 052105.
- [13] D.J. Chadi // *Applied Physics Letters* **71** (1997) 2970.
- [14] A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, A.V. Govorkov, Z. Fang, D.C. Look, R.J. Molnar, A.V. Osinsky // *Journal of Applied Physics* **91** (2002) 6580.
- [15] M. Mynbaeva, A. Sitnikova, A. Nikolaev, K. Vinogradova, K. Mynbaev, V. Nikolaev // *Physica Status Solidi C* **10** (2013) 366.

**LIGHT-EMITTING p–n STRUCTURES
FABRICATED WITH HYDRIDE VAPOR-PHASE EPITAXY ON
GaN/Al₂O₃ STRUCTURED SUBSTRATES**

**M.G. Mynbaeva^{1-3*}, A.I. Pechnikov², Sh.Sh. Sharofidinov¹⁻³, V.E. Bougrov¹,
K.D. Mynbaev^{1,3}, S.I. Stepanov⁴, M.A. Odnoblyudov⁴, V.I. Nikolaev¹⁻⁴, A.E. Romanov^{1,3}**

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 State Technical University, Polytechnicheskaya 29, Saint-Petersburg 195251, Russia

*e-mail: mgm@mail.ioffe.ru

Abstract. A possibility is shown to use GaN/Al₂O₃ substrates with internal voids fabricated with metal–organic chemical vapor deposition (MOCVD) for the growth of light-emitting structures based on p–n junctions by hydride vapor-phase epitaxy (HVPE). Within the frames of the work, an extensive characterization of the grown HVPE films with *n*– and *p*–type conductivity and formed *p*–*n* junctions was performed. The results obtained show possibilities that HVPE method offers in respect to the fabrication of the elements of device structures based on GaN.

Acknowledgement

This study was supported by Russian Science Foundation (grant № 14-29-00086).

References

- [1] C.–H. Chiu, C.–C. Lin, H.–V. Han, C.–Y. Liu, Y.–H. Chen, Y.–P. Lan, P. Yu, H.–C. Kuo, T.–C. Lu, S.–C. Wang, C.–Y. Chang // *Nanotechnology* **23** (2012) 045303.
- [2] Y.–C. Huang, C.–F. Lin, S.–H. Chen, J.–J. Dai, G.–M. Wang, K.–P. Huang, K.–T. Chen, Y.–H. Hsu // *Optics Express* **19**(S1) (2011) A57.
- [3] J.Z. Liu, M.D.B. Charlton, C.H. Lin, K.Y. Lee, C. Krishnan, M.C. Wu // *IEEE Journal of Quantum Electronics* **50** (2014) 314.
- [4] M. Ali, O. Svensk, L. Riuttanen, M. Kruse, S. Suihkonen, A.E. Romanov, P.T. Törmä, M. Sopianen, H. Lipsanen, M.A. Odnoblyudov, V.E. Bougrov // *Semiconductor Science and Technology* **27** (2012) 082002.
- [5] T. Lang, M. A. Odnoblyudov, V. E. Bougrov, A. E. Romanov, S. Suihkonen, M. Sopianen, H. Lipsanen // *Physica Status Solidi A* **203** (2006) R76.
- [6] M. Ali, A.E. Romanov, S. Suihkonen, O. Svensk, P.T. Törmä, M. Sopianen, H. Lipsanen, M.A. Odnoblyudov, V.E. Bougrov // *Journal of Crystal Growth* **315** (2011) 188.
- [7] Yu.V. Melnik, A.E. Nikolaev, S. Stepanov, I.P. Nikitina, K. Vassilevski, A. Ankudinov, Yu. Musikhin, V.A. Dmitriev // *Material Science Forum* **264–268** (1998) 1121.
- [8] M.A. Reshchikov, H. Morkoc // *Journal of Applied Physics* **97** (2005) 061301.
- [9] M.E. Rudinsky, A.A. Gutkin, P.N. Brunkov // *Semiconductors* **46**(6) (2012) 755.
- [10] M. Mynbaeva, M. Kayambaki, K. Mynbaev, K. Zekentes // *Semiconductor Science and*

- Technology* **23** (2008) 075039.
- [11] A.Y. Polyakov, I.H. Lee, N.B. Smirnov, A.V. Govorkov, E.A. Kozhukhova, S.J. Pearton // *Journal of Applied Physics* **109** (2011) 123701.
- [12] K. Kumakura, T. Makimoto, N. Kobayashi, T. Hashizume, T. Fukui, H. Hasegawa // *Applied Physics Letters* **86** (2005) 052105.
- [13] D.J. Chadi // *Applied Physics Letters* **71** (1997) 2970.
- [14] A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, A.V. Govorkov, Z. Fang, D.C. Look, R.J. Molnar, A.V. Osinsky // *Journal of Applied Physics* **91** (2002) 6580.
- [15] M. Mynbaeva, A. Sitnikova, A. Nikolaev, K. Vinogradova, K. Mynbaev, V. Nikolaev // *Physica Status Solidi C* **10** (2013) 366.