

## Спектры фотолюминесценции GAN/INGAN МКЯ на GAN наностержнях

В.И. Осинский<sup>1,\*</sup>, Н.Н. Ляхова<sup>1,†</sup>, В.И. Глозов<sup>1</sup>, Н.О. Суховий<sup>1,‡</sup>, О.С. Литвин<sup>2</sup>, П.В. Деминский<sup>1,§</sup><sup>1</sup>Институт Микроприборов НАН,

Украина, 04136, г. Киев, ул. Северо-Сырецкая, д. 3

<sup>2</sup>Институт физики полупроводников имени В.Е. Лашкарева НАН,

Украина, 03028, г. Киев, пр. Науки, д. 41

(Статья поступила 24.09.2013; подписана в печать 02.06.2014)

На базе нанотемплетов «SiO<sub>2</sub>–слой инициации Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» на Si(100) подложке методом газофазного осаждения с использованием металлорганических соединений сформированы GaN «плоские» слои и наностержни. Исследованы спектры фотолюминесценции GaN/InGaN МКЯ на «плоских» нанотемплетных слоях нитрида галлия и на наностержнях. При этом эффективность излучения МКЯ на «плоских» нанотемплетных слоях GaN была на порядок ниже интенсивности на наностержнях, а максимум излучения от МКЯ на наностержнях был сдвинут в длинноволновую область на 36 нм по сравнению с контрольными «плоскими» образцами.

PACS: 78.67.Rb, 61.46.Km.

УДК: 621.382, 621.383.

Ключевые слова: нанотемплеты, квантовые ямы, Si, GaN, наностержни, нитриды.

## ВВЕДЕНИЕ

Синие светодиоды на основе InGaN уже достигли внешней квантовой эффективности более 70%, но она значительно уменьшается в жёлто–зеленом диапазоне. Особого внимания заслуживает вклад пьезоэлектрических полей в люминесценцию GaN/InGaN квантовых ям, которые до сих пор еще в основном выращиваются вдоль (0001) кристаллографической ориентации, обуславливающей наличие интенсивного пьезоэлектрического поля ( $\approx 0.3\text{--}1.5$  МВ/см), что снижает эффективность излучения. Индий сложнее встраивается на полярных, чем на неполярных и полуполярных плоскостях, поэтому для подавления внутреннего электрического поля при изготовления желто-зеленых светодиодов эффективнее использовать неполярные полуполярные направления [1, 2].

III-нитридные структуры, как правило, формируются на сапфире или карбиде кремния [3]. Однако низкая теплопроводность сапфира и высокие цены на SiC-подложки являются серьезными препятствиями, тогда как кремниевые подложки характеризуются большими размерами и низкой стоимостью. Для решения проблемы совмещения Si/A3B5 при создании сложных функциональных элементов необходима оптимизация согласующих темплетно-буферных слоев. Несмотря на то, что первые одночиповые Si/A3B5 приборы были предложены достаточно давно [4–8], поиск новых технологий активно продолжается [9–11].

На базе ранее разработанных нанотемплетов анодного окисла алюминия на Si(100) для  $\alpha$ -GaN [12–14] в данной работе методом газофазного осаждения с использованием металлорганических соединений сфор-

мированы «плоские» слои и наностержни нитрида галлия, на которых выращены GaN/InGaN МКЯ и исследованы их спектры фотолюминесценции.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

4-периодные InGaN/GaN квантовые ямы были выращены методом газофазного осаждения с использованием металлорганических соединений на нанотемплетках «слой инициации Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SiO<sub>2</sub>–GaN» на подложках Si(100).

На эпитаксиальном слое GaN (толщина 3 мкм) методом плазмохимического осаждения наносилась плёнка SiO<sub>2</sub> толщиной 0.1 мкм, на которой формировался слой инициации Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, представляющий собой нанопористый анодный окисел алюминия толщиной 0.5 мкм. Характеризация его осуществлялась средствами атомно-силовой микроскопии на базе сканирующего зондового микроскопа NanoScope IIIa Dimension 3000TM. Типичные трехмерные и двумерные изображения нанорельефа поверхности слоев нанопористого оксида алюминия на окиси кремния (рис. 1а, 1б) показали, что геометрические размеры пор и их расположение, близкое к гексагональному, пригодны для дальнейшего роста наносистем III-нитридов. при боковом заращивании упорядоченной маски нанопористого SiO<sub>2</sub>, полученного методом плазмохимического травления слоя SiO<sub>2</sub> через маску инициации анодного окисла алюминия.

Режимы роста подбирались на базе исследований нанотемплетов анодного окисла алюминия, включая определение диффузионной длины эпитаксиальных GaN слоёв (рассчитанная эффективная диффузионная длина электронов составляла  $L_d \approx 3.2$  мкм, что соответствует плотности дислокаций  $\sim 3 \times 10^6$  см<sup>-2</sup>). При формировании GaN/InGaN квантовых ям (рис. 2, 3) были использованы триметил галлия (TMGa), триметил индия (TMIn) и ам-

\*E-mail: osinsky@imd.org.ua

†E-mail: lyahovann@gmail.com

‡E-mail: ninaliakhova@gmail.com

§E-mail: p.deminskyi@kpi.ua

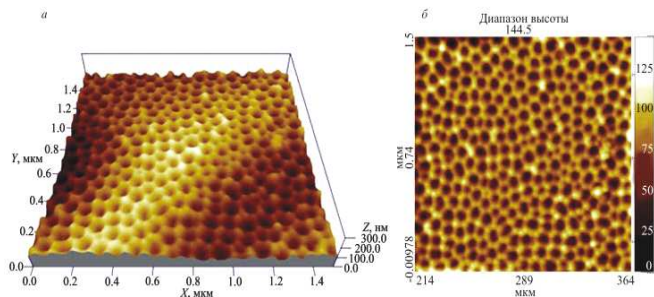


Рис. 1: Трехмерное изображение поверхности (а) и вид сверху (б) нанорельефа пленки анодированного оксида алюминия

миак как источники галлия, индия и азота, соответственно. GaN наностержни формировались на нанопористых темплатах Si(100)/GaN/SiO<sub>2</sub> при давлении 60 торр и температуре 1000 °С, газ-носитель — азот. Затем температура реактора уменьшалась до 760 °С и выращивались 4-х периодные InGaN/GaN квантовые ямы. При исследовании массивов наностержней GaN методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) было установлено, что наностержни имеют вертикальные боковые стенки в порах SiO<sub>2</sub> маски. При этом их высота (без учёта «конусообразного обрамления») определяется толщиной маски. Осаждение нитрида галлия выше маски SiO<sub>2</sub> непосредственно на неё не наблюдалось из-за низкого коэффициента прилипания GaN к SiO<sub>2</sub>. Толщина ямы и барьера составляла ~30 Å и 45 Å, соответственно.

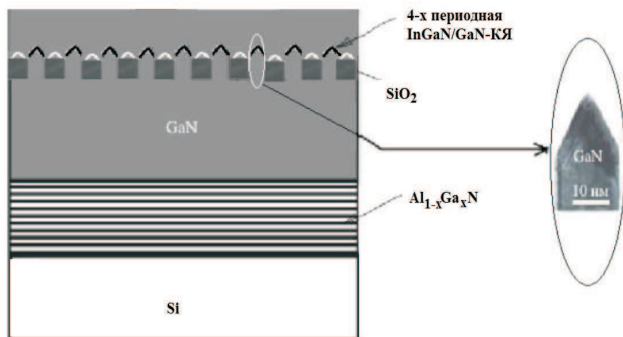


Рис. 2: GaN/InGaN МКЯ на системе GaN-наностержней

Были исследованы люминесцентные характеристики гетероструктур с квантовыми ямами на образцах с нанотемплетными слоями и на «плоских» структурах на Si(100), рис. 2, 3. Эффективность излучения МКЯ «плоских» образцов была на порядок ниже интенсивности структур на наностержнях, что, вероятно, связано со снижением внутреннего отражения света а также с образованием массивов InGaN квантовых

точек и нано колец на GaN наностержнях. Кроме того, было показано, что максимум излучения от МКЯ, выращенных на GaN наностержнях, был сдвинут на 36 нм, рис. 4, по сравнению с контрольным «плоским» образцом, из-за повышенной концентрации In в МКЯ. Вероятно, фасетированная поверхность наностержней GaN включает также и полуполярные плоскости (10–11) и (11–22), поэтому InGaN активные области, сформированные на них, могут иметь пониженное пьезоэлектрическое поле [1, 2], а следовательно, включать больше индия.

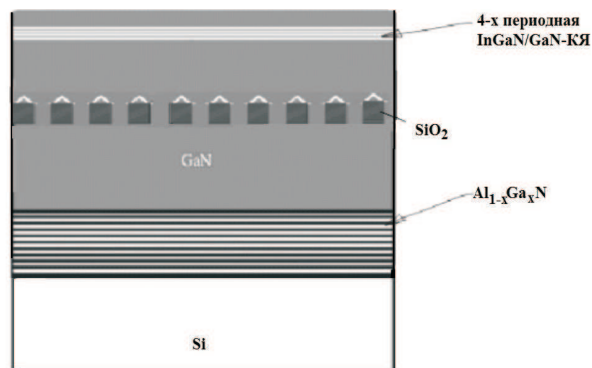


Рис. 3: GaN/InGaN МКЯ на «планарных» GaN темплетных слоях (контрольная структура)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен технологический подход получения нанотемплетов «SiO<sub>2</sub>–слой инициации Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–III-нитрид» на подложках кремния для неполярных гетероструктур III-нитридов. Продемонстрирована возможность эффективного роста высококачественных GaN слоев методом газофазного осаждения с использованием металлоорганических соединений при боковом наращивании упорядоченной маски нанопористого SiO<sub>2</sub>, а также возможность формирования плотных массивов GaN и InGaN квантовых точек и наноклец на «конусообразном обрамлении» GaN наностержней.

Исследование спектров фотолуминесценции показало, что массивы наностержней имеют ряд преимуществ перед обычными «плоскими» пленками, обеспечивая:

- увеличение интенсивности фотолуминесценции на порядок;
- возможности большей концентрации индия в твердом растворе, позволяющей расширить видимый диапазон спектра излучения фотолуминесценции в длинноволновую область.

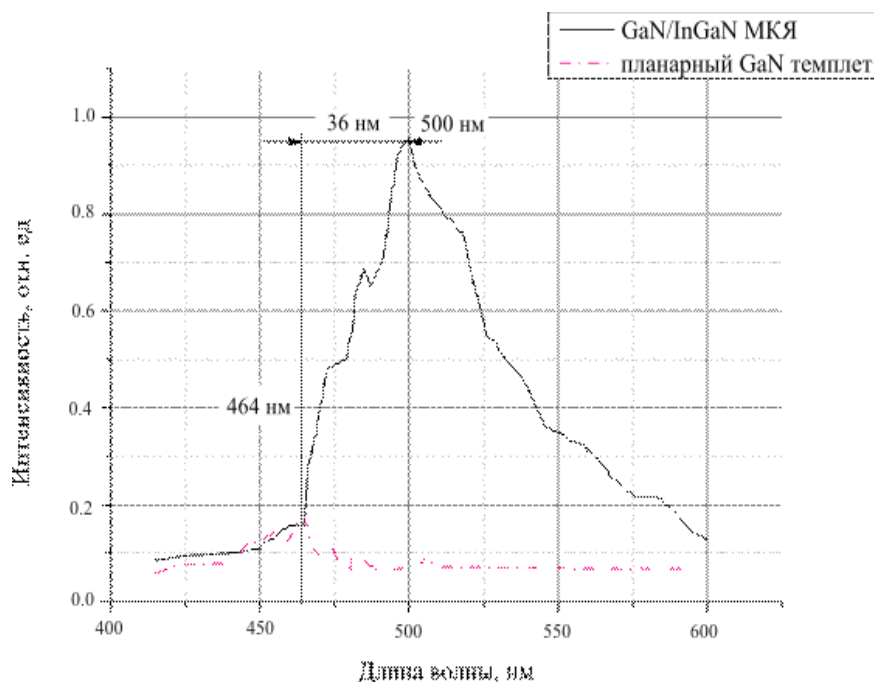


Рис. 4: Фотолюминесценция GaN/InGaN МКЯ на системе неностержневой (сплошная линия) и на «планарных» GaN темплетных слоях (пунктирная линия)

- [1] Sato H., et al. Applied Physics Letters, **92**(22) (2008).
- [2] Sato H., et al. Physica Status Solidi, **1**(4). P. 162. (2007).
- [3] Шуберт Ф. Светодиоды. Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. 2-е изд. (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008). 96 с.
- [4] Осинский В.И., Костожевич Н.К. Интегральный опtron. АС №551730 (СССР), приоритет 1973 г.
- [5] Osinsky V., Katsapov T.M., Tyavlovskaya E.A. Phys. Stat. Sol. **82**, №2. P. 174. (1984).
- [6] Осинский В.И., Олексенко П.Ф., Вербицкий В.Г. и др. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. № 1. С. 3. (1999).
- [7] Осинский В.И., Кацапов Ф.М. ДАН БССР. **12**, №2, С. 123 (1978).
- [8] Осинский В.И., Привалов В.И., Тихоненко О.Я. Оптоэлектронные структуры на многокомпонентных полупроводниках. (Мн.: Наука и техника, 1981. 208 с.).
- [9] Осинский В.И. Материалы V Международной научно-технической конференции «Электроника и информатика 2005». Москва-Зеленоград. Ч.1. С.260. (2005).
- [10] Osinsky V., Murchenko D., Hooshmand H. Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. **12**, №3. P. 240. (2009).
- [11] Масол И.В., Осинский В.И., Сергеев О.Т. Информационные нанотехнологии (К.: Макрос. 560 с.).
- [12] Осинский В.И., Лабунюв В.А., Горох Г.Г., Ляхова Н.М., Ляхова Н.О., Соловей Д.В. Электроника и связь, тематический выпуск «Проблемы электроники». № 1–2. С. 76. (2008).
- [13] Osinsky V. I. et. al. Applied physics letters. **94**. P. 022114. (2009).
- [14] Ляхова Н.О. Электроника и связь. № 3 С. 39. (2011).

## Photoluminescence spectrums of GaN/InGaN MQDs on GaN nanoroads

V.I. Osinsky<sup>1, a</sup>, N.N. Lyahova<sup>1, b</sup>, V.I. Hlotov<sup>1</sup>, N.O. Suhovyy<sup>1, c</sup>, O.S. Lytvyn<sup>2</sup>, P.V. Deminskyi<sup>1, d</sup>

<sup>1</sup>Department of Optoelectronics, SRI of Microdevices NAS of Ukraine, Kiev, 04136, Ukraine

<sup>2</sup>V.E. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Kiev, 03028, Ukraine

E-mail: <sup>a</sup> osinsky@imd.org.ua, <sup>b</sup> lyahovann@gmail.com, <sup>c</sup> ninaliakhova@gmail.com, <sup>d</sup> p.deminskyi@kpi.ua

SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (initiation layer) template technology on silicon substrates has been developed for non-polar III-nitride heterostructures. The possibility of effective growth of high quality GaN layers by vapor deposition using organometallic compounds with lateral overgrowth mask ordered nanoporous SiO<sub>2</sub>, as well as the possibility of formation of dense arrays of GaN and InGaN quantum dots and nanorings on «tapered frame» GaN nanorods have been shown. Study of photoluminescence spectra showed that the nanorods arrays have several advantages compared with conventional «flat» films. There are: (1) Increase in

the photoluminescence intensity twice; (2) probability of introduction of more indium concentration in the solid solution, allows to extend the range of the emission spectrum to longer wavelengths of photoluminescence.

PACS:78.67.Rb, 61.46.Km.

Keywords: nanotemplates, quantum wells, Si, GaN, nanoroads, nitrides.

Received 24.09.2013.

#### Сведения об авторах

1. Осинский Владимир Иванович — докт. тех. наук, профессор, директор Центра оптоэлектронных технологий, НИИ Микроприборов НАН Украины, e-mail: osinsky@imd.org.ua.
2. Суший Андрей Владимирович — инженер, заместитель директора Центра оптоэлектронных технологий, НИИ Микроприборов НАН Украины, e-mail: sushyi\_av@ukr.net.
3. Ляхова Наталья Николаевна — старший научный сотрудник НИИ Микроприборов НАН Украины; e-mail: lyahovann@gmail.com.
4. Глотов Владимир Иванович — старший научный сотрудник НИИ Микроприборов НАН Украины.
5. Суховий Нина Олеговна — инженер НИИ Микроприборов НАН Украины.
6. Деминский Петр Витальевич — канд.тех.наук, ученый секретарь НИИ Микроприборов НАН Украины; тел.: +308978200067, e-mail: p.deminskyi@kpi.ua.