

# Влияние давления в реакторе на свойства активной области InGaN/GaN светодиодов

© В.В. Лундин<sup>\*,†</sup>, Е.Е. Заварин<sup>\*,†</sup>, М.А. Синицын<sup>\*,†</sup>, А.В. Сахаров<sup>\*,†</sup>, С.О. Усов<sup>\*,†</sup>,  
А.Е. Николаев<sup>\*,†</sup>, Д.В. Давыдов<sup>\*,†</sup>, Н.А. Черкашин<sup>\*</sup>, А.Ф. Цацульников<sup>\*,†¶</sup>

\* Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

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

• Center for Material Elaboration & Structural Studies (CEMES) of the National Center for Scientific Research (CNRS) 31055 Toulouse, France

(Получена 8 июня 2009 г. Принята к печати 15 июня 2009 г.)

Исследовано влияние давления в реакторе при росте активных областей InGaN/GaN светодиодов методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений на их электролюминесцентные и структурные свойства. Показано, что при увеличении давления происходит трансформация слоев InGaN от сплошных в латеральном направлении к слоям изолированных InGaN-островков. Данная трансформация влияет как на эффективность излучения, так и на зависимость эффективности от тока.

## 1. Введение

При выращивании классических полупроводников  $A^{III}B^V$  методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений изменение давления в реакторе практически влияет только на особенности протекания газа и диффузионные процессы в реакторе. В то же время в случае III–N соединений от давления в реакторе существенно зависят как газофазные паразитные реакции, так и сам процесс синтеза материала [1–7]. В то же время механизмы этого влияния все еще мало изучены, а оптимальное давление при выращивании должно экспериментально определяться для каждого слоя многослойной приборной гетероструктуры. Ранее нами уже сообщалось об увеличении интенсивности фотолюминесценции InGaN/GaN-гетероструктур без изменения длины волны при повышении давления в реакторе [8]. В данной работе проводилось детальное исследование влияния давления в реакторе на структурные и электролюминесцентные свойства активной области InGaN/GaN светодиодов.

## 2. Эксперимент

Исследованные InGaN/GaN светодиодные гетероструктуры выращивались на установке AIX2000HT с планетарным реактором на подложках сапфира. Аммиак, триметилгаллий, триэтилгаллий, триметилиндий, триметилалюминий, моносилан и биспентациклодиенил магния использовались в качестве соединений-источников. В качестве несущего газа использовались: водород при выращивании слоев  $n$ -GaN, азот–водородная смесь при

выращивании слоев  $p$ -(Al)GaN, азот при выращивании InGaN/GaN активной области. Подаваемые в реактор газы очищались соответствующими системами очистки Aeropex. Структуры выращивались на сапфировых подложках ориентации (0001). Процедура роста описана в [9].

Структурные свойства исследовались с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) высокого разрешения.

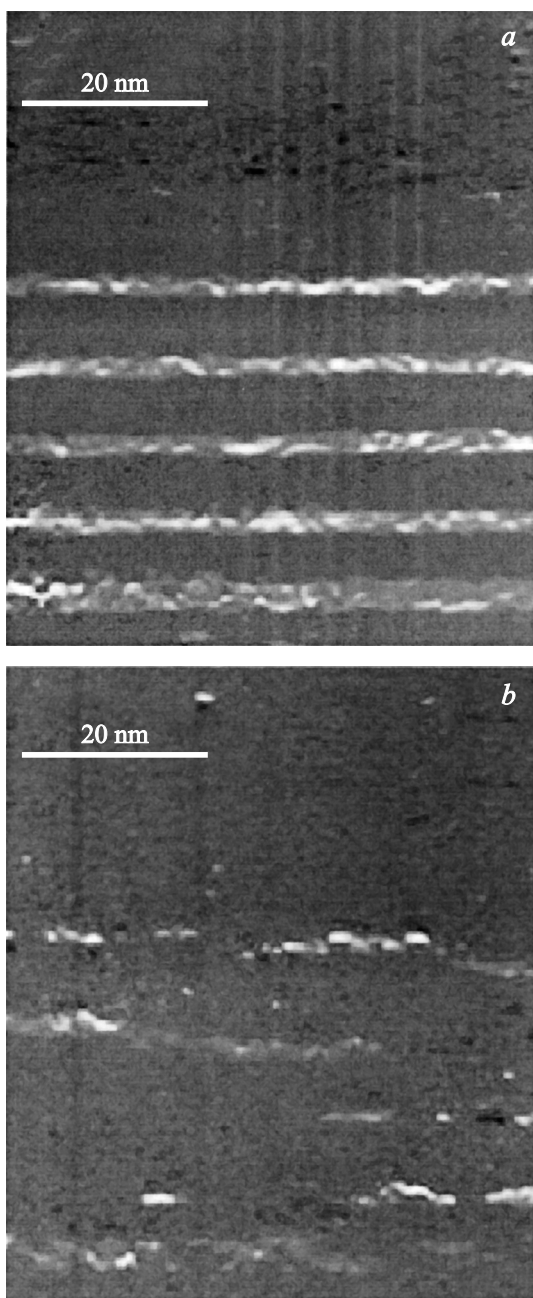
Электролюминесцентные (ЭЛ) свойства выращенных структур исследовались в непрерывном режиме на неразделенных пластинах с выводом света через подложку. Спектры ЭЛ регистрировались установкой на основе монохроматора и фотоэлектронного умножителя. При измерении эффективности светодиодных структур интенсивность ЭЛ измерялась калиброванным фотодиодом.

Выращенные структуры состояли из буферного слоя  $n$ -GaN, толщиной 5 мкм InGaN/GaN активной области с пятью квантовыми ямами (КЯ),  $p$ -AlGaN эмиттера толщиной 15 нм и контактного слоя  $p$ -GaN толщиной 180 нм. С целью сохранения неизменных начальных условий формирования активной области давление в реакторе при выращивании первой InGaN-КЯ для всех структур составляло 300 мбар, и эта КЯ зарастивалась барьерным слоем GaN без прерывания роста. При выращивании верхних четырех квантовых ям и барьеров между ними давление в реакторе варьировалось от структуры к структуре в диапазоне 100–900 мбар. После выращивания каждой из этих четырех КЯ производилось 20-секундное прерывание роста с добавлением водорода в атмосферу несущего газа [11,12]. Номинальная толщина InGaN-квантовых ям и GaN-барьеров составляли 3 и 8 нм соответственно.

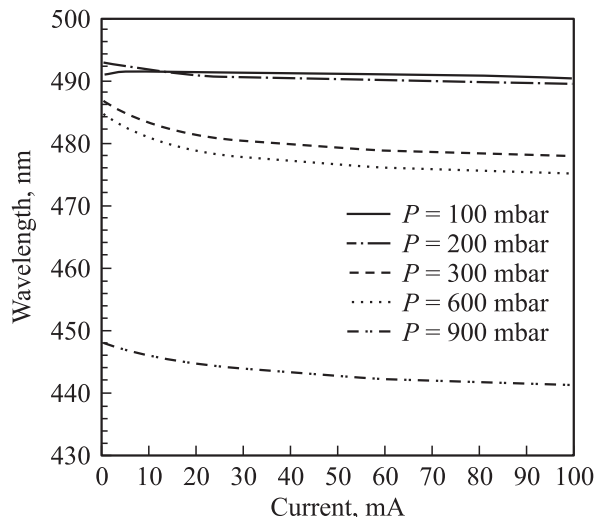
¶ E-mail: Andrew@beam.ioffe.ru

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены изображения активных областей структур, выращенных при давлении 100 и 600 мбар, полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения с последующим анализом геометрических фаз. На данном рисунке отчетливо видно формирование InGaN-слоев в активной области, причем толщина и состав по In в первом слое InGaN для обеих структур одинаковы и состав-



**Рис. 1.** Карта распределения локальных деформаций кристаллической решетки по отношению к ненапряженной матрице GaN в направлении роста [0001] для активной области, выращенной при давлении 100 (a) и 600 мбар (b).

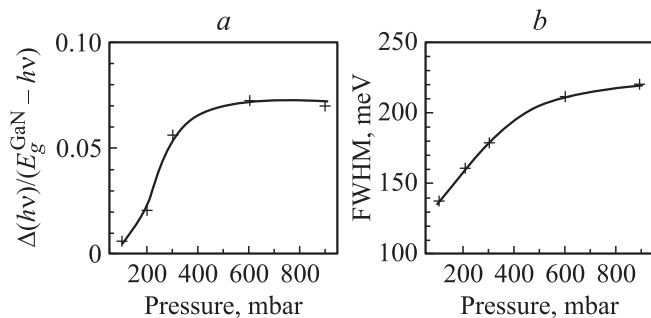


**Рис. 2.** Зависимости длины волны излучения от тока для светодиодных структур, содержащих InGaN/GaN активную область, выращенную при различных давлениях.

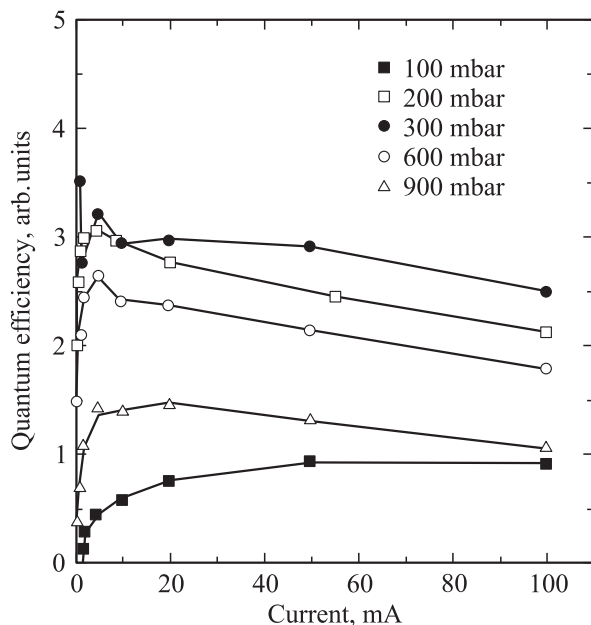
ляют  $\sim 3\text{--}4$  нм и  $18 \pm 4\%$  соответственно. Параметры остальных слоев InGaN сильно зависят от давления при росте. Выращивание активной области при давлении 100 мбар (рис. 1, a) приводит к образованию непрерывных в латеральном направлении InGaN-слоев с заметными флуктуациями состава на масштабе длин в единицы нанометров [13]. Толщины слоев InGaN в этой структуре составляют 2.3–2.5 нм, средний состав по In составляет  $27 \pm 8\%$ , а максимальный состав по In достигает 70%. Активная область, выращенная при давлении 600 мбар, имеет принципиально другую структуру (рис. 1, b) — в ней слои InGaN разделены на плоские островки, имеющие большую дисперсию по размерам от единиц до нескольких нанометров. Толщины слоев InGaN в этой структуре меняются от 0 до 2.0–2.5 нм, средний состав по In составляет  $27 \pm 8\%$ , а максимальный состав по In достигает 55%. Таким образом, увеличение давления при росте тонких слоев InGaN приводит к распаду сплошного слоя InGaN, формированию отдельных, несвязанных островков и к уменьшению максимального состава по In в слое при сохранении одинакового среднего состава по In.

На рис. 2 приведены зависимости длины волны максимума ЭЛ от тока для исследованной серии светодиодных структур. Видно, что увеличение давления приводит к коротковолновому сдвигу излучения, что связано с уменьшением максимального состава по In в островках при увеличении давления при росте, как было показано исследованиями ПЭМ.

Кроме изменения положения максимума излучения, увеличение давления в реакторе приводит к изменению величины сдвига максимума („blue shift“) длины волны излучения от тока, которая также связана с флуктуациями состава по In в слоях InGaN [14]. При сравнении структур, излучающих на различных длинах



**Рис. 3.** Зависимости сдвига максимума („blue shift“) длины волны излучения (a) и полуширины линии излучения (b) от давления в реакторе при росте активной области.  $j = 100$  мА.



**Рис. 4.** Зависимости эффективности электролюминесценции от тока для структур с активной областью, выращенной при различных давлениях.

волн, величину сдвига правильнее представлять в энергетических единицах и нормировать на разницу энергий излучаемых фотонов и ширины запрещенной зоны барьерного слоя (GaN). Данные зависимости представлены на рис. 3, a, из которого видно, что с ростом давления коротковолновый сдвиг излучения с увеличением тока возрастает. Данный эффект связан с тем, что образование отдельных островков InGaIn, имеющих значительную дисперсию как по размерам, так и по составу, приводит к уширению спектра состояний. Следовательно, при увеличении тока увеличивается заселенность состояний с меньшей энергией локализации, что приводит к увеличению ширины линии излучения (рис. 3, b).

Таким образом, в исследованной серии структур наблюдается аномальная взаимосвязь между длиной волны излучения и ее шириной — структуры с большей длиной волны имеют более узкий спектр излучения и меньший

сдвиг максимума излучения с током. Если увеличение длины волны ЭЛ InGaIn/GaN-структур достигается снижением температуры роста (что является общепринятым способом управления длиной волны излучения), то структуры с большей длиной волны имеют более широкий спектр и большую величину сдвига максимума излучения с током [14].

На рис. 4 представлены зависимости эффективности ЭЛ от тока для светодиодных структур, выращенных при различных давлениях. Видно, что увеличение давления роста от 100 до 300 мбар приводит к значительному увеличению эффективности излучения. Данный эффект может быть связан с тем, что образование островков приводит к подавлению латерального транспорта носителей к центрам безызлучательной рекомбинации, что повышает эффективность ЭЛ. Особенно данный эффект заметен в области малых (< 20 мА) токов. Изменения в ходе зависимости эффективности излучения от тока для структур, выращенных при различных давлениях, связаны, видимо, с изменением динамики рекомбинации через состояния формирующихся островков и требуют дальнейшего изучения.

#### 4. Заключение

Таким образом, нами исследовано влияние давления в реакторе на формирование InGaIn/GaN активных областей светодиодных структур. Показано, что увеличение давления в диапазоне 100–600 мбар приводит к разделению сплошных слоев InGaIn на массив пространственно разделенных островков. Данная морфологическая трансформация слоев InGaIn в активной области сопровождается увеличением эффективности электролюминесценции. Показано, что данная трансформация слоев InGaIn приводит к немонотонной зависимости эффективности излучения от давления роста. Таким образом, оптимальное значение давления в реакторе при росте активной области, приводящее к оптимальной морфологической трансформации слоев InGaIn, должно определяться экспериментально в зависимости от необходимых свойств светодиодной структуры и требуемого режима работы светодиода.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 02.523.12.3017 от 14 августа 2008 г.

#### Список литературы

- [1] H. Tokunaga, A. Ubukata, Y. Yano, A. Yamaguchi, N. Akutsu, T. Yamasaki, K. Matsumoto. *J. Cryst. Growth*, **272** (1–4), 348 (2004).
- [2] Sadahiro Kato, Yoshihiro Satoh, Hitoshi Sasaki, Iwami Masayuki, Seikoh Yoshida. *J. Cryst. Growth*, **298**, 831 (2007).
- [3] A. Strittmatter, L. Reissmann, R. Seguin, S. Rodt, A. Brostowski, U.W. Pohl, D. Bimberg, E. Hahn, D. Gerthsen. *J. Cryst. Growth*, **272** (1–4), 415 (2004).

- [4] T. Chung, J.-B. Limb, U. Chowdhury, P. Li, J.-H. Ryou, D. Yoo, D. Zakharov, Z. Liliental-Weber, R.D. Dupuis. *Phys. Status Solidi C*, **2** (7), 2157 (2005).
- [5] A.V. Kondratyev, R.A. Talalaev, W.V. Lundin, A.V. Sakharov, A.F. Tsatsul'nikov, E.E. Zavarin, A.V. Fomin, D.S. Sizov. *J. Gryst. Growth*, **272**, 420 (2004).
- [6] K. Yanashima, S. Hashimoto, T. Hino, K. Funato, T. Kobayashi, K. Naganuma, T. Tojyo, T. Asano, T. Asatsuma, T. Miyajima, M. Ikeda. *J. Electron. Mater.*, **28** (3), 287 (1999).
- [7] R.A. Talalaev, E.V. Yakovlev, S.Yu. Karpov, I.Yu. Estratov, A.N. Vorobev, Yu.N. Makarov. *Phys. Status Solidi A*, **176**, 253 (1999).
- [8] Е.Е. Заварин, В.В. Лундин, М.А. Синицын, А.Ф. Цацульников. Тез. докл. 5-й Всеросс. конф. *Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы* (31 января–2 февраля 2007 года, Москва) с. 156.
- [9] С.А. Сахаров, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, М.А. Синицын, А.Е. Николаев, С.А. Усов, В.С. Сизов, Г.А. Михайловский, Н.А. Черкашин, М. Нutch, Ф. Нус, Е.В. Яковлев, А.В. Лобанова, А.Ф. Цацульников. *ФТП*, **43** (6), 841 (2009).
- [10] А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин, А.В. Сахаров, Е.Е. Заварин, С.О. Усов, А.Е. Николаев, Н.А. Черкашин, Б.Я. Бер, Д.Ю. Казанцев, М.Н. Мизеров, Нее Seok Park, М. Нutch, Ф. Нус. *ФТП*, **44** (01), 96 (2010).
- [11] A.V. Sakharov, W.V. Lundin, I.L. Krestnikov, D.A. Bedarev, A.F. Tsatsul'nikov, A.S. Usikov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, A. Hoffmann, D. Bimberg. *Proc. IWN2000* (Nagoya, Sept. 24–27, 2000).
- [12] W.V. Lundin, E.E. Zavarin, M.A. Sinitsyn, A.E. Nikolaev, A.V. Sakharov, A.F. Tsatsulnikov, E.V. Yakovlev, R.A. Talalaev, A.V. Lobanova, A.S. Segal. *13<sup>th</sup> Europ. Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy* (Ulm, Germany, June 7–10, 2009). Extended abstracts.
- [13] Yu.G. Musikhin, D. Gerthsen, D.A. Bedarev, N.A. Bert, W.V. Lundin, A.F. Tsatsul'nikov, A.V. Sakharov, A.S. Usikov, Zh.I. Alferov, I.L. Krestnikov, N.N. Ledentsov, A. Hoffmann, D. Bimberg. *Appl. Phys. Lett.*, **80** (12), 2099 (2002).
- [14] R.W. Martin, P.G. Middleton, K.P. O'Donnell, W. Van Der Stricht. *Appl. Phys. Lett.*, **74** (2), 263 (1999).

Редактор Л.В. Беляков

## Effect of growth pressure on InGaN/GaN LEDs active region properties

W.V. Lundin<sup>+,\*</sup>, E.E. Zavarin<sup>+,\*</sup>, M.A. Sinitsyn<sup>+,\*</sup>, A.V. Sakharov<sup>+,\*</sup>, S.O. Usov<sup>+,\*</sup>, A.E. Nikolaev<sup>+,\*</sup>, D.V. Davydov<sup>+,\*</sup>, N.A. Cherkaschin<sup>•</sup>, A.F. Tsatsulnikov<sup>+,\*</sup>

\* Center for Microelectronics  
at Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences  
194021 St. Petersburg, Russia

+ Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences  
194021 St. Petersburg, Russia

• Center for Material Elaboration & Structural  
Studies (CEMES) of the National Center  
for Scientific Research (CNRS),  
31055 Toulouse, France

**Abstract** Effect of the pressure in a reactor during MOCVD growth of the active regions of a InGaN/GaN LEDs on electroluminescence and structural properties was investigated. Transformation of the InGaN layers from continuous layers to isolated islands at increase in the pressure was revealed. This transformation effects on the emission efficiency as well as on the current dependence of the emission efficiency.