

# Электролюминесцентные свойства гетероструктур с квантовыми ямами GaInNAs

© А.В. Мурель<sup>¶</sup>, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, Д.М. Гапонова, В.И. Шашкин, В.Б. Шмагин, О.И. Хрыкин

Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 1 июня 2004 г. Принята к печати 14 июня 2004 г.)

Квантовые ямы GaInNAs выращивались методом металлорганической газофазной эпитаксии. Для улучшения оптических свойств с обеих сторон квантовой ямы встраивались барьеры GaNAs, компенсирующие упругие напряжения. Характеристики оптических переходов оценивались из измерений фотолюминесценции и фототока. Для изготовления светоизлучающих диодов использовались неплавные омические контакты на основе сильно легированных  $\delta$ -слоев. Электролюминесценция наблюдалась на длине волны  $\sim 1.2$  мкм при температурах 77 и 300 К, ее интенсивность зависела линейно от инжектирующего тока, выше некоторого порогового значения.

## 1. Введение

Длинноволновые (1.3–1.5 мкм) лазеры на GaInNAs, изготавливаемые на подложках GaAs, представляют интерес для использования в оптоэлектронных линиях связи [1,2]. Полупроводниковое соединение GaInNAs широко исследуется как возможный кандидат для активного слоя вертикально излучающих лазеров (VCSEL) вследствие хорошо развитой VCSEL-технологии на GaAs, которая включает распределенные брэгговские отражатели (DBR) на основе решетки Al(Ga)As/GaAs и селективное окисление AlAs для пространственного ограничения области протекания тока. С другой стороны, ухудшение эффективности эмиссии, обусловленное введением азота, признается самой большой проблемой GaInNAs-слоев. Поэтому многие исследователи прилагают значительные усилия по улучшению оптического качества этого материала.

Одним из направлений является включение растягивающих напряженных барьеров GaNAs с каждой стороны квантовой ямы GaInNAs [3,4], что предполагает частичную компенсацию напряжений в яме, позволяет сделать яму более широкой, что должно привести к сдвигу эмиссии в длинноволновую область. Предполагается, что барьеры GaNAs действуют также в качестве резервуаров азота, предотвращая голубой сдвиг из-за диффузии азота из ямы при повышенных температурах.

## 2. Эксперимент

Структуры выращивались на полуизолирующих и  $n$ - и  $p$ -сильно легированных подложках арсенида галлия методом металлорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) при пониженном (75 Торр) давлении. Триметилгаллий (TMG) и триметилиндий (TMI) использовались как источники элементов III группы, 1,1 диметилгидразин (DMHy) и арсин (AsH<sub>3</sub>) — как источники элементов V группы. Температура роста составляла 650°C для GaAs и 500–600°C для III–N–As.

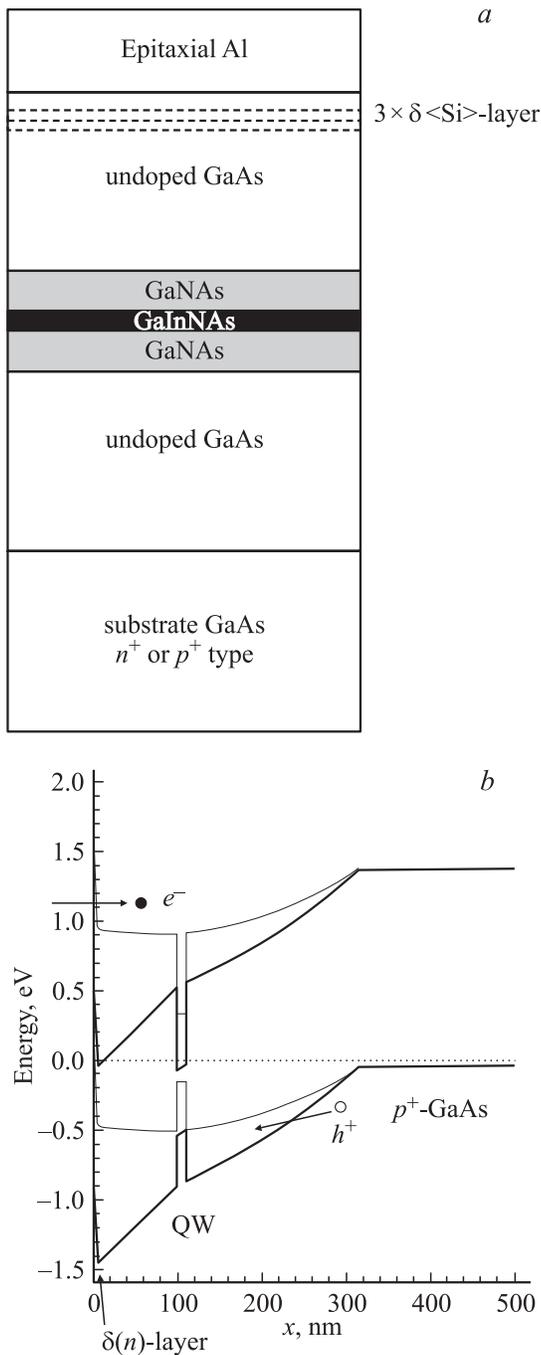
Схематический вид выращенных структур представлен на рис. 1, *a*. В нелегированный слой GaAs толщиной 0.3 мкм встраивалась квантовая яма GaInNAs толщиной 8.5 нм, окруженная с двух сторон слоями GaNAs толщиной 6 нм. Вблизи поверхности с периодом 3 нм выращивались три сильно легированных Si  $\delta$ -слоя, используемых в качестве неплавного омического контакта для инжекции электронов. После окончания роста гетероструктуры из металлорганического алюминийсодержащего соединения *in situ* осаждался слой эпитаксиального алюминия толщиной 20 нм, который играл роль металлического контакта, а также предохранял поверхность арсенида галлия от окисления. Для обеспечения надежного механического и электрического контакта осуществлялось подпыление дополнительного слоя алюминия методом термического напыления. Толщина и состав квантовых ям оценивались из кривых рентгеновской дифракции (РД) и вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Измерение спектров рентгеновской дифракции проводилось на дифрактометре ДРОН-4 с монохроматором Ga(400) на излучении  $\text{CuK}\alpha_1$  в окрестности отражений (400)GaAs и (440)GaAs. Оптические свойства образцов изучались методом фотолюминесценции (ФЛ) и фототоковой спектроскопии. Исследование электролюминесценции (ЭЛ) проводилось на изготовленных путем выкалывания образцах площадью  $\sim 1$  мм<sup>2</sup>. Накачка осуществлялась регулируемым импульсным генератором тока с длительностью импульса 10 мкс и частотой повторения 1 кГц. Регистрировалось выходное излучение из боковой поверхности скола при температурах 80 и 300 К.

Предполагаемая зонная диаграмма светоизлучающей структуры представлена на рис. 1, *b* для режимов нулевого смещения и при условии протекания прямого инжекционного тока.

## 3. Результаты и обсуждение

Содержание азота и индия в четверных соединениях в зависимости от параметров роста в процессе металлорганической газофазной эпитаксии изучалось ра-

<sup>¶</sup> E-mail: murel@ipm.sci-nnov.ru

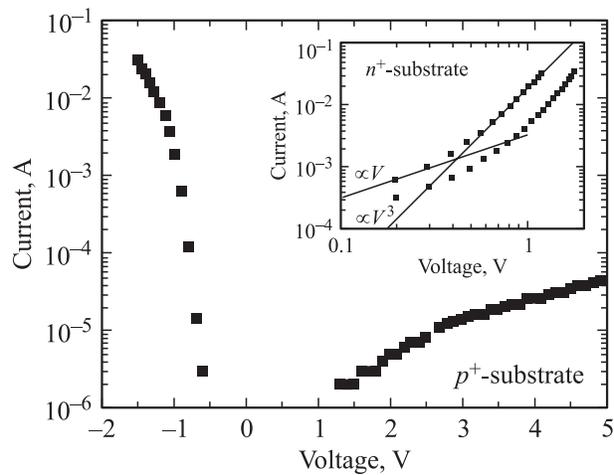


**Рис. 1.** *a* — схематическое изображение структуры, содержащей квантовую яму GaInNAs; *b* — зонная диаграмма структуры при нулевом (толстая линия) и прямом смещении (тонкая линия).

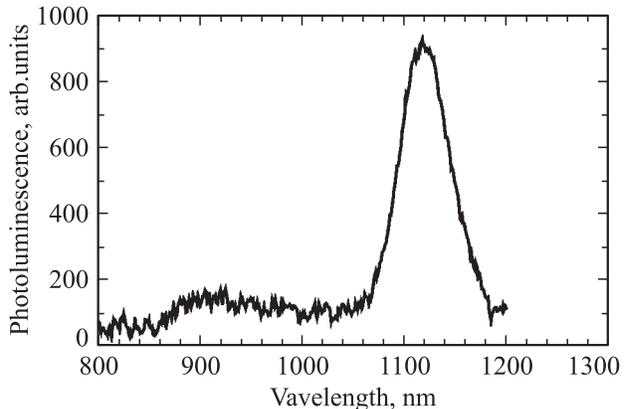
нее [5], в настоящей работе были использованы эти результаты. Содержание азота в GaNAs барьерах оценивалось в 2%, состав квантовой ямы был приблизительно  $\text{Ga}_{0.88}\text{In}_{0.12}\text{N}_{0.01}\text{As}_{0.99}$ . В спектрах рентгеновской дифракции пик слоя четверного соединения находился при меньших брегговских углах, чем пик GaAs (период решетки больше, чем у GaAs), т. е. величина растяжения за счет замещения In–Ga больше, чем сжатие за счет

замещения N–As. Поэтому введение барьерных слоев тройного соединения GaAsN с уменьшенным периодом действительно приводит к частичной компенсации суммарной упругой деформации слоев и увеличивает критическую толщину образования дислокаций несоответствия.

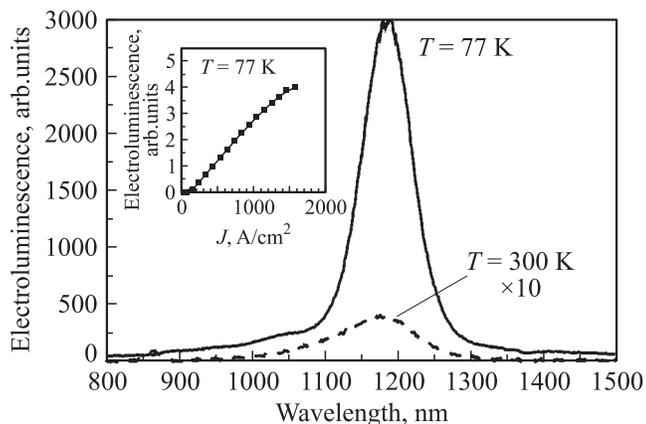
Вольт-амперные характеристики диодов диаметром 200 мкм, изготовленных на  $p^+$ -подложке, имели вид, типичный для  $p^+ - n^+$ -перехода (рис. 2) со следующими параметрами: фактор неидеальности  $\sim 2.2$  и последовательное сопротивление 10–15 Ом. Вольт-фарадная характеристика, измеренная при обратном смещении, свидетельствует о полном обеднении нелегированной области. Вид вольт-амперных характеристик структур, изготовленных на  $n^+$ -подложке, приведен на вставке рис. 2 в двойных логарифмических координатах. Наблюдаемый начальный омический участок описывает перенос носителей в структуре  $n^+ - n^- - n^+$  при малых напряжениях. При дальнейшем росте напряжения ток



**Рис. 2.** Вольт-амперная характеристика диода с квантовой ямой GaInNAs, выращенной на  $p^+$ -подложке для исследования электролюминесценции. На вставке — вольт-амперная характеристика той же структуры, выращенной на подложке  $n^+$ -типа.



**Рис. 3.** Спектр фотолюминесценции структуры, содержащей квантовую яму GaInNAs, измеренный при температуре 80 К.



**Рис. 4.** Спектры электролюминесценции диода с квантовой ямой GaInNAs, измеренные при температурах 77 и 300 К. На вставке — зависимость величины сигнала электролюминесценции от плотности инжектируемого тока.

описывается зависимостью  $I \propto V^3$ , которая характерна для токов, ограниченных пространственным зарядом.

Спектр фотолуминесценции, измеренный при 77 К, имеет пик на длине волны 1120 нм, связанный с основным переходом в квантовой яме (рис. 3). На рис. 4 приведены спектры электролюминесценции, полученной с боковой поверхности скола образца, при протекании инжекционного тока 150 мА, в которых наблюдается пик на длине волны 1180 нм. Различие в значениях длин волн для максимумов ФЛ и ЭЛ связано с планарной неоднородностью исследуемых образцов, обусловленной особенностью процесса газофазной эпитаксии в горизонтальном реакторе без вращения подложек. Интенсивность электролюминесценции при низкой температуре (77 К) почти на 2 порядка выше, чем при комнатной температуре. Изменение выходной мощности электролюминесценции от тока инжекции, показанное на вставке рис. 4, имеет практически линейную зависимость.

Для дальнейшего продвижения в длинноволновую часть спектра необходимо увеличивать содержание индия и(или) азота в квантовой яме для уменьшения ширины запрещенной зоны. Это предполагает развитие и отработку технологии роста четверных соединений, углубленное понимание процессов, происходящих в газовой фазе, которые приводят к сильному взаимному влиянию на вхождение индия и азота в растущую эпитаксиальную пленку.

#### 4. Заключение

Методом металлоорганической газофазной эпитаксии при температуре 500–550°C выращены квантовые ямы четверного соединения GaInNAs на подложках арсенида галлия. Для улучшения оптических свойств квантовой ямы с обеих сторон встроены барьеры GaNAs, компенсирующие механические напряжения. Изучены фото-

электрические свойства полученных структур. Для создания светоизлучающего диода использовался несплавной омический контакт на основе сильно легированных  $\delta$ -слоев. Электролюминесценция наблюдалась на длине волны  $\sim 1.2$  мкм при температурах 77 и 300 К, интенсивность ее зависела линейно от плотности инжекционного тока.

Исследования поддержаны грантами РФФИ № 03-02-17404, 04-02-17180 и программой ФТНС.

#### Список литературы

- [1] T. Kitatani, M. Kondow, T. Tanaka. *J. Cryst. Growth*, **221**, 491 (2000).
- [2] S. Sato. *Japan. J. Appl. Phys.*, **39**, 3403 (2000).
- [3] E.-M. Pavelescu, T. Jouhti, C.S. Peng, W. Li, J. Lontinen, D. Dumitrescu, P. Laukkanen, M. Pessa. *J. Cryst. Growth*, **241**, 31 (2002).
- [4] N. Tansu, J.-Y. Yeh, J. Mawst. *J. Appl. Phys. Lett.*, **83**, 2512 (2003).
- [5] А.В. Мурель, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, Д.М. Гапонова, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **68** (1), 87 (2004).

Редактор Л.В. Беляков

#### Electroluminescence characteristics of GaInNAs quantum well heterostructures

A.V. Murel, V.M. Daniltsev, Yu.N. Drozdov, D.M. Gaponova, V.I. Shashkin, V.B. Shmagin, O.I. Khrykin

Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The GaInNAs quantum wells were grown by metalorganic vapor-phase epitaxy. The compensating mechanical strains GaNAs barriers were built in from both sides of a quantum well for improving the optical properties. Characteristics of optical transitions were estimated from photoluminescence and photocurrent measurements. Nonalloyed ohmic contacts on the basis of high doped  $\delta$ -layers were used for the light-emitting diode fabrication. Electroluminescence was observed on the wavelength of  $\sim 1.2$   $\mu\text{m}$  at temperatures 77 and 300 K, the intensity depending linearly on the density of an injection current above certain threshold value.