

# Температурные электролюминесцентные исследования излучательных характеристик инжекционных лазеров на основе InGaAsN/GaAs

© Л.Я. Карачинский\*<sup>¶</sup>, Н.Ю. Гордеев\*, И.И. Новиков\*, М.В. Максимов\*, А.Р. Ковш\*<sup>+,</sup>,  
J.S. Wang<sup>+</sup>, R.S. Hsiao<sup>+</sup>, J.Y. Chi<sup>+</sup>, В.М. Устинов\*, Н.Н. Леденцов\*<sup>\*\*,\*</sup>

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

<sup>+</sup> Индустриально-технологический исследовательский институт,  
310 Ксинчу, Тайвань, Китайская Республика

\*\* Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin,  
D-10623 Berlin, Germany

(Получена 19 ноября 2003 г. Принята к печати 27 ноября 2003 г.)

Проведены исследования мощностных, спектральных и пространственных характеристик излучения инжекционных лазеров с активной областью на основе твердого раствора InGaAsN, выращенных на подложках GaAs. Исследования проводились в широком диапазоне температур (77–300 К) при различных плотностях тока накачки. Показано, что увеличение содержания азота в твердом растворе InGaAsN может приводить к модификации структуры квантовой ямы, выражающейся в спонтанном формировании нанокластеров InGaAsN. Эти изменения приводят к возникновению  $N$ -образной температурной зависимости пороговой плотности тока и дифференциальной ватт-амперной эффективности.

## 1. Введение

Полупроводниковые лазеры с длиной волны излучения 1.3 мкм широко используются в оптоэлектронных системах телекоммуникаций. В последние годы большое внимание уделяется вопросам создания таких лазеров, выращенных на подложках из арсенида галлия. Впервые лазеры в системе InGaAsN/GaAs были предложены и реализованы Kondow и др. [1] и с тех пор являются основной альтернативой для InGaAsP/InP-лазеров, излучающих в том же диапазоне длин волн. За прошедшее время со времени работы Kondow (1995 г.) было осуществлено большое число попыток реализации лазеров, выращенных на GaAs-подложках, с активной областью, состоящей из квантовых ям (КЯ) InGaAsN [2–7].

Лазеры, выращенные на подложках InP, являются в настоящее время основными источниками излучения на длине волны 1.3 мкм. Они обладают невысокой характеристической температурой  $T_0 = 50–70$  К [8], что связано со слабой локализацией электронов в активной области [9,10]. Для лазеров в системе InGaAsN/GaAs предсказанное значение  $T_0$  составляет более 150 К [1], что связывается с сильным электронным ограничением, вызванным более существенным различием в энергиях запрещенной зоны. Возможность создания более дешевых длинноволновых лазеров с улучшенными температурными характеристиками делает лазеры с активной областью на основе КЯ InGaAsN чрезвычайно привлекательными для исследований и последующего использования.

Цель настоящей работы — исследование излучательных характеристик InGaAsN/GaAs-лазеров в широком диапазоне температур.

## 2. Эксперимент

Исследуемые лазерные структуры были выращены на подложках GaAs (100), легированных кремнием, в установке молекулярно-пучковой эпитаксии Riber Epicut. Источником атомарного азота служил плазменный источник UNI Bulb (Applied EPI). Режимы работы источника тщательно оптимизировались для подавления негативного эффекта бомбардировки растущей поверхности высокоэнергетичными ионами, формирующимися в плазменном источнике. Активная область лазерных структур представляла собой одиночную квантовую яму  $\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}_{0.97}\text{N}_{0.03}$  (структура 1) и  $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}_{0.974}\text{N}_{0.026}$  (структура 2). Скорость роста составляла 2.5 Å/с при температуре 440°C. Активная область помещалась в GaAs-волновод толщиной 0.35 мкм, ограниченный эмиттерными слоями  $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$   $p$ - и  $n$ -типа. Рост эмиттеров проводился при 700°C. Структура 2 подвергалась отжигу в течение 15 мин при температуре 750°C, при этом структура 1 не подвергалась отжигу. Длина волны лазерной генерации при комнатной температуре составила 1.28 мкм для структуры 1 и 1.24 мкм для структуры 2.

Из выращенных гетероструктур были изготовлены образцы с полосковым контактом (ширина контакта 100 мкм, длина резонатора 2000 мкм). Накачка образцов осуществлялась в квазинепрерывном режиме импульсами тока длительностью 1 мкс с частотой повторения 5 кГц. Спектральные, мощностные и пространственные характеристики электролюминесценции исследовались в широком диапазоне температур от 77 до 300 К, для чего образцы спаивались на теплоотвод эпитаксиальными слоями вниз и помещались в криостат.

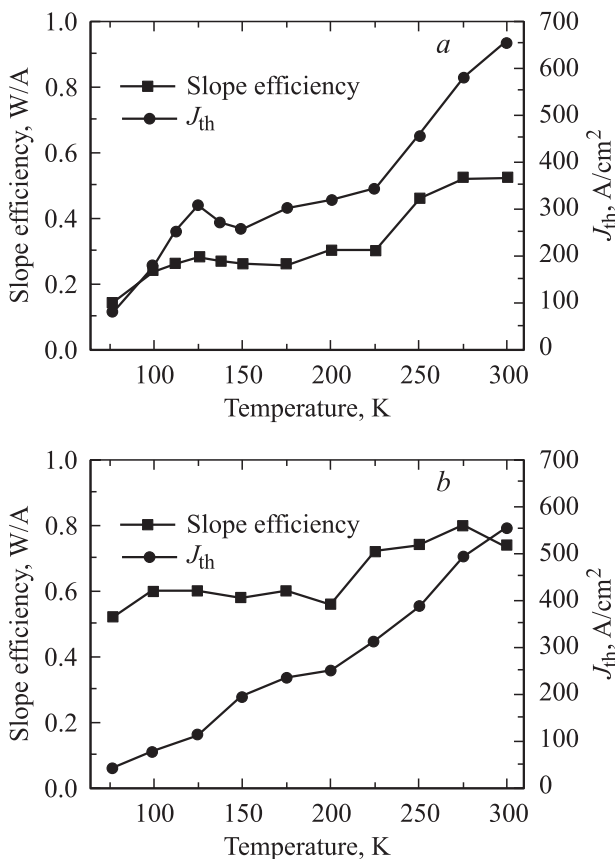
<sup>¶</sup> E-mail: Karach@switch.ioffe.ru

### 3. Экспериментальные результаты

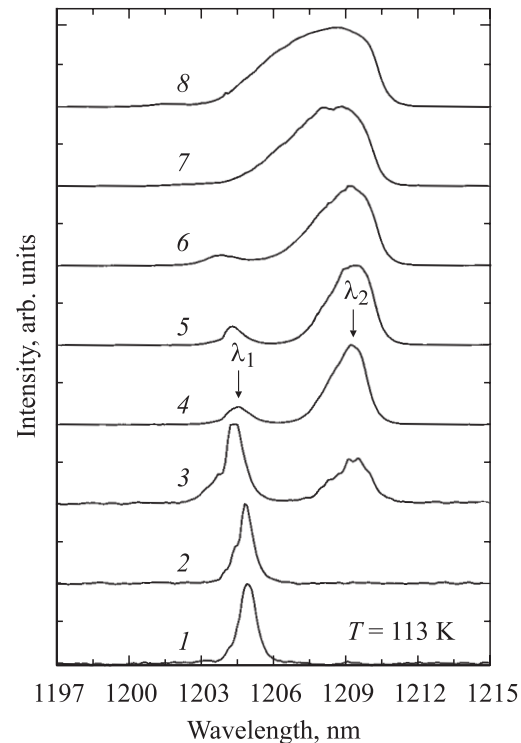
Были проведены измерения ватт-амперных характеристик образцов обеих выращенных структур. Полученные результаты позволили построить зависимости пороговой плотности тока и дифференциальной ватт-амперной эффективности (slope efficiency) от температуры, которые представлены на рис. 1. Было обнаружено, что для гетероструктуры с содержанием азота 3% (структура 1) наблюдается *N*-образная температурная зависимость этих величин, тогда как для структуры с содержанием азота 2.6% (структура 2) такая особенность отсутствует, и характеристики монотонно изменяются с увеличением температуры.

Были проведены спектральные исследования излучения образцов структуры 1 в диапазоне температур, соответствующем мощностным измерениям. При этом особое внимание было уделено тем температурам, при которых наблюдались особенности в зависимостях пороговой плотности тока и дифференциальной ватт-амперной эффективности.

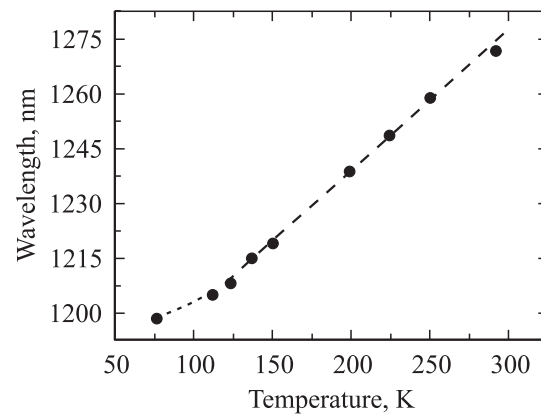
Было обнаружено, что в диапазоне температур 110–130 К лазерная генерация возникает сперва в коротковолновой области спектра, потом с ростом тока накачки в спектрах возникает второй максимум в бо-



**Рис. 1.** Зависимости пороговой плотности тока  $J_{th}$  и дифференциальной ватт-амперной эффективности от температуры для лазерных гетероструктур 1 (a) и 2 (b).

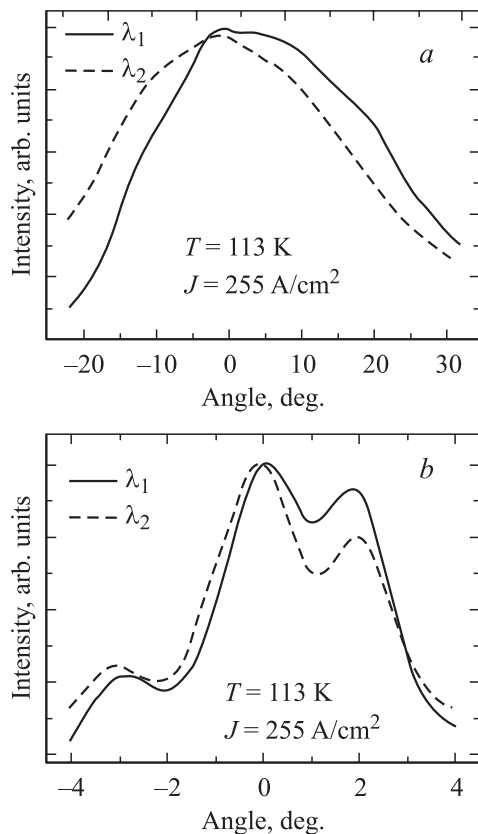


**Рис. 2.** Спектры лазерной генерации гетероструктуры 1 при  $T = 113$  К. Ток накачки,  $A/cm^2$ : 1 — 190, 2 — 205, 3 — 255, 4 — 380, 5 — 510, 6 — 765, 7 — 1015, 8 — 1270.



**Рис. 3.** Зависимость длины волны, на которой происходит лазерная генерация, от температуры для гетероструктуры 1.

лее длинноволновой области и происходит одновременная генерация на двух различных длинах волн. При дальнейшем увеличении тока накачки коротковолновый максимум практически полностью исчезал из спектров. Развитие данного процесса при температуре 113 К представлено на рис. 2. Для всех остальных температур генерация возникала на определенной длине волны и с ростом тока накачки развивалась в этой же спектральной области. На рис. 3 представлена зависимость длины волны лазерной генерации от температуры. Видно, что



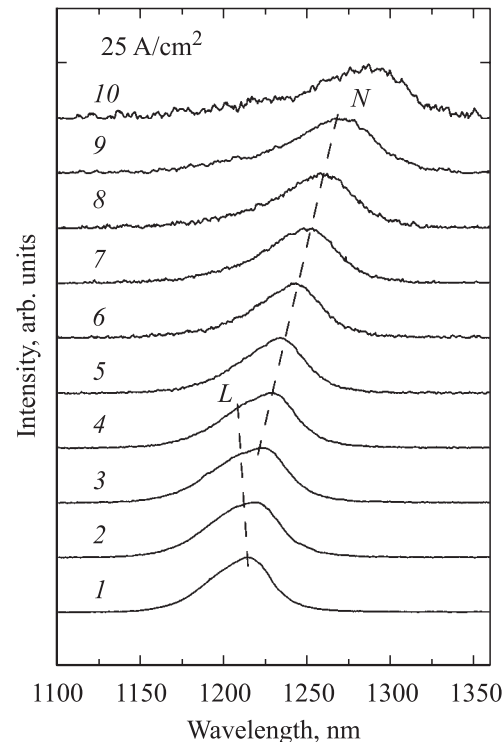
**Рис. 4.** Дальнее поле излучения со спектральным разрешением гетероструктуры *I* в плоскости, перпендикулярной плоскости *p*–*n*-перехода (*a*), и в плоскости, параллельной *p*–*n*-переходу (*b*).

зависимость имеет два характерных участка — в диапазоне температур 77–120 К и 120–300 К.

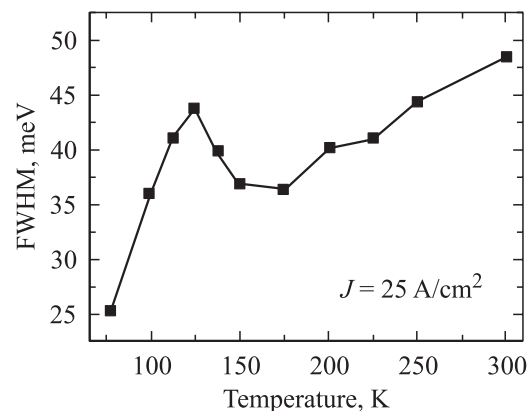
Для определения того, соответствуют ли два максимума в спектре в диапазоне температур 110–130 К одной и той же поперечной моде излучения или же они принадлежат различным модам, было исследовано со спектральным разрешением дальнее поле излучения образца структуры *I*. Измерения проводились как в плоскости, перпендикулярной *p*–*n*-переходу (рис. 4, *a*), так и в плоскости, параллельной ему (рис. 4, *b*), при температуре 113 К при плотности тока накачки  $255 \text{ A/cm}^2$ . При этом монохроматор настраивался на разные максимумы ( $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  на рис. 2) спектра излучения. Методика данного исследования была предложена в работе [11]. Измерения показали, что оба максимума в спектре имеют одинаковый профиль распределения и соответствуют одной и той же поперечной моде.

Спектры спонтанного излучения образца структуры *I* исследовались в зависимости от температуры при плотности тока накачки  $25 \text{ A/cm}^2$  (рис. 5). Такое значение плотности тока было выбрано из тех соображений, чтобы при любой температуре в исследуемом диапазоне оно было бы существенно меньше значения пороговой плотности тока. На рис. 6 представлена зависимость

ширины спектра спонтанного излучения на полувысоте (full width of half maximum — FWHM) в зависимости от температуры. Легко видеть, что зависимость носит *N*-образный характер, аналогичный зависимостям пороговой плотности тока и дифференциальной ватт-амперной эффективности.



**Рис. 5.** Спектры спонтанного излучения гетероструктуры *I* в зависимости от температуры при плотности тока накачки  $25 \text{ A/cm}^2$ . *L* — максимум, соответствующий излучательной рекомбинации через локализованные состояния; *N* — максимум, соответствующий обычной межзонной рекомбинации в квантовой яме. Температура, К: 1 — 77, 2 — 113, 3 — 125, 4 — 138, 5 — 150, 6 — 175, 7 — 200, 8 — 225, 9 — 250, 10 — 300.



**Рис. 6.** Зависимость ширины спектра спонтанного излучения на полувысоте (FWHM) от температуры для гетероструктуры *I*.

## 4. Обсуждение

Зависимость пороговой плотности тока от температуры для структуры 2 (рис. 1, *b*) позволила оценить значение характеристической температуры  $T_0$ . Полученное значение составило 80 К, что является улучшением характеристик по сравнению с лазерами, выращенными на подложках InP [8]. Зависимости пороговой плотности тока и дифференциальной ватт-амперной эффективности, аналогичные полученным для структуры 1 (рис. 1, *a*), ранее были обнаружены при исследовании лазерных гетероструктур на основе квантовых точек (КТ) InAs/GaAs [12]. Учет перехода от неравновесного к равновесному распределению неравновесных носителей в активной области лазера с ростом температуры позволил объяснить подобные особенности поведения температурных характеристик лазеров на квантовых точках [12,13]. Ранее отмечалось, что в твердом растворе InGaAsN при высокой концентрации индия (более 30%) может происходить кластеризация с образованием квантовых объектов с трехмерным ограничением [14]. Таким образом, у нас есть все основания полагать, что в данном случае *N*-образная температурная зависимость пороговой плотности тока и дифференциальной ватт-амперной эффективности структуры 1 связана с наличием в активной области этой гетероструктуры объектов, по своим свойствам идентичным КТ.

Проведенные спектральные исследования структуры 1 показали, что в диапазоне температур 110–130 К и при плотности тока накачки, немного превышающей пороговую, имеет место одновременная лазерная генерация на двух различных длинах волн (рис. 2). При этом лазерная генерация возникает сперва в коротковолновой области спектра, а затем происходит „переключение“ на большую длину волны. Как уже было показано в предыдущем разделе, исследование дальнего поля излучения данной гетероструктуры со спектральным разрешением позволило исключить из рассмотрения возможность того, что оба максимума в спектре принадлежат различным поперечным модам. Кроме того, сравнительно небольшое по энергии расстояние между двумя максимумами в спектре (около 4 мэВ), а также то, что с ростом плотности тока накачки первым появляется коротковолновый максимум, позволяет утверждать, что два спектральных максимума не являются следствием лазерной генерации через основное и возбужденное состояние каких-либо объектов с трехмерным пространственным ограничением носителей заряда. Дело в том, что характерное расстояние между основным и первым возбужденным состоянием в квантовых точках составляет более 50 мэВ [15,16]. При этом переключение на лазерную генерацию через высокоэнергетичное состояние (коротковолновый максимум) в КТ происходит с ростом плотности тока накачки только после того, как генерация через

основное состояние (длинноволновый максимум) насыщается [17].

Известно, что в гетероструктурах с квантовыми ямами InGaAsN существуют локализованные состояния, через которые может происходить рекомбинация носителей [18–20]. При этом длина волны излучения оказывается меньшей по сравнению со случаем обычной рекомбинации электронов и дырок в квантовой яме [18–20]. Разница по энергии между двумя максимумами, соответствующими рекомбинации через локализованные и обычные состояния в квантовой яме согласно данным работ [18–20], составляет около 5 мэВ. С ростом плотности тока накачки излучение через такие состояния должно быстро насыщаться, что и наблюдалось в нашем эксперименте. Как видно из рис. 2, при плотности тока накачки, равной двум пороговым, вклад коротковолновой составляющей в суммарную интенсивность излучения уже крайне мал, а при дальнейшем росте тока накачки и вовсе стремится к нулю. Таким образом, можно предположить, что наличие в спектре излучения гетероструктуры 1 при определенных условиях двух максимумов связано с наличием в этой структуре большого числа локализованных состояний, которые являются причиной возникновения более коротковолнового излучения.

*N*-образная температурная зависимость ширины линии фотолюминесценции на полувысоте (FWHM) для гетероструктуры с квантовой ямой InGaAsN, не прошедшей процедуру отжига, ранее наблюдалась в работе [20]. При этом отжиг приводит к исчезновению этой особенности. В этой работе *N*-образность объяснялась тем, что при низких температурах излучение идет в основном через локализованные состояния, затем в некотором диапазоне температур происходит одновременная излучательная рекомбинация через локализованные и обычные состояния в квантовой яме, вследствие чего происходит уширение линии фотолюминесценции, а затем с ростом температуры локализованные состояния практически перестают вносить вклад в излучение, что приводит к сужению спектральной линии. Аналогичное поведение линии электролюминесценции мы наблюдали и в данной работе для гетероструктуры 1 (рис. 5). Тот факт, что с ростом температуры интенсивность коротковолнового пика резко падает, может быть объяснен следующим образом: как уже отмечалось выше, согласно нашим данным, в активной области структуры 1 образуются нанокластеры InGaAsN. Если размер нанокластеров достаточно мал, то дополнительное квантование носителей в плоскости ямы приводит к увеличению энергии основного состояния (мы предполагаем, что энергетические состояния в нанокластерах отделены от состояний в квантовой яме барьерами). При низких температурах время излучательной рекомбинации носителей в нанокластерах меньше, чем время их термического выброса в континуум. Таким образом, носители, попавшие в нанокластер, рекомбинируют в нем же и лазерная генерация осуществляется через

состояния нанокластеров. При повышении температуры происходит выброс носителей из нанокластеров, в системе устанавливается квазиравновесное распределение и лазерная генерация осуществляется через состояния квантовой ямы.

Отжиг уменьшает эффективность локализации носителей, поскольку локализация вызвана наличием неоднородностей твердого раствора. По всей видимости, наличие  $N$ -образной зависимости ширины спектра спонтанного излучения на полувысоте (FWHM) в зависимости от температуры для гетероструктуры  $I$  (рис. 6) связано именно с отсутствием процедуры отжига при постростовой обработке данной структуры. По нашему мнению, физические причины, приводящие к  $N$ -образной зависимости, аналогичны указанным в работе [20]. Таким образом, измерения температурной зависимости FWHM для гетероструктуры  $I$  дополнительно подтверждают наше предположение о том, что одновременная лазерная генерация на двух различных длинах волн при определенных условиях, наблюдавшаяся для гетероструктуры  $I$ , связана с наличием в данной структуре локализованных состояний. Кроме того, эти данные также косвенно указывают и на наличие кластерных образований в активной области гетероструктуры  $I$ , поскольку именно они могут являться причиной большого числа локализованных состояний в ней. В прошедшей отжиг гетероструктуре  $2$  происходит разрушение кластеров, поэтому обсуждаемые выше особенности, связанные с локализованными состояниями, в ней не наблюдаются.

## 5. Заключение

В широком диапазоне температур (77–300 К) проведены исследования мощностных, спектральных и пространственных характеристик излучения инжекционных лазеров на квантовых ямах в системе InGaAsN/GaAs. В гетероструктуре с содержанием азота 3% при отсутствии отжига обнаружена  $N$ -образная температурная зависимость пороговой плотности тока, дифференциальной ватт-амперной эффективности и ширины спектра спонтанного излучения. Эти особенности связываются с возможным образованием нанокластеров InGaAsN. Такая интерпретация согласуется с данными просвечивающей электронной микроскопии, полученными в работе [14]. Для гетероструктуры с содержанием азота 2.6%, прошедшей процедуру отжига, получено значение характеристической температуры  $T_0 = 80$  К. При этом величина дифференциальной ватт-амперной эффективности (slope efficiency) составила 0.74 Вт/А при комнатной температуре. Полученные результаты повышают уровень понимания процессов в лазерах с активной областью на основе квантовых ям InGaAsN и могут быть использованы для разработки полупроводниковых излучателей с улучшенными свойствами.

Авторы выражают признательность Н.В. Крыжановской за полезное обсуждение результатов и Ю.М. Шернякову за помощь в подготовке образцов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, программы „Физика твердотельных наноструктур“ и совместной программы ФТИ и ITRI „Research and development of advanced light sources for application in the next generation of optoelectronic systems“. Л.Я. Карачинский и И.И. Новиков выражают благодарность фонду „Династия“ и МЦФФМ за финансовую поддержку работы, а также Л.Я. Карачинский — фонду INTAS (грант YSF 2001/2-97).

## Список литературы

- [1] M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki, Y. Yazawa. *Jap. J. Appl. Phys.*, **35**, 1273 (1996).
- [2] A.Yu. Egorov, D. Bernklau, D. Livshits, V. Ustinov, Zh.I. Alferov, H. Riechert. *Electron. Lett.*, **35**, 1643 (1999).
- [3] C.W. Coldren, M.C. Larson, S.G. Spruytte, J.S. Harris. *Electron. Lett.*, **36**, 951 (2000).
- [4] M. Fischer, M. Reinhardt, A. Forchel. *Electron. Lett.*, **36**, 1208 (2000).
- [5] J.S. Harris. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, 1145 (2000).
- [6] G. Steinle, H. Riechert, A.Yu. Egorov. *Electron. Lett.*, **37**, 93 (2001).
- [7] В.А. Одноблюдов, А.Ю. Егоров, А.Р. Ковш, В.В. Мамутин, Е.В. Никитина, Ю.М. Шерняков, М.В. Максимов, В.М. Устинов. *Письма ЖТФ*, **29**, 77 (2003).
- [8] H. Temkin, D. Coblenz, R.A. Logan, J.P. van der Ziel, T. Tanbun-Ek, R.D. Yadvish, A.M. Sergent. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 2402 (1993).
- [9] M. Yano, H. Nishi, M. Tukasagawa. *J. Appl. Phys.*, **52**, 3172 (1981).
- [10] H. Ishikawa, I. Suemune. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **6**, 344 (1994).
- [11] N.Yu. Gordeev, A.M. Georgievski, V.I. Kopchatov, S.V. Zaitsev, A.Yu. Egorov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev. *Proc. Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology* (St. Petersburg, Russia, 1997) p. 183.
- [12] И.И. Новиков, М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Н.Ю. Гордеев, А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, С.С. Михрин, Н.А. Малеев, А.П. Васильев, В.М. Устинов, Ж.И. Алфёров, Н.Н. Леденцов, Д. Бимберг. *ФТП*, **37**, 270 (2003).
- [13] L.V. Asryan, R.A. Suris. *Semicond. Sci. Technol.*, **11**, 554 (1996).
- [14] В.М. Volovik, A.R. Kovsh, W. Passenberg, H. Kuenzel, N. Grote, N.A. Cherkashin, Yu.G. Musikhin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, V.M. Ustinov. *Semicond. Sci. Technol.*, **16**, 186 (2001).
- [15] Н.Ю. Гордеев, С.В. Зайцев, В.И. Копчатов, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, В.М. Устинов, П.С. Копьев, *Письма ЖТФ*, **26**, 78 (2000).
- [16] M.V. Maximov, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. *J. Electron. Mater.*, **29**, 476 (2000).
- [17] A. Markus, J.X. Chen, C. Paranthonen, A. Fiore, C. Platz, O. Gauthier-Lafaye. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 1818 (2003).
- [18] A. Polimeni, M. Capizzi, M. Geddo, M. Fischer, M. Reinhardt, A. Forchel. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 2870 (2000).

- [19] R.A. Mair, J.Y. Lin, H.X. Jiang, D.E. Jones, A.A. Allerman, S.R. Kurtz. *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 188 (2000).
- [20] S. Shirakata, M. Kondow, T. Kitatani. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 2087 (2002).

*Редактор Т.А. Полянская*

## Temperature-dependent electroluminescent studies of the InGaAsN/GaAs injection lasers

*L.Ya. Karachinsky\**, *N.Yu. Gordeev\**, *I.I. Novikov\**,  
*M.V. Maximov\**, *A.R. Kovsh\*<sup>+</sup>*, *J.S. Wang<sup>+</sup>*,  
*R.S. Hsiao<sup>+</sup>*, *J.Y. Chi<sup>+</sup>*, *V.M. Ustinov\**,  
*N.N. Ledentsov\*<sup>\*\*</sup>*

\* A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup> Industrial Technology Research Institute,  
Hsinchu 310, Taiwan, R.O.C.

\*\* Institut für Festkörperphysik,  
Technische Universität Berlin,  
D-10623 Berlin, Germany

**Abstract** Spectral, light–current, and far-field characteristics of the injection lasers grown on GaAs substrates with the active area based on InGaAsN solid solution have been studied. The investigations have been performed in a wide temperature range (77–300 K) at various injection current densities. The increase in indium content in InGaAsN solid solution results in a spontaneous formation of InGaAsN nanoclusters, which leads to the *N*-shape like dependencies of the threshold current density and slope efficiency on temperature.