

## Непрерывная генерация при 293 К РО ДГС лазеров с одним слоем InAs квантовых точек в активной области, выращенных на вицинальных поверхностях GaAs (001), разориентированных в направлении [010]

© В.П. Евтихийев, И.В. Кудряшов, Е.Ю. Котельников, В.Е. Токранов, А.Н. Титков, И.С. Тарасов, Ж.И. Алферов

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

(Получена 29 июня 1998 г. Принята к печати 1 июля 1998 г.)

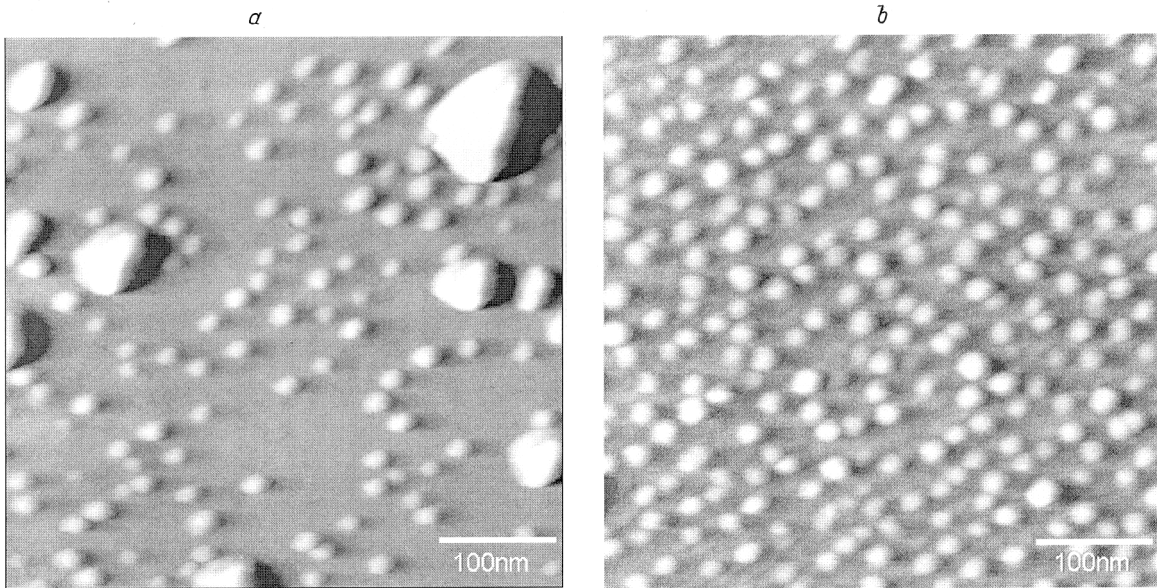
Исследованы электролюминесценция и генерация лазеров с одним слоем InAs квантовых точек, выращенных в одном процессе молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках (001) GaAs, разориентированных в направлении [010] на 2, 4 и 6°. Обнаружено, что увеличение угла разориентации приводит к коротковолновому сдвигу и уменьшению полуширины спектров электролюминесценции. Наблюдаемый эффект объясняется уменьшением размеров квантовых точек и улучшением их однородности по размерам. Обнаружена сильная зависимость величины пороговой плотности тока от ширины спектра спонтанной люминесценции. Пороговая плотность тока при комнатной температуре лазеров с одним слоем квантовых точек и с минимальной полушириной спектра спонтанной люминесценции (54 мэВ) составила 210 А/см<sup>2</sup>.

Массивы квантовых точек (КТ) являются наиболее интересным объектом для использования в качестве активной среды в инжекционных гетеролазерах следующего поколения. Расчеты [1] показали, что из-за  $\delta$ -образного характера зависимости для КТ плотности состояний от энергии, лазеры на КТ могут иметь чрезвычайно низкие ( $> 10$  А/см<sup>2</sup>) значения пороговой плотности тока, слабо зависящие от температуры. Достигнутые на сегодняшний день значения пороговой плотности тока в лазерах на квантовых точках еще далеки от предсказанных. Значительный прогресс в совершенствовании характеристик лазеров на КТ достигнут за счет использования в качестве активной области нескольких слоев вертикально связанных КТ [2] и туннельно связанных массивов КТ и квантовых ям [3]. Однако, поскольку эти решения неизбежно ведут к уширению функции плотности состояний, интерес к возможности создания "классического" лазера на квантовых точках не снижается.

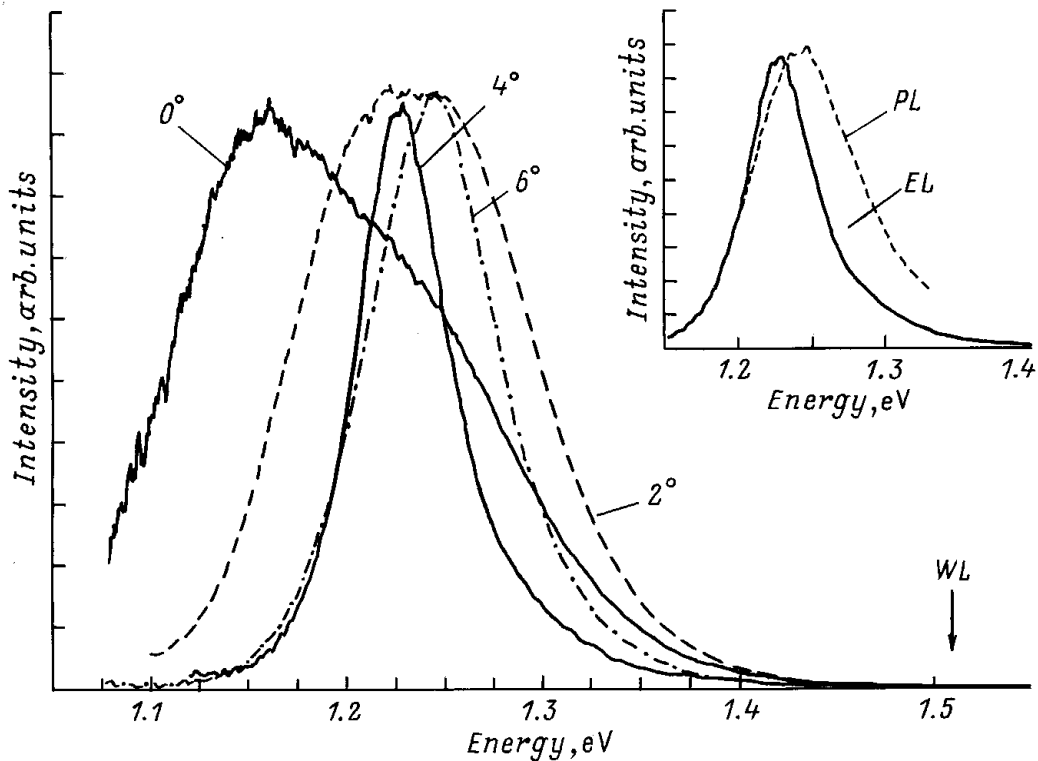
Основным препятствием для получения низкороговой генерации при комнатной температуре является сложность выращивания однородных массивов изолированных КТ высокой плотности при молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) по методу Странского–Крастанова. Для улучшения однородности КТ по размерам в работе [4] впервые было предложено использовать в обычной МПЭ по методу Странского–Крастанова подложки (001) GaAs, разориентированные в направлении [010]. На такой вицинальной поверхности должны возникать ступени роста, распространяющиеся в двух направлениях — [110] и  $[-110]$ . Пересечение этих ступеней формирует на вицинальной поверхности сеть ограниченных террас, размер которых зависит от угла разориентации. Расположенные на границах террас энергетические барьеры в поверхностном потенциале препятствуют перемещению диффундирующих по поверхности атомов с террасы на террасу. Действительно, детальные исследования методом атомно-силовой ми-

кроскопии (АСМ) массивов InAs КТ, выращенных по методу Странского–Крастанова, на разориентированных в направлении [010] подложках (001) GaAs [5], показали что рост квантовой точки на каждой террасе происходит преимущественно за счет материала, осажденного на ту же террасу. Увеличение угла разориентации приводило к увеличению плотности КТ, уменьшению их размеров, уменьшению количества скоалесцировавших "больших" островов, улучшению однородности размеров КТ.

Наша работа посвящена изучению электролюминесценции (ЭЛ) лазерных гетероструктур раздельного ограничения (РО ДГС) с одним слоем InAs КТ в активной области, выращенных в обычной МПЭ по методу Странского–Крастанова на разориентированных в направлении [010] подложках (001) GaAs. Лазерные гетероструктуры выращивались на установке ЦНА-4 в одном процессе МПЭ на наборе подложек, разориентированных в направлении [010] на 0, 2, 4 и 6 градусов. Скорости роста, температура подложек и соотношение потоков элементов V/III группы выбирались и контролировались с помощью метода дифракции быстрых электронов (RHEED). Как и в работе [5], температура роста InAs КТ составляла 470°C при соотношении потоков V/III, равном 2. После осаждения 2.9 монослоев InAs рост прерывался на 15 секунд для окончательного формирования КТ. Слой КТ с обеих сторон заключался в волноводный сверхрешеточный слой с эффективным изменением состава от Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As вблизи слоя КТ до Al<sub>0.6</sub>Ga<sub>0.4</sub>As вблизи эмиттеров. Гетероструктура представляла собой обычную лазерную РО ДГС структуру с Al<sub>0.6</sub>Ga<sub>0.4</sub>As эмиттерами толщиной 0.8 мкм каждый, волноводным слоем переменного состава толщиной 0.6 мкм и контактным *p*-слоем GaAs(Be) толщиной 0.4 мкм. Из структур были изготовлены лазеры простейшей полосковой конструкции с SiO<sub>2</sub> изоляцией и шириной полоска 100 мкм. На зеркала части лазеров были нанесены высокоотражающие диэлектрические покрытия с коэффициентами



**Рис. 1.** АСМ изображения поверхностей GaAs (001), покрытых слоем InAs толщиной 2.9 монослоя, с углами разориентации в направлении [010]: 0 (а) и 6 (б) градусов.



**Рис. 2.** Спектры электролюминесценции ( $T = 293 \text{ K}$ ;  $I = 300 \text{ mA}$ ) четырех лазерных диодов, изготовленных из гетероструктур с разным углом разориентации подложки. На вставке приведены спектры фото- и электролюминесценции для образца с разориентацией подложки  $4^\circ$ .

отражения 80/90%. Спектры (ЭЛ) исследовались при непрерывном токе накачки.

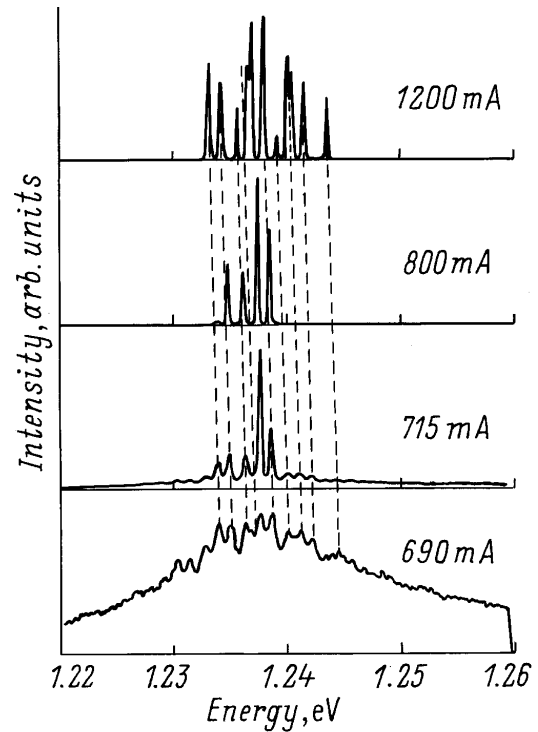
На рис. 1 показаны АСМ изображения массивов КТ, выращенных в одном процессе МПЭ на точноориентированной (а) и отклоненной на 6 градусов (б) подложках

(001) GaAs в условиях полностью соответствующих росту лазерных гетероструктур. Поверхность образцов исследовалась методом атомно-силовой микроскопии на микроскопе SPM-4 (NT-MDT). Изображения поверхности получались при сканировании в режиме постоянной

силы давления иглы зонда на поверхность образца (контактная мода). Пространственное разрешение, достигавшееся с помощью иглы из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  радиусом  $R < 300 \text{ \AA}$ , расположенной на V-образной микроконсоли (cantilever), было гораздо лучше, чем размер большинства особенностей, наблюдаемых на поверхности. Сравнение АСМ изображений на рис. 1 показывает, что разориентация подложки приводит к формированию более однородного массива InAs КТ без "больших" InAs островов. Оценка плотности КТ по АСМ изображениям дает  $4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и  $\approx 10^{11} \text{ см}^{-2}$  для точноориентированной и отклоненной на 6 градусов поверхностей соответственно. Анализ распределения КТ по высоте показал уменьшение по мере разориентации средней высоты КТ от 35 до 20  $\text{ \AA}$  и уменьшение величины дисперсии по высоте от 15 до 10%.

Для исследования электролюминесценции были использованы лазерные диоды с длиной резонатора 1700 мкм без диэлектрических покрытий на зеркалах. При такой длине резонатора оказалось возможным наблюдать переход в режим генерации. Сравнение спектров фото- и электролюминесценции, приведенное на вставке рис. 2, для образца с разориентацией  $4^\circ$  показало, что эффекты самопоглощения [6] не меняют качественной картины спектра и не мешают сравнительному изучению спектров в лазерных образцах. На рис. 2 представлены спектры ЭЛ 4 лазерных диодов без диэлектрических покрытий на зеркалах, изготовленных из гетероструктур с разным углом разориентации. Спектры записаны при температуре  $20^\circ\text{C}$  и плотности тока накачки  $300 \text{ А/см}^2$ .

Спектр точноориентированного образца имеет наблюдавшуюся ранее [7] сложную форму. Кроме длинноволнового максимума, связанного с рекомбинацией из основного состояния квантовых точек, в нем присутствует коротковолновое плечо, разделяющееся при подгонке на два пика гауссовой формы. Увеличение угла разориентации приводит к коротковолновому сдвигу спектров люминесценции, уменьшению коротковолнового плеча, уменьшению полуширины пика основного состояния. Из-за большой высоты барьера ( $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ ), ограничивающего точки, ни в одном из образцов не наблюдалось люминесценции из смачивающего слоя (расчетное положение пика показано стрелкой). Наблюдаемые коротковолновый сдвиг и уменьшение полуширины (рис. 2) хорошо согласуются с данными АСМ исследований и объясняются изменением распределения точек по размерам при изменении угла разориентации. Изменение температуры в диапазоне  $20\text{--}50^\circ\text{C}$  и тока накачки вплоть до порогового не приводило к изменению формы и полуширины длинноволнового максимума, а лишь меняло вклад в люминесценцию коротковолнового плеча. Уменьшение вклада коротковолнового плеча в спектр с увеличением угла разориентации свидетельствует, что сложная форма спектров, очевидно, связана с рекомбинацией не только через возбужденные состояния КТ, но также и через со-



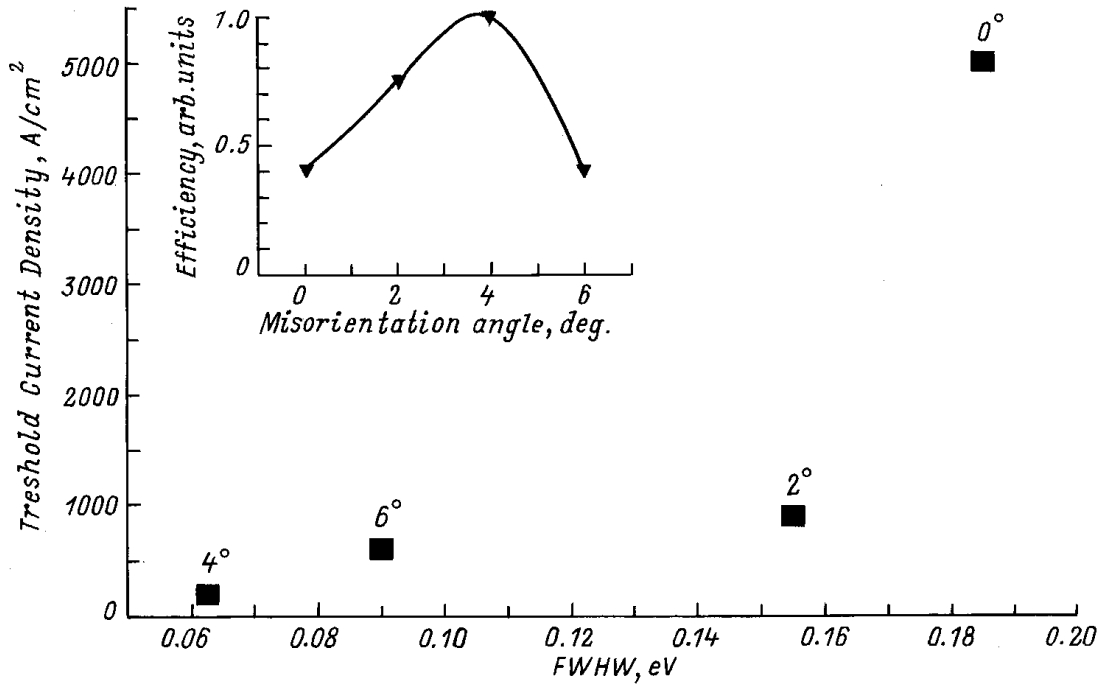
**Рис. 3.** Спектры электролюминесценции образца с разориентацией подложки  $4^\circ$  при различных токах накачки и температуре  $T = 293 \text{ К}$ .

стояния, обусловленные наличием туннельно связанных точек с разным средним размером [8,9]<sup>1</sup>.

Дальнейшее увеличение тока накачки ( $T = 20^\circ\text{C}$ ) в образцах без диэлектрических зеркал приводило к появлению генерации. На рис. 3 приведены спектры электролюминесценции образца с разориентацией  $4^\circ$  при различных токах накачки. При токе 690 мА, кроме общего сужения в максимуме люминесценции, появляется серия отдельных узких (1–2 мэВ) пиков. Такой характер люминесценции, очевидно, обусловлен стимулированным излучением отдельных, очень близких по размеру групп КТ. Увеличение тока накачки до 715 мА вызывает появление в спектре линий генерации, по положению совпадающих с пиками стимулированной ЭЛ. Изменение тока накачки вплоть до 2 пороговых, не приводило к изменению положения начальных пиков генерации. В спектре лишь добавлялись новые пики, обусловленные генерацией из других групп КТ.

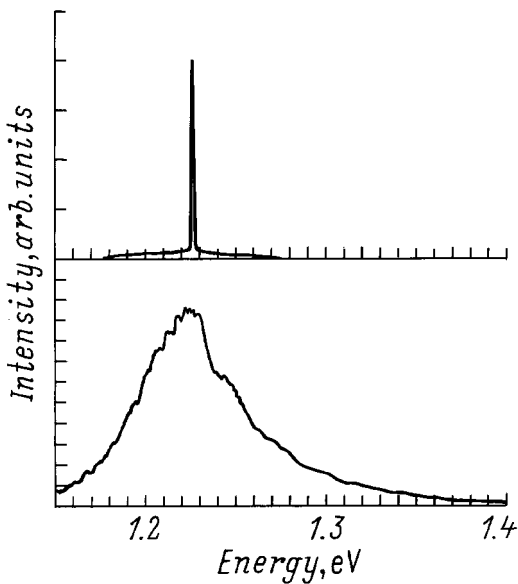
Для уменьшения потерь на вывод излучения на зеркалах полосковых лазеров были нанесены высокоотражающие диэлектрические покрытия. Измеренные для лучших образцов значения пороговой плотности тока находились в диапазоне  $210 \text{ А/см}^2$  для образца с  $4^\circ$  разориентацией до  $5000 \text{ А/см}^2$  для точноориентированного образца. Такое сильное изменение пороговой плотности тока,

<sup>1</sup> Результаты исследования формы спектров фотолюминесценции массивов КТ на разориентированных пластинах авторы предполагают опубликовать в ближайшее время.



**Рис. 4.** Зависимость пороговой плотности тока  $J_{th}$  от полуширины спектров спонтанной ЭЛ для образцов с различным углом разориентации подложки: 0, 2, 4, 6°. На вставке приведено относительное изменение величины квантового выхода в образцах с коротким ( $L = 100$  мкм) резонатором от угла разориентации подложки.

на наш взгляд, не может быть объяснено величиной квантового выхода в гетероструктурах. Мы измерили величину квантового выхода ( $\eta$ ) в образцах с коротким ( $L = 100$  мкм) резонатором по методике, описанной в [10] (вставка рис. 4). Относительный рост величины  $\eta$  с увеличением угла разориентации не превышает 2 раз.



**Рис. 5.** Спектры спонтанной ЭЛ ( $J = 170$  А/см<sup>2</sup>) и генерации ( $J = 210$  А/см<sup>2</sup>) лазера с разориентацией подложки 4°.  $T = 293$  К.

Этот факт можно связать с уменьшением вклада безызлучательной рекомбинации через "большие острова". Пороговая плотность тока у образца с разориентацией 6° даже оказалось ниже, чем у образца с разориентацией 2°, несмотря на меньшее значение  $\eta$ . На рис. 4 величины пороговой плотности тока  $J_{th}$  представлены в зависимости от полуширины спектров спонтанной ЭЛ. Быстрое возрастание  $J_{th}$  с ростом полуширины соответствует предсказаниям теории лазера на КТ, развитой в работе [11]. Согласно этой теории, максимальное усиление в лазере пропорционально поверхностной плотности КТ, а также зависит от дисперсии точек по размерам  $\epsilon$  как  $1/\epsilon$ . Поскольку полуширина спектров люминесценции прямо связана с однородностью размеров КТ, низкие значения пороговой плотности тока для образцов с разориентацией 2, 4 и 6° обусловлены тем, что на них удалось получить квантовые точки с большой поверхностной плотностью и низкой дисперсией распределения КТ по размеру.

Минимальное значение пороговой плотности тока 210 А/см<sup>2</sup> имели лазеры с минимальной полушириной спонтанной ЭЛ (разориентация подложки 4°). Спектры ЭЛ и генерации этого лазера представлены на рис. 5. Эта величина является рекордной для инжекционных лазеров с одним слоем InAs КТ в активной области.

В заключение отметим, что применение подложек (001) GaAs, отклоненных в направлении [010], позволило нам вырастить традиционным методом МПЭ лазерные гетероструктуры с одиночным однородным масси-

вом КТ с высокой ( $\approx 10^{11}$  см<sup>-2</sup>) поверхностной плотностью в активной области, на которых удалось получить непрерывную генерацию при 293 К через основное состояние носителей в КТ. Значение пороговой плотности тока 210 А/см<sup>2</sup> при 293 К, полученное на лазерах с 4° разориентацией, является лучшим из известных нам для РО ДГС лазеров с одним слоем квантовых точек в качестве активной области.

Авторы благодарят Л.В. Асрияна за плодотворные дискуссии, Н.Ф. Кадошук за нанесение зеркал.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 97-02-18153, 97-02-18151, 97-02-18291).

## Список литературы

- [1] Y. Arakawa, H. Sakaki. Appl. Phys. Lett., **40**, 939 (1982).
- [2] Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Шукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов. ФТП, **32**, 385 (1998).
- [3] F. Heinrichsdorff, M.-H. Mao, N. Kirstaedter, A. Krost, D. Bimberg. Appl. Phys. Lett., **71**, 22 (1997).
- [4] V.P. Evtikhiev, A.K. Kryganovskii, A.B. Komissarov, A.N. Titkov, M. Ichida, A. Nakamura. Inst. Phys. Conf. Ser., **155**, 351 (1996).
- [5] В.П. Евтихийев, В.Е. Токранов, А.К. Крыжановский, А.М. Бойко, Р.А. Сурис, А.Н. Титков, А. Накамура, М. Ичида. ФТП, **32**, 860 (1998).
- [6] Д.З. Гарбузов, В.П. Евтихийев, В.В. Агаев, В.Б. Халфин, В.П. Чалый. ФТП, **17**, 1653 (1983).
- [7] H. Shoji, Y. Nakata, K. Mukai, Y. Sugiyama, M. Sugawara, N. Yoneyama, H. Ishikawa. IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron., **3**, 188 (1997).
- [8] Д.Г. Васильев, В.П. Евтихийев, В.Е. Токранов, И.В. Кудряшов, В.П. Кочерешко. ФТП, **40**, 855 (1998).
- [9] N.P. Kobayashi, T.R. Ramachandran, P. Chen, A. Madhukar. Appl. Phys. Lett., **68**, 3299 (1996).
- [10] Д.З. Гарбузов, А.Т. Гореленок, М.К. Трукан, А.С. Усиков, В.П. Чалый. ФТП, **15**, 505 (1981).
- [11] L.V. Asryan, R.A. Suris. Semicond. Sci. Technol., **11**, 554 (1996).

Редактор В.В. Чалдышев

## Continues wave at $T = 293$ K lasing of SCH lasers with a one sheet InAs quantum dots grown on the vicinal GaAs (001) surfaces misoriented to the [010] direction

V.P. Evtikhiev, I.V. Kudryashov, E.Yu. Kotel'nikov, V.E. Tokranov, A.N. Titkov, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov

Ioffe Physical Technical Institute RAS,  
194021 St.Petersburg, Russia

**Abstract** We present a study of electroluminescence and lasing one sheet InAs quantum dots (QD) lasers. All of samples were grown in single MBE process on the vicinal GaAs (001) surfaces misoriented to the direction [010] by 0, 2, 4 and 6 degrees. In has been found that the increase of misorientation angle leads to a blue shift of electroluminescence spectrum and to decrease of full width at half maximum (FWHM) of this one. We explain these effects the decreasing of size and better homogeneity of QDs. We found very strong dependency of the threshold current of the value of FWHM. The laser with minimal value of FWHM (54 meV) have the best threshold current density 210 A/cm<sup>2</sup> at room temperature.

E-mail: evt@mbe.ioffe.rssi.ru