

## Лазерная генерация с длиной волны излучения в районе 1.3 мкм в структурах на основе квантовых точек InAs

© А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, Н.А. Малеев, С.С. Михрин, В.М. Устинов, А.Ф. Цацульников, М.В. Максимов, Б.В. Воловик, Д.А. Бедарев, Ю.М. Шерняков, Е.Ю. Кондратьева, Н.Н. Леденцов, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров, Д. Бимберг<sup>+</sup>

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

<sup>+</sup> Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin, D-10623 Berlin, Germany

(Получена 23 марта 1999 г. Принята к печати 25 марта 1999 г.)

Исследована возможность реализации лазерной генерации на длине волны вблизи 1.3 мкм в структурах на основе квантовых точек InAs, помещенных во внешнюю квантовую яму InGaAs/GaAs. Показано, что требуемая длина волны может быть достигнута при соответствующем выборе толщины слоя InAs, осаждаемого для формирования массива трехмерных островков, и мольной доли InAs в квантовой яме InGaAs. Вследствие недостаточного усиления, достигаемого на основном состоянии, в структуре с активной областью на основе одного слоя квантовых точек лазерная генерация достигается через возбужденные состояния в температурном интервале от 85 до 300 К. Использование трех рядов квантовых точек позволяет увеличить максимально достижимое усиление в лазерной структуре, что в свою очередь приводит к реализации низкопороговой ( $70 \text{ А/см}^2$ ) генерации через основное состояние на длине волны 1.26 мкм при комнатной температуре.

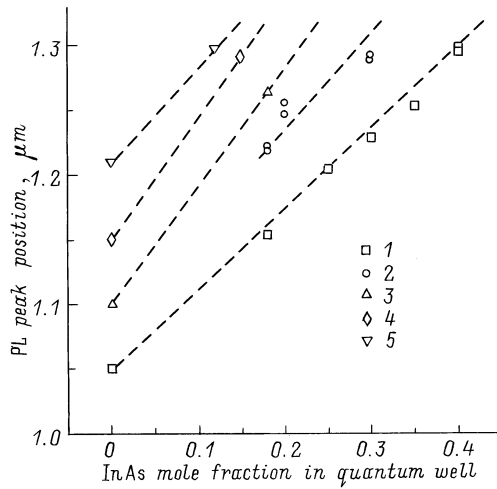
Актуальной задачей является создание лазерных диодов на подложках арсенида галлия с длиной волны генерации 1.3 мкм с целью их применения в волоконно-оптических линиях связи, что обусловлено стремлением найти альтернативу используемым в настоящее время лазерам на основе фосфида индия. Основными недостатками последних являются низкая температурная стабильность характеристик [1] и сложность создания брэгговских зеркал в случае вертикально-излучающих лазеров [2] вследствие малого разрыва запрещенных зон и недостаточного различия в показателях преломления используемых соединений InGaAsP.

При использовании напряженных квантовых ям (КЯ) InGaAs/GaAs длина волны излучения ограничена значением  $\sim 1.1 \text{ мкм}$  вследствие требований к ширине и составу КЯ, налагаемых пределами псевдоморфного роста [3]. Для расширения спектрального диапазона излучения структур на основе арсенида галлия в настоящий момент активно разрабатываются два подхода: первый основан на использовании КЯ InGaAsN с малым содержанием азота [4], другой состоит в применении концепции островкового роста In(Ga)As на поверхности GaAs, позволяющей создавать бездислокационные локализованные объекты узкозонного материала с латеральными размерами порядка  $100 \text{ \AA}$  [5,6]. Наименьшие пороговые плотности тока, полученные при использовании квантовых ям InGaAsN/GaAs и квантовых точек (КТ) InGaAs/GaAs составили соответственно  $675$  и  $270 \text{ А/см}^2$  (см. [7,8]). В последнем случае КТ InGaAs/GaAs формировались осаждением 11 монослоев (МС) InGaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) при попеременном осаждении атомов индия, галлия и молекул мышьяка.

Ранее нами был предложен альтернативный метод создания лазерных структур на КТ, основная идея кото-

рого состоит в помещении КТ InAs, сформированных в стандартном режиме МПЭ, во внешнюю КЯ InGaAs [9]. Использование данного метода позволяет увеличивать длину волны излучения вплоть до  $1.35 \text{ мкм}$  при комнатной температуре [10]. В данной работе мы сообщаем о реализации лазерной генерации на длине волны  $1.26 \text{ мкм}$  с пороговой плотностью тока  $70 \text{ А/см}^2$  в структуре с активной областью, сформированной при использовании упомянутого метода.

Исследуемые структуры выращивались методом МПЭ в установке Riber 32P с твердотельным источником As. Активная область как тестовых образцов, предназначенных для фотолюминесцентных измерений, так и лазерных структур представляла собой массив КТ InAs, выращенный КЯ InGaAs определенного состава и толщины. Температура осаждения КТ, КЯ, а также прилегающего арсенида галлия толщиной  $5 \text{ нм}$  равнялась  $485^\circ\text{C}$ . Рост остальной части структуры проводился при температуре  $600^\circ\text{C}$ . При росте использовались стандартные для МПЭ условия обогащения по мышьяку. Переход от двумерного к трехмерному режиму роста при осаждении InAs наблюдался непосредственно в процессе выращивания по возникновению штриховой картины в дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение. Лазерные диоды формировались в геометрии с четырьмя сколотыми гранями с целью минимизации потерь на вывод излучения. Контакты формировались напылением и вплавлением (при  $450^\circ\text{C}$ ) металлических слоев AuGe/Ni/Au и AuZn/Ni/Au к подложке  $n^+$ -GaAs и контактному слою  $p^+$ -GaAs соответственно. Исследования электролюминесценции (ЭЛ) проводились при импульсной накачке (частота  $5 \text{ кГц}$ , длительность импульсов  $1 \text{ мкс}$ ). Для регистрации сигнала использовался германиевый фотодиод.



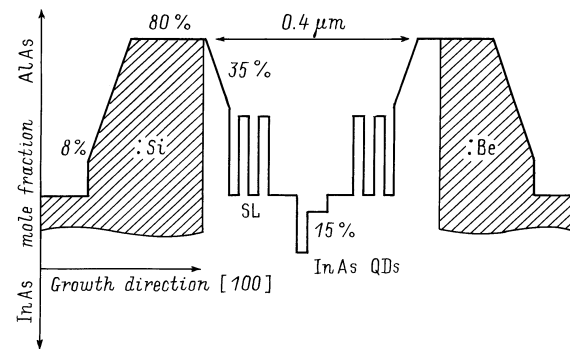
**Рис. 1.** Положение пика фотолюминесценции (PL) структур с КТ InAs во внешней квантовой яме InGaAs на подложках GaAs при комнатной температуре в зависимости от мольной доли InAs в КЯ InGaAs для толщины слоя InAs, идущего на формирование КТ,  $Q_{\text{InAs}} = 2.0$  (1), 2.2 (2), 2.4 (3), 2.7 (4), 3.0 МС (5). Толщина КЯ InGaAs изменяется в пределах от 5 до 8 нм.

Структурные и оптические свойства подобных структур подробно изучены в [11]. Длина волны излучения зависит как от размеров самих КТ, так и от состава слоя InGaAs, прикрывающего КТ. В свою очередь размер КТ увеличивается при увеличении количества осажденного InAs ( $Q_{\text{InAs}}$ ), идущего на их формирование. На рис. 1 показано положение максимума фотолюминесценции (ФЛ) структур с КТ InAs/InGaAs/GaAs при различных значениях  $Q_{\text{InAs}}$ , а также при различных составах КЯ InGaAs. Нами было обнаружено, что при варьировании толщины КЯ в пределах от 5 до 8 нм положение максимума ФЛ практически не изменяется. Видно, что для достижения длины волны излучения 1.3 мкм можно использовать как "большие" КТ, зарощённые слоем  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с малым содержанием In (например,  $Q_{\text{InAs}} = 3$  МС,  $x \approx 0.2$ ), так и, наоборот, "меньшие" КТ при большем содержании In в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $Q_{\text{InAs}} = 2$  МС,  $x \approx 0.35 \div 0.4$ ).

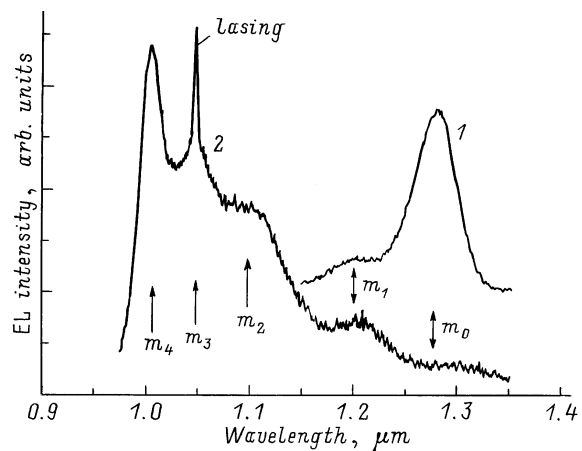
Для исследования электролюминесценции была выращена лазерная структура InGaAs/AlGaAs в стандартной геометрии двойной гетероструктуры, в которой осуществляется раздельное ограничение носителей и световой волны, с градиентным волноводом. В качестве легирующих примесей для получения *n*- и *p*-типа проводимости использовались Si и Be соответственно. Схематическое изображение данной структуры приведено на рис. 2. Активная область представляла собой массив КТ InAs ( $Q_{\text{InAs}} = 2.7$  МС), зарощённый слоем  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  толщиной 8 нм. На рис. 3 приведены спектры ЭЛ данной структуры при 300 К и различных плотностях тока. При низком уровне накачки в спектре доминирует пик спонтанного излучения в районе 1.3 мкм, что связано с рекомбинацией через основное состояние КТ ( $m_0$ ). С увеличением тока накачки происходит его быстрое насыщение и начинают возрастать интенсивности пиков

возбужденных состояний. При уровне плотности тока накачки  $J = 2.1$  кА/см<sup>2</sup> в спектре хорошо различаются 4 возбужденных состояния ( $m_1, m_2, m_3, m_4$ ), а также наблюдается пик стимулированного излучения через состояние  $m_3$ . Пороговая плотность тока ( $J_{\text{th}}$ ) составила 2 кА/см<sup>2</sup>.

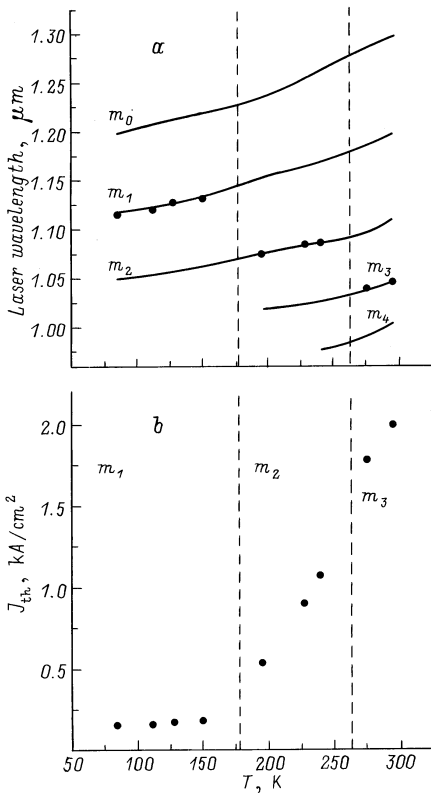
На рис. 4, а линиями показаны температурные зависимости положения пиков спонтанного излучения для различных состояний, а точками — длина волны лазерной генерации. На рис. 4, б приведена зависимость  $J_{\text{th}}$  от температуры наблюдения  $T$ . Данные зависимости носят скачкообразный характер. При температурах от 85 до 150 К генерация происходит через состояние  $m_1$ , начиная с  $T = 195$  К и вплоть до  $T = 240$  К наблюдается лазерная генерация через состояние  $m_2$ , что сопровождается резким увеличением  $J_{\text{th}}$ , а при дальнейшем росте температуры генерация переходит на состояние  $m_3$ .



**Рис. 2.** Схематическое изображение лазерной структуры с активной областью на основе КТ (QD) InAs/InGaAs/GaAs. По оси ординат отложено процентное содержание AlAs(InAs). SL — сверхрешетка.



**Рис. 3.** Спектры электролюминесценции (EL) структуры с активной областью на основе одного слоя КТ InAs/InGaAs/GaAs при комнатной температуре. При низком уровне накачки  $J = 4.5$  А/см<sup>2</sup> (1) в спектре доминирует пик спонтанного излучения через основное состояние КТ ( $m_0$ ), при высоком уровне возбуждения  $J = 2.1$  кА/см<sup>2</sup> (2) различаются одно основное и 4 возбужденных состояния (положения отмечены стрелками). Лазерная генерация с пороговой плотностью тока  $J_{\text{th}} \approx 2$  кА/см<sup>2</sup> возникает на третьем возбужденном состоянии.



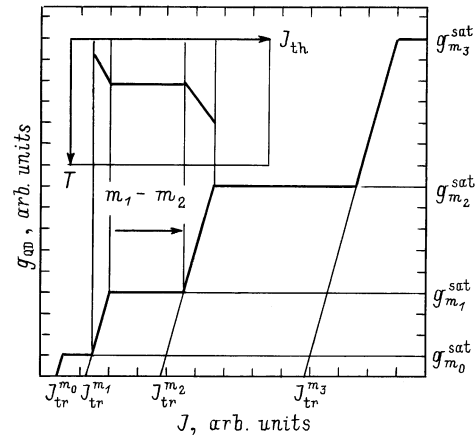
**Рис. 4.** Температурные зависимости длины волны генерации (а) и порогового тока  $J_{th}$  (б) структуры с активной областью на основе одного слоя КТ InAs/InGaAs/GaAs. Сплошные линии (а) — ЭЛ от различных состояний, точки (а, б) — лазерная генерация. Вертикальные пунктирные линии разделяют температурные области генерации через определенные состояния.

Для выяснения физической природы подобного поведения обратимся к зависимости усиления от плотности тока накачки для лазеров на основе КТ, схематически представленной на рис. 5. Каждое состояние характеризуется определенным значением тока прозрачности ( $J_{tr}^{m_i}$ ) и насыщенного усиления ( $g_{m_i}^{sat}$ ). Данные величины прямо пропорциональны количеству самих КТ, степени вырождения состояния и силе осциллятора. Ранее нами было обнаружено, что для структур с массивом КТ вследствие 4-кратного вырождения первого возбужденного состояния ( $m_1$ ) по отношению к основному ( $m_0$ ) значение тока прозрачности, равно как и насыщенного усиления, для возбужденного состояния оказывается в 4 раза выше [12]. Более высоколежащие состояния имеют еще большую степень вырождения, а следовательно, характеризуются еще большими значениями тока прозрачности и насыщенного усиления. Условием возникновения лазерной генерации является равенство достигнутого усиления ( $g_{QD}$ ) сумме внутренних потерь ( $\alpha_{in}$ ) и потерь на вывод излучения ( $\alpha_{out}$ ). Если максимально достижимое усиление ( $g_{m_i}^{sat}$ ) для ( $m_i$ )-го состояния оказывается ниже порогового усиления ( $G_{th} = \alpha_{in} + \alpha_{out}$ ), то генерация через данное состояние вообще не реализуется. Вследствие того что  $g_{m_{i+1}}^{sat} > g_{m_i}^{sat}$ , генерация может

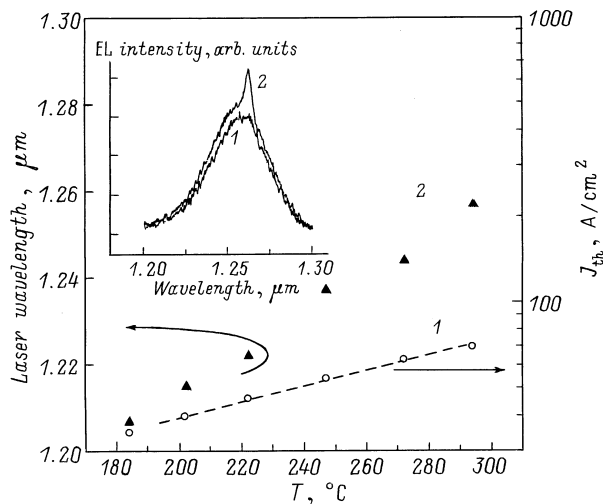
начаться на ( $m_{i+1}$ )-м состоянии, что сопровождается переключением длины волны генерации и резким увеличением  $J_{th}$  вследствие увеличения тока прозрачности (см. вставку на рис. 5). Таким образом, скачкообразное поведение длины волны генерации и пороговой плотности тока для исследуемой лазерной структуры может быть объяснено возрастанием порогового усиления с температурой. Дело в том, что при увеличении температуры наблюдения вследствие термического "размазывания" носителей по вышележащим состояниям для поддержания того же усиления необходимо приложить больший ток накачки, что в свою очередь приводит к увеличению  $\alpha_{in}$ , вызванного возрастанием потерь на свободных носителях, а следовательно, увеличивает значение порогового усиления (loss multiplication regime).

Итак, недостаточное значение насыщенного усиления на основном состоянии КТ ( $g_{m_0}^{sat}$ ) не позволяет реализовать лазерную генерацию вблизи 1.3 мкм при комнатной температуре. Значение  $g_{m_0}^{sat}$  может быть увеличено за счет увеличения количества самих КТ, что в свою очередь может быть реализовано при использовании нескольких плоскостей КТ, разделенных слоями GaAs.

Во второй исследуемой в данной работе лазерной структуре активная область представляла собой три ряда КТ InAs, зарощенных слоем  $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ . Толщина спейсерных слоев GaAs равнялась 30 нм, а толщина слоев  $In_{0.15}Ga_{0.85}As$  — 5 нм. Зависимости  $J_{th}$  и длины волны лазерной генерации для такой структуры приведены на рис. 6. На вставке приведены спектры ЭЛ при комнатной температуре, записанные вблизи порога генерации. В данном случае во всем изученном температурном диапазоне лазерная генерация происходит через основное состояние КТ. При комнатной температуре длина волны составила 1.26 мкм, а пороговая плотность тока  $J_{th} = 70$  А/см<sup>2</sup>. Значение характеристической температуры —  $T_0 = 160$  К. Отметим, что значение  $J_{th}$



**Рис. 5.** Схематическое изображение зависимости усиления ( $g_{QD}$ ) от плотности тока накачки ( $J$ ) в структурах на основе КТ в предположении наличия основного и четырех возбужденных состояний ( $m_0, m_1, m_2, m_3, m_4$ ). На вставке — зависимость пороговой плотности тока ( $J_{th}$ ) от температуры (схематическое изображение). Переход лазерной генерации с состояния  $m_i$  на состояние  $m_{i+1}$  сопровождается резким возрастанием  $J_{th}$ .



**Рис. 6.** Температурные зависимости  $J_{th}$  (1) и длины волны лазерной генерации (2) в структуре с активной областью на основе трех рядов КТ InAs/InGaAs, разделенных слоями GaAs толщиной 30 нм. На вставке — спектры ЭЛ структуры при комнатной температуре до ( $J = 65 \text{ А/см}^2$ ) (1) и после ( $J = 75 \text{ А/см}^2$ ) (2) порога лазерной генерации. Пороговая плотность тока при  $T = 293 \text{ К}$  составляет  $J_{th} = 70 \text{ А/см}^2$ , длина волны лазерной генерации 1.26 мкм, характеристическая температура  $T_0 = 160 \text{ К}$ .

близко к рекордным значениям для лазеров на основе КТ [13], что показывает перспективность предлагаемой концепции для реализации лазерной генерации с длиной волны излучения 1.3 мкм.

Таким образом, использование массива КТ InAs, помещенного во внешнюю КЯ InGaAs, позволяет реализовать излучение на длине волны 1.3 мкм в структурах, выращенных на подложках GaAs. Вследствие недостаточного усиления, достигаемого на основном состоянии, лазерная генерация в структуре с активной областью на основе одиночного массива КТ происходит через возбужденные состояния на длине волны 1.05 мкм. Увеличение максимального усиления на основном состоянии, достигаемое за счет использования трех рядов с КТ, приводит к лазерной генерации на длине волны 1.26 мкм с пороговой плотностью тока  $70 \text{ А/см}^2$ . Столь низкое значение пороговой плотности тока указывает на возможность дальнейшей оптимизации активной области с целью реализации лазерной генерации на длине волны 1.3 мкм.

Работа выполнена при поддержке программы INTAS (грант 96-0467).

## Список литературы

- [1] S. Seki, H. Oohasi, H. Sugiura, T. Hirono, K. Yokoyama. *J. Appl. Phys.*, **79**(5), 2192 (1996).
- [2] Y. Qian, Z.H. Zhu, Y.H. Lo, D.L. Huffaker, D.G. Deppe, H.Q. Hou, B.E. Hammons, W. Lin, Y.K. Tu. *Appl. Phys. Lett.*, **71**(1), 25 (1997).
- [3] J.W. Matthews, A.E. Blakeslee. *J. Cryst. Growth*, **27**, 118 (1974).

- [4] M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki, Y. Yazawa. *Japan. J. Appl. Phys.*, **35**, 1273 (1996).
- [5] K. Mukai, N. Ohtsuka, M. Sugawara, S. Yamazaki. *Japan. J. Appl. Phys. Lett.*, **33**(12A), L1710 (1994).
- [6] А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, В.М. Устинов, А.Ф. Цацульников, Ж.И. Алфёров, Д.Л. Федоров, Д. Бимберг. *ФТП*, **30**(8), 1345 (1996).
- [7] K. Nakahara, M. Kondow, T. Kitatani, M.C. Larson, K. Uomi. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **10**(4), 487 (1998).
- [8] D.L. Huffaker, G. Park, Z. Zou, O.B. Shchekin, D.G. Deppe. *Appl. Phys. Lett.*, **73**(18), 2564 (1998).
- [9] А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, А.Ю. Егоров, Н.А. Малеев, В.М. Устинов, Б.В. Воловик, М.В. Максимов, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, Ю.М. Шерняков, А.В. Лунев, Ю.Г. Мусихин, Н.А. Берг, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **33**(2), 180 (1999).
- [10] K. Nishi, H. Saito, S. Sugou, J.-S. Lee. *Appl. Phys. Lett.*, **74**(8), 1111 (1999).
- [11] Б.В. Воловик, А.Ф. Цацульников, Д.А. Бедарев, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, Н.А. Малеев, Ю.Г. Мусихин, А.А. Суворова, В.М. Устинов, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров, Д. Бимберг, П. Вернер. *ФТП*, **33** (1999) (в печати).
- [12] А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, А.Ф. Цацульников, П.С. Копьев. *ФТП*, **33**(2), 215 (1999).
- [13] V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, M.V. Maksimov, A.F. Tsatsul'nikov, N.Yu. Gordeev, S.V. Zaitsev, Yu.M. Shernyakov, N.A. Bert, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, J. Bohrer, D. Bimberg, A.O. Kosogov, P. Werner, U. Gosele. *J. Cryst. Growth*, **175/176**, 689 (1997).

Редактор Л.В. Шаронова

## Laser generation with radiation wavelength close to 1.3 $\mu\text{m}$ in InAs quantum dot based structures

A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, N.A. Maleev, S.S. Mikhlin, V.M. Ustinov, A.F. Tsatsul'nikov, M.V. Maksimov, B.V. Volovik, D.A. Bedarev, Yu.M. Shernyakov, E.Yu. Kondratyeva, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg<sup>†</sup>

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

<sup>†</sup> Institute für Festkörperphysik,  
Technische Universität Berlin, D-10623 Berlin, Germany

**Abstract** We report on the realization of heterostructures with InAs quantum dots lasing at the wavelength close to 1.3  $\mu\text{m}$ . Laser diodes with active region based on InAs quantum dots embedded in a InGaAs quantum well have been studied. 1.3  $\mu\text{m}$  emission can be achieved using the necessary effective thickness of InAs quantum dot layer and appropriate InAs mole fraction in the InGaAs/GaAs quantum well. Due to insufficient maximum gain of the ground state the structure based on one quantum dot sheet demonstrates lasing via excited states in the 85–300 K temperature range. Using three rows of quantum dots separated by GaAs spacers results in long-wavelength (1.26  $\mu\text{m}$ ) low-threshold ( $70 \text{ А/см}^2$ ) lasing due to the increase in the maximum ground state gain.