

Инжекционный гетеролазер на квантовых точках со сверхвысокой температурной стабильностью порогового тока до 50° С

© М.В. Максимов, Н.Ю. Гордеев, С.В. Зайцев, П.С. Копьев, И.В. Кочнев, Н.Н. Леденцов, А.В. Лунев, С.С. Рувимов, А.В. Сахаров, А.Ф. Цацульников, Ю.М. Шерняков, Ж.И. Алферов, D. Bimberg*

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

* Technische Universität Berlin, D-10623 Berlin, Germany

(Получена 2 апреля 1996 г. Принята к печати 9 апреля 1996 г.)

Методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений получен низкотемпературный инжекционный лазер с активной областью на основе квантовых точек $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$. Оптимизация условий выращивания и геометрических параметров структуры позволила увеличить диапазон сверхвысокой температурной стабильности порогового тока (характеристическая температура $T_0 = 385 \text{ K}$) вплоть до 50° С.

Одним из наиболее перспективных направлений в современной физике полупроводников является получение и исследование свойств структур с размерностью ниже чем 2: квантовых проволок и квантовых точек. Использование таких структур позволит кардинально улучшить характеристики большинства приборов опто- и микроэлектроники. Так, было показано, что температурная стабильность пороговой плотности тока лазеров на квантовых точках существенно превышает верхний предел, теоретически предсказанный для лазеров на квантовых ямах [1–5]. Однако до настоящего времени сверхвысокая стабильность пороговой плотности тока реализовывалась только при температурах значительно ниже комнатной, что существенно ограничивало перспективы практического использования лазеров с квантовыми точками.

В настоящей работе нами исследовано влияние геометрии структуры, условий выращивания, а также постростового отжига на рабочие характеристики инжекционных лазеров $\text{GaAs}-(\text{Al,Ga})\text{As}$ с активной областью на основе квантовых точек InGaAs , полученных методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. Впервые показано, что диапазон сверхвысокой температурной стабильности порогового тока (характеристическая температура $T_0 = 385 \text{ K}$) может быть расширен до 50° С.

Процесс выращивания лазерных эпитаксиальных гетероструктур проводился на установке газофазной эпитаксии с применением металлорганических соединений химических элементов III группы и гидридов химических элементов V группы. Установка оборудована горизонтальным реактором с резистивным нагревом. Рост проводился при пониженном давлении. Пониженное давление позволяет существенно повысить однородность состава, толщин, уровня легирования эпитаксиальных слоев по сравнению с процессами роста при атмосферном давлении. В установке в качестве газа — носителя применялся водород, прошедший многоступенчатую очистку. В качестве источников основных компонент твердых растворов

использовались триметил галлия, триметил алюминия, этилдиметил индия и арсин, в качестве источников легирующей донорной примеси — силан, легирующей акцепторной примеси — бициклопентадиенил магния. Рост проводился при избытке арсина. Соотношение элементов V и III групп составляло 75. Эпитаксиальная гетероструктура выращивалась на подложке из арсенида галлия, легированного кремнием, с ориентацией (100). Схематическое изображение лазерной структуры дано на рис. 1,а. Буферный слой, нижний эмиттер, волновод и нижний слой GaAs толщиной 8 нм выращивались при температуре 750° С. Затем температура опускалась до 490° С и осаждался слой квантовых точек $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$. Среднее количество осажденного InGaAs составляло 3 монослоя. Точки зарастивались слоем GaAs толщиной 8 нм. После этого температура снова поднималась до 750° С и осуществлялось выращивание волновода, верхнего эмиттера и контактного слоя. Таким образом, в данной лазерной структуре слой квантовых точек был заключен в узкую (16 нм) квантовую яму, которая в свою очередь была ограничена широкозонными барьерами $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$.

В случае образцов для исследований методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и фотолюминесценции (ФЛ) квантовые точки $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ выращивались при тех же условиях и были встроены в середину слоя GaAs толщиной 2000 Å, ограниченного с обеих сторон достаточно узкими (250 Å) барьерами $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$. Исследования ПЭМ проводились на электронном микроскопе JEOL JEM 1000 (ускоряющее напряжение 1 МВ). ФЛ возбуждалась линией 514.5 нм Ar-лазера, для детектирования использовался германиевый фотодетектор. Для электролюминесцентных исследований были изготовлены полосковые лазеры типа "мелкая меза" с широким полоском (ширина $W = 40 \text{ мкм}$). Измерение рабочих характеристик проводилось при импульсной накачке (длительность импульсов 200 нс, частота повторения 5 кГц) в температурном диапазоне 80–380 К.

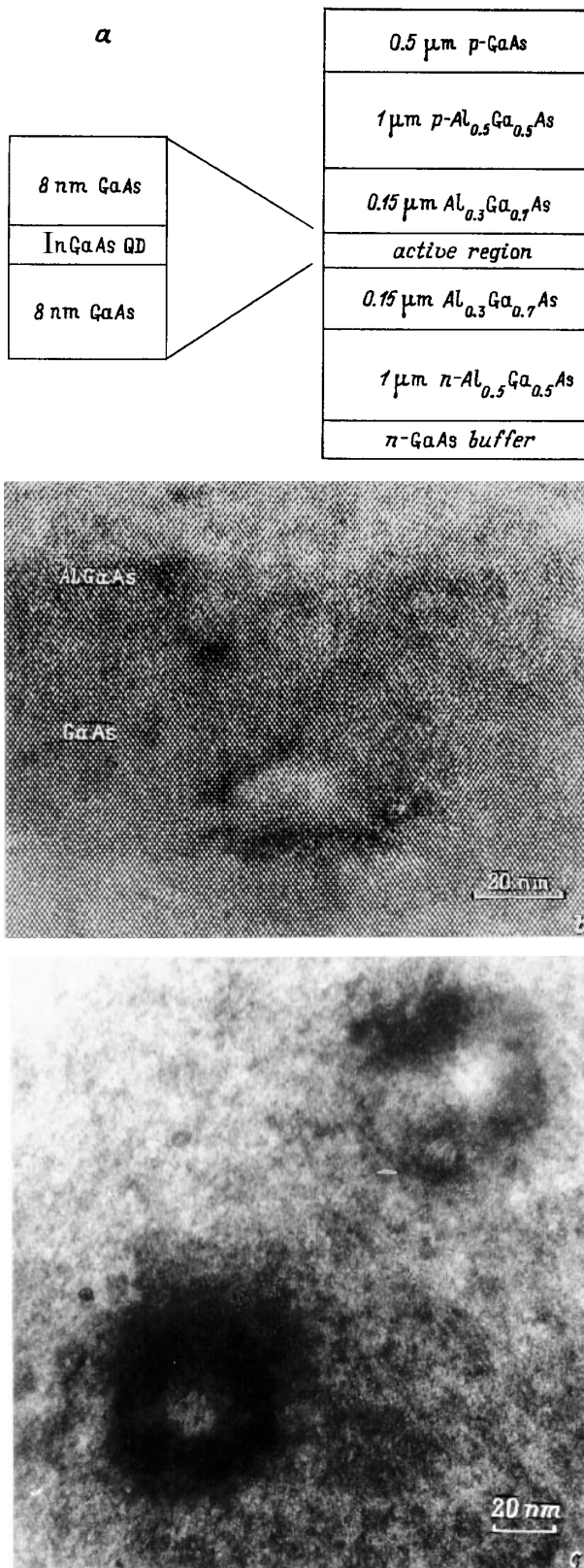


Рис. 1. Схематическое изображение лазерной структуры с квантовыми точками (QD) In_{0.5}Ga_{0.5}As (a), изображения квантовой точки, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения в поперечном сечении (b) и в плоскости подложки (вид сверху) (c).

Точки формировались за счет морфологической трансформации упругонапряженного слоя In_{0.5}Ga_{0.5}As [6]. Изображение поперечного сечения квантовой точки вдоль направления [011], полученное при помощи просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, представлено на рис. 1, b. На рис. 1, c представлено изображение квантовой точки, полученное с высоким разрешением при наблюдении в плоскости подложки (вид сверху). Из рис. 1, b, c следует, что квантовая точка имеет форму пирамиды с квадратным основанием (20 × 20 нм²), со сторонами, ориентированными вдоль направлений [010] и [001], и высотой ~ 8 нм. Характерный размер квантовой точки можно изменять, варьируя количество осажденного InGaAs, а также время прерывания роста после осаждения, что позволяет изменять положение максимума линии в спектре фотолюминесценции в диапазоне 1.00 ÷ 1.36 мкм при 300 К.

Отжиг квантовых точек, неизбежный при высокотемпературном (750° С) выращивании верхних эмиттерных слоев AlGaAs в лазерных структурах, приводит к смещению линий ФЛ в коротковолновую сторону. Согласно данным электронной микроскопии на просвет это связано с уменьшением содержания In в квантовых точках вследствие диффузии In в окружающие области. В то же время форма и размер контура квантовой точки не изменяются.

На рис. 2 приведены спектры ФЛ лазерной структуры, верхний контактный слой которой был удален при помощи химического травления. Спектр ФЛ при слабой накачке (5 Вт/см²) представляет собой интенсивную линию с максимумом при ~ 1.25 эВ и полушириной 60 мэВ, типичной для образцов с квантовыми точками и определяющейся статистическим распределением точек по размерам. При больших плотностях мощности возбуждения появляется особенность, связанная с тяжелым экситоном в так называемом "смачивающем слое" при 1.32 эВ. При еще более высоких плотностях возбуждения наблюдается насыщение люминесценции основного состояния и сдвиг максимума ФЛ в коротковолновую сторону.

На вставке к рис. 2 приведен спектр лазерной генерации структуры с квантовыми точками. Спектральное положение линии генерации (показано пунктиром на рис. 2) при плотностях тока, близких к пороговой, соответствует максимуму полосы ФЛ, т. е. лазерная генерация осуществляется через нуль-мерные состояния квантовых точек. Для длинных полосков (длиной $L \simeq 1600$ мкм) при 300 К пороговая плотность тока составила 390 А/см², а дифференциальная квантовая эффективность 45%. Для коротких полосков ($L \simeq 500$ мкм) дифференциальная квантовая эффективность увеличивалась до 60%, в то время как пороговая плотность тока возрастала до 760 А/см². Зависимость длины волны генерации от температуры наблюдения соответствует температурной зависимости ширины запрещенной зоны GaAs (рис. 3, b), т. е.

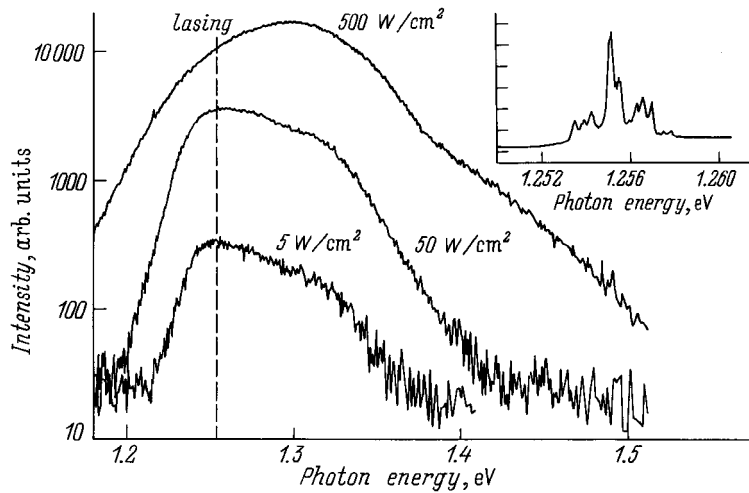


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции при различных плотностях мощности возбуждения лазерной структуры с квантовыми точками $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ после удаления химическим травлением верхнего эмиттера и контактного слоя. Пунктиром показано положение линии лазерной генерации. Температура измерений 300 К. На вставке — спектр лазерной генерации при токе, превышающем пороговый в 1.5 раза.

механизм генерации не меняется вплоть до комнатной температуры.

Известно, что при относительно высоких температурах (180÷220 К) активационный уход носителей из квантовых точек приводит к значительному уменьшению усиления и соответственно увеличению пороговой плотности тока [3,4]. Этого эффекта можно избежать в том случае, когда точки находятся в достаточно узкой (16 нм) квантовой яме (рис. 1,а). При этом область сверхвысокой температурной стабильности пороговой плотности тока такого лазера увеличивается до 330 К (рис. 3,а). Как видно из рис. 3,а, в диапазоне 80÷330 К изменению пороговой плотности тока соответствует значение характери-

стической температуры $T_0 = 385$ К, что существенно превышает теоретический предел $T_0 = 285$ К, предсказанный для лазеров с активной областью на основе двумерных структур (квантовых ям) [1]. Расширение области сверхвысокой температурной стабильности до температур выше комнатной (50° С) открывает широкие возможности для практического применения лазеров на квантовых точках.

Таким образом, нами показано, что при оптимальном выборе геометрии структуры лазеры с квантовыми точками, полученные методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений, имеют низкую плотность и сверхвысокую температурную стабильность порогового тока вплоть до 50° С.

Работа поддерживалась Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), фондом Сороса, грантом INTAS-94-1028.

Список литературы

[1] Y. Arakawa, H. Sakaki. Appl. Phys. Lett., **40**, 939 (1982).
 [2] N. Kirstaedter, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V.M. Ustinov, S.S. Ruvimov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, U. Richter, P. Werner, U. Gossel, J. Heydenreih. Electron. Lett., **30**, 1416 (1994).
 [3] Ж.И. Алфёров, Н.Ю. Гордеев, С.В. Зайцев, П.С. Копьев, И.В. Кочнев, В.В. Комин, И.Л. Крестников, Н.Н. Леденцов, А.В. Лунев, М.В. Максимов, С.С. Рувимов, А.В. Сахаров, А.Ф. Цацульников, Ю.М. Шерняков, Д. Бимберг. ФТП, **30**, 357 (1996).
 [4] Ж.И. Алфёров, Н.А. Берг, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, А.О. Косоогов, И.Л. Крестников, Н.Н. Леденцов, А.В. Лунев, М.В. Максимов, А.В. Сахаров, В.М. Устинов, А.Ф. Цацульников, Ю.М. Шерняков, Д. Бимберг. ФТП, **30**, 351 (1996).

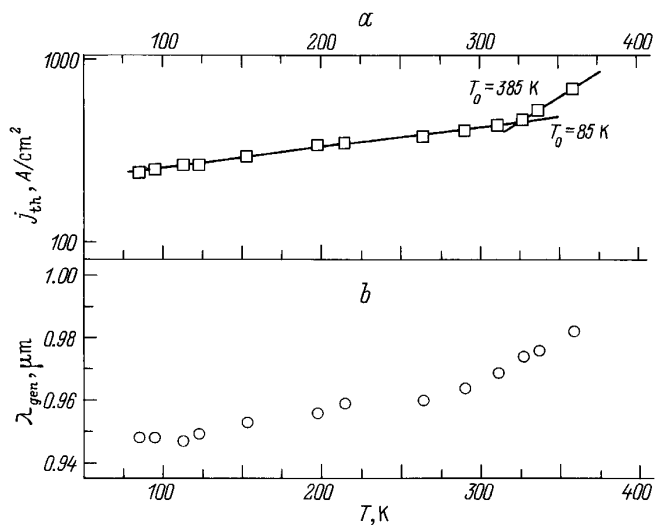


Рис. 3. Зависимости пороговой плотности тока J_{th} (а) и длины волны генерации λ_{gen} (б) от температуры. Ширина полоска $W = 40$ мкм, длина полоска $L = 1500$ мкм.

- [5] V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, N.N. Ledentsov, M.V. Maksimov, A.F. Tsatsul'nikov, N.A. Bert, A.O. Kosogov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. *Proc. Materials Research Society, Fall Meeting* (Boston, USA, 1995) paper EE3.6.
- [6] V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg. *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 2968 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

Injective heterolaser based on quantum dots with ultrahigh temperature stability of the threshold current up to 50° C

*M.V. Maximov, N.Yu. Gordeev, S.V. Zaitsev, P.S. Kop'ev, I.V. Kochnev, N.N. Ledentsov, A.V. Lunev, S.S. Ruvimov, A.V. Sakharov, A.F. Tsatsul'nikov, Yu.M. Sherniakov, Zh.I. Alferov, D. Bimberg**

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia
* Technische Universität Berlin,
D-10623 Berlin, Germany

Abstract Low threshold current density lasers based on $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum dots are grown by metalorganic chemical vapor deposition. Optimisation of growth parameters and geometry of structure allows to extend the range of ultrahigh temperature stability of the threshold current up to 50° C.