

НИЗКОПороГОВЫЙ ИНЖЕКЦИОННЫЙ ГЕТЕРОЛАЗЕР НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ, ПОЛУЧЕННЫЙ МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ ИЗ МЕТАЛЛОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

© Ж.И.Алферов, Н.Ю.Гордеев, С.В.Зайцев, П.С.Копьев, И.В.Кочнев,
В.В.Комин, И.Л.Крестников, Н.Н.Леденцов, А.В.Луцев,
М.В.Максимов, С.С.Рувимов, А.В.Сазаров, А.Ф.Пацульников,
Ю.М.Шерняков, Д.Бимберг*

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

* Technische Universität Berlin, D-10623 Berlin, Germany

(Получена 23 ноября 1995 г. Принята к печати 26 ноября 1995 г.)

Методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений получен низкопороговый инжекционный лазер с активной областью на основе квантовых точек в системе $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$. При 300 К пороговая плотность тока составила 150 А/см^2 для полоска длиной 1780 мкм и шириной 60 мкм. В диапазоне 80–220 К пороговая плотность тока составляет $50\text{--}60 \text{ А/см}^2$ и ее зависимость от температуры описывается значением характеристической температуры $T_0 = 530 \text{ К}$.

Ожидается, что лазеры на квантовых точках будут обладать свойствами, значительно превосходящими свойства традиционных лазеров на квантовых ямах. Так, для лазеров с активной областью на основе квантовых точек теоретические расчеты предсказывают высокий коэффициент дифференциального усиления, сверхнизкую пороговую плотность тока и сверхвысокую температурную стабильность [1]. В таком лазере диффузия неравновесных носителей к зеркалам отсутствует («активная область» — квантовая точка — «погружена» в широкозонную матрицу), минимизирован перегрев зеркал и может быть кардинально повышен срок службы лазера при сверхвысоких мощностях излучения. Действительно, первые лазеры на точках в системе $(\text{In,Ga})\text{As}/\text{GaAs}$ продемонстрировали высокое значение характеристической температуры T_0 , существенно превышающее теоретический предел для лазеров на основе квантовых ям в диапазоне температур $T_0 < 150 \text{ К}$ [2,3].

В данной работе исследованы электролюминесцентные свойства инжекционного гетеролазера с активной областью на основе квантовых точек в системе $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$, полученного методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений.

Процесс выращивания лазерных эпитаксиальных гетероструктур проводился на установке газофазной эпитаксии с применением металлоорганических соединений химических элементов III группы и гидридов химических элементов V группы. Установка оборудована горизонтальным реактором с резистивным нагревом. Рост проводился при пониженном давлении в реакторе, которое составляло 76 мм.рт.ст. Пониженное давление позволяет существенно улучшить однородность состава и толщин, уровня легирования эпитаксиальных слоев по сравнению с процессами роста при атмосферном давлении. В данной 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 легирующей примеси *n*-типа — силан, легирующий примеси *p*-типа — 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 представлено на рис. 1,а. Буферный слой, нижний эмиттер и нижняя часть волновода выращивались при рабочей температуре 750°C. Затем температура опускалась до 500°C и выращивалась активная область GaAs, в середину которой вставлялись квантовые точки $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$. Среднее количество осажденного InAs составляло 3 монослоя. После этого температура снова поднималась до 750°C и осаждались верхний эмиттер и контактный слой.

В случае образцов для исследований методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и фотолюминесценции (ФЛ) квантовые точки $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ наращивались при тех же условиях и были вставлены в середину слоя GaAs толщиной 2000 Å, ограниченного с обеих сторон достаточно узкими (250 Å) барьерами $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$. 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 (шириной $w = 60$ мкм). Измерение рабочих характеристик проводилось при импульсной накачке (длительность импульсов 3 мкс, частота повторения 4 кГц) в температурном диапазоне 80–300 К.

Точки формировались при спонтанной морфологической трансформации упругонапряженного слоя $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ в соответствии с механизмом роста Странски–Крастанова [3,4]. Как следует из данных электронной микроскопии на просвет, в структурах, выращенных GaAs, присутствуют два типа квантовых точек (см. рис. 1,б). Точки одного типа имеют форму пирамид (p) с квадратным основанием порядка 20 нм×20 нм со сторонами, ориентированными вдоль направлений [010] и [001] и высотой ~ 8 нм. Помимо этого наблюдаются точки, имеющие форму квантовых дисков (d) с характерными размерами ~ 30–50 нм и высотой в 5–10 монослоев.

На рис. 2 представлены спектры ФЛ данной структуры при различных интенсивностях накачки. При высокой интенсивности накачки в спектре присутствуют линии, обозначенные как A, A*, I и WL.

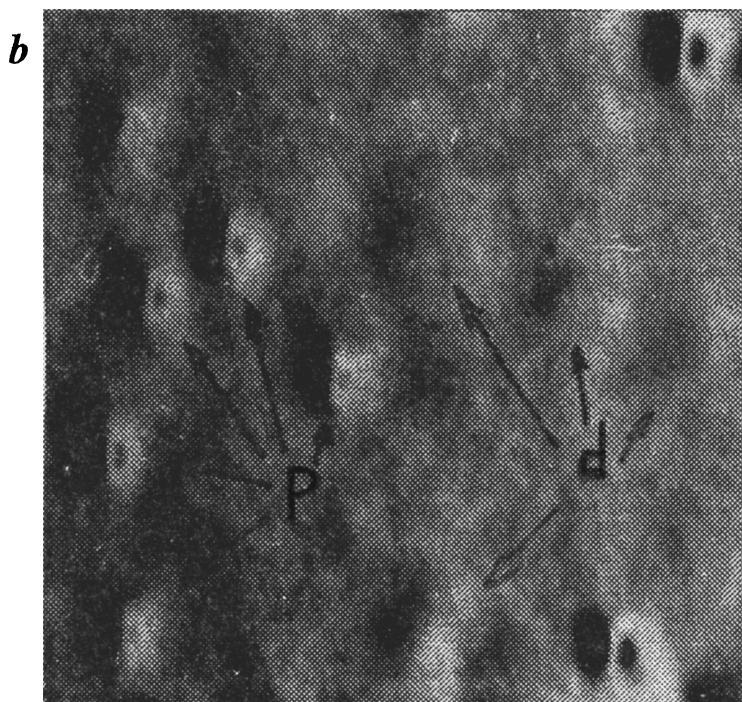
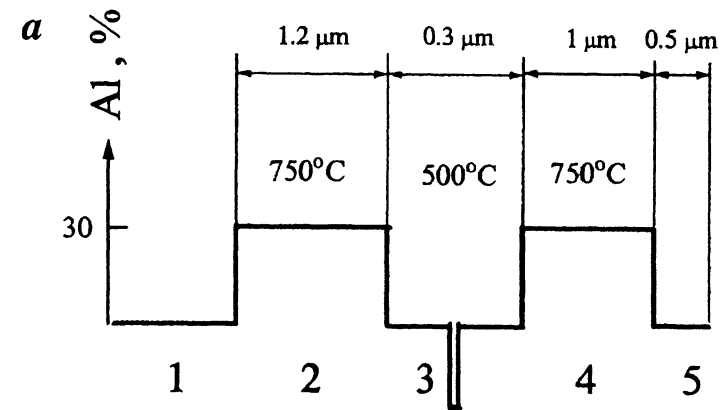


Рис. 1. а — схематическое изображение структуры с квантовыми точками $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$, б — изображение квантовых точек $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии. На поверхности присутствуют квантовые точки (р) и квантовые диски (d).

Квантовым пирамидам соответствует узкая (~ 30 мэВ) линия ФЛ, обозначенная на рис. 2, а как А, при энергии 0.98 эВ при 8 К и 0.9 эВ ($\lambda = 1.36$ мкм) при 300 К. Кроме линии, соответствующей основному состоянию в квантовой точке, в спектре присутствует ряд линий, связанных с возбужденными состояниями и обозначенных на рис. 2, а как А*. Квантовым дискам соответствует полоса, обозначенная на рис. 2, а как I, в области энергий 1.25 – 1.35 эВ (при 8 К). Из рисунка видно, что данная полоса представляет собой суперпозицию узких (~ 5 – 8 мэВ) перекрывающихся линий. Исходя из экспериментального положения

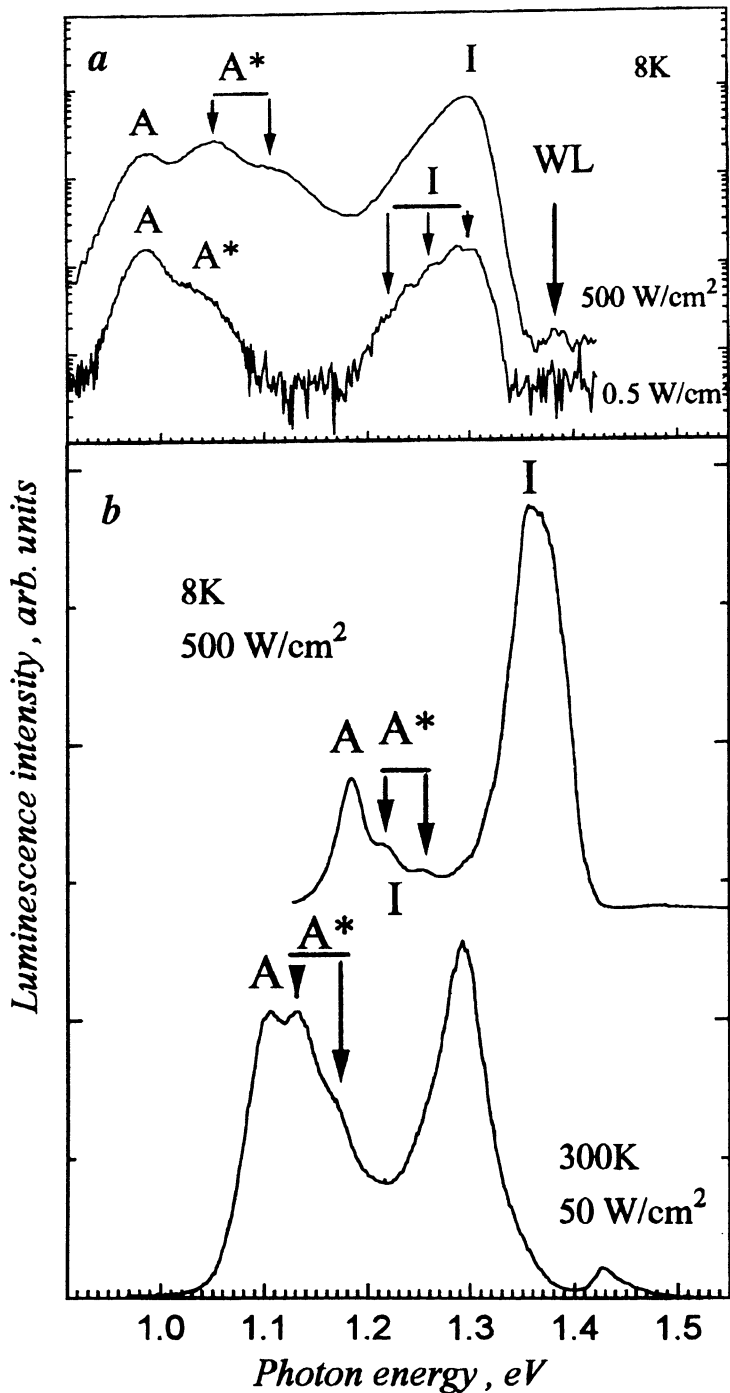


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции: *a* — образцы с квантовыми точками $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$, *b* — лазерной структуры, у которой при помощи химического травления были удалены верхний эмиттер и контактный слой. Энергия возбуждающего кванта 2.41 эВ.

линий можно предположить, что они связаны с флуктуациями высоты квантовых дисков на целое число монослоев. При очень высоких плотностях возбуждения наблюдается линия WL (~ 1.4 эВ при 8 К), обусловленная рекомбинацией через состояния смачивающего слоя. Отжиг зарощенных структур при температуре 750°C приводит к некоторому смещению всех линий в коротковолновую область спектра, что связано с изменением формы точек, обусловленным диффузионными процессами. В инжекционных лазерных двойных гетероструктурах GaAs-AlGaAs, где в активную область были вставлены точки, а эмиттеры выращивались при 750°C , наблюдается аналогичной эффект (рис. 2, *b*).

На рис. 3 представлен спектр лазерной генерации структуры с квантовыми точками. Пороговая плотность тока составила $J_{\text{th}} = 150$ А/см² при 300 К и длине резонатора $L = 1780$ мкм (рис. 3, *a*). Эффекты растекания основных и неосновных носителей, превышающие истинную плотность порогового тока, при расчете значений J_{th} не учитывались. Спектральное положение линии генерации при плотностях тока, близких к пороговой, соответствует максимуму полосы ФЛ, обусловленной квантовыми дисками. Таким образом, лазерная генерация осуществляется через нульмерные состояния квантовых дисков. Данный факт подтверждается зависимостью пороговой плотности тока от температуры (см. вставку на рис. 3, *a*). В диапазоне температур 80–220 К пороговая плотность тока меняется очень слабо и описывается значением характеристической температуры $T_0 = 530$ К. Зависимость длины волны генерации от температуры наблюдения соответствует температурной зависимости ширины запрещенной зоны GaAs, т. е. механизм генерации не меняется вплоть до комнатной температуры. При температурах наблюдения выше 220 К начинается резкий рост пороговой плотности тока. Данный факт наблюдался ранее в лазерах на квантовых точках [3] и обусловлен термическим испарением носителей из квантовых дисков в прилегающий слой GaAs, что обуславливает необходимость увеличения плотности инжекционного тока, требуемой для поддержания данного коэффициента усиления.

При уменьшении длины резонатора ($L < 250$ мкм) наблюдается насыщение усиления на квантовых дисках при увеличении тока накачки и лазерная генерация осуществляется через состояния смачивающего слоя при энергии ~ 1.38 эВ (рис. 3, *b*). В этом случае при $L \sim 250$ мкм и величинах тока накачки, в несколько раз превышающих пороговый ток, генерации осуществляется в широком спектральном диапазоне ($\Delta\lambda \approx 50$ нм). Зависимость коэффициента усиления от плотности тока накачки представлена на вставке к рис. 3, *b*. Значения коэффициента усиления были вычислены из исследованных зависимостей как пороговой плотности тока, так и дифференциальной квантовой эффективности от потерь на выход излучения из резонатора. При этом использовалось условие равенства потерь излучения и дополнительной мощности за счет усиления при пороговой плотности тока. В диапазоне плотностей токов накачки от 1 до 4 кА/см² наблюдалось полное насыщение усиления, связанного с квантовыми дисками. Рост усиления при $J > 4$ кА/см² связан с генерацией через состояния смачивающего слоя.

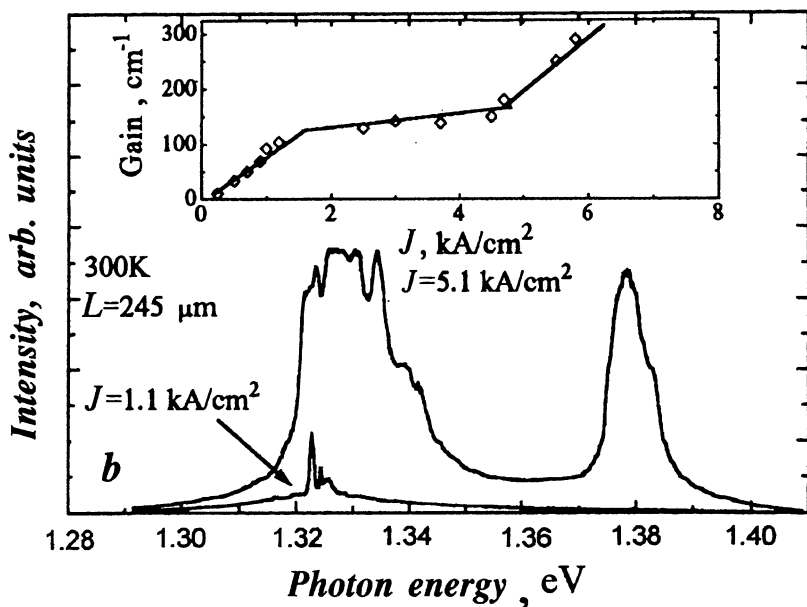
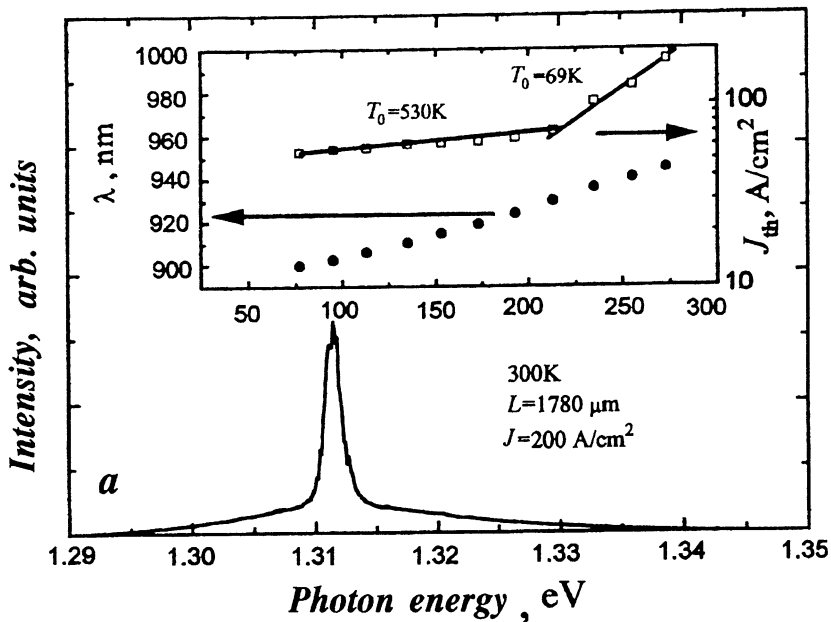


Рис. 3. Спектры электролюминесценции для лазеров с различной длиной полостки L , мкм: a — 1780, b — 245. На вставке к рис. a представлена зависимость пороговой плотности тока J_{th} и длины волны генерации λ от температуры T для $L = 1780 \mu\text{m}$. На вставке к рис. b представлена зависимость коэффициента усиления от плотности тока накачки.

Таким образом, уже первые лазеры с квантовыми точками, полученные методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений, демонстрируют низкую плотность и высокую температурную стабильность порогового тока в широком диапазоне температур ($T < 220$ K).

Работа поддерживалась Российским фондом фундаментальных исследований, Международным научным фондом Дж. Сороса и INTAS (грант 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. Heydenrein. Electron. Lett., **30**, 1416 (1994).
- [3] N.N. Ledentsov, M. Grundmann, R. Heits, J. Bohrer, D. Bimberg, V.M. Ustinov, V.A. Shchukin, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, S.S. Ruvimov, A.O. Kosogov, P. Werner, U. Richter, U. Gossele, J. Heidenreich. Invited talk on 7th Int. Conf. on Modul. Semicond. Struct. (Madrid, 1995), to be published in Sol. St. Electr.
- [4] V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg. Phys. Rev. Lett., **75**, 2968 (1995).

Редактор Т.А. Полянская

Low threshold heterolaser based on self-assembled quantum dots, formed by metalorganic chemical vapor deposition

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

A.F. Ioffe Physical-Technical Institute Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Technische Universität Berlin, D-10623 Berlin, Germany

Low threshold lasers based on $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum dots are grown by metalorganic chemical vapor deposition. Threshold current density equal to 150 A/cm^2 at 300 K for the cavity length of $1780 \mu\text{m}$ and the stripe width of $60 \mu\text{m}$. Ultrahigh temperature stability of the threshold current density (characteristic temperature $T_0 = 530 \text{ K}$) is demonstrated in wide temperature range of 80–220 K.