

Особенности электролюминесценции инжекционных лазеров на основе вертикально-связанных квантовых точек вблизи порога лазерной генерации

© Н.Ю. Гордеев[†], С.В. Зайцев*, Л.Я. Карачинский, В.И. Копчатов, И.И. Новиков, В.М. Устинов, П.С. Копьев

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

* Nova Crystals, Inc.,
174 Component Dr., San Jose, CA 95131 USA

(Получена 28 мая 2002 г. Принята к печати 3 июня 2002 г.)

Электролюминесцентным методом проведено исследование спектрального состава излучения лазерной гетероструктуры на основе вертикально-связанных квантовых точек InGaAs. Исследования проводились в широком диапазоне температур (77–300 К) и при различных плотностях тока накачки. Обнаружено, что во всем диапазоне температур лазерная генерация происходит через основное состояние квантовых точек. Предложено объяснение температурной независимости максимума излучения, соответствующего второму возбужденному состоянию в квантовых точках.

1. Введение

При исследовании лазерных гетероструктур, активная область которых состоит из квантовых точек (КТ), большое внимание уделяется тому, через какие именно состояния происходит излучение вообще и лазерная генерация в частности [1,2]. Например, в таких структурах с ростом температуры наблюдался переход от лазерной генерации через состояния КТ к лазерной генерации через состояния смачивающего слоя [3]. Это связывалось в первую очередь с существенным выбросом неравновесных носителей заряда из КТ. Ранее было показано, что использование массивов вертикально-связанных квантовых точек (ВСКТ) в системе InGaAs/GaAs позволяет существенно уменьшить выброс носителей из КТ в смачивающий слой [4].

В данной работе представлены результаты исследования спектрального состава излучения гетероструктуры, активная область которой представляет собой вертикально-совмещенные квантовые точки InGaAs/GaAs. Особое внимание было уделено тщательному исследованию температурной зависимости максимумов спектра излучения. Основной задачей являлось определение состояний КТ, через которые происходит лазерная генерация при различных температурах.

2. Эксперимент

Лазерная гетероструктура раздельного ограничения InGaAs/GaAs (длина волны излучения $\lambda = 0.98$ мкм) была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs(001), легированной кремнием. Структура состояла из *n*- и *p*-эмиттеров Al_{0.4}Ga_{0.6}As толщиной 1.5 мкм, градиентного волновода толщиной 0.4 мкм и контактного слоя GaAs толщиной 0.6 мкм.

КТ выращивались при температуре 485°C, а вся остальная структура при температуре 700°C. ВСКТ были получены по методу Странского–Крастанова в результате самообразования в процессе осаждения 10 слоев КТ (In, Ga)As, отделенных друг от друга буферными слоями GaAs толщиной 50 Å [4].

Накачка образцов с полосковым контактом (длина резонатора 300–500 мкм) осуществлялась в квазинепрерывном режиме импульсами тока длительностью 1.5 мкс, следовавшими с частотой 5 кГц. Спектры электролюминесценции исследовались в широком диапазоне температур (*T*) от 77 до 300 К, для чего образцы напаялись на теплоотвод слоями вниз и помещались в криостат. Исследовалось излучение в направлении, перпендикулярном эпитаксиальным слоям. Особое внимание было уделено подавлению обратной связи, зеркала травилась и покрывалась черной краской с высоким показателем преломления. Этот метод, позволяющий исключить влияние переизлучения и свести на нет влияние волновода, подробно изложен в работе [5]. Также это позволило существенно повысить порог лазерной генерации в исследованных образцах, что привело к расширению диапазона возможных токов накачки. Кроме того, были изготовлены образцы, в которых со стороны эпитаксиальных слоев было протравлено „окно“ до волновода. Это позволило исследовать спектр излучения, исключив влияние эмиттера и контактного слоя.

3. Результаты и обсуждение

Спектры излучения на пороге лазерной генерации представлены на рис. 1. Хорошо видно, что количество максимумов в спектре электролюминесценции растет с ростом температуры, что связано с заселением вышележащих уровней. Температурная зависимость положения максимумов (*I*–*I*_п) приведена на рис. 2. Она получена

[†] E-mail: gordeev@switch.ioffe.rssi.ru

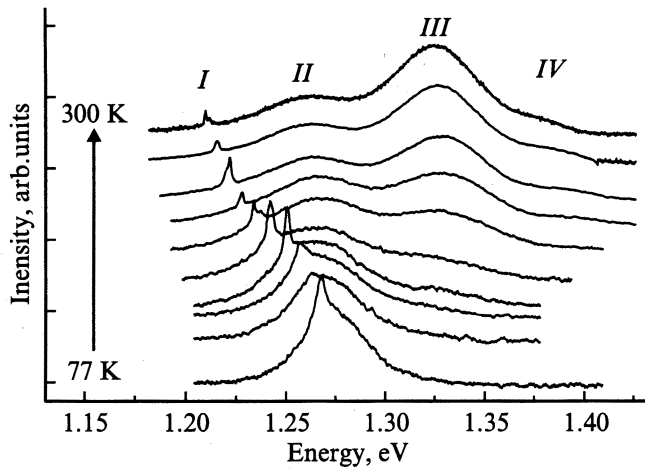


Рис. 1. Спектры электролюминесценции лазерной гетероструктуры с КТ в системе InGaAs/GaAs на пороге лазерной генерации.

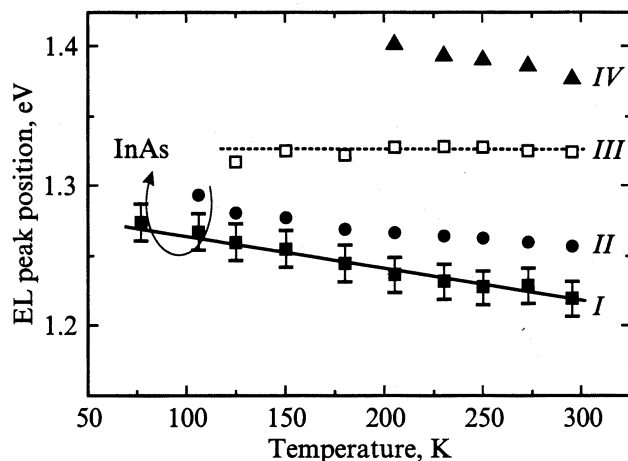


Рис. 2. Температурная зависимость положения максимумов спектров электролюминесценции (EL).

после использования метода моделирования спектров излучения, описанного в работе [6].

Предлагаемая схема энергетических уровней представлена на рис. 3. Мы считаем, что в КТ присутствует одно электронное состояние и три дырочных, между которыми возможны переходы (*I-III*). При этом переход *I* соответствует основному состоянию в КТ, а *II* и *III* — первому и второму возбужденным состояниям соответственно. Переход *IV* — это переход между электронным состоянием в КТ и смачивающим слоем (WL).

Из рис. 2 хорошо видно, что смещение первого максимума (*I*) с ростом температуры хорошо согласуется с температурной зависимостью запрещенной зоны InAs. Второй максимум (*II*) смещается гораздо слабее с ростом температуры, а положение третьего максимума (*III*) вообще не зависит от температуры.

Ранее авторы работ [7–9] отмечали наблюдавшуюся слабую температурную зависимость длины волны лазерной генерации гетероструктур на основе КТ. В работе [9] для гетероструктуры, имеющей в качестве активной области один слой КТ InGaAs, было показано, что этот эффект связан с независимостью положения максимума усиления от температуры. С изменением температуры состояния в КТ меняются таким образом, что при неизменном усилении расстояние между квазиуровнями Ферми (ΔE_f), соответствующими распределению электронов и дырок в КТ, остается практически постоянным. Это означает, что форма энергетического распределения этих состояний следует за увеличением размытия функций Ферми с ростом температуры. Энергетическое распределение состояний в КТ определяется неоднородным уширением, обусловленным неоднородностями формы, размера и состава КТ.

Полученные результаты показывают, что длина волны генерации зависит от температуры практически так же, как и ширина запрещенной зоны. Расхождения с данными работы [9] обусловлены, скорее всего, разной методикой эксперимента и разными условиями накачки. Аномальная температурная зависимость переходов *II* и *III* также объясняется наличием значительного неоднородного уширения. Спектру при большей температуре соответствует и большая плотность тока накачки, поскольку спектры регистрировались на пороге лазерной генерации, который увеличивается с температурой. Из рис. 4 видно, что увеличение тока накачки при фиксированной температуре приводит к смещению максимума излучения через более высоколежащий уровень в коротковолновую сторону. Можно предположить, что это смещение может иметь величину порядка неоднородного уширения соответствующего уровня (вплоть

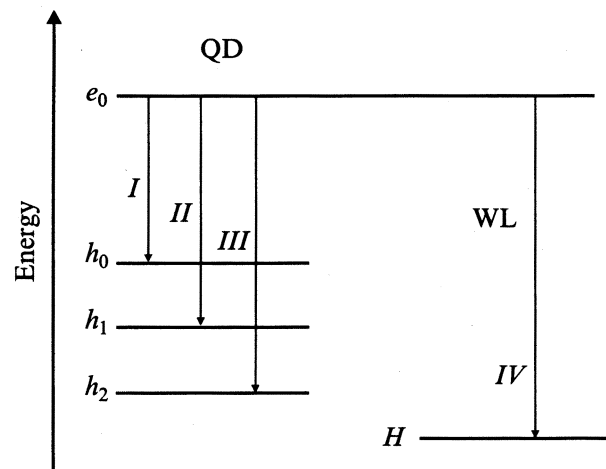


Рис. 3. Схема энергетических уровней, ответственных за излучательную рекомбинацию в исследованной гетероструктуре. e_0 и h_0 — основные состояния электронов и дырок в КТ (QD) соответственно; h_1 и h_2 — возбужденные состояния дырок в КТ; H — условное обозначение подзоны дырок в смачивающем слое (WL).

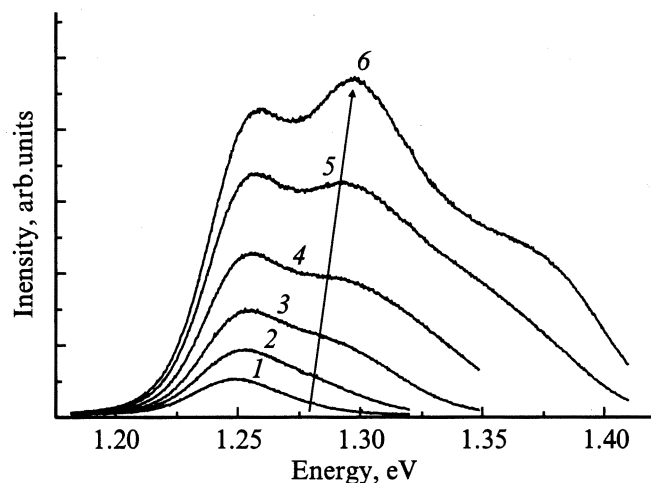


Рис. 4. Спектры электролюминесценции лазерной гетероструктуры с КТ в системе InGaAs/GaAs при температуре 77 К. Плотность тока накачки, A/cm^2 : 1 — 40, 2 — 80, 3 — 160, 4 — 320, 5 — 640, 6 — 980.

до 40–50 мэВ [2]). При увеличении температуры изменение ширины запрещенной зоны и описанный выше эффект заполнения уровня компенсируют друг друга. В диапазоне $T = 77–300$ К температурное сужение запрещенной зоны составляет ~ 50 мэВ. По всей видимости, описанный выше механизм компенсации смещения максимумов электролюминесценции за счет изменения ширины запрещенной зоны с ростом температуры и за счет увеличения тока накачки приводит к тому, что положение перехода II (см. рис. 1) слабо меняется с температурой, а положение перехода III остается неизменным во всем температурном диапазоне.

4. Заключение

Проведено исследование спектрального состава излучения лазерной гетероструктуры на основе вертикально-связанных квантовых точек InGaAs/GaAs. Подробно исследовано возникновение максимумов в спектре излучения, связанных с выбросом носителей из основного состояния КТ с ростом температуры. Показано, что во всем диапазоне температур лазерная генерация происходит через основное состояние квантовых точек. Предложено объяснение температурной независимости максимума излучения, соответствующего второму возбужденному состоянию в КТ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 01-02-17764) и 6-го конкурса-экспертизы проектов молодых ученых РАН (грант № 26). Один из авторов (Л.Я. Карачинский) выражает благодарность INTAS за финансовую поддержку работы (грант YSE № 2001/2-97).

Авторы выражают благодарность Р.А. Сурису, Г.Г. Зегре и Е.Ю. Котельникову за интересное обсуждение полученных результатов. Также авторы выражают благодарность Н.Д. Ильинской за помощь при подготовке экспериментальных образцов.

Список литературы

- [1] S. Raymond, S. Fafard, P.J. Poole, A. Wojs, P. Hawrylak, S. Charbonneau, D. Leonard, R. Leon, P.M. Petroff, J.L. Merz. *Phys. Rev. B*, **54**, 11 548 (1996).
- [2] Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Шукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров, Д. Бимберг. *ФТП*, **32**, 385 (1998).
- [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] S.V. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, Yu.M. Shernyakov, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.Yu. Egorov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, N. Kirstaedter, D. Bimberg. *Superlat. Microstruct.*, **21**, 559 (1997).
- [5] А.М. Георгиевский, С.В. Зайцев, Н.Ю. Гордеев, В.И. Копчатов, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, П.С. Копьев. *ФТП*, **33**, 847 (1999).
- [6] S.V. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, L.Ya. Karachinsky, V.I. Kopchatov, I.I. Novikov, I.S. Tarasov, N.A. Pikhtin, V.M. Ustinov, P.S. Kop'ev. *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2514 (2000).
- [7] D. Bimberg, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, N. Kirstaedter, O.G. Schmidt, M.H. Mao, V.M. Ustinov, A.Y. Egorov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, Z.I. Alferov, S.S. Ruvimov, U. Gösele, H. Heydenreich. *Jap. J. Appl. Phys.*, **35**, 1311 (1996).
- [8] H. Shoji, Y. Nakaata, K. Mukai, Y. Sugiyama, M. Sugawara, N. Yokoyama, H. Ishikawa. *Selected Topics Quant. Electron.*, **3**, 188 (1997).
- [9] J.D. Thomson, H.D. Summers, P.M. Smowton, E. Herrmann, P. Blood, M. Hopkinson. *J. Appl. Phys.*, **90**, 4859 (2001).

Редактор Л.В. Шаронова

Peculiarities in electroluminescence of injection lasers based on vertically coupled quantum dots near lasing threshold

N.Yu. Gordeev, S.V. Zaitsev*, L.Ya. Karachinsky, V.I. Kopchatov, I.I. Novikov, V.M. Ustinov, P.S. Kop'ev

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Nova Crystals, Inc.,
174 Component Dr., San Jose, CA 95131 USA

Abstract Electroluminescent investigation of laser heterostructure based on InGaAs vertically coupled self-assembled quantum dots has been done. Luminescent parameters were measured in the 77–300 K temperature range. Lasing via ground state of quantum dots up to room temperature has been shown. Temperature independence of the electroluminescent peak position, which corresponds to the second excited state in quantum dots, has been explained.