

Лазеры на квантовых точках: основные компоненты пороговой плотности тока

© С.В. Зайцев, Н.Ю. Гордеев, В.И. Копчатов, А.М. Георгиевский, В.М. Устинов, А.Е. Жуков, А.Ю. Егоров, А.Р. Ковш, Н.Н. Леденцов, П.С. Копьев, Д. Бимберг*, Ж.И. Алфёров

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

* Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin, D-10623 Berlin, Germany

(Получена 4 февраля 1997 г. Принята к печати 10 февраля 1997 г.)

Исследованы инжекционные гетеролазеры на квантовых точках, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Показано, что пороговая плотность тока при комнатной температуре может быть снижена до 15 A/cm^2 при уменьшении безызлучательной рекомбинации и при повышении степени локализации носителей. С помощью метода электропоглощения исследована плотность состояний в структурах с вертикально-связанными квантовыми точками.

Лазеры с квантовыми точками (КТ) в системе InAs/GaAs/AlGaAs вызывают интерес в связи с их спектральными свойствами. Наблюдались генерация в одной продольной моде и узкий спектр оптического усиления [1]. Они имели также высокую температурную стабильность при низких температурах. Вместе с тем пороговая плотность тока при комнатной температуре была довольно высока ($\sim 900 \text{ A/cm}^2$). Электролюминесцентные исследования этих структур показали, что основной причиной этого является сильная безызлучательная рекомбинация в активной области. Другой причиной является активационный уход носителей из состояний КТ при комнатной температуре. Для таких структур наблюдался переход от генерации через состояния КТ к генерации через состояния так называемого "смачивающего" слоя [2]. Использование массивов вертикально связанных (ВС) КТ [3] позволило нам избежать этих эффектов, но делокализация носителей из КТ все еще оставалась основным ограничением для улучшения лазерных характеристик. Использование AlGaAs в качестве матрицы КТ позволило значительно снизить пороговую плотность тока и поднять эффективность вынужденного излучения [4]. Однако оценки показывают, что эти параметры еще могут быть значительно улучшены. В данной работе мы исследовали основные механизмы утечек, которые препятствуют приближению характеристик лазеров на КТ к теоретическим пределам.

Лазерные структуры в системе AlGaAs/GaAs были выращены на подложке GaAs(100), легированной кремнием в установке молекулярно-пучковой эпитаксии Riber 32P. Активная область состояла из трех или десяти слоев ВС КТ $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ (соответственно $N = 3$ или 10) [5]. ВС КТ самоорганизовывались в процессе осаждения нескольких слоев КТ $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ (эффективная толщина $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 12 \AA), разделенных слоем GaAs или AlGaAs толщиной 50 \AA .

Были изготовлены лазеры с замкнутой кольцевой модой. Лазерные характеристики исследовались при импульсном токе накачки (длительность импульса 3 мкс,

частота повторения 5 кГц) в температурном диапазоне $80 \div 300 \text{ K}$. Для исследования механизмов внутренних утечек в лазерах на КТ изучалась эффективность вынужденной и спонтанной рекомбинации при различных температурах. Для исследования внутренней эффективности спонтанных процессов излучение измерялось через специальное окно в верхнем контакте лазерной структуры. Особое внимание было уделено подавлению лазерной генерации. Это позволило нам оценить потери на безызлучательную рекомбинацию носителей как функцию плотности тока накачки в предположении, что максимальная эффективность спонтанной излучательной рекомбинации при 77 К близка к 100%. Аналогичные образцы были использованы для исследования электропоглощения. Детектируемое излучение проходило через подложку и поглощалось в слоях с КТ. Спектры электропоглощения адекватно отображают распределение плотности состояний в активной области. Для оценки квантовой эффективности вынужденной рекомбинации были исследованы лазеры полосковой геометрии с различной длиной резонатора. Экстраполяция к оси ординат зависимости обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора дает значение внутренней квантовой эффективности генерации.

Из рис. 1 видно, что внутренняя квантовая эффективность спонтанной излучательной рекомбинации в однослойных лазерных гетероструктурах на основе КТ в системе InAs/GaAs была очень низка и процессы безызлучательной рекомбинации не насыщались вплоть до тока накачки 10 kA/cm^2 . Оптимизация процесса роста и использование нескольких слоев КТ InGaAs/GaAs позволили нам увеличить этот параметр в 10 раз при пороговой плотности тока. Хотя указанная эффективность при комнатной температуре не превысила всего лишь 40% своего значения при температуре 77 К, ее возрастание и было основной причиной соответствующего уменьшения пороговой плотности тока с 1 kA/cm^2 до 100 A/cm^2 .

Для уменьшения термической активации носителей из состояний КТ в качестве матрицы был использован

$\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$. Из рис. 1 видно, что эффективность спонтанной рекомбинации при низком уровне возбуждения в этом случае также была увеличена. Мы полагаем, что это увеличение может объяснить уменьшение пороговой плотности тока до 60 A/cm^2 как результат более сильной локализации носителей. Тем не менее при комнатной температуре по-прежнему только 40% носителей участвуют в излучательной рекомбинации. Характерной особенностью последней кривой является сильное уменьшение эффективности с увеличением плотности тока для структур InGaAs/AlGaAs , тогда как для структур InGaAs/GaAs с ВС КТ она оставалась практически постоянной выше порога лазерной генерации.

На рис. 2 показано влияние использования такого типа матрицы с КТ на дифференциальную квантовую эффективность вынужденного излучения (η_{diff}). Видно, что эффективность возрастает с уменьшением длины резонатора в широком диапазоне (за исключением относительно коротких лазеров). В то время как для ВС КТ InGaAs/GaAs предел обратной дифференциальной квантовой эффективности примерно равен 2 (внутренняя эффективность порядка 50%), для ВС КТ InGaAs/GaAs этот предел близок к 1.5 (внутренняя эффективность порядка 65%). Таким образом, около 35% носителей

все еще рекомбинируют через возбужденные состояния и состояния смачивающего слоя в спонтанном режиме.

Результаты исследования электропоглощения представлены на рис. 3. Из принципиального совпадения спектров электролюминисценции (I_{EL}) и электропоглощения (I_{EA}), с одной стороны, и отсутствия каких-либо изменений в спектре с увеличением напряжения смещения, с другой стороны, можно заключить, что спектр электропоглощения связан только с распределением плотности состояний в КТ. Во всяком случае, отсутствие сдвига и изменения формы края поглощения при возрастании напряжения обратного смещения совершенно нетипично для квантовых слоев. Это делает исследование спектров электропоглощения эффективным методом изучения распределения КТ по размерам.

Таким образом, в структурах с вертикально связанными КТ обнаружено два главных механизма утечек носителей из основных состояний КТ. Безызлучательная рекомбинация различных типов препятствует попаданию носителей в основные состояния КТ и исключает их из процесса усиления. Мы оценили вклад каждого механизма для того, чтобы вычислить реальную плотность тока, приложенную к КТ на пороге генерации. Только 65% носителей, участвующих в излучательной рекомбинации,

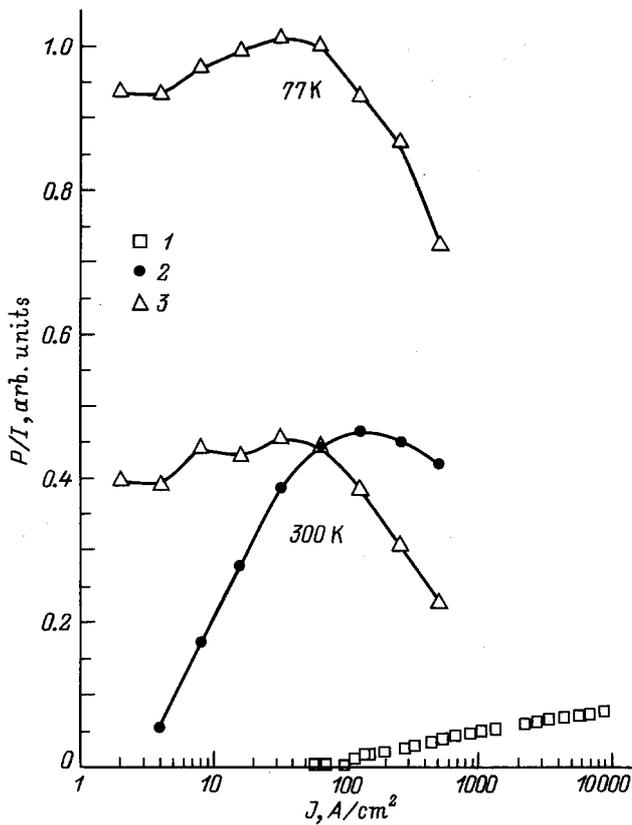


Рис. 1. Зависимость внутренней квантовой эффективности P/I от плотности тока накачки J . Структуры: 1 — InGaAs/GaAs , однослойная; 2 — InGaAs/GaAs , $N = 10$; 3 — InGaAs/AlGaAs , $N = 10$.

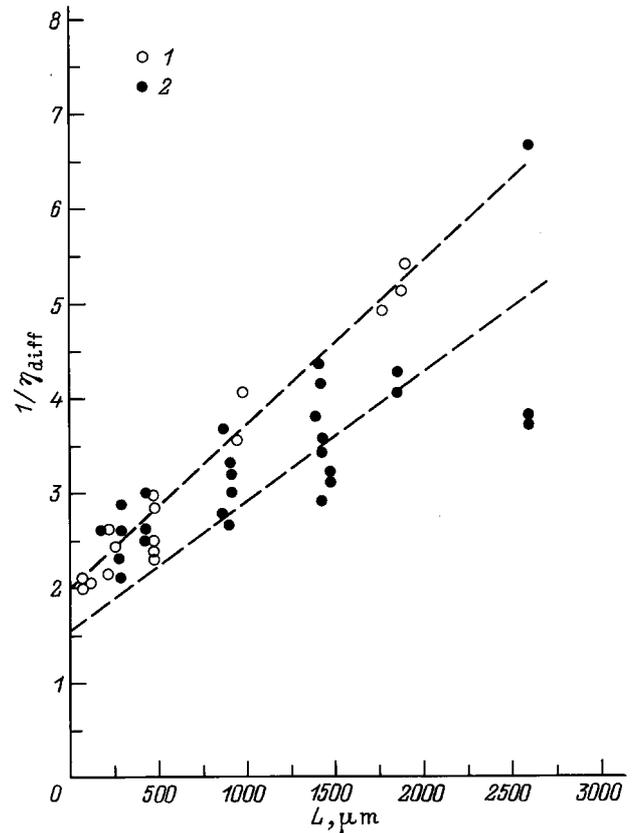


Рис. 2. Зависимость обратной квантовой дифференциальной эффективности вынужденной рекомбинации ($1/\eta_{\text{diff}}$) от длины резонатора (L) лазеров в системах InGaAs/GaAs (1) и InGaAs/AlGaAs (2).

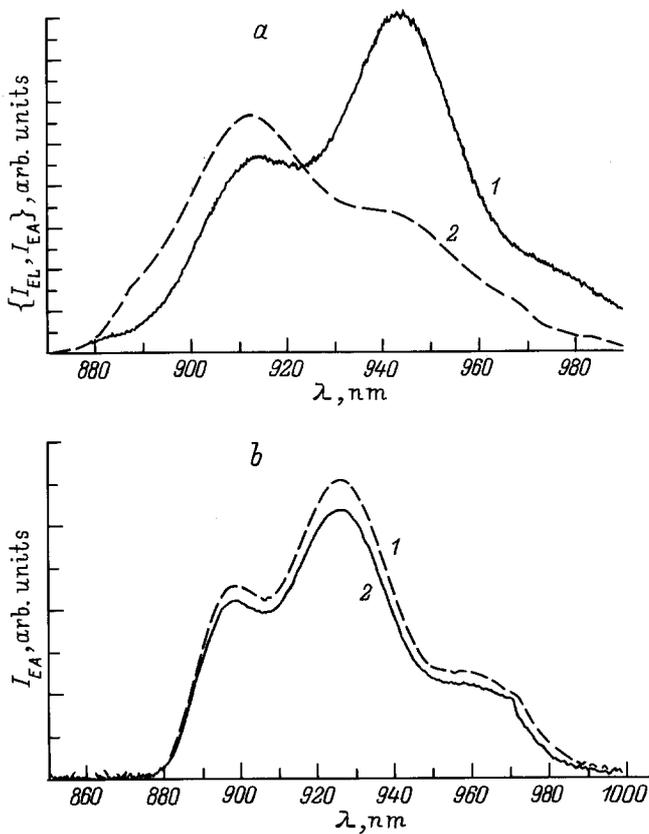


Рис. 3. *a* — спектры электролюминесценции (1) и электропоглощения (2) для структур с КТ. *b* — спектры электропоглощения при напряжениях смещения 0 (1) и 4 В (2).

дают вклад в вынужденное излучение, а внутренняя квантовая эффективность составляет величину порядка 40%. Таким образом, только около 25% тока используется для достижения порога лазерной генерации.

Полученные результаты показывают, что хотя уже получены очень низкая пороговая плотность тока и высокая эффективность лазерной генерации, потенциальные возможности для лазерных гетероструктур на основе ВС КТ еще очень высоки. Фактически показана возможность достижения пороговой плотности тока 15 A/cm^2 при комнатной температуре без изменения состава и количества КТ. Не обнаружено никаких принципиальных механизмов, препятствующих дальнейшему повышению эффективности лазерной генерации. Для исследования плотности состояний в КТ предложено использовать метод электропоглощения.

Список литературы

- [1] S.V. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, M.P. Soshnikov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev. *Proc. SPIE's Optical Dimension and Materials (OPDIM) Conference* (Kiev, 1995) N 2648-45, p. 287.
- [2] 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. *Semicond.*, **30**, 197 (1996).
- [3] V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, N.N. Ledentsov, M.V. Maksimov, A.F. Tsatsul'nikov, N.A. Bert, A.A. Kosogov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. *Proc. Mater. Res. Soc.* (Boston, USA, 1995) v. **417**, p. 141.
- [4] S.V. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.Yu. Egorov, N.N. Ledentsov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. *Superlatt. Microstr.* (1997) (to be published).
- [5] V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, 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. *IX Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy* (Malibu, CA, USA, 1996).

Редактор Л.В. Шаронова

Quantum dot lasers: main components of threshold current density

S.V. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, V.I. Kopchatov, A.M. Georgievskii, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.Yu. Egorov, A.R. Kovsh, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg*, Zh.I. Alferov

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

Abstract Molecular-beam epitaxy grown quantum dot (QD) injection lasers have been investigated. It has been shown that the threshold current density may be reduced down to 15 A/cm^2 at room temperature by reducing the non-radiative recombination and improving the carrier localization in QD lasers. The density of states in vertically coupled quantum dot structures has been studied by electroabsorption.