

06;07

Аномальные динамические характеристики полупроводниковых лазеров на квантовых точках, генерирующих излучение двух квантовых состояний

© Г.С. Соколовский, М.А. Каталуна, А.Г. Дерягин, В.И. Кучинский, И.И. Новиков, М.В. Максимов, А.Е. Жуков, В.М. Устинов, В. Сиббет, Э.У. Рафаилов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: gs@mail.ioffe.ru
School of Physics and Astronomy, University of St. Andrews, North Haugh,
St Andrews, KY16 9SS UK
Division of Electronic Engineering and Physics, University of Dundee, Dundee
DD1 4HN, UK

Поступило в Редакцию 18 июля 2006 г.

Проведены эксперименты по исследованию динамики спектров излучения полупроводниковых лазеров на квантовых точках, генерирующих излучение двух квантовых состояний. При электрической накачке 30 ns импульсами через 2–5 ns после включения лазера наблюдалось полное прекращение лазерной генерации на время до 10 ns и более в зависимости от амплитуды импульса накачки. После повторного включения в лазерном излучении наблюдались короткие импульсы излучения возбужденного состояния квантовых точек длительностью 200–300 ps, следующие за короткими провалами сходной длительности (т.н. „темными импульсами“) в излучении основного состояния. В качестве объяснения наблюдаемых явлений предложено изменение добротности лазера за счет перераспределения концентрации носителей между квантовыми состояниями.

PACS: 73.21.La, 78.67.Hc, 85.35.Be

Полупроводниковые лазеры на основе квантовых точек привлекают к себе пристальное внимание исследователей благодаря многим интересным и полезным свойствам, связанным, прежде всего, с дискретным характером энергетических уровней в квантовых точках. В частности,

сравнительно недавно была обнаружена возможность одновременной лазерной генерации с основного (GS, от „ground state“ — англ.) и возбужденного (ES, от „excited state“ — англ.) состояний квантовых точек (КТ) [1]. Позднее были проведены эксперименты по исследованию динамики спектров излучения [2,3] и теоретические исследования [4] этого эффекта. В настоящей работе нами приводятся результаты экспериментальных наблюдений аномальных динамических характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых точках (КТ ППЛ), генерирующих излучение двух квантовых состояний, которые существенно отличаются от данных, приводимых в мировой литературе в последние годы.

Лазерная структура, использованная в эксперименте, была выращена молекулярно-пучковой эпитаксией на подложке GaAs и содержала активную область из 5 слоев InAs КТ, покрытых слоем $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{As}$ толщиной 5.3 nm с GaAs в качестве разделителя. На структуре был сформирован меза-полосок шириной 4 μm и изготовлены лазерные чипы длиной от 1.5 до 2.5 mm. На задние и передние зеркала всех изготовленных КТ ППЛ были нанесены соответственно высокоотражающие и антиотражающие покрытия.

Схема экспериментальной установки показана на вставке на рис. 1. Электрическая накачка полупроводникового лазера осуществлялась импульсами тока амплитудой от 0 до 2 А. Лазерное излучение вводилось в одномодовое оптическое волокно, имевшее три выхода с разделением интенсивности в процентном отношении 40/40/20, подключенные к оптическому анализатору спектра, измерителю мощности и быстродействующему фотодиоду, подключенному к 50-GHz осциллографу, что обеспечило одновременное проведение спектральных и динамических измерений. Раздельная регистрация излучения с GS и ES осуществлялась путем включения в оптическую схему брэгговского фильтра, пропускавшего коротковолновую и отражавшего длинноволновую часть излучения.

Аномальные динамические характеристики КТ ППЛ, генерирующих излучение двух квантовых состояний, наблюдались нами при электрической накачке импульсами тока длительностью 30 ns с частотой повторения 100 kHz. Значения длительности импульсов накачки и частоты повторения были выбраны с целью предотвращения перегрева лазера. Необходимо особо отметить, что никаких аномальных динамических свойств КТ ППЛ нами не было обнаружено при уровнях накачки,

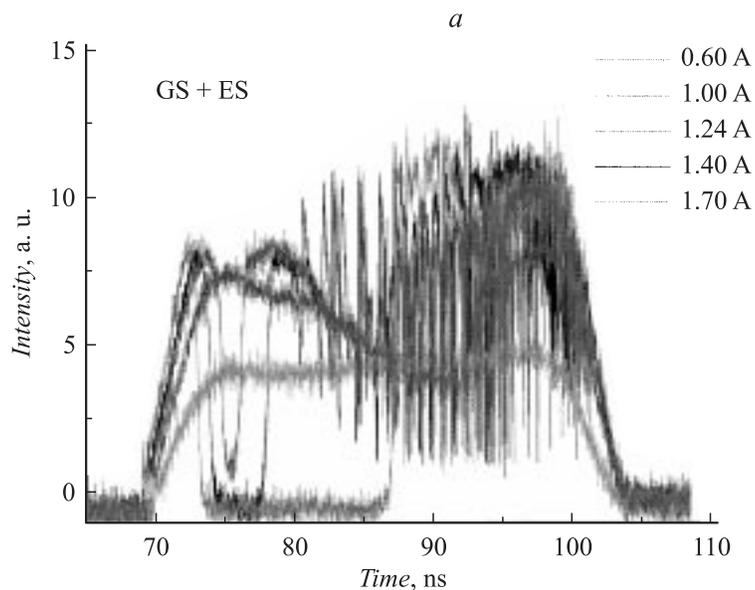


Рис. 1. Осциллограммы (*a*) и спектры (*b*) излучения КТ ППЛ при накачке импульсами тока различной амплитуды длительностью 30 ns. На вставке показана упрощенная схема экспериментальной установки.

обеспечивающих генерацию лишь с основного состояния КТ. При увеличении амплитуды импульсов накачки выше уровня, определяемого длиной ППЛ, нами наблюдалось насыщение усиления и прекращение лазерной генерации GS. По нашему мнению, наблюдаемое насыщение усиления вызывается насыщением населенности основного состояния квантовых точек, что ведет к значительному росту населенности возбужденного состояния, как можно видеть из соотношения спектральных и динамических характеристик при различных уровнях накачки (рис. 1).

Увеличение скорости заполнения ES ведет к соответствующему уменьшению скорости заполнения GS и, как следствие, обеднению основного состояния и прекращению лазерной генерации. При этом складывается ситуация, когда из-за уменьшения скорости заполнения генерация на основном состоянии КТ уже невозможна, а для генерации на возбужденном состоянии еще не накоплена необходимая концентра-

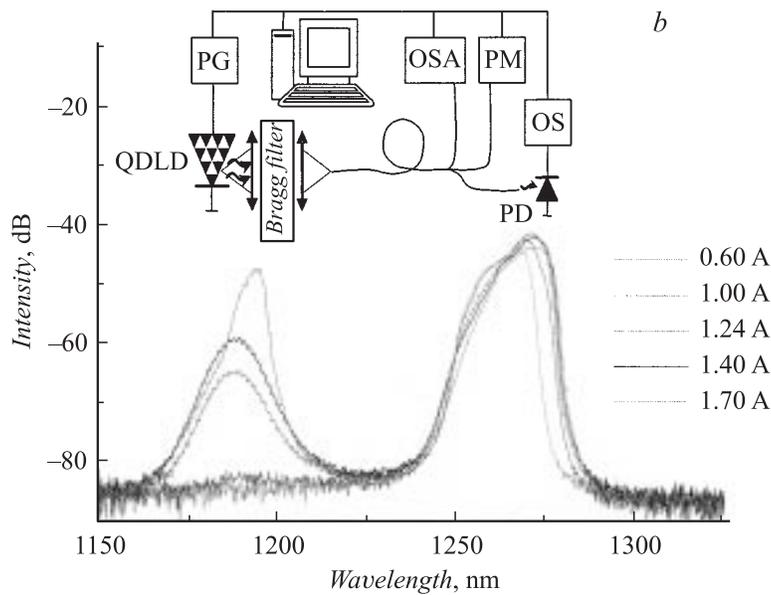


Рис. 1 (продолжение).

ция носителей. Необычайность складывающейся ситуации усиливается тем, что, несмотря на то, что электрическая накачка служит заполнению обоих состояний КТ, время, необходимое для возобновления генерации, значительно увеличивается с увеличением амплитуды импульса накачки (рис. 1, *a*). Так, при максимальной амплитуде импульсов тока накачки (2 А) время от выключения до возобновления генерации для некоторых образцов превышало 10 ns. Ниже мы подробнее обсудим эту зависимость.

После возобновления генерации в лазерном излучении наблюдалась последовательность провалов, т.н. „темных импульсов“ [5,6]. Измерения динамики спектров излучения (рис. 2) показали, что провалы длительностью 200–300 ps наблюдаются только в излучении основного состояния, в то время как возбужденное состояние излучает короткие импульсы сходной длительности, сдвинутые по времени относительно провалов приблизительно на свою полуширину (см. вставку на рис. 2, *a*).

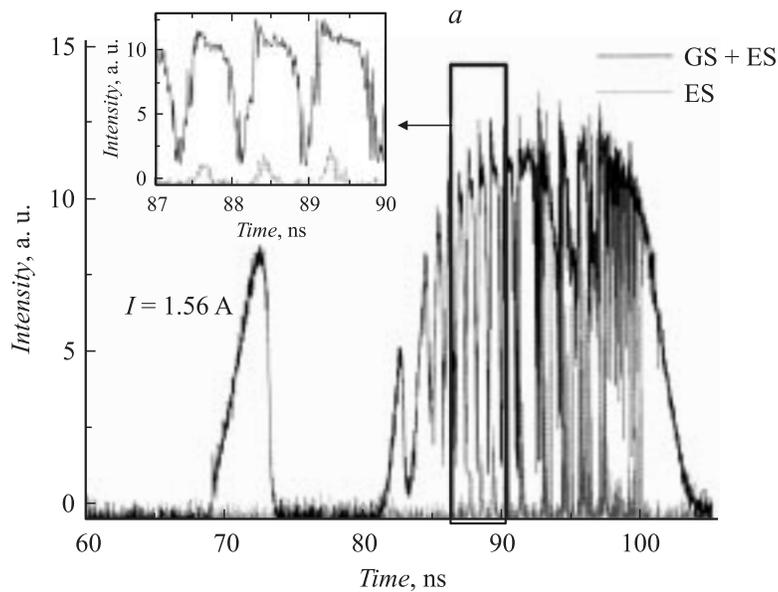


Рис. 2. Осциллограммы излучения КТ ППЛ в условиях генерации с основного и возбужденного состояний при накачке импульсами тока амплитудой 1.56 А длительностью 30 ns (*a*) и соответствующие осциллограммам спектры излучения основного и возбужденного состояний (без фильтра) и возбужденного состояния (с фильтром) (*b*).

По нашему мнению, в качестве причины этого явления следует рассматривать перераспределение концентрации носителей между основным и возбужденным состояниями КТ. Иными словами, одно состояние выступает в роли модулятора добротности или „насыщающего поглотителя“ для другого состояния. Единственным отличием от „обычного“ насыщающегося поглотителя, широко используемого для модуляции добротности и синхронизации мод в ППЛ [7], является то, что насыщение испытывает не поглощение света, а скорость заполнения квантового состояния.

Предположение о том, что механизмом модуляции добротности при возникновении пульсаций в излучении КТ лазеров является перераспределение концентрации носителей между состояниями КТ нашло свое

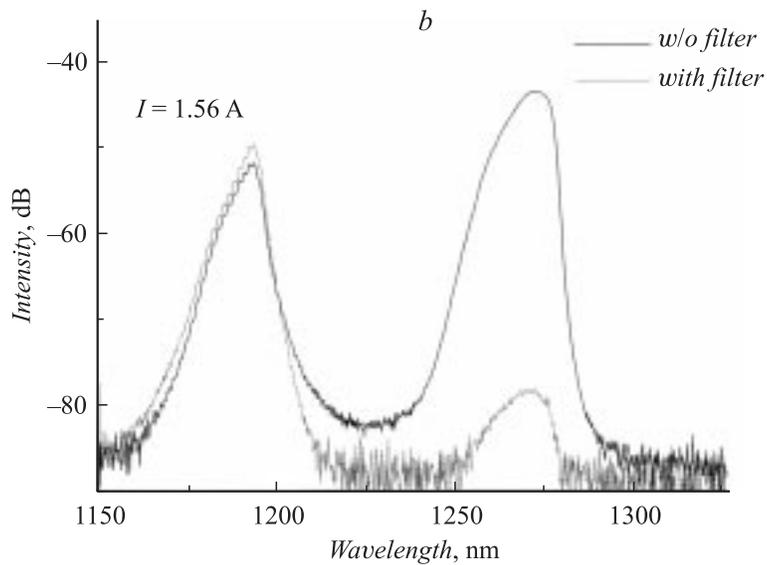


Рис. 2 (продолжение).

подтверждение при исследовании лазера, генерирующего излучение с трех квантовых состояний. „Темные импульсы“ наблюдались одновременно в излучении и GS, и ES1, причем без заметной временной задержки относительно друг друга (ср. с динамикой лазера с двумя квантовыми состояниями на рис. 2). По нашему мнению, отсутствие указанной временной задержки является следствием перераспределения концентрации носителей не между комбинацией GS и ES, как в предыдущем случае, а между комбинацией GS + ES1 и ES2. К сожалению, мощность излучения с ES2 в наших экспериментах была на несколько порядков меньше полной мощности излучения лазера и не поддавалась отдельной регистрации на осциллограмме.

Обсуждение полученных результатов следует начать с того, что, как видно из рис. 1, выключение КТ лазера происходит при достижении определенного уровня выходной мощности. Из этого можно сделать вывод о том, что выключение лазера связано с насыщением усиления, причиной которого является ограниченное количество квантовых точек

в активной области, что делает невозможным поддержание высокого усиления GS при превышении определенной концентрации GS фотонов в резонаторе. Насыщение населенности GS вызывает рост концентрации носителей на ES, однако, пока возросшая концентрация ES далека от концентрации прозрачности, ее рост вызывает лишь рост потерь, а не лазерную генерацию (рис. 2). Этот факт может быть описан как уменьшение эффективности накачки η :

$$\eta = \frac{N_{GS}}{N_{GS} + N_{ES}}, \quad (1)$$

что вызывает увеличение эффективного порога I_{th} :

$$I_{th} = \frac{I_{th0}}{\eta} = I_{th0}(1 + \beta I), \quad (2)$$

где I_{th0} — пороговый ток без воздействия обсуждаемых нелинейных эффектов, I — амплитуда импульса накачки, β — коэффициент, описывающий рост концентрации ES с увеличением тока накачки. Другими словами, присутствие ES делает насыщение усиления GS предельно важным для лазерной динамики из-за увеличения эффективного порога в силу внутреннего поглощения излучения ES, что ведет к срыву лазерной генерации. После выключения лазера большую роль начинает играть омический нагрев активной области, что ведет к дальнейшему увеличению эффективного порога из-за увеличения внутренних потерь с ростом температуры:

$$I_{th} = \frac{I_{th0}(1 + \alpha I)}{\eta} = I_{th0}(1 + (\alpha + \beta)I + \alpha\beta I^2), \quad (3)$$

где α — коэффициент увеличения внутренних потерь из-за омического нагрева (увеличение температуры активной области с током хорошо видно из красного смещения спектра на рис. 1, *b*).

Квадратичная зависимость (3) эффективного порога, найденная из простых феноменологических соображений, при подстановке в хорошо известную зависимость задержки включения Δ от тока накачки

$$\Delta = \tau_s \ln \frac{I}{I - I_{th}} \quad (4)$$

дает неплохое объяснение наблюдаемому аномальному увеличению задержки повторного включения КТ ППЛ с ростом тока накачки.

Таким образом, в настоящей работе нами проведены спектрально-разрешенные экспериментальные исследования аномальных динамических характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых точках, генерирующих излучение двух квантовых состояний. В качестве объяснения наблюдаемых явлений предложено изменение добротности лазера за счет перераспределения концентрации носителей между квантовыми состояниями.

Список литературы

- [1] *Maximov M.V., Asryan L.V., Shernyakov Yu.M.* et al. // IEEE J. Quant. El. 2001. V. 37. P. 676–683.
- [2] *Mao M.-H., Su L.-C., Wang K.-C.* et al. // 18th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society. Sidney, Australia, 2005. Conference Digest. P. 56–57.
- [3] *Cataluna M.A., Rafailov E.U., McRobbie A.D.* et al. // 18th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society. Sidney, Australia, 2005. Conference Digest. P. 870–871.
- [4] *Markus A., Chen J.X., Paranthoen C.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 1818–1820.
- [5] *Selbmann P.E., Hessler T.P., Pleumeekers J.L.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. P. 3760–3762.
- [6] *Platonov A.V., Lingk C., Feldmann J.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. P. 1177–1179.
- [7] *Avrutin E.A., Marsh J.H., Portnoi E.L.* // IEE. Proc. Optoe. 2000. V. 147. P. 251–278.