

06:07

Спонтанное длинноволновое межуровневое излучение в лазерных структурах с квантовыми точками

© Л.Е. Воробьев, Д.А. Фирсов, В.А. Шалыгин, В.Н. Тулупенко,
Ю.М. Шерняков, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш,
П.С. Копьев, И.В. Кочнев, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов,
В.М. Устинов, Ж.И. Алферов

С.-Петербургский государственный технический университет
Донбасская государственная машиностроительная академия,
Краматорск, Украина
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 6 января 1998 г.

Впервые наблюдалось спонтанное излучение, связанное с внутризонными переходами дырок и электронов между уровнями размерного квантования в вертикально связанных квантовых точках (QD), а также с переходами из состояний в квантовой яме на уровень в QD. Спектральная область излучения лежала в дальнем ИК диапазоне ($\lambda \cong 10-20 \mu\text{m}$). Длинноволновое излучение регистрировалось только при одновременной генерации коротковолнового межзонного излучения ($\lambda \cong 0.94 \mu\text{m}$) в лазерных InGaAs/AlGaAs QD структурах при токах, больших порогового.

Введение. На межподзонных переходах носителей заряда в квантовых ямах (QW) уже создан ряд приборов, таких как детекторы и модуляторы дальнего ИК (FIR) диапазона ($\lambda > 10 \mu\text{m}$) [1], квантовый каскадный [2] и "фонтанный" [3] лазеры. Разработка методов выращивания структур с самоорганизованными квантовыми точками (QD) открывает новые возможности в создании приборов на FIR область спектра. Однако до сих пор оптические межуровневые переходы в QD не изучались, за исключением работы по фотоиндуцированному поглощению FIR излучения при межуровневых переходах дырок и электронов в самоорганизованных InAs/GaAs QD [4].

В настоящей работе впервые наблюдалось спонтанное излучение в лазерных InGaAs/AlGaAs QD структурах при переходах дырок и электронов в QD типа "уровень-уровень" и "состояния в QW-уровень в

QD". FIR излучение было зарегистрировано только при одновременной генерации коротковолнового (NIR) межзонного ($h\nu \cong \varepsilon_g$, $\lambda \cong 0.94 \mu\text{m}$) излучения при токах вблизи порога генерации ($I > I_m$). Исследование спонтанного излучения является первой ступенью создания лазера FIR диапазона на межуровневых переходах дырок (электронов) в QD.

Образцы и методика эксперимента. Образцы представляли собой лазерные структуры со слоями вертикально связанных QD, описанные в [5]. Активная область такого лазера представляет собой слой $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ с самоорганизованными квантовыми точками $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$. Число слоев равно 10. Толщина слоя равна 5 nm и сравнима с размером (высотой) квантовых точек в направлении, перпендикулярном слоям, так что QD связаны в вертикальном направлении. При расстоянии между зеркалами резонатора примерно $1100 \mu\text{m}$ пороговая плотность тока j_{th} имела при $T = 300 \text{ K}$ значение примерно 290 A/cm^2 (пороговый ток $I_{th} \cong 0,6 \text{ A}$). Длина волны генерации составляла около $0.94 \mu\text{m}$.

Стимулированное излучение ближнего ИК диапазона (NIR) регистрировалось с помощью фотодиода ФД8-К. Длинноволновое (FIR) излучение было обнаружено с помощью фотоприемников $\text{Ge}\langle\text{Gu}\rangle$ и $\text{Si}\langle\text{B}\rangle$, имеющих при температурах вблизи температуры жидкого гелия область чувствительности приближенно в диапазоне $\lambda = 5\text{--}29 \mu\text{m}$. Для отсечки коротковолнового (NIR, $\lambda \cong 0.94 \mu\text{m}$) излучения использовались фильтры из InSb и Ge . Более точно спектральный диапазон излучения дальнего ИК диапазона определялся с помощью фильтров из BaF_2 , NaCl и KBr . Излучение наблюдалось в импульсном режиме, длительность импульсов тока и излучения составляла 200 ns .

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 показаны зависимости сигналов фотоприемников для стимулированного излучения ближнего ИК диапазона (NIR, $\lambda \cong 0.94 \mu\text{m}$) и спонтанного излучения дальнего ИК диапазона (FIR) из QD лазерной структуры. С помощью системы фильтров было установлено, что FIR излучение сосредоточено в диапазоне $10\text{--}20 \mu\text{m}$. Отметим, что зависимость интенсивности спонтанного FIR излучения от тока лазера носит пороговый характер, причем пороговый ток близок к пороговому току генерации NIR излучения I_{th} , который при низких температурах был равен 0.33 A , что примерно в два раза меньше I_{th} при комнатной температуре FIR излучение удается зарегистрировать только одновременно с генерацией NIR излучения ($\lambda \cong 0.94 \mu\text{m}$). Отметим, что FIR излучение не удалось обнаружить в аналогичных структурах, в которых не появлялась генерация NIR излучения.

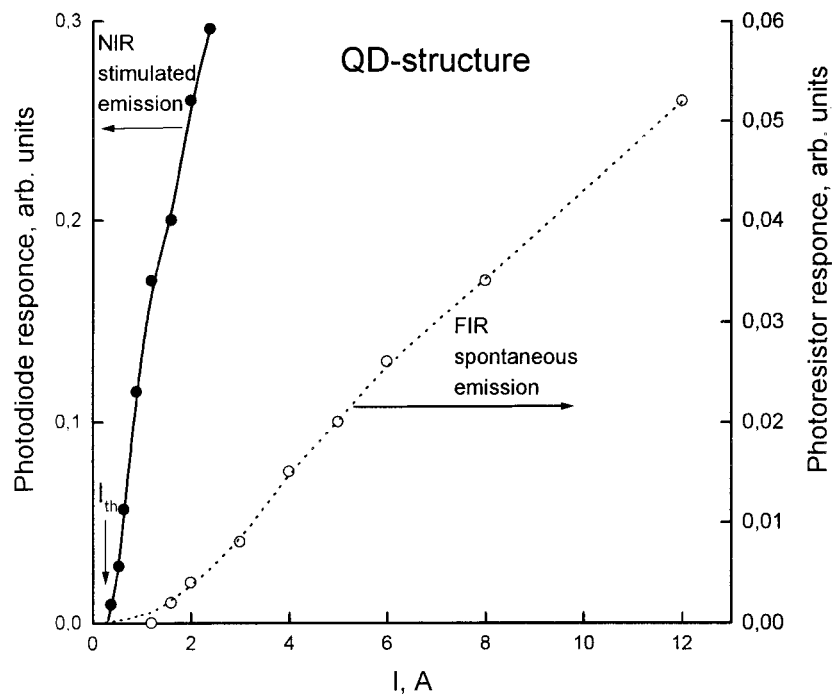


Рис. 1. Зависимость интенсивности спонтанного излучения дальнего ИК диапазона (FIR, $\lambda \cong 10\text{--}20\ \mu\text{m}$) и стимулированного излучения ближнего ИК диапазона (NIR, $\lambda = 0.92\ \mu\text{m}$) от тока через лазерную структуру с InGaAs/AlGaAs квантовыми точками. Температура $T \cong 30\ \text{K}$. NIR излучение регистрировалось Si фотодиодом, FIR излучение — Ge(Cu) фоторезисторами. Указано пороговое значение тока I_{th} для NIR и FIR излучения.

Возникновение спонтанного излучения можно пояснить с помощью схемы переходов на рис. 2. Согласно расчету [6] для InAs/GaAs квантовых точек пирамидальной формы с характерным линейным размером основания 8–12 nm имеется один $|000\rangle$ электронный уровень и три дырочных уровня $|000\rangle$, $|100\rangle$, $|001\rangle$. При инжекции электронов (дырок) в слой AlGaAs происходит их захват в состоянии в смачивающем слое за время порядка нескольких пикосекунд [7,8] и последующий переход на электронный (дырочный) уровень в квантовой

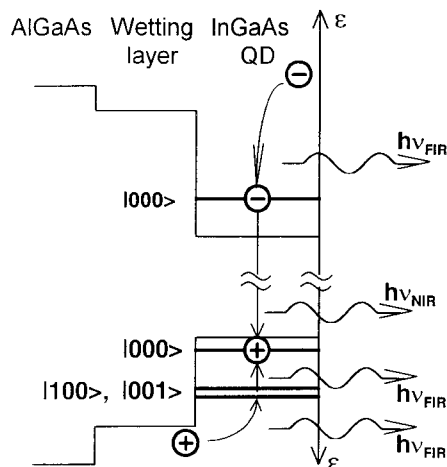


Рис. 2. Схема оптических переходов электронов и дырок между уровнями размерного квантования InGaAs/AlGaAs квантовых точек и между состояниями в слое AlGaAs и уровнями квантовых точек, приводящих к спонтанному излучению FIR диапазона. Опустошение невозбужденных (основных) уровней электронов и дырок происходит благодаря индуцированному межзонному излучению NIR диапазона.

точке. Для дырок возможны также межуровневые переходы в QD типа $|100\rangle \rightarrow |000\rangle$ и $|001\rangle \rightarrow |000\rangle$. Переходы из верхних состояний на нижние могут происходить с испусканием фононов [7–9], с эмиссией кванта света в диапазоне $10\text{--}20\ \mu\text{m}$ или (при высоких концентрациях носителей заряда) при процессах типа Оже [10]. Согласно [7], время перехода между возбужденным и основным состоянием дырок составляет примерно 40 ps (десятки ps [8]). В работе [4] при возбуждении электронно-дырочных пар светом обнаружены пики поглощения для переходов между уровнями дырок в QD в области 115 meV и для переходов электронов с уровня QD в континуум в области 190 meV, причем насыщение поглощения света дырками происходит при интенсивности возбуждающего света вблизи $100\ \text{W}/\text{cm}^2$, что означает заполнение уровней дырок в InAs/GaAs QD. Если предположить, что картина уровней и процессы в системе связанных InGaAs/AlGaAs QD подобны, то следует ожидать, что заполнение уровней в InGaAs/AlGaAs

QD осуществляется при той же интенсивности света. При пороговых токах $I_{th} \cong 0.3 \text{ A}$ ($J_{th} \cong 140 \text{ A/cm}^2$) создается приблизительно в два раза больше электронно-дырочных пар, чем возбуждающим светом интенсивности $J^\nu \cong 100 \text{ W/cm}^2$. При этом основные состояния QD оказываются заполненными и оптические переходы на них дырок (электронов) из возбужденных состояний QD или состояний в QW (рис. 2) невозможны. Такие переходы возникают только в условиях генерации межзонного NIR излучения, которое частично опустошает основные состояния. Таким образом, появляется спонтанное FIR излучение. Его интенсивность пропорциональна числу носителей заряда в возбужденных состояниях N_{ex} и вероятности того, что основные состояния свободны. Число N_{ex} зависит от тока линейно, а вероятность заполнения нижних состояний уменьшается после возникновения генерации и опустошения нижних уровней стимулированным излучением. По мере роста интенсивности NIR излучения (или тока) в генерацию вовлекается все большее число квантовых точек, отличающихся размером. Об этом свидетельствует, например, различная величина дифференциальной квантовой эффективности $\eta^\nu = dJ_{NIR}^\nu/dI$ при разных температурах T (с повышением T от низких температур до 300 К η^ν растет). По указанным причинам интенсивность FIR излучения J_{FIR}^ν может расти по более быстрому закону, чем линейный, что подтверждает и эксперимент. Согласно нашим данным, при $I > I_{th} : J_{FIR}^\nu \propto I^2$.

При дальнейшем росте тока через структуру зависимость $J_{FIR}^\nu(I)$ замедляется ($J_{FIR}^\nu \propto I$), что, возможно, связано с выбросом дырок (электронов) их верхних состояний мощным стимулированным излучением и усилением роли Оже-процессов [10].

Нами обнаружено также FIR излучение из лазерных $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ структур с квантовыми ямами. Пороговый ток начала генерации межзонного NIR излучения был равен примерно 0.25 А. Излучение было примерно на порядок слабее и не имело порогового характера. Согласно расчетам для $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ QW с шириной ямы $L_w = 7 \text{ nm}$, для электронов в QW имеются два уровня размерного квантования, энергетический интервал между которыми $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = 108 \text{ meV}$, а для дырок — три уровня с энергиями $\varepsilon_1(HH_1) = 12 \text{ meV}$, $\varepsilon_2(HH_2) = 45 \text{ meV}$ и $\varepsilon_3(LH_1) = 79 \text{ meV}$. Переходы между подзонами размерного квантования электронов и дырок в QW также могут дать излучение в диапазоне $\lambda = 10 - 20 \mu\text{m}$. Число носителей заряда в возбужденных состояниях (верхних подзонах)

пропорционально току через структуру. В нижних (основных) подзонах всегда имеются незаполненные состояния, в которые переходят дырки (или электроны). Поэтому интенсивность FIR излучения примерно пропорциональна току: $J_{\text{FIR}}^{\nu} \propto I$ и не имеет порога, что и наблюдается экспериментально. Следует, однако, заметить, что время жизни носителей заряда в возбужденных состояниях QW по данным разных авторов составляет примерно доли–единицы пикосекунд, что более чем на порядок меньше, чем для QD. Поэтому интенсивность FIR излучения для структур с QW должна быть меньше, чем для структур с QD. Действительно, экспериментально найдено, что J_{FIR}^{ν} примерно на порядок слабее для QW, чем для QD.

Таким образом, впервые наблюдалось спонтанное излучение, связанное с переходами носителей заряда между уровнями в квантовых точках, в условиях генерации межзонного коротковолнового излучения в лазерных QD структурах. Большое время жизни в возбужденных состояниях электронов и дырок в QD (десятки пикосекунд) по сравнению с аналогичным временем для QW (около одной пикосекунды) позволяет надеяться на получение инверсии населенности дырок или электронов в условиях генерации межзонного излучения (и опустошения основных уровней QD этим излучением) и создание FIR лазера на межуровневых переходах носителей заряда в QD.

Работа поддержана частично РФФИ, грант 96–02–17404; INTAS–RFBR, грант 00615i96; Министерством науки и технологий, программа ”Физика твердотельных наноструктур”, грант 96–1029, а также Федеральной целевой программой ”Интеграция”, проект № 75.

Список литературы

- [1] *Intersubband transitions in quantum wells* / Ed. E. Rosencher, B. Levine // NATO ASI Series. Ser. B. Physics. V. 288. Plenum Press. N.-Y. and London, 1992.
- [2] *Faist J., Capasso F., Sivco D.L. et al.* // Science. 1994. V. 264. P. 553–556.
- [3] *Gauthier O.-Lafaye, Sauvage S., Boucaud P. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70. N 24. P. 3197–3199; Proceedings of Intern. Sympos. ”Nanostructures: Physics and Technology”. St. Petersburg, 1997. P. 567–570.
- [4] *Sauvage S., Boucaud P., Julien F.H. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. N 19. P. 2785–2787.

- [5] *Maximov M.V., Shernyakov Yu.M., Ledentsov N.N.* et al. // Symposium "Nanostructures: Physics and Technology". St. Petersburg, 1997. P. 202–205.
- [6] *Grundmann M., Stier O., Bimberg D.* // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. P. 11969–11981.
- [7] *Heitz R., Veit M., Ledentsov N.N.* et al. // Phys. Rev. B. 1997. V. 56. P. 10435–10445.
- [8] *Ledentsov N.N.* // The Physics of Semiconductors / Ed. by M. Scheffler and R. Zimmermann. Singapore: "World Scientific", 1996. V. 1. P. 19–26.
- [9] *Steer M.J., Mowbray D.J., Skolnick M.S.* et al. // The Physics of Semiconductors. / Ed. by M. Scheffler and R. Zimmermann. Singapore. "World Scientific", 1996. V. 2. P. 1389–1392.
- [10] *Sandmann J.H.H., von Plessen G, Feldman J.* et al. // Program and Abstracts of 10 Int. Conf. on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors. Berlin, 1997. Report MoD3.