

СПОНТАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ДАЛЬНОГО ИК ДИАПАЗОНА ПРИ ПЕРЕХОДАХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА МЕЖДУ УРОВНЯМИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Л.Е.Воробьев¹⁾, Д.А.Фирсов, В.А.Шалыгин, В.Н.Тулупенко⁺,
Ю.М.Шерняков*, Н.Н.Леденцов*, В.М.Устинов*, Ж.И.Алферов*

Санкт-Петербургский государственный технический университет
195251 Санкт-Петербург, Россия

⁺Донбасская государственная машиностроительная академия
343913 Краматорск, Украина

* Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН
194021 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 15 января 1998 г.

Обнаружено спонтанное излучение дальнего инфракрасного диапазона ($\lambda \cong 10...20$ мкм) из диодных структур с вертикально связанными InGaAs/AlGaAs квантовыми точками, обусловленное переходами дырок и электронов между уровнями размерного квантования в квантовых точках, а также с переходами из континуума на уровень в квантовой точке. Такое излучение наблюдается только при одновременной генерации межзонного коротковолнового ($\lambda \cong 0.94$ мкм) лазерного излучения и, как и коротковолновое излучение, имеет пороговый характер по току. Спонтанное длинноволновое излучение обнаружено также в лазерных InGaAs/GaAs структурах с квантовыми ямами. Интенсивность этого излучения примерно на порядок слабее, чем в структурах с квантовыми точками. Порог по току у него отсутствует.

PACS: 42.55.Px, 78.66.-w

Введение. Межподзонные оптические переходы носителей заряда в квантовых ямах исследованы достаточно подробно, в результате этих исследований уже созданы детекторы и модуляторы инфракрасного излучения [1]. Среди последних достижений этого направления следует отметить реализацию квантового каскадного лазера [2], основанного на модифицированной идее авторов работ [3], и создание "фонтанного" лазера [4]. Новые перспективы в разработке приборов на дальнюю инфракрасную (far infrared, FIR) область спектра ($\lambda > 10$ мкм) открывает изучение переходов носителей заряда между уровнями квантовых точек (quantum dots, QD). До настоящего времени, однако, в QD исследовались только процессы поглощения света при переходах между локализованными состояниями электронов в QD и сплошным спектром, а также при переходах дырок между различными уровнями в QD [5].

В настоящей работе обнаружено спонтанное излучение при переходах электронов из континуума на уровни QD и при межуровневых переходах дырок в квантовых точках. Необходимым условием для наблюдения этого физического процесса является одновременная генерация излучения в QD через основные состояния локализованных электронов и дырок ($h\nu$ близко к ε_g), которая обеспечивает опустошение нижних (основных) уровней электронов и дырок в QD при высоких уровнях токовой инжекции электронно-дырочных пар в QD-гетеролазере. Наблюдение спонтанного излучения можно рассматривать как первый этап создания лазера дальнего ИК диапазона на межуровневых переходах носителей заряда в QD.

¹⁾ e-mail: LVor@phsc2.stu.neva.ru

Образцы и методика эксперимента. Образцы представляли собой лазерные структуры с вертикально-связанными QD, описанные в [6]. Активная область такого лазера представляет собой слои $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ с самоорганизованными квантовыми точками $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$. Число слоев равно 10. Толщина слоя $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ равна 5 нм и сравнима с размером квантовых точек в направлении, перпендикулярном слоям. Таким образом, QD туннельно-связаны в вертикальном направлении. Стимулированное излучение соответствовало ближнему инфракрасному (near infrared, NIR) диапазону: длина волны генерации составляла около 0.94 мкм (при температуре 300 К). Для регистрации этого излучения использовался кремниевый фотодиод ФД8-К. Излучение наблюдалось в импульсном режиме, длительность импульсов тока составляла 200 нс. При расстоянии между зеркалами резонатора примерно 1100 мкм пороговая плотность тока j_{th} имела при $T = 300$ К значение примерно 290 А/см^2 (пороговый ток $I_{th} = 0.6 \text{ А}$). Диэлектрические зеркала не наносились.

С целью обнаружить FIR излучение из этих же структур были применены фотоприемники $\text{Ge} < \text{Cu} >$ и $\text{Si} < \text{B} >$, имеющие при температурах вблизи температуры жидкого гелия области чувствительности приблизительно в диапазоне $\lambda = 5...29$ мкм. Для отсеки NIR излучения ($\lambda \cong 0.94$ мкм) на входе фотоприемников были установлены фильтры из InSb и Ge . Более точно спектральный состав FIR излучения определялся с помощью фильтров из BaF_2 , NaCl и KBr . Исследования FIR излучения проводились при $T = 30$ К (также в импульсном режиме).

Параллельно были проведены исследования спонтанной эмиссии FIR излучения из лазерных $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ структур с квантовыми ямами (quantum well, QW) шириной 7 нм, которые были сконструированы для генерации стимулированного NIR излучения.

Результаты и их обсуждение. На рис.1а показаны зависимости сигналов фотоприемников для стимулированного NIR излучения и спонтанного FIR излучения из QD лазерной структуры. С помощью системы фильтров было установлено, что FIR излучение сосредоточено в диапазоне 10...20 мкм. Отметим, что зависимость интенсивности спонтанного FIR излучения от тока лазера носит пороговый характер, причем пороговый ток близок к пороговому току генерации стимулированного NIR излучения I_{th} , который при низких температурах был равен 0.33 А (примерно в два раза меньше, чем при комнатной температуре). Таким образом, FIR излучение удастся зарегистрировать только одновременно с генерацией NIR излучения ($\lambda \cong 0.94$ мкм). Была исследована целая серия аналогичных образцов с QD-лазерными структурами. В тех образцах, в которых отсутствовала генерация стимулированного NIR излучения, не наблюдалось и эмиссии спонтанного FIR излучения.

Затем аналогичные исследования были проведены на лазерных $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ структурах с квантовыми ямами (рис.1б). Пороговый ток генерации стимулированного NIR излучения для QW-структур был равен примерно 0.25 А. В этих структурах нами также была обнаружена эмиссия спонтанного FIR излучения. В отличие от QD-структур, FIR излучение было примерно на порядок слабее и не имело порогового характера.

Дадим качественное объяснение наблюдавшимся закономерностям. Обсудим сначала возможность эмиссии спонтанного FIR излучения для QD-лазерных структур. Предположим, что в исследованных $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ квантовых точках структура уровней подобна той, что рассчитана в [6] для InAs/GaAs квантовых точек пирами-

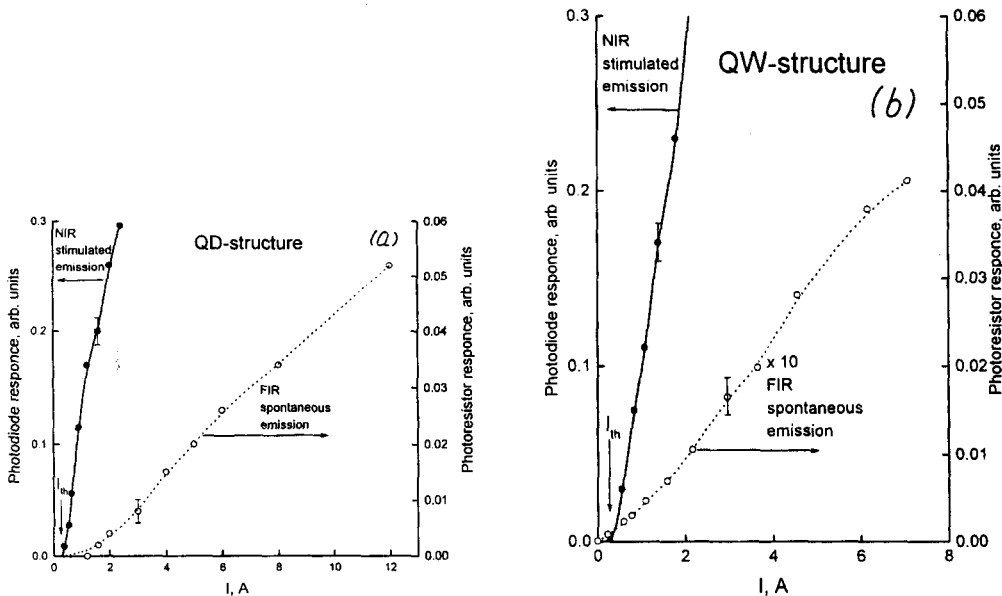


Рис.1. Зависимости интенсивности спонтанного FIR излучения ($\lambda \approx 10...20$ мкм) и стимулированного NIR излучения ($\lambda = 0.94$ мкм) от тока через структуру. Температура $T = 30$ К. NIR излучение регистрировалось Si фотодиодом, FIR излучение – Ge < Cu > или S < B > фоторезисторами. а. Для структуры с InGaAs/AlGaAs квантовыми точками (I_{th} – пороговый ток как для NIR, так и для FIR излучения). б. Для структуры с InGaAs/GaAs квантовыми ямами (I_{th} – пороговый ток для NIR излучения, FIR излучение порога не имеет)

дальней формы с характерным линейным размером основания 10...12 нм. Для таких квантовых точек имеется один электронный уровень $|000\rangle$ (в использованных нами структурах возможно существование двух электронных уровней), а также четыре дырочных уровня: $|000\rangle$, $|100\rangle$, $|001\rangle$ и $|110\rangle$ (см. рис.2а). При инжекции электронов (дырок) в слой AlGaAs происходит их захват в состоянии в смачивающем слое (wetting layer) за время порядка нескольких пикосекунд [8, 9] и последующий переход на электронный (дырочный) уровень в квантовой точке. Для дырок возможны также межуровневые переходы в QD типа $|100\rangle \rightarrow |000\rangle$, $|001\rangle \rightarrow |000\rangle$ и $|110\rangle \rightarrow |000\rangle$. Переходы из верхних состояний на нижние могут происходить с испусканием фононов [8–10], с эмиссией кванта света в диапазоне 10...20 мкм или (при высоких концентрациях носителей заряда) в результате процессов типа Оже [11]. Согласно [8], время перехода между возбужденным и основным состояниями дырок составляет примерно 40 пс (десятки пс [9]).

В работе [5] при возбуждении в InAs/GaAs QD электронно-дырочных пар межзонным светом обнаружены пики поглощения для переходов между уровнями дырок в QD в области 115 мэВ и для переходов электронов с уровня QD в континуум в области 190 мэВ. При интенсивности возбуждающего света ~ 100 Вт/см² наблюдалось насыщение поглощения света дырками, что означает полное заполнение основных уровней дырок в QD. Если предположить, что процессы в системе связанных InGaAs/AlGaAs QD подобны, то следует ожидать, что заполнение основных уровней в InGaAs/AlGaAs QD осуществляется при той же интенсивности света. При пороговых токах $I_{th} \approx 0.3$ А ($j_{th} \approx 140$ А/см²) создается приблизительно в два

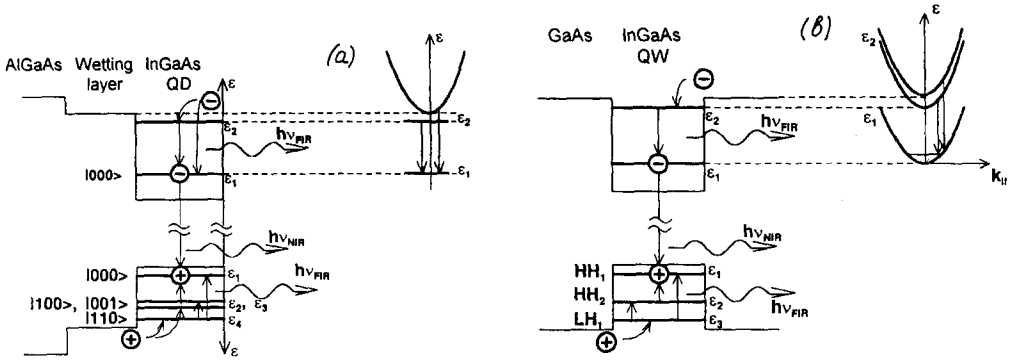


Рис.2.а. Схема оптических переходов электронов и дырок между уровнями размерного квантования InGaAs/AlGaAs квантовых точек и между состояниями в слое AlGaAs и уровнями квантовых точек, приводящих к спонтанному излучению FIR диапазона. Опустошение невозбужденных (основных) уровней электронов и дырок происходит благодаря индуцированному межзонному излучению NIR диапазона. б. То же, но для лазерных структур с InGaAs/GaAs квантовыми ямами. Энергии уровней отсчитываются от дна ям. Электронные уровни: $\epsilon_1 = 48$ мэВ, $\epsilon_2 = 156$ мэВ; глубина ямы для электронов 163 мэВ. Дырочные уровни: $\epsilon_1 = 12$ мэВ, $\epsilon_2 = 45$ мэВ и $\epsilon_3 = 79$ мэВ; глубина ямы для тяжелых дырок 80 мэВ

раза больше электронно-дырочных пар, чем возбуждающим светом интенсивности $J^{\nu} \cong 100$ Вт/см². При этом основные состояния дырок (электронов) в QD оказываются заполненными и оптические переходы на них из возбужденных состояний в QD или состояний в QW (рис.2а) невозможны.

При токе накачки, превышающем I_{th} , происходит эмиссия стимулированного NIR излучения и соответствующие межзонные переходы частично опустошают основные состояния электронов и дырок в QD. Переходы на них электронов и дырок из возбужденных состояний порождают спонтанное FIR излучение. Его интенсивность пропорциональна числу носителей заряда в возбужденных состояниях N_{ex} и вероятности того, что нижние состояния опустошены. Число N_{ex} зависит от тока линейно, а вероятность опустошения нижних состояний увеличивается с ростом интенсивности стимулированного NIR излучения.

По мере роста тока накачки в генерацию NIR излучения вовлекается все большее число квантовых точек, отличающихся размером. Об этом свидетельствует, например, относительно низкая величина дифференциальной квантовой эффективности $\eta^{\nu} = dJ_{NIR}^{\nu}/dI$ при низких температурах (с повышением T от 30 К 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 $I > I_{th}$: $J_{FIR}^{\nu} \propto I^2$ (см. рис.1а). При дальнейшем росте тока через структуру зависимость $J_{FIR}^{\nu}(I)$ постепенно переходит в линейную, что, возможно, связано с выбросом дырок (электронов) из верхних состояний мощным стимулированным излучением и усилением роли оже-процессов [11].

Обсудим теперь наблюдавшиеся закономерности эмиссии спонтанного FIR излучения для QW лазерных структур. Согласно расчетам, в In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs QW с шириной ямы $L_W = 7$ нм имеются два уровня размерного квантования для электронов (рис.2б), энергетический интервал между которыми $\epsilon_2 - \epsilon_1 = 108$ мэВ. Для дырок имеются три уровня: $\epsilon_1 = 12$ мэВ, $\epsilon_2 = 45$ мэВ (подзоны тяжелых дырок HH_1 и HH_2) и $\epsilon_3 = 79$ мэВ (подзоны легких дырок LH_1). Переходы между подзонами

размерного квантования электронов и дырок в QW также могут дать излучение в диапазоне $\lambda = 10...20$ мкм. 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) (рис.2a). Поэтому интенсивность FIR излучения примерно пропорциональна току: $J_{FIR}^V \propto I$ и не имеет порога, что и наблюдается экспериментально (рис.1b). Кроме того, следует 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 FIR излучение примерно на порядок слабее для QW, чем для QD.

Таким образом, наблюдалось спонтанное излучение, связанное с переходами носителей заряда между уровнями в квантовых точках, в условиях генерации межзонного коротковолнового излучения в лазерных QD-структурах. В отличие от аналогичного излучения из структур с QW, FIR излучение из QD-структур примерно на порядок сильнее и имеет четко выраженный пороговый характер. Сравнение интенсивности излучения для обоих случаев показывает, что время жизни носителей заряда в QD по крайней мере на порядок больше, чем в QW. Это позволяет надеяться на получение инверсии населенности дырок или электронов в условиях генерации межзонного излучения ближнего инфракрасного диапазона и создание на основе QD-структур новых, более эффективных, светоизлучающих приборов FIR диапазона, в частности, FIR лазера на межуровневых переходах носителей заряда в QD.

Работа поддержана частично Российским фондом фундаментальных исследований, грант 96-02-17404; INTAS-REBR, грант 00615i96; Министерством науки и технологий, программа "Физика твердотельных наноструктур", грант 96-1029, а также Федеральной целевой программой "Интеграция", проект N°75.

-
1. *Intersubband transitions in quantum wells*, Eds. E.Rosencher and B.Levine, NATO ASI Series, Ser. B, Physics **288**, Plenum Press, N.-Y. and London, 1992.
 2. J.Faist, F.Capasso, D.L.Sivco et al., *Science* **264**, 553 (1994).
 3. П.Ф.Казаринов, Р.А.Суриц, ФТП **5**, 797 (1971); **6**, 148 (1972).
 4. O.Gauthier-Lafaye, S.Sauvage, P.Boucaud et al., *Appl. Phys. Lett.* **70**, 3197 (1997); *Proc. of Intern. Sympos. Nanostructures: Physics and Technology*, St.Petersburg, 1997, p.567.
 5. S.Sauvage, P.Boucaud, F.H.Julien et al., *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2785 (1997).
 6. M.V.Maximov, Yu.M.Shernyakov, N.N.Ledentsov et al., *Intern. Symposium "Nanostructures: Physics and Technology"*, St.Petersburg, 1997, p.202.
 7. M.Grundmann, O.Stier, and D.Bimberg, *Phys. Rev. B* **52**, 11969 (1995).
 8. R.Heitz, M.Veit, N.N.Ledentsov et al., *Phys. Rev. B* **56**, 10435 (1997).
 9. N.N.Ledentsov, In: *The Physics of Semiconductors*, Eds. M.Scheffler and R.Zimmermann, World Scientific, Singapore, V.1, 1996, p.19.
 10. M.J.Steer, D.J.Mowbray, M.S.Skolnick et al., in: *The Physics of Semiconductors*, Eds. M.Scheffler and R.Zimmermann, World Scientific, Singapore, V.2, 1996, p.1389.
 11. J.H.H.Sandmann, G. von Plessen, J.Feldman et al., *Program and Abstracts of 10 Int. Conf. on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors*, Berlin, report MoD3 (1997).