03,12,09

Однофотонное излучение квантовых точек InAs/AlGaAs

© М.В. Рахлин[1], К.Г. Беляев[1], Г.В. Климко[1], И.С. Мухин[2,3], С.В. Иванов[1], А.А. Торопов[1]

[1] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
[3] Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: maximrakhlin@mail.ru

(Поступила в Редакцию 2 ноября 2017 г.)

Представлены результаты исследования излучательных характеристик гетероструктур с квантовыми точками (КТ) InAs/AlGaAs, выращенных с помощью молекулярно пучковой эпитаксии. Свойства одиночных КТ определялись с помощью спектроскопии микро-фотолюминесценции в цилиндрических мезаструктурах диаметром 200−1000 nm или колончатых микрорезонаторах с распределенными брэгговскими зеркалами. Однофотонный характер излучения подтвержден измерениями и анализом корреляционной функции второго порядка $g^2(\tau)$ в широком спектральном диапазоне от 630 до 730 nm.

Авторы из ФТИ им. Иоффе благодарят за финансовую поддержку Фонд перспективных исследований. Исследования свойств однофотонных излучателей видимого спектрального диапазона поддержаны Российским научным фондом (проект № 14-22-00107).

DOI: 10.21883/0000000000

1. Введение

В последнее десятилетие особое внимание уделяется разработке источников света с неклассической однофотонной статистикой на основе эпитаксиальных полупроводниковых квантовых точек (КТ) с целью их возможного применения в системах квантовой криптографии и квантовых вычислений. Коммерчески доступные приборы такого типа в настоящее время отсутствуют, что связано со сложностью воспроизводимого изготовления образцов с одиночными КТ, а также возможностью выделения узких неперекрывающихся линий излучения одиночных экситонов и биэкситонов.

Гетероструктуры с КТ InAs/AlGaAs являются хорошими кандидатами для создания источников однофотонного излучения и „запутанных“ фотонных пар видимого диапазона [1]. Достоинства данной системы заключаются в использовании хорошо отработанных методов роста гетероструктур в системе (In, Ga, Al) As, высокой квантовой эффективности, а также возможности достижения однофотонного излучения в видимом спектральном диапазоне с длиной волны порядка и больше 620 nm [2–4].

В данной работе представлены результаты оптических исследований источников видимого однофотонного излучения на основе гетероструктур и микрорезанаторных структур с КТ InAs/AlGaAs. Оптические свойства одиночных КТ исследовались с помощью спектроскопии микро-фотолюминесценции (μ-ФЛ). Однофотонная природа излучения подтверждена измерениями корреляционной функции второго порядка $g^2(0)$, величина которой не превышала 0.25.

2. Образцы и экспериментальные методики

Исследуемые гетероструктуры с КТ InAs были выращены с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) методом Странски–Крастанова на подложках GaAs (001)с буферным слоем GaAs толщиной 0.2 μm. Поверх буферного слоя структуры содержали барьеры $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ толщиной 200 и 50 nm соответственно, между которыми вставлялась плоскость КТ InAs номинальной толщиной 1.7 монослоя. Микро-резонаторные полупроводниковые гетероструктуры были выращены на положке GaAs (001) и включали КТ InAs в барьерах $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$, сформированные в центре одноволнового микро-резонатора, выращенного на брэгговском зеркале, состоящем из набора пар четвертьволновых слоев Al0.9Ga0.1As/$Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ (30 пар). Верхнее зеркало (24 пары) было изготовлено эпитаксиально в том же ростовом процессе.

Излучение одиночных КТ исследовалось с помощью установки μ-ФЛ в цилиндрических мезаструктурах размером 200−1000 nm в диаметре, которые были изготовлены посредством электронной литографии и реактивного ионного травления. Образец помещался в гелиевый криостат с пьезо-подвижками Attocube XYZ, позволяющими удерживать позицию выбранной мезы по отношению к лазерному пятну на протяжении достаточно долгого времени (несколько h). Для оптического возбуждения мезаструктур и колончатых микрорезонаторов использовалось непрерывное лазерное излучение с длиной волны $\lambda = 405$ и $\lambda = 664$ nm соответственно. Плотность

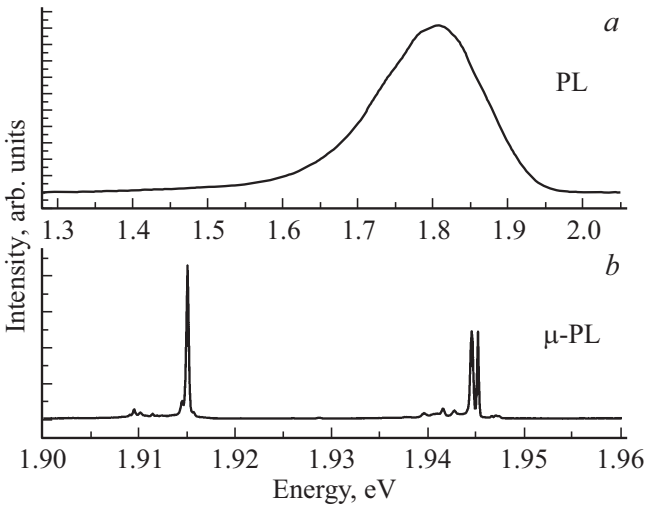


Рис. 1. Нормированный спектр ФЛ КТ $InAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As$, измеренный при $T = 77$ K (a). Спектр μ-ФЛ $InAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As$, измеренный при $T = 8$ K в мезе размером 500 nm (b).

мощности возбуждения составляла $\sim 4\,W/cm^2$. Корреляционные измерения производились в схеме Хэнбери Браун-Твисса с использованием однофотонных лавинных фотодиодов с временным разрешением порядка 40 ps.

3. Результаты

Типичный спектр ФЛ КТ $InAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As$, измеренный при 77 K, представлен на рис. 1, *a*. Структуры демонстрируют широкий пик ФЛ КТ, который лежит в диапазоне от ~ 1.4 eV до ~ 2 eV (890–620 nm), тем самым позволяя получить однофотонное излучение из одиночных КТ в достаточно широком спектральном диапазоне от видимого красного до ближнего инфракрасного света. Спектры μ-ФЛ, измеренные при 8 K, демонстрируют набор узких линий, относящихся к излучению экситонов и других электрон-дырочных комплексов — биэкситонов и трионов (рис. 1, *b*). Оценка числа узких одиночных линий в спектре μ-ФЛ, измеренном в мезе

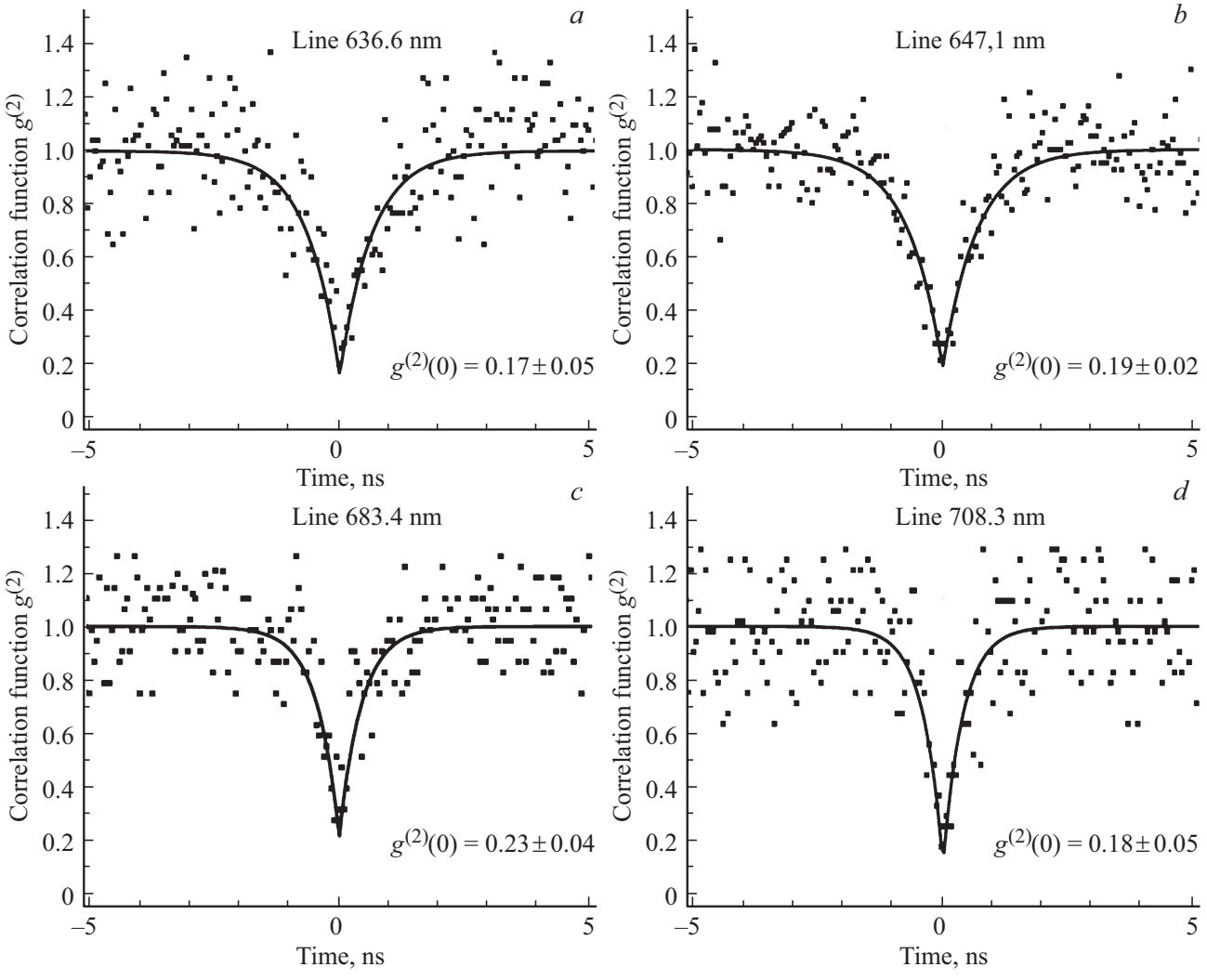


Рис. 2. Нормированные корреляционные функции второго порядка однофотонного излучения, измеренные для различных одиночных линий в гетероструктурах $InAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ при $T = 8$ K в мезах размером 500nm (a–d).

размером 500 nm, составила несколько десятков, что соответствует плотности КТ $\sim 1.2 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$. Данная плотность КТ достаточно мала для создания однофотонного источника, в основе которого лежит излучение одиночной КТ.

Корреляционная функция второго порядка $g^2(\tau)$, измеренная для различных одиночных КТ InAs/AlGaAs при $T = 8\,\mathrm{K}$, представлена на рис. 2. Данная функция нормирована согласна формуле: $C_N(t) = c(t)/(N_1 N_2 \omega T)$, где $c(t)$ — число совпадений, $N_{1,2}$ — количество фотонов в секунду на каждом из детекторов, ω — временное разрешение и T — общее время накопления [5]. Измеренные корреляционные функции являются характеристикой экситонных линий и могут быть аппроксимированы с помощью формулы

$$g^2(\tau) = a - b_1 \exp(-|\tau|/c_1). \qquad (1)$$

Значение параметра c_1 дает оценку ширины провала корреляционной функции при нулевой задержке, которая напрямую соотносится со временем жизни излучающего экситона. Для зависимостей на рис. (a)–(d) аппроксимированные значения параметра c_1 составили 650, 690, 450 и 460 ps соответственно. Среднее значение числа фотонов, регистрируемых одним детектором в секунду, для данных структур составило $\sim 10^4$, что с учетом аппаратной функции измерительного оборудования соответствует интенсивности однофотонного излучения на первой линзе порядка 160 kHz. Полученные значения $g^2(0)$ не превышают 0.25, что свидетельствует о неклассическом однофотонном характере излучения.

С целью увеличения эффективности вывода фотонов были изготовлены микро-резонаторные структуры с брэгговскими зеркалами. Спектр отражения данной структуры демонстрирует резонансный провал с полушириной 1.7 meV на энергии 1.71 eV (рис. 3, a). Эти данные хорошо согласуются с измеренным спектром μ-ФЛ

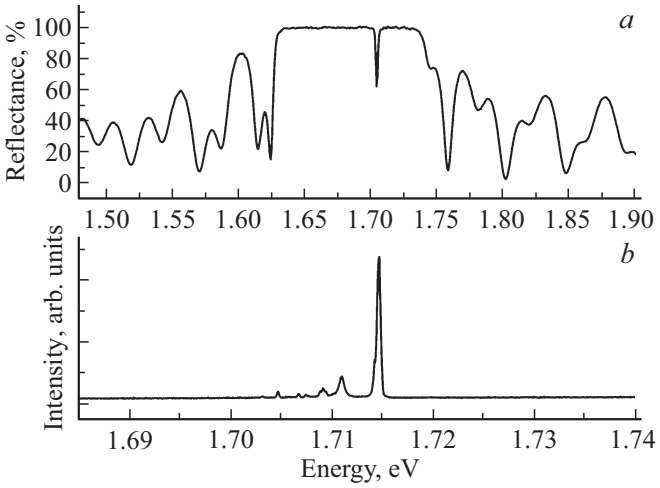


Рис. 3. Спектр отражения микро-резонаторной гетероструктуры с брэгговскими зеркалами (a). Спектр μ-ФЛ, измеренный при $T = 8\,\mathrm{K}$ в мезе размером 1000 nm (b).

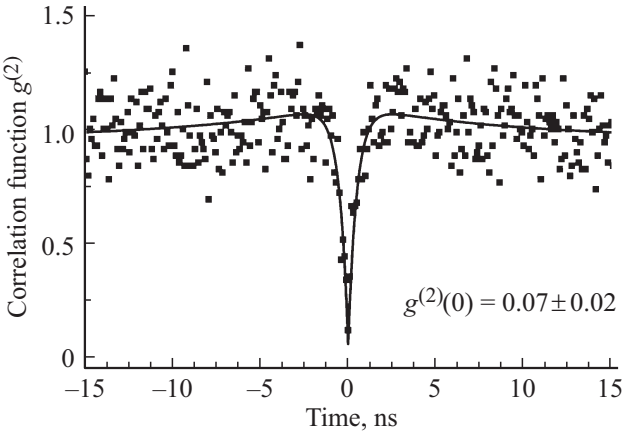


Рис. 4. Нормированная корреляционная функция второго порядка однофотонного излучения, измеренная в микрорезонаторной гетероструктуре с брэгговскими зеркалами при $T = 8\,\mathrm{K}$ в мезе размером 1000 nm.

(рис. 3, b), демонстрирующим усиление отдельной линии непосредственно в данном энергетическом диапазоне.

Рис. 4 демонстрирует корреляционную функцию, измеренную в микро-резонаторной гетероструктуре с брэгговскими зеркалами при $T = 8\,\mathrm{K}$ с использованием мезы размером 1000 nm. Данная функция характерна для излучения триона, так как вокруг провала „антигруппировки“ наблюдаются два симметричных пика „группировки“ [6]. Измеренная корреляционная функция может быть аппроксимирована с помощью выражения

$$g^2(\tau) = a - b_1 \exp(-|\tau|/c_1) + b_2 \exp(-|\tau|/c_2). \qquad (2)$$

Полученное при подгонке c_1 значение составило 490 ps. Эта характеристика отражает время жизни ФЛ, тогда как величина параметра $c_2 = 9.1\,\mathrm{ns}$ позволяет оценить ширину пика „группировки“, связанную со временем перезарядки триона. Значение $g^2(0) = 0.07 \pm 0.02$ подтверждает однофотонную природу излучения. Наличие брэгговских зеркал позволило увеличить среднее число регистрируемых фотонов в секунду одним детектором до $4 \cdot 10^4$. При учете аппаратной функции интенсивность излучения на первой линзе составила 640 kHz.

4. Заключение

В заключение в работе исследованы излучательные характеристики цилиндрических мезаструктур с КТ InAs/AlGaAs, изготовленных с помощью МПЭ, как при наличии встроенных брэгговских зеркал, так и при их отсутствии. Была получена достаточно низкая плотность КТ, позволяющая проводить исследования характеристик одиночных экситонов и других электрон-дырочных комплексов. Наличие брэгговских зеркал позволило увеличить число регистрируемых фотонов в 4 раза. Значение корреляционной функции второго порядка $g^2(0)$ для всех исследуемых структур составило менее 0.25, что

позволяет использовать КТ InAs/AlGaAs при конструировании различных систем квантовой фотоники, функционирующих в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах.

Список литературы

[1] S.C.M. Grijseels, J. vanBree, P.M. Koenraad, A.A. Toropov, G.V. Klimko, S.V. Ivanov, C.E. Pryor, A.Yu. Silov. J. OfLum. **176**, 95 (2016).
[2] C. Santori, D. Fattal, J. Vuckovic, G.S. Solomon, Y. Yamamoto. Nature **419**, 594 (2002).
[3] S. Rodt, A. Schliwa, K. Potschke, F. Guffarth, D. Bimberg. Phys. Rev. B **71**, 155325 (2005).
[4] J.J. Finley, D.J. Mowbray, M.S. Skolnick, A.D. Ashmore, C. Baker, A.F.G. Monte, M. Hopkinson. Phys. Rev. B **66**, 153316 (2002).
[5] R. Brouri, A. Beveratos, J.-P. Poizat,P. Grangier. Opt. Lett. **25**, 1294 (2000).
[6] G. Sallen, A. Tribu, T. Aichele, R. Andre, L. Besombes, C. Bougerol, S. Tatarenko, K. Kheng, J.Ph. Poizat. Phys. Rev. B **80**, 085310 (2009).