

## Люминесценция одиночных квантовых точек InAs и AlInAs

В. А. Гайслер, И. А. Дерезев, А. В. Гайслер, Д. В. Дмитриев

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирск, Россия*

### Аннотация

Исследована система квантовых точек на основе твердых растворов  $Al_xIn_{1-x}As / Al_yGa_{1-y}As$ . Использование широкозонных твердых растворов  $Al_xIn_{1-x}As$  в качестве основы квантовых точек позволяет существенно расширить спектральный диапазон излучения в коротковолновую область, включая участок длин волн вблизи 770 нм, представляющий интерес для разработки аэрокосмических систем квантовой криптографии. Методом криогенной микрофотолюминесценции изучены оптические характеристики одиночных  $Al_xIn_{1-x}As$  квантовых точек, выращенных по механизму Странского-Крастанова. С использованием интерферометра Хэнбери Брауна – Твисса исследована статистика излучения экситонных состояний одиночных квантовых точек. Функция парных фотонных корреляций отчетливо демонстрирует субпуассоновский характер статистики излучения, что является прямым подтверждением возможности создания излучателей одиночных фотонов на основе  $Al_xIn_{1-x}As$  квантовых точек. На участке длин волн вблизи 770 нм исследована тонкая структура экситонных состояний квантовых точек. Показано, что величина расщепления экситонных состояний сравнима с естественной шириной экситонных линий, что представляет большой интерес для разработки излучателей пар запутанных фотонов на основе  $Al_xIn_{1-x}As$  квантовых точек.

### Ключевые слова

полупроводниковые квантовые точки, экситон, биэкситон, тонкая структура экситонных состояний, субпуассоновская статистика, излучатели одиночных фотонов, излучатели фотонных пар, запутанных по поляризации

### Для цитирования

Гайслер В. А., Дерезев И. А., Гайслер А. В., Дмитриев Д. В. Люминесценция одиночных квантовых точек InAs и AlInAs // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 4. С. 117–125. DOI 10.25205/2541-9447-2018-13-4-117-125

## Luminescence of InAs and AlInAs Single Quantum Dots

V. A. Gaisler, I. A. Derebezov, A. V. Gaisler, D. V. Dmitriev

*A. V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS  
Novosibirsk, Russian Federation*

### Abstract

A system of quantum dots on the basis of  $Al_xIn_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$  solid solutions has been studied. The usage of broadband  $Al_xIn_{1-x}As$  solid solutions as the basis of quantum dots makes it possible to expand considerably the spectral emission range into the short-wave region, including the wavelength region near 770 nm being of interest for the design of aerospace systems of quantum cryptography. The optical characteristics of single  $Al_xIn_{1-x}As$  quantum dots grown according to the Stranski-Krastanov mechanism are studied by the cryogenic microphotoluminescence method. Hanbury Brown and Twiss experiment has been carried out to measure the photon statistics. Photon correlation function demonstrates a clear photon antibunching effect, what is a direct evidence of single photon emission by  $Al_xIn_{1-x}As$  single quantum dots. The fine structure of exciton states of quantum dots is studied in the wavelength region near 770 nm. It is shown that the splitting of exciton states is comparable with the natural width of exciton lines, which is of great interest for the design of emitters of pairs of entangled photons on the basis of  $Al_xIn_{1-x}As$  quantum dots.

### Keywords

semiconductor quantum dots, exciton, biexciton, fine structure splitting, subpoisson statistic, single photon emitters, emitters of entangled photon pairs

## For citation

Gaisler V. A., Derebezov I. A., Gaisler A. V., Dmitriev D. V. Luminescence of InAs and AlInAs Single Quantum Dots. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 4, p. 117–125. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2018-13-4-117-125

Излучатели одиночных фотонов и излучатели фотонных пар, запутанных по поляризации, являются ключевыми элементами разрабатываемых квантовых оптических информационных систем и систем квантовой криптографии [1; 2]. Одним из перспективных вариантов практической реализации данных излучателей является использование самоорганизованных полупроводниковых квантовых точек [3–7]. На основе одиночных полупроводниковых квантовых точек разрабатываются эффективные полностью твердотельные излучатели одиночных фотонов как с оптической, так и с токовой накачкой [8–10]. Одиночные квантовые точки могут являться и излучателем пар запутанных фотонов, что происходит в процессе каскадной рекомбинации биэкситона и экситона в случае, если экситонные состояния вырождены по энергии или же их расщепление  $\Delta E_{FS}$  не превышает естественную ширину экситонных уровней  $\Gamma_x = \hbar/\tau_x$ , где  $\tau_x$  – время жизни экситона [7; 11–14]. В этом случае излучается пара фотонов, запутанных по поляризации [7; 11].

В настоящее время наиболее изученной является система InAs квантовых точек, уникальной особенностью которой является широкий спектральный диапазон, достигающий  $\sim 400$  нм и включающий в себя первый и второй телекоммуникационные стандарты ( $\sim 0,9, 1,3$  мкм). С использованием одиночных InAs квантовых точек продемонстрировано однофотонное излучение и излучение пар запутанных фотонов на длинах волн вблизи первого телекоммуникационного стандарта [5; 7; 8–16].

Расширение спектрального диапазона излучения квантовых точек в коротковолновую область представляет интерес как для исследований физики новых низкоразмерных полупроводниковых систем, так и для создания источников излучения систем атмосферной или аэрокосмической квантовой криптографии. Оптимальным участком длин волн для данных систем признан участок вблизи 770 нм [1], что обусловлено максимальной чувствительностью кремниевых фотоприемников в данном диапазоне, минимальным поглощением атмосферного слоя и минимальными флуктуациями локального показателя преломления воздушной среды, что необходимо для сохранения поляризации фотонов.

В данной работе исследованы механизмы формирования и оптические характеристики квантовых точек на основе твердых растворов  $Al_xIn_{1-x}As / Al_yGa_{1-y}As$ . Использование широкозонных твердых растворов  $Al_xIn_{1-x}As$  в качестве основы квантовых точек позволяет существенно расширить спектральный диапазон излучения в коротковолновую область, включая участок длин волн вблизи 770 нм, представляющий интерес для разработки аэрокосмических систем квантовой криптографии. С использованием интерферометра Хэнбери Брауна-Твисса установлен субпуассоновский характер статистики излучения экситонных состояний, что является прямым подтверждением возможности создания излучателей одиночных фотонов на основе  $Al_xIn_{1-x}As$  квантовых точек. На участке длин волн вблизи 770 нм исследована тонкая структура экситонных состояний квантовых точек. Показано, что для субансамбля  $Al_xIn_{1-x}As$  квантовых точек выполняется условие  $\Delta E_{FS} \approx \Gamma_x$ , необходимое для генерации пар запутанных фотонов.

Исследованные структуры выращивались на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Riber C21» на подложках GaAs с ориентацией (001). Были изучены  $Al_xIn_{1-x}As / Al_yGa_{1-y}As$  квантовые точки с составом в интервале  $x = 0–0,3$  с шагом 0,05, при этом состав слоев  $Al_yGa_{1-y}As$  задавался согласно  $y \approx 1,7 \cdot x$ . Слои  $Al_xIn_{1-x}As$  квантовых точек выращивались по механизму Странского-Крастанова при температуре  $T = 505$  °C [3–7]. На поверхности  $Al_yGa_{1-y}As$  выращивался слой  $Al_xIn_{1-x}As$  критической толщины ( $\sim 2$  монослоев (МС)), по достижении которой начинал формироваться массив самоорганизованных  $Al_xIn_{1-x}As$  квантовых

точек. Скорость роста  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  слоев составляла 0,045 МС/с. Момент перехода от двумерного механизма роста к трехмерному контролировался методом дифракции быстрых электронов. По достижении критической толщины процесс роста  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  прекращался, и в течение времени  $\tau_{GI}$  формировался массив  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  квантовых точек по механизму Оствальда [19–22], после чего слой  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  КТ зарастивался  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ . Время ростовой паузы  $\tau_{GI} = 10$  с.

Структуры  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As} / \text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  квантовых точек исследовались методами макро- и микрофотолюминесценции, площадь пятна возбуждающего лазера на поверхности структуры составляла 3 000 и 3 мкм<sup>2</sup> соответственно. Для возбуждения люминесценции использовалось излучение Nd:YAG лазера с длиной волны 532 нм, работающего в непрерывном режиме. Люминесценция регистрировалась с помощью однократного монохроматора, оснащенного охлаждаемым Ge-pin фотодиодом (макролюминесценция), или с использованием тройного монохроматора «TriVista-555» с охлаждаемой матрицей Si фотоприемников (микролюминесценция).

Интерферометр Хэнбери Брауна-Твисса был собран по классической схеме [5; 7]. Излучение квантовой точки, проходя первый монохроматор «TriVista-555», направлялось на светоделительную неполяризирующую призму «50/50 CCM1-BS014», которая разделяла падающий световой поток строго поровну. Излучение в каждом из каналов регистрировалось счетчиками фотонов на основе Si лавинных фотодиодов «PerkinElmer SPCM-AQRH-15». Статистика излучения квантовых точек анализировалась с использованием счетчика совпадений «PicoHarр 300».

На рис. 1, а приведены спектры макролюминесценции трех структур, содержащих  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As} / \text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  квантовые точки. На рис. 1, б горизонтальными отрезками обозначен спектральный диапазон излучения  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As} / \text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  квантовых точек различного состава при  $T = 295$  К. Представленные данные демонстрируют существенное расширение спектрального диапазона излучения квантовых точек в коротковолновую область (до 200 нм), включая участок длин волн вблизи 770 нм, представляющий интерес для разработки атмосферных систем квантовой криптографии. Данные, приведенные на рис. 1, были получены на участках исследуемых структур, содержащих массивы  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As} / \text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  КТ высокой плотности ( $d \geq 10^{10}$  см<sup>-2</sup>).

Для исследования характеристик одиночных квантовых точек требуются области с низкой плотностью  $d \leq 10^8$  см<sup>-2</sup>. В работе для решения этой задачи использовался следующий подход. Рост слоя  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  осуществлялся без вращения подложки. Это задавало существенный градиент скорости роста данного слоя по поверхности структуры. В итоге, согласно данным атомно-силовой микроскопии, структура содержала участки квантовых точек различной плотности в диапазоне от нулевой до предельно высокой  $d \approx 10^{11}$  см<sup>-2</sup>.

Наличие областей с низкой плотностью квантовых точек на подготовленных структурах позволяет уверенно адресоваться к одиночным квантовым точкам и исследовать их оптические характеристики с использованием методики микрофотолюминесценции. В данной работе при исследовании люминесценции одиночных квантовых точек наибольшее внимание уделялось участку длин волн вблизи 770 нм, наиболее подробно были исследованы области с низкой плотностью квантовых точек структуры  $\text{Al}_{0,1}\text{In}_{0,9}\text{As} / \text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{As}$ . Интерпретация пиков люминесценции одиночных квантовых точек проводилась с использованием зависимостей интенсивностей пиков от мощности излучения возбуждающего лазера. При наименьших мощностях возбуждения в спектрах люминесценции в первую очередь проявляются пики экситонов X, и зависимость их интенсивности от мощности линейна. При больших мощностях в спектрах появляются пики биэкситонов XX, интенсивность которых возрастает по квадратичному закону от плотности мощности лазера [5; 7].

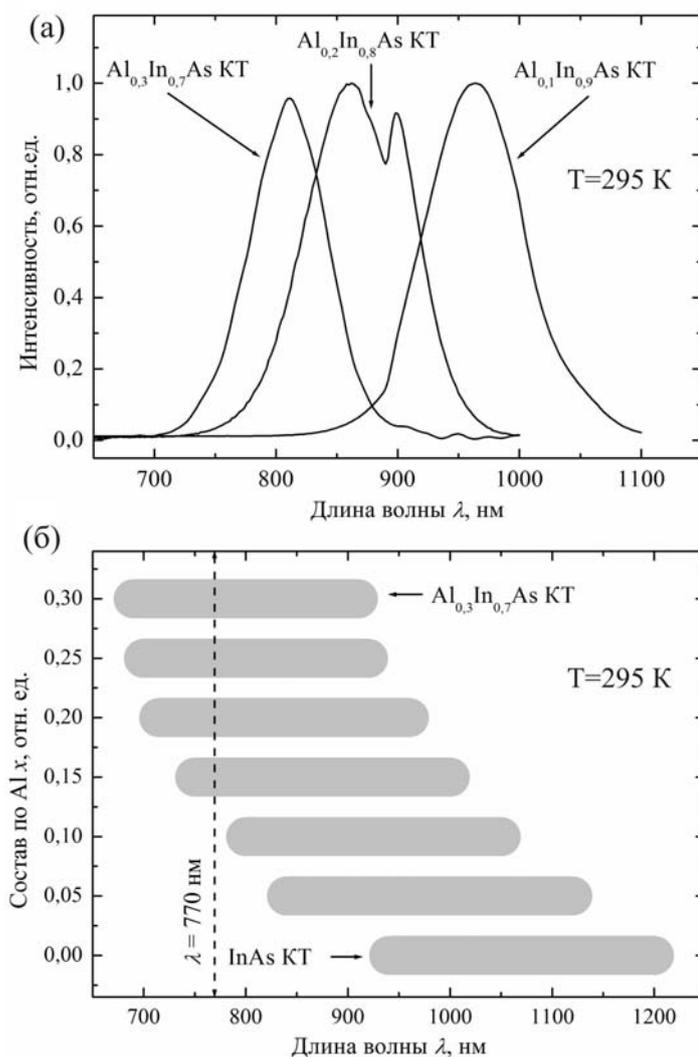


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции трех структур, содержащих  $\text{Al}_{0,1}\text{In}_{0,9}\text{As}$ ,  $\text{Al}_{0,2}\text{In}_{0,8}\text{As}$  и  $\text{Al}_{0,3}\text{In}_{0,7}\text{As}$  квантовые точки (а). Спектральный диапазон излучения  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  /  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  квантовых точек различного состава в диапазоне  $x$  от 0 до 0,3 (б)

Fig. 1. Photoluminescence spectra of three structures containing  $\text{Al}_{0,1}\text{In}_{0,9}\text{As}$ ,  $\text{Al}_{0,2}\text{In}_{0,8}\text{As}$  and  $\text{Al}_{0,3}\text{In}_{0,7}\text{As}$  QDs (a). Spectral emission range of  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  /  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  QDs with different compositions  $x$  from 0 to 0.3 (b)

Статистика излучения квантовых точек анализировалась на основе измерения парных фотонных корреляций, получаемых с помощью интерферометра Хэнбери Брауна-Твисса. Нами измерялся коррелятор второго порядка, или коррелятор интенсивностей  $I$ :

$$g^2(\tau) = \frac{\langle I_1(t)I_2(t+\tau) \rangle}{\langle I_1(t) \rangle \langle I_2(t) \rangle}. \quad (1)$$

В (1) угловые скобки означают усреднение по ансамблю,  $\tau$  – время задержки в регистрируемой паре фотонов, задаваемое электронным блоком интерферометра Хэнбери Брауна-Твисса.

При пуассоновской статистике излучения  $g^2(\tau) = 1$ , что означает полное отсутствие корреляции излучения фотонов [5; 7]. Для суперпуассоновского излучения, где проявляется эффект группировки (bunching) фотонов,  $1 < g^2(\tau) < 2$ . При субпуассоновской статистике излучения (разгруппировка фотонов (antibunching))  $g^2(\tau) < 1$ . В идеальном случае, когда рассматриваются однофотонные Фоковские состояния и задержка регистрации пар фотонов  $\tau = 0$ , интерферометр Хэнбери Брауна-Твисса не регистрирует совпадений:  $g^2(0) = 0$ .

На вставке рис. 2, а приведен участок спектра излучения квантовых точек, выделяемый первым монохроматором «TriVista555», который был исследован на интерферометре Хэнбери Брауна-Твисса. Как видно из рисунка, в спектре доминирует один пик с длиной волны  $\lambda \approx 770$  нм, относящийся к рекомбинации экситонного состояния одиночной квантовой точки  $\text{Al}_{0,1}\text{In}_{0,9}\text{As} / \text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{As}$ . Необходимо отметить, что наряду с этим пиком в спектре также проявляются менее интенсивные пики, относящиеся, предположительно, к биэкситонным и трионным состояниям данной квантовой точки или других квантовых точек.

На рис. 2, а представлена зависимость  $g^2(\tau)$ , измеренная для данного спектрального участка излучения. При  $\tau = 0$  зависимость  $g^2(\tau)$  имеет ярко выраженный минимум,  $g^2(0) \approx 0,46$ , что указывает на субпуассоновский тип статистики излучения. Конечное быстродействие счетчиков фотонов, шумы Si лавинных фотодиодов, используемых в интерферометре Хэнбери Брауна-Твисса, а также проявление других квантовых точек являются причинами того, что при  $\tau = 0$   $g^2(0) > 0$ .

На зависимости  $g^2(\tau)$  слева и справа от точки  $\tau = 0$  проявляются участки с  $g^2(\tau) > 1$  (суперпуассоновская статистика излучения). Этот эффект, предположительно, может быть объяснен проявлением биэкситонных и трионных состояний исследуемой квантовой точки, излучение которых скоррелировано с излучением экситонного состояния.

В идеальных квантовых точках оптически активные экситоны, образованные основными электронными и дырочными состояниями с моментами  $(+1/2; -3/2)$  и  $(-1/2; +3/2)$ , вырождены по энергии. В реальных квантовых точках это вырождение снимается за счет отклонения формы от идеальной, а также влияния пьезопотенциала, индуцированного встроенными механическими напряжениями [5; 7]. Величина расщепления экситонных уровней  $\Delta E_{FS}$  определяется набором факторов – как, например, степень отклонения формы квантовых точек от идеальной и влияние пьезопотенциала, значение которого возрастает с увеличением размера квантовых точек [7; 15; 16]. При  $\Delta E_{FS}$ , значительно превосходящих  $\Gamma_X$ , излучение экситона и биэкситона линейно поляризовано вдоль кристаллографических направлений  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$ . Соответственно, спектры люминесценции, записанные для поляризаций вдоль направлений  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$ , будут содержать пики экситонов  $X[110]$ ,  $X[1\bar{1}0]$  и биэкситонов  $XX[110]$ ,  $XX[1\bar{1}0]$ , смещенных друг относительно друга, на величину  $\Delta E_{FS}$ , что позволяет непосредственно из спектров излучения определять параметр расщепления экситонных состояний  $\Delta E_{FS}$ . В данной работе величина  $\Delta E_{FS}$  определялась как разница энергий фотонов  $X[110]$  и  $X[1\bar{1}0]$ , отвечающих экситонной рекомбинации в квантовой точке.

Как отмечалось, идеальные квантовые точки с вырожденными по энергии экситонными состояниями ( $\Delta E_{FS} = 0$ ) и квантовые точки с малым расщеплением экситонных состояний ( $\Delta E_{FS} \approx \Gamma_X = \hbar/\tau_X$ ) могут быть источниками пар запутанных фотонов [7]. При выполнении этих условий в процессе каскадной рекомбинации биэкситона и экситона излучаются пары фотонов, запутанных по поляризации. Согласно литературным данным время жизни экситона  $\tau_X$  при криогенных температурах составляет  $\sim 10^{-9}$  с [5–7; 23], что задает ширину экс-

тонного пика  $\Gamma_X$  на уровне  $10^{-6}$  эВ. Таким образом, для разработки излучателей фотонных пар представляют интерес квантовые точки, в которых величина  $\Delta E_{FS}$  не превышает нескольких микроэлектронвольт. Для поиска квантовых точек, отвечающих данному требованию, погрешность определения  $\Delta E_{FS}$  должна быть также на уровне единиц микроэлектронвольт.

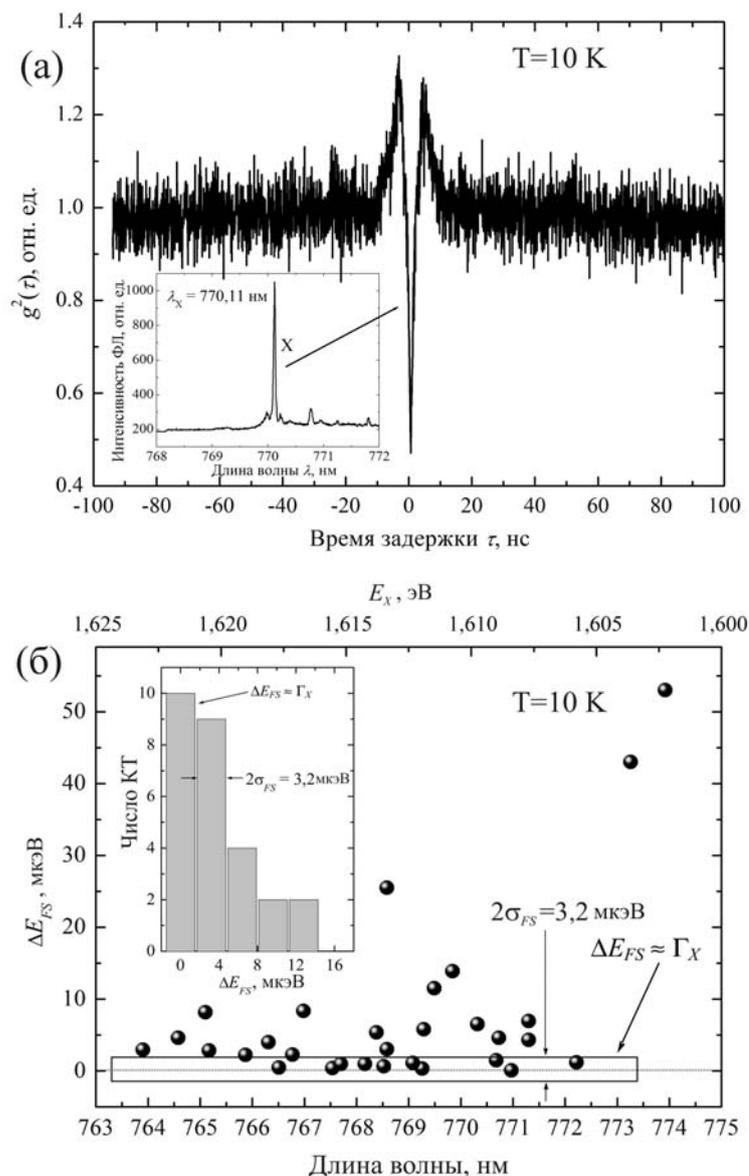


Рис. 2. Функция парных фотонных корреляций  $g^2(\tau)$ , на вставке участок спектра излучения  $\text{Al}_{0,1}\text{In}_{0,9}\text{As}/\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{As}$  квантовой точки, исследуемый с использованием интерферометра Хэнбери Брауна-Твисса (а). Расщепление экситонных состояний  $\Delta E_{FS}$  для 30  $\text{Al}_{0,1}\text{In}_{0,9} / \text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{As}$  КТ (б). В прямоугольной рамке выделены экспериментальные точки, для которых  $\Delta E_{FS}$  сравнимо с естественной шириной экситонных состояний

Fig. 2. Second-order correlation measurement  $g^2(t)$ , the inset displays a micro-photoluminescence spectrum of a  $\text{Al}_{0,1}\text{In}_{0,9}\text{As} / \text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{As}$  QD (a). Splitting of exciton states for 30  $\text{Al}_{0,1}\text{In}_{0,9} / \text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{As}$  QDs. The inset shows the histogram of the distribution of the number of QDs versus for the interval from 0 to 16  $\mu\text{eV}$ ; the column width is twice the measurement error 3.2  $\mu\text{eV}$ , comparable with the natural width of exciton levels (b)

В работе для увеличения точности определения параметра  $\Delta E_{FS}$  экспериментальные контуры пиков люминесценции аппроксимировались контурами Лоренца. Максимум контура Лоренца принимался за максимум пика. С использованием данной процедуры погрешность в определении параметра  $\Delta E_{FS}$  составляла  $\sigma_{FS} = \pm 1,6$  мкэВ, что сравнимо с естественной шириной экситонных пиков  $\Gamma_X$ .

В диапазоне длин волн  $770 \pm 5$  нм были исследованы характеристики 30 одиночных квантовых точек системы  $Al_{0,1}In_{0,9}As / Al_{0,24}Ga_{0,76}As$ . Полученные экспериментальные данные по параметру  $\Delta E_{FS}$  для этих квантовых точек представлены на рис. 2, б. Из рисунка видно, что в ряде квантовых точек расщепление экситонных состояний значительно, и максимальная зарегистрированная величина составляет  $\Delta E_{FS} \approx 50$  мкэВ. При этом большая часть квантовых точек характеризуется  $\Delta E_{FS} \leq 10$  мкэВ. И, наконец, примерно для 30 % исследованных  $Al_{0,1}In_{0,9}As / Al_{0,24}Ga_{0,76}As$  квантовых точек выполняется условие  $\Delta E_{FS} \approx \Gamma_X$ . На рис. 2, б эта группа квантовых точек отмечена прямоугольной рамкой. На вставке рис. 2, б приведена гистограмма распределения числа квантовых точек от  $\Delta E_{FS}$  для интервала  $\Delta E_{FS}$  от  $-1,6$  до  $16$  мкэВ, ширина столбца равна удвоенной погрешности измерений  $3,2$  мкэВ, сравнимой с естественной шириной экситонных уровней  $\Gamma_X$ . Как видно из гистограммы, максимум распределения приходится на квантовые точки с  $\Delta E_{FS} = 0 \pm 1,6$  мкэВ. Очевидно, что данная выборка квантовых точек представляет большой интерес для создания излучателей фотонных пар на основе  $Al_xIn_{1-x}As$  квантовых точек.

Таким образом, в данной работе исследована система квантовых точек на основе твердых растворов  $Al_xIn_{1-x}As / Al_yGa_{1-y}As$ . Использование широкозонных твердых растворов  $Al_xIn_{1-x}As$  в качестве основы КТ позволило существенно расширить спектральный диапазон излучения в коротковолновую область, включая участок длин волн вблизи  $770$  нм, представляющий интерес для разработки аэрокосмических систем квантовой криптографии.

С использованием интерферометра Хэнбери Брауна-Твисса установлен субпуассоновский характер статистики излучения экситонных состояний, что является прямым подтверждением возможности создания излучателей одиночных фотонов на основе  $Al_xIn_{1-x}As$  квантовых точек.

Методом криогенной микрофотолюминесценции изучены оптические характеристики одиночных  $Al_xIn_{1-x}As$  КТ. На участке длин волн вблизи  $770$  нм исследована тонкая структура экситонных состояний квантовых точек и показано, что величина расщепления экситонных состояний сравнима с естественной шириной экситонных линий, что представляет большой интерес для разработки излучателей пар запутанных фотонов на основе  $Al_xIn_{1-x}As$  квантовых точек.

### Список литературы / References

1. **Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H.** Quantum cryptography. *Reviews of Modern Physics*, 2002, vol. 74, no. 1, p. 145–195.
2. **Bouwmeester D., Ekert A. K., Zeilinger A.** The Physics of Quantum Information. Berlin, Springer, 2000, 314 p.
3. **Bimberg D., Grundmann M., Ledentsov N.** Quantum Dot Heterostructures. Chichester, John Wiley & Sons, 1999. 328 p.
4. Semiconductor Nanostructures. Ed. by D. Bimberg. Berlin, Springer-Verlag, 2008, 357 p.
5. Single Quantum Dots, Fundamentals, Applications and New Concepts. Ed. by P. Michler. Berlin, Springer-Verlag, 2003, 347 p.
6. Self-Assembled Quantum Dots. Ed. by Z. M. Wang. New York, Springer Science + Business Media, LLC, 2008, 463 p.

7. Single Semiconductor Quantum Dots. Ed. by P. Michler. Berlin, Springer-Verlag, 2009, 389 p.
8. **Lochmann A., Stock E., Schulz O. et al.** Electrically driven single quantum dot polarized single photon emitter. *Electron. Lett.*, 2009, vol. 45, no. 13, p. 566–567.
9. **Bimberg D., Stock E., Lochmann A. et al.** Quantum dots for single – and entangled – photon emitters. *IEEE Photon. Journ.*, 2009. vol. 1, no. 1, p. 58–68.
10. **Heindel T., Kessler C., Rau M. et al.** Quantum key distribution using quantum dot single – photon emitting diodes in the red and near infrared spectral range. *New Journ. Phys.*, 2012, no. 14, p. 083001.
11. **Benson O., Santori C., Pelton M., Yamamoto Y.** Regulated and entangled photons from a single quantum dot. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, vol. 84, no. 11, p. 2513–2516.
12. **Stevenson R. M., Young R. J., Atkinson P. et al.** A semiconductor source of triggered entangled photon pairs. *Nature*, 2006, no. 439, p. 179–182.
13. **Mohan A., Felici M., Gallo P. et al.** Polarization-entangled photons produced with high-symmetry site-controlled quantum dots. *Nature Photon*, 2010, no. 4, p. 302–306.
14. **Stevenson R. M., Salter C. L., Nilsson J. et al.** Indistinguishable entangled photons generated by a light-emitting diode. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, vol. 108, no. 4, p. 040503.
15. **Seguin R., Schliwa A., Germann T. D. et al.** Control of fine-structure splitting and excitonic binding energies in selected individual InAs / GaAs quantum dots. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, no. 89, p. 263109.
16. **Seguin R., Schliwa A., Rodt S. et al.** Quantum-dot size dependence of exciton fine-structure splitting. *Physica E*, 2006, no. 32, p. 101–103.
17. **Walls D. F., Milburn G. J.** Quantum Optics. Berlin, Springer-Verlag, 2008, 437 p.
18. **Grundmann M.** The Physics of Semiconductors. Heidelberg, Springer, 2010, 864 p.
19. **Li L. H., Chauvin N., Patriarche G., Alloing B., Fiore A.** Growth – interruption – induced low – density InAs quantum dots on GaAs. *J. Appl. Phys.*, 2008, no. 104, p. 083508.
20. **Krzyzewski T. J., Jones T. S.** Ripening and annealing effects in InAs / GaAs (001) quantum dot formation. *J. Appl. Phys.*, 2004, no. 96, p. 668–674.
21. **Muller-Kirsch L., Heitz R., Pohl U. W., Bimberg D.** Temporal evolution of GaSb / GaAs quantum dot formation. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, no. 79, p. 1027–1029.
22. **Pohl U. W., Potschke K., Schliwa A. et al.** Evolution of a multimodal distribution of self-organized InAs / GaAs quantum dots. *Phys. Rev. B*, 2005, no. 72, p. 245332.
23. **Mano T., Abbarchi M., Kuroda T. et al.** Self-Assembly of Symmetric GaAs Quantum Dots on (111)A Substrates: Suppression of Fine-Structure Splitting. *Appl. Phys. Express*, 2010, no. 3, p. 065203.

*Материал поступил в редколлегию  
Received  
14.08.2018*

**Сведения об авторах / Information about the Authors**

**Гайслер Владимир Анатольевич**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия)

**Vladimir A. Gaisler**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), A. V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (13 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

vahvah55@mail.ru

**Деребезов Илья Александрович**, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия)

**Ilya A. Derebezov**, Candidate of Science (Physics and Mathematics), A. V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (13 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

**Гайслер Алексей Владимирович**, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия)

**Aleksey V. Gaisler**, Candidate of Science (Physics and Mathematics), A. V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (13 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

**Дмитриев Дмитрий Владимирович**, младший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия)

**Dmitriy V. Dmitriev**, A. V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (13 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)