

Исследование способов получения и свойств квантовых молекул InAs в матрице GaAs

© Ю.Б. Самсоненко[¶], Г.Э. Цырлин, А.А. Тонких, Н.К. Поляков,
Н.В. Крыжановская*, В.М. Устинов*, Л.Е. Воробьев[†], Д.А. Фирсов[†],
В.А. Шалыгин[‡], N.D. Zakharov[‡], P. Werner[‡], A. Andreev^{*°}

Институт аналитического приборостроения Российской академии наук,
190103 Санкт-Петербург, Россия

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[†] Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

[‡] Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik,
06120 Halle (Saale), Germany

[°] Department of Physics, University of Surrey, UK

(Получена 1 июня 2004 г. Принята к печати 14 июня 2004 г.)

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии синтезирован массив квантовых молекул InAs в матрице GaAs, состоящий из пар вертикально совмещенных квантовых точек InAs. Исследование полученных структур методом просвечивающей электронной микроскопии показало, что вертикально совмещенные квантовые точки имеют одинаковый размер. Фотолуминесцентные измерения продемонстрировали наличие в спектрах исследуемых образцов полос, соответствующих электронным состояниям квантовых молекул.

1. Введение

Исследованию свойств полупроводниковых квантовых точек (КТ) в последнее время посвящено большое количество работ. Интерес к феномену КТ обусловлен уникальностью их физических свойств, наличием воспроизводимых технологий получения, а также возможностями их применения в современных микро- и оптоэлектронных приборах. Спектр энергетических состояний КТ имеет дискретную структуру, в связи с чем КТ часто именуют „искусственными атомами“. Полупроводниковая квантовая молекула — это объект, состоящий из двух или более КТ, расположенных в непосредственной близости друг от друга. В контексте данной работы под термином квантовая молекула (КМ) будем понимать две одинаковые КТ, связанные друг с другом за счет туннельных эффектов. Спектр энергетических состояний КМ, состоящих из пары идентичных КТ, содержит расщепленные состояния отдельных КТ [1]. В ряде работ [2,3] обсуждался вопрос о возможности получения излучения терагерцового диапазона за счет переходов электронов с верхних расщепленных уровней КМ на нижние. Таким образом, КМ потенциально могут рассматриваться в качестве излучателей терагерцового излучения.

Одной из наиболее распространенных методик получения КТ является их эпитаксиальное выращивание в гетероэпитаксиальных системах, рассогласованных по параметру решетки, за счет эффекта самоорганизации. Методом, позволяющим выращивать КТ подобным образом, является молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ). В системе материалов InAs/GaAs рассогласование параметров решетки достигает 7%. Это приводит к тому,

что при эпитаксиальном выращивании слоя InAs на поверхности подложки GaAs в определенный момент происходит распад упругонапряженного слоя InAs на массив трехмерных островков InAs и остаточный квазидвумерный слой InAs (смачивающий слой). Как было показано ранее в [4], островки InAs представляют собой КТ, в которых движение электрона и дырки ограничено во всех направлениях. Таким образом, при МПЭ КТ получаются естественным образом, необходимо лишь в определенный момент остановить процесс эпитаксии и покрыть массив КТ InAs слоем GaAs. Получение КМ является более сложной технологической задачей.

Ранее было показано [5], что при выращивании двух и более слоев КТ InAs через небольшой спэйсер GaAs наблюдается эффект вертикальной корреляции, когда КТ верхнего слоя формируются непосредственно над КТ нижнего слоя. Используя этот эффект, становится возможным получать близко расположенные КТ — прототип КМ. Отрицательным эффектом при вертикальной корреляции с точки зрения получения КМ является увеличение размеров КТ в верхнем слое по сравнению с КТ нижнего слоя. Подход, позволяющий получить пары вертикально совмещенных КТ, в которых каждая КТ была бы одинакового размера и состава, был предложен в работе [6]. Тем не менее небольшое количество публикаций по данной тематике говорит о том, что формирование вертикально связанных пар идентичных КТ является достаточно сложной технологической задачей и требует дополнительного исследования.

Данная работа посвящена разработке воспроизводимой методики формирования КМ InAs в матрице GaAs методом МПЭ и их исследованию методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и фотолуминесценции (ФЛ).

[¶] E-mail: samsonenko@beam.ioffe.ru

2. Эксперимент

Ростовые эксперименты проводились на установке МПЭ ЭП1203 на полуизолирующих подложках GaAs (100). Было выращено несколько серий образцов с двумя слоями КТ, разделенными спэйсером GaAs. В процессе оптимизации технологии получения КМ варьировались следующие параметры структуры: эффективные толщины InAs в 1-м и 2-м слоях КТ, толщина спэйсера GaAs и условия промежуточных отжига слоев с КТ.

Структурные исследования образцов выполнялись с помощью дифракционной электронной микроскопии на микроскопе CM20 при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Исследование структуры энергетических уровней образцов проводилось методом стационарной ФЛ при температуре 77 К. Оптическая накачка осуществлялась Ar⁺-лазером на длине волны 514,5 нм, сигнал ФЛ детектировался с помощью охлаждаемого Ge-фотодетектора.

3. Результаты и обсуждение

Разработка технологии получения КМ потребовала проведения нескольких серий ростовых экспериментов.

На первом этапе исследовалось влияние промежуточного высокотемпературного отжига (ВТО) на однородность КТ в 1-м и 2-м слоях структуры [7]. Необходимость ВТО обусловлена тем, что при выращивании КТ и последующем наращивании их слоем GaAs возможна сегрегация In [7]. Таким образом, при равной толщине осажденного InAs в обоих слоях КТ, эффективная толщина InAs в верхнем слое оказывается больше.

Для того чтобы исследовать влияние ВТО на однородность КТ в разных слоях, нами выращивались образцы в следующей геометрии. Эффективная толщина InAs в обоих слоях выбиралась равной 2,5 монослоям (МС), толщина спэйсера GaAs — 30 нм. Спэйсера такой толщины достаточно для того, чтобы исключить влияние упругих напряжений, создаваемых нижним слоем КТ, на 2-й слой КТ. Кроме того, спэйсер GaAs толщиной 30 нм исключает туннелирование электронов между КТ 1-го и 2-го слоев. Сформированные при температуре 485°С КТ InAs наращивались слоем GaAs толщиной 5 нм, после чего температура образца поднималась до 610°С и выдерживалась на этом уровне в течение 1 мин (ВТО). Затем температура образца понижалась до 550°С и следовало осаждение остаточного слоя спэйсера GaAs толщиной 25 нм. КТ 2-го слоя формировались аналогичным образом с применением процедуры ВТО. Однородность массива КТ в 1-м и 2-м слоях оценивалась методом сравнения полуширин полос ФЛ для образцов с одним и двумя слоями КТ. Применение процедуры ВТО, описанной выше, не приводило к уширению спектров ФЛ КТ для структур с двумя слоями КТ. Следовательно, массивы КТ в 1-м и 2-м слоях КТ достаточно однородны по размерам.

На втором этапе исследований толщина спэйсера GaAs была уменьшена до 10 нм для того, чтобы выяснить влияние упругих напряжений КТ 1-го слоя на форму и размеры КТ во 2-м слое. Эффективные толщины слоев InAs были равны 2 МС для обоих слоев КТ. На рис. 1 представлено ПЭМ-изображение, полученное от подобной структуры. Из рис. 1 видно, что КТ 2-го слоя больше по размерам, чем КТ 1-го слоя. Спектры ФЛ, полученные от образца, изображенного на рис. 1, демонстрируют 2 полосы ФЛ. Исследование влияния плотности мощности возбуждения на соотношение интенсивностей полос ФЛ для КТ показало, что соотношение интегральных интенсивностей двух полос ФЛ одинаково для любых мощностей накачки. Таким образом, измерения ФЛ подтвердили существование в исследуемом образце 2 групп КТ разного размера.

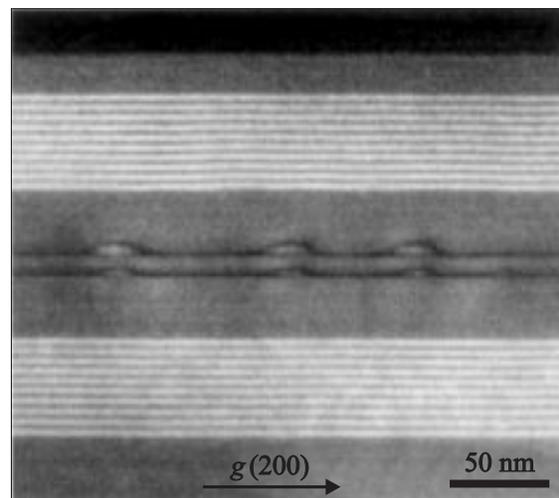


Рис. 1. ПЭМ-изображение поперечного сечения структуры с 2 слоями квантовых точек InAs, разделенных спэйсером GaAs толщиной 10 нм. Эффективная толщина InAs в каждом слое составляла 2 монослоя.

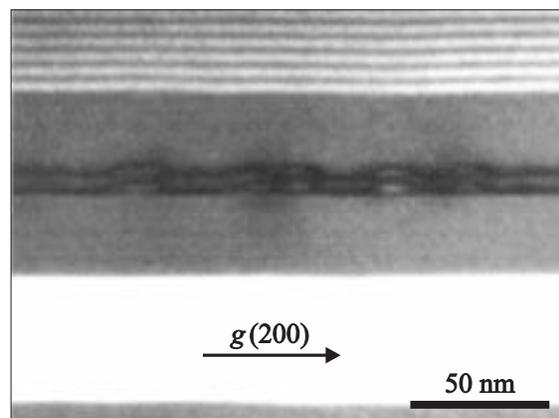


Рис. 2. ПЭМ-изображение поперечного сечения образца с двумя слоями квантовых точек InAs, разделенных спэйсером GaAs толщиной 5 нм.

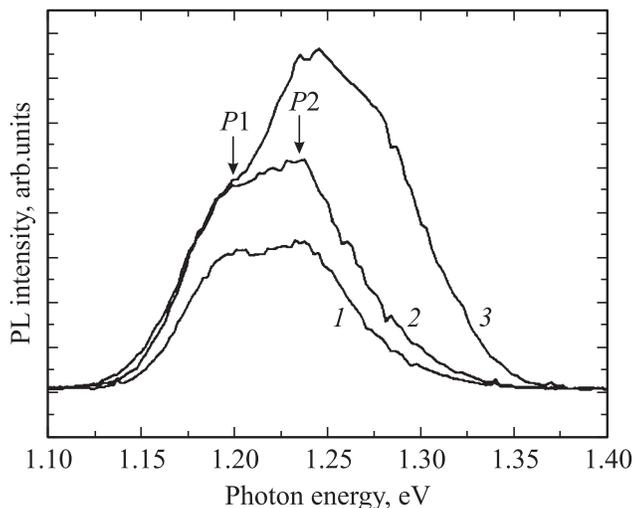


Рис. 3. Спектры фотолуминесценции образца, изображенного на рис. 2, измеренные при 77 К, при мощностях накачки W , равной: 1 — W_0 , 2 — $5W_0$, 3 — $20W_0$.

Исследования, проведенные на первом и втором этапах, доказали необходимость применения ВТО, а также показали, что для формирования КТ 2-го слоя, однородных по размерам с КТ 1-го слоя, во 2-м слое следует осаждать слой InAs меньшей толщины.

На третьем этапе толщина спэйсера GaAs выбиралась равной 5 нм. Этой толщины спэйсера достаточно и для вертикальной корреляции КТ 2-го слоя, и для обеспечения туннелирования электронов между вертикально совмещенными КТ. Основной задачей данного этапа был выбор эффективных толщин InAs в 1-м и 2-м слоях с целью получения в них идентичных размеров КТ. На рис. 2 представлено ПЭМ-изображение структуры с 2 слоями КТ InAs, разделенных спэйсером GaAs толщиной 5 нм, причем эффективные толщины InAs составляли 4 и 2 нм для 1-го и 2-го слоев соответственно. Из рис. 2 видно, что вертикально совмещенные КТ 1-го и 2-го слоев имеют одинаковые размеры. Спектры ФЛ, измеренные на данном образце при температуре 77 К и различной плотности мощности возбуждения, изображены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что в спектрах ФЛ при всех мощностях накачки присутствуют два пика $P1$ и $P2$. Эта ситуация аналогична той, которая наблюдалась в образце со спэйсером 10 нм, в котором эффективная толщина InAs в обоих слоях КТ была одинаковой. Однако в случае образца со спэйсером GaAs в 5 нм и разной эффективной толщиной InAs при увеличении мощности накачки интегральная интенсивность полосы $P2$ растет быстрее, чем интегральная интенсивность полосы $P1$, что, по-видимому, связано с расщеплением на симметричные и антисимметричные состояния. Для выявления подлинного механизма, ответственного за появление полос $P1$ и $P2$, было проведено дополнительное исследование методом нестационарной ФЛ с временным

разрешением [8]. Это исследование, а также хорошее согласование величины энергии расщепления полос $P1$ и $P2$ с теоретическим расчетом, выполненным для модели образца со спэйсером GaAs в 5 нм, доказывают образование КМ в этом образце.

4. Заключение

Таким образом, нами разработана методика, позволяющая методом МПЭ синтезировать туннельно-связанные пары идентичных квантовых точек — квантовые молекулы. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии образцов с квантовыми молекулами показали наличие в их структуре вертикально совмещенных пар квантовых точек одинакового размера, разделенных спэйсером GaAs толщиной 5 нм. Результаты исследования фотолуминесценции для образца с вертикально совмещенными туннельно-связанными квантовыми точками хорошо согласуются с результатами вычислений, проведенных для квантовых молекул обсуждаемой геометрии.

Данная работа была поддержана проектом ИНТАС № 2001-0615 и РФФИ.

Список литературы

- [1] M. Bayer, P. Hawrylak, K. Hinzer, S. Fafard, M. Korkusinski, Z.R. Wasilewski, O. Stern, A. Forchel. *Science*, **291**, 451 (2001).
- [2] P. Boucaud, J.B. Williams, K.S. Gill, M.S. Sherwin, W.V. Schoenfeld, P. Petroff. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (26), 4356 (2000).
- [3] P. Boucaud, K.S. Gill, J.B. Williams, M.S. Sherwin, W.V. Schoenfeld, P. Petroff. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (4), 510 (2000).
- [4] D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov. *Quantum dot heterostructures* (Wiley, Chichester, 1998).
- [5] L. Goldstein, F. Glas, J.Y. Marzin, M.N. Charasse, G. LeRoux. *Appl. Phys. Lett.*, **47** (10) 1099 (1985).
- [6] S. Fafard, M. Spanner, J.P. McCaffrey, Z.R. Wasilewski. *Appl. Phys. Lett.*, **76** (16), 2268 (2000).
- [7] Z.R. Wasilewski, S. Fafard, J.P. McCalrey. *J. Cryst. Growth*, **201/202**, 1131 (1999).
- [8] В.Г. Талалаев, J.W. Tomm, N.D. Zakharov, P. Werner, Б.В. Новиков, Г.Э. Цырлин, Ю.Б. Самсоненко, А.А. Тонких, В.А. Егоров, Н.К. Поляков, В.М. Устинов. *ФТП*, **38**, 723 (2004).

Редактор Т.А. Полянская

Engineering and properties of InAs quantum dot molecules in GaAs matrix

*Yu.B. Samsonenko, G.E. Cirlin, A.A. Tonkikh,
N.K. Polyakov, N.V. Kryzhanovskaya*, V.M. Ustinov*,
L.E. Vorobjev†, D.A. Firsov†, V.A. Shalygin†,
N.D. Zakharov‡, P. Werner‡, A. Andreev*,°*

Institute for Analytical Instrumentation
of Russian Academy of Sciences,
190103 St. Petersburg, Russia

* Ioffe Physicotechnical Institute,
of Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

† St. Petersburg State Polytechnic University,
195251 St. Petersburg, Russia

‡ Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik,
06120 Halle (Saale), Germany

° Department of Physics, University of Surrey,
Guildford, GU2 7XH, UK

Abstract Arrays of quantum dot molecules, consisting of vertically coupled quantum dots, were grown by molecular beam epitaxy. Transmission electron microscopy investigation shows that vertical correlated quantum dots have the same sizes under optimized growth conditions. Photoluminescence measurements reveal spectral bands which corresponds to the quantum dot molecules electronic states.