

Оптические явления в гетероструктурах InAs/GaAs с легированными квантовыми точками и искусственными молекулами

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

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

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

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

[‡] Институт аналитического приборостроения Российской академии наук,
198103 Санкт-Петербург, Россия

[†] Institute of Physics, University of Bayreuth,
Germany

[°] Max Planck Institute of Microstructure Physics,
06120 Halle (Saale), Germany

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

Исследованы спектры внутризонного поглощения поляризованного излучения среднего инфракрасного диапазона в квантовых точках InAs/GaAs *n*- и *p*-типов, а также нелегированных, покрытых слоем InGaAs. Рассчитаны оптические матричные элементы для внутризонных переходов электронов и дырок в квантовых точках для разных поляризаций света, результаты расчетов находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Показано, что внутризонное поглощение излучения электронами существенно превышает поглощение света дырками. Исследованы спектры фотолюминесценции и картины просвечивающей электронной микроскопии в искусственных молекулах, образованных парами квантовых точек.

1. Введение

Исследование внутризонных оптических переходов носителей заряда в квантовых точках представляет интерес с точки зрения разработки новых приборов оптоэлектроники — приемников и источников излучения среднего ИК диапазона. Фотоиндуцированное внутризонное поглощение света в нелегированных квантовых точках (КТ) InAs/GaAs и поглощение света в КТ *n*-типа исследовалось в ряде работ [1,2], однако данные по внутризонному поглощению света в КТ *p*-типа и сравнительный анализ поглощения в структурах *n*- и *p*-типов отсутствуют. Между тем такие данные были бы интересны как для разработки эффективных фотоприемников излучения, так и для определения величины оптических потерь, связанных с поглощением света дырками, в лазерах на внутризонных переходах электронов в КТ. В настоящей работе экспериментально и теоретически исследуется внутризонное поглощение ИК излучения в структурах с КТ InAs/GaAs.

Оптические свойства структур с искусственными молекулами (ИМ), образованными парами вертикально связанных квантовых точек, к настоящему времени изучены недостаточно подробно. Между тем такие структуры уже предложены в качестве базового элемента квантовых компьютеров [3,4]. Кроме того, на основе

структур с ИМ могут быть созданы эмиттеры излучения среднего инфракрасного и терагерцового диапазонов, поскольку энергия расщепления основного состояния в ИМ является функцией толщины спейсера и лежит в диапазоне от нескольких мэВ до нескольких десятков мэВ. В настоящей работе представлены результаты по выращиванию и исследованию структур InAs/GaAs с ИМ.

2. Образцы и методика экспериментальных исследований

Образцы для исследований оптических переходов в квантовых точках представляли собой структуры с 15 слоями КТ InAs/GaAs, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии. В отличие от обычно используемой методики Странского–Крастанова, перед нанесением матрицы GaAs КТ зарощивались тонким (5 нм) слоем $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$. Это приводило к модификации структурных и оптических свойств КТ. Для получения *n*- и *p*-типов проводимости структуры легировались соответственно кремнием и бериллием. Легировался слой GaAs толщиной 2 нм, лежащий на 1.5 нм ниже слоев с КТ. Поверхностная концентрация КТ в одном слое составляла $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, поверхностная концентрация легирующей примеси приблизительно в 6 раз превышала концентрацию КТ. Исследование поглощения велось в образцах многопроходной геометрии.

[¶] E-mail: dmfir@rphf.spbstu.ru;
Fax: 812-533-4717

Для получения искусственных молекул на подложке GaAs выращивались два слоя КТ InAs/GaAs, разделенных спейсерным слоем GaAs толщиной $d_s = 5$ нм. Количество InAs, наносимого в первом и втором слоях КТ, было различным (4 и 2.5 монослоя соответственно), что позволило сформировать связанные КТ одинакового размера. Полученные структуры исследовались методами фотолюминесценции и просвечивающей электронной микроскопии.

3. Результаты и их обсуждение

В структурах с КТ исследовалось внутризонное поглощение света s - и p -поляризации. Результаты эксперимента представлены на рис. 1. Особенности спектров, показанные на рис. 1 стрелками, могут быть связаны с внутризонными переходами электронов и дырок между уровнями размерного квантования. Пики поглощения для электронных переходов наблюдаются в s -поляризации (95 мэВ) и p -поляризации (175 мэВ). Пик поглощения для дырочных переходов наблюдается в s -поляризации для энергии кванта около 96 мэВ.

При расчете энергетической зонной структуры полупроводниковых квантовых точек и молекул учитывались следующие важные факторы:

- 1) упругие напряжения в структуре с учетом заданной формы квантовой точки, распределения состава и присутствия тонкого смачивающего слоя;
- 2) пьезоэлектрические поля;
- 3) сложная структура валентной зоны и ее модификация упругими напряжениями;
- 4) спин-орбитальное взаимодействие и непараболичность зоны проводимости.

Достаточно хорошим приближением для решения данной проблемы с учетом всех указанных требований является решение трехмерной задачи линейной теории упругости и системы уравнений в рамках метода огибающих волновых функций на основе 8×8 эффектив-

ного гамильтониана модели Кейна. Для КТ произвольной формы последовательное решение подобной задачи представляет значительные вычислительные трудности. Однако значительную часть решения задачи, а именно расчет упругих напряжений и пьезоэлектрических полей, можно выполнить аналитически для произвольной формы КТ, не вводя при этом каких-либо упрощающих предположений. Результатом при этом являются фурье-образы тензора напряжений и пьезоэлектрического потенциала. Для получения этого результата был использован формализм функции Грина для линейного уравнения упругости [5]. Далее, для расчета энергетической зонной структуры удобно воспользоваться методом разложения по плоским волнам в рамках 8×8 эффективного гамильтониана модели Кейна. В работе [6] описано применение данного метода для напряженных КТ на основе нитридов с кристаллической структурой типа вюрцита.

В рамках метода плоских волн волновая функция электрона или дырки, локализованных в КТ, представляется в виде суперпозиции объемных волновых функций:

$$\Psi(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{k}, \alpha} C_{\mathbf{k}, \alpha} |\mathbf{k}, \alpha\rangle, \quad (1)$$

где плоская волна $|\mathbf{k}, \alpha\rangle \propto \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})$ является собственным состоянием $8 \times 8 \mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ эффективного гамильтониана обобщенной модели Кейна [7], α обозначает состояние электронов, легких, тяжелых и спин-отщепленных дырок (включая спин). Волновая функция Ψ и плоская волна $|\mathbf{k}, \alpha\rangle$ в (1) являются векторами с восемью компонентами, каждая из компонент относится к соответствующей блоховской функции. Энергии электронов и дырок, локализованных в КТ или ИМ, и коэффициенты $C_{\mathbf{k}, \alpha}$ находились путем численного решения задачи на собственные вектора и числа большой матрицы, элементы которой зависят от фурье-образов формы КТ или ИМ и распределения упругих и пьезоэлектрических напряжений. Как указано выше, требуемые фурье-образы можно найти аналитически.

В расчетах предполагалось, что квантовые точки имеют форму усеченной пирамиды со следующими размерами: нижнее основание 16×16 нм², верхнее основание 4×4 нм², высота 5.5 нм. Результаты расчетов приведены на рис. 2 с учетом гауссова уширения отдельных переходов.

Спектральное положение и поляризационная зависимость рассчитанных кривых на рис. 2 хорошо согласуется с экспериментально определенными спектрами пропускания (рис. 1). В частности, как из расчета, так и из эксперимента следует, что величина поглощения излучения дырками в несколько раз слабее, чем электронами. Кроме того, поглощение света дырками и электронами по-разному зависит от поляризации и спектрального состава излучения. Этот результат является благоприятным с точки зрения разработки биполярных лазеров среднего ИК диапазона, основанных на межуровневых переходах электронов в КТ (см., например, [8]). Сильное

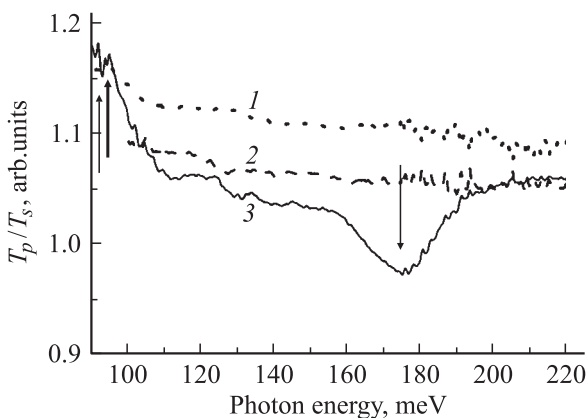


Рис. 1. Отношение пропусканий света p - и s -поляризации для образцов с КТ, легированными различным образом (1 — p -тип, 2 — нелегированные КТ, 3 — n -тип).

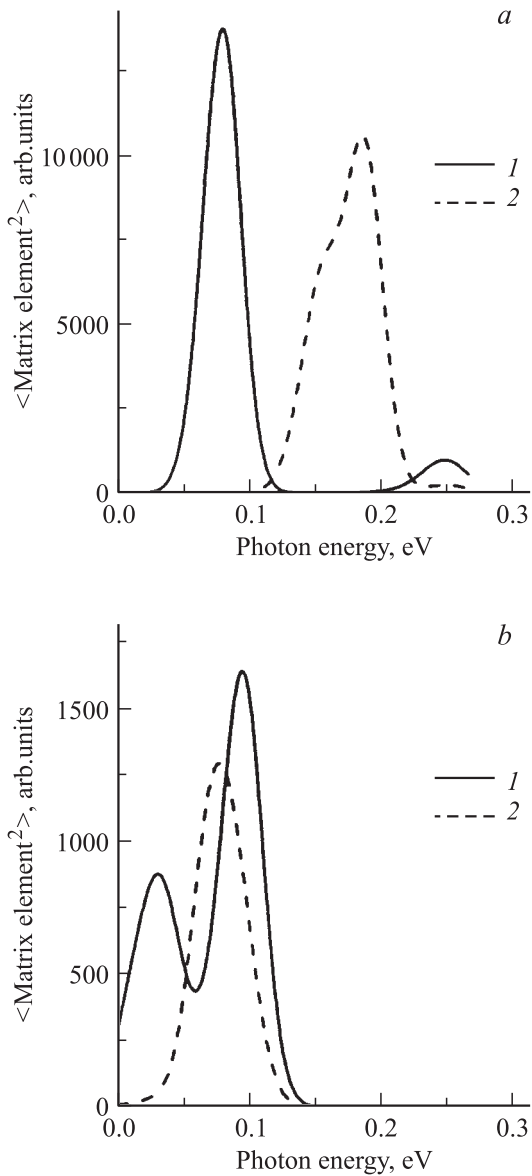


Рис. 2. Рассчитанные оптические матричные элементы для межуровневых переходов электронов (а) и дырок (б) с учетом уширения в 20 мэВ (поляризация света: 1 — s, 2 — p).

поглощение света дырками могло бы уменьшить оптическое усиление, обусловленное внутризонными переходами электронов между уровнями КТ.

Различие оптических матричных элементов для электронов и дырок связано с тем, что оптический матричный элемент для КТ определяется двумя факторами: объемным матричным элементом (построенном на волновых функциях объемного кристалла) и пространственным перекрытием волновых функций начального и конечного состояний в КТ. Объемный матричный элемент для переходов электронов в несколько раз больше, чем для переходов дырок. Кроме того, перекрытие волновых функций основного и возбужденных дырочных состояний в КТ (энергии соответствующих

внутризонных переходов более 70 мэВ) меньше, чем перекрытие между электронными состояниями для той же энергии внутризонного перехода. Таким образом, оба этих фактора приводят к большему сечению внутризонного поглощения для электронов.

В структурах с искусственными молекулами, образованными парами вертикально связанных КТ, расщепление основного уровня зависит от расстояния между КТ. На рис. 3 приведены результаты расчета энергии расщепления основного уровня КТ. В расчете использовались следующие параметры структуры: высота КТ $h_t = 4$ нм, размеры основания 13×13 нм, размеры вершины 10×10 нм, толщина смачивающего слоя 0.5 нм. Эти параметры согласуются с изображениями ИМ, полученными с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), одно из таких изображений приведено на рис. 4. На основе ПЭМ изображений высокого разрешения было установлено, что материал КТ соответствует составу $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$, что также было использовано при расчете.

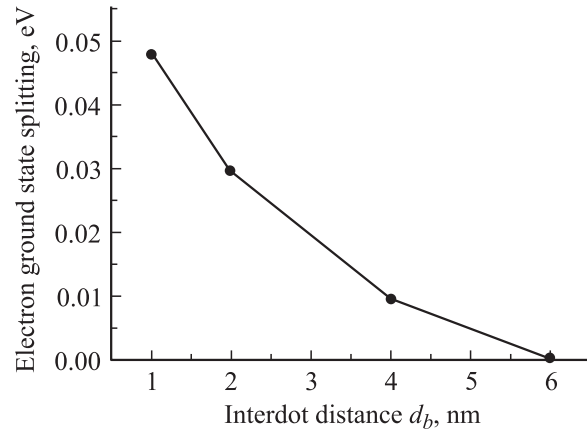


Рис. 3. Рассчитанная зависимость энергии расщепления основного состояния КТ в ИМ от расстояния между связанными квантовыми точками d_b (толщина спейсера $d_s = d_b + h_t$).

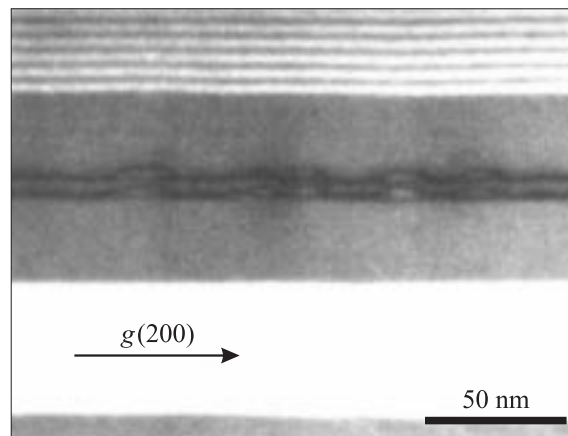


Рис. 4. Изображение поперечного сечения структуры с двумя слоями КТ, полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

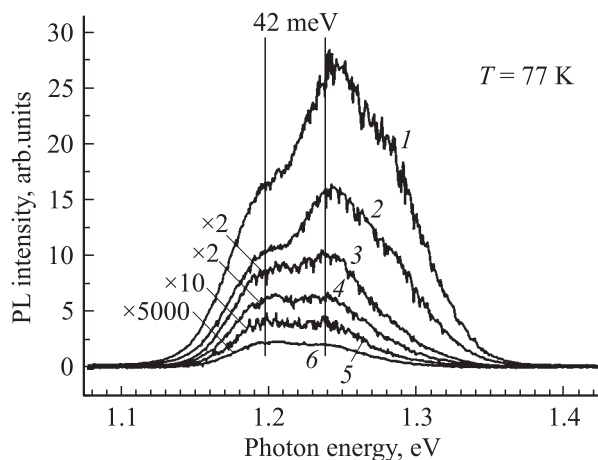


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции, полученные для структуры с ИМ при различных уровнях накачки: 1 — I_0 , 2 — $I_0/2$, 3 — $I_0/7$, 4 — $I_0/50$, 5 — $I_0/500$, 6 — $I_0/250000$ (I_0 соответствует мощности Ar-лазера 40 мВт). Показано расщепление основного состояния КТ. Ширина спейсера $d_b + h_t = 5$ нм.

В спектрах люминесценции (рис. 5), измеренных в большом диапазоне интенсивностей накачки, можно выделить два пика, расстояние между которыми составляет 42 мэВ. В значительном интервале интенсивностей накачки интенсивности этих пиков совпадают, что позволяет связать эти пики с переходами электронов с симметричного и антисимметричного состояний ИМ, образованных при расщеплении основного состояния КТ. Как ПЭМ изображения, так и спектры фотолюминесценции демонстрируют наличие в структуре симметричных связанных КТ, формирующих искусственную молекулу.

Полученное из эксперимента значение энергии расщепления основного состояния 42 мэВ хорошо согласуется с рассчитанной величиной 46 мэВ (см. рис. 3, $d_b = 1$ нм).

4. Заключение

Экспериментально и теоретически показано, что внутризонное поглощение излучения среднего ИК диапазона в структурах с квантовыми точками InAs/GaAs, связанное с электронными переходами, в несколько раз сильнее, чем поглощение связанное с переходами дырок. Этот факт является благоприятным с точки зрения разработки лазеров среднего ИК диапазона, основанных на электронных внутризонных переходах.

Выращены и исследованы структуры с парами вертикально связанных КТ. С помощью спектров фотолюминесценции и ТЕМ изображений продемонстрировано образование искусственных молекул.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов INTAS, ISTC, РФФИ, Министерства образования и науки РФ. Работа одного из авторов (А.А. Андреев) также частично поддержана EPSRC (UK).

Список литературы

- [1] S. Sauvage, P. Boucaud, F.H. Julien, J.-M. Gérard, J.-Y. Marzin. *J. Appl. Phys.*, **82**, 3396 (1997).
- [2] S. Sauvage, P. Boucaud, F.H. Julien, J.-M. Gérard, V. Thierry-Mieg. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2785 (1997).
- [3] A. Barenco, D. Deutsch, A. Ekert, R. Jozsa. *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 4083 (1995).
- [4] M. Bayer, P. Hawrylak, K. Hinzer, S. Fafard, M. Korkusinski, Z.R. Wasilewski, O. Stern, A. Forchel. *Science*, **291**, 451 (2001).
- [5] A.D. Andreev, J.R. Downes, D.A. Faux, E.P. O'Reilly. *J. Appl. Phys.*, **84**, 297 (1999).
- [6] A.D. Andreev, E.P. O'Reilly. *Phys. Rev. B*, **62**, 15 851 (2000).
- [7] T.B. Bahder. *Phys. Rev. B*, **41**, 11 992 (1990); *Phys. Rev. B*, **46**, 9913 (1992).
- [8] A. Kastalsky, L.E. Vorobjev, D.A. Firsov, V.L. Zerova, E. Towe. *IEEE J. Quant. Electron.*, **37**, 1356 (2001).

Редактор Л.В. Беляков

Optical phenomena in InAs/GaAs heterostructures with doped quantum dots and artificial molecules

L.E. Vorobjev, V.Yu. Panevin, N.K. Fedosov, D.A. Firsov, V.A. Shalygin, A.D. Andreev^{+,*}, Yu.B. Samsonenko[‡], A.A. Tonkikh[‡], G.E. Cirilin[‡], N.V. Kryzhanovskaya^{*}, V.M. Ustinov^{*}, S. Hanna[†], A. Seilmeier[†], N.D. Zakharov[°], P. Werner[°]

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

⁺ Department of Physics, University of Surrey, UK

^{*} Ioffe Physicotechnical Institute

Russian Academy of Sciences,

194021 St. Petersburg, Russia

[‡] Institute for Analytical Instrumentation

Russian Academy of Sciences,

198103 St. Petersburg, Russia

[†] Institute of Physics, University of Bayreuth,

Germany

[°] Max Planck Institute of Microstructure Physics,

06120 Halle (Saale), Germany

Abstract Spectra of intraband absorption of mid-infrared polarized radiation were investigated in InAs/GaAs quantum dots covered with InGaAs quantum well. Undoped, *p*- and *n*-doped structures were studied. Optical matrix elements of intraband electron and hole transitions were calculated. Results of experiment and calculations are in good agreement. It is shown that intraband light absorption connected with electron transitions exceeds the light absorption by holes. Photoluminescence spectra and TEM images were investigated in structures with artificial molecules formed by pairs of quantum dots.