

06

Эффект Штарка в многослойной системе связанных квантовых точек InAs/GaAs

© М.М. Соболев, А.Е. Жуков, А.П. Васильев,
Е.С. Семенова, В.С. Михрин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: m. sobolev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 24 октября 2006 г.

Методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) исследована эмиссия электронов из состояний в системе вертикально коррелированных квантовых точек (ВККТ) InAs в $p-n$ -гетероструктурах InAs/GaAs, полученных методами молекулярно-пучковой эпитаксии, в зависимости от числа рядов квантовых точек (КТ) и от величины обратного смещения. Установлено, что при толщине прослойки $d_{\text{GaAs}} = 40 \text{ \AA}$ между двумя рядами КТ система находится в фазе молекулы независимо от числа рядов КТ в этой системе. Увеличение числа рядов КТ приводит к уменьшению величины смещения Штарка, что обусловлено, по-видимому, уменьшением деформационного потенциала в окрестностях с ВККТ.

PACS: 78.67.-n, 71.70.Ej

Вертикальное связывание (coupling) двух и более полупроводниковых квантовых точек (КТ), разделенных барьерами GaAs толщиной несколько нанометров, посредством кулоновского взаимодействия и квантово-механического туннелирования может привести к образованию искусственных молекул и гибридизации состояний носителей с расщеплением уровней на связанные (bonding) и антисвязанные (antibonding) состояния [1–10]. Основному состоянию, так же как и другим состояниям такой системы ВККТ, должно быть присуще красное смещение по энергии при наличии электрического поля. Подобного рода зависимости получили наименование квантово-ограниченного эффекта Штарка [3,5–10]. В теоретических работах ряда авторов [3–6] было установлено, что все возбужденные состояния будут пересекающимися или антипересекающимися с другими состояниями, и это должно привести к переупорядочению состояний в сильном электрическом поле. Связывание КТ можно контролировать посредством изменения

величины внешнего электрического поля и усиления эффекта гибридизации электронных состояний двух и более КТ в зависимости от толщины прослойки между ними (d_{GaAs}). Самостоятельный интерес, ввиду возможного применения структур с ВККТ для электрооптической модуляции света, имеют также исследования эффекта Штарка ВККТ структур с различным числом рядов КТ [7–10].

В наших предыдущих работах [7–14] мы уже исследовали InAs/GaAs гетероструктуры с ВККТ, полученные методами молекулярно-пучковой эпитаксии в результате осаждения 2 монослоев InAs, разделенных прослойкой GaAs толщиной $d_{\text{GaAs}} = 15, 40$ и 100 \AA и помещенных в середину p^0/n^0 -GaAs. Исследования квантовых состояний и эффекта Штарка в InAs/GaAs ВККТ гетероструктурах производились с использованием метода нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS), который, в отличие от межзонной спектроскопии [15–17], позволяет исследовать не совместное поведение электронов и дырок в полупроводниковых p - n -структурах, а раздельное. Проведенные с помощью DLTS-метода исследования эмиссии носителей квантовыми состояниями ВККТ в p - n -гетероструктурах InAs/GaAs в зависимости от толщины прослойки d_{GaAs} и от величины напряжения обратного смещения U_b позволили нам установить [7–14], что:

связывание близко расположенных КТ и происходящая при этом гибридизация квантовых состояний электронов приводят к смещению Штарка для уровней энергии этих состояний при приложении к гетероструктуре напряжения обратного смещения;

при толщине прослойки $d_{\text{GaAs}} = 100 \text{ \AA}$ между двумя рядами КТ система проявляет себя как пара несвязанных КТ, а при толщине прослойки $d_{\text{GaAs}} = 40 \text{ \AA}$ между двумя рядами КТ система находится в фазе молекулы;

гибридизация электронных состояний двух близко расположенных КТ приводит к расщеплению уровней на связанные и антисвязанные состояния.

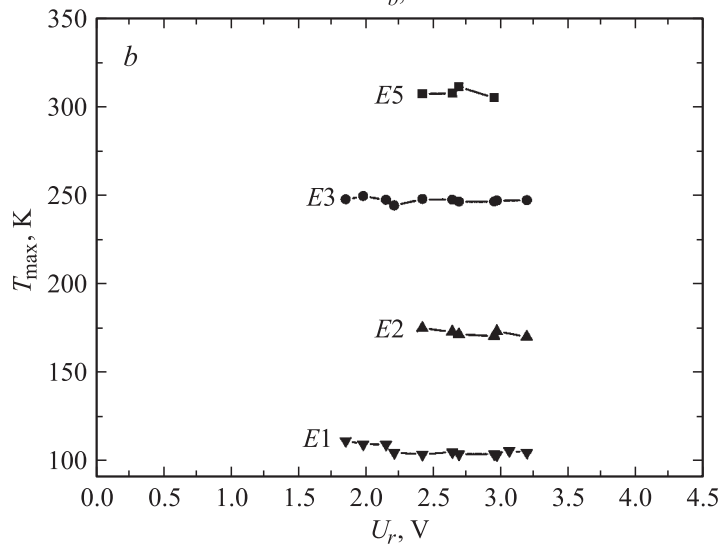
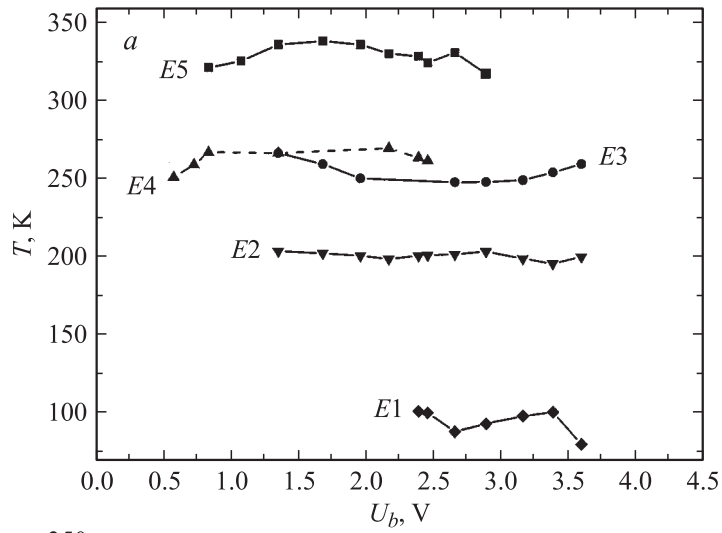
В этой работе мы исследовали влияние на DLTS-спектр, связанный с эмиссией электронов, увеличения числа рядов КТ в InAs/GaAs ВККТ гетероструктурах с двух до восьми. Массив КТ был сформирован в результате двух-, трех-, шести- и восьмикратного осаждения 2 монослоев InAs, разделенных прослойкой GaAs толщиной $d_{\text{GaAs}} = 40 \text{ \AA}$ и помещенных в середину n^0 -GaAs. Прослойки GaAs между слоями КТ–InAs специально не легировались. Сверху p^0/n^0 -GaAs слой был

покрыт n^+/p^+ -GaAs. Структуры с ВККТ были получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии.

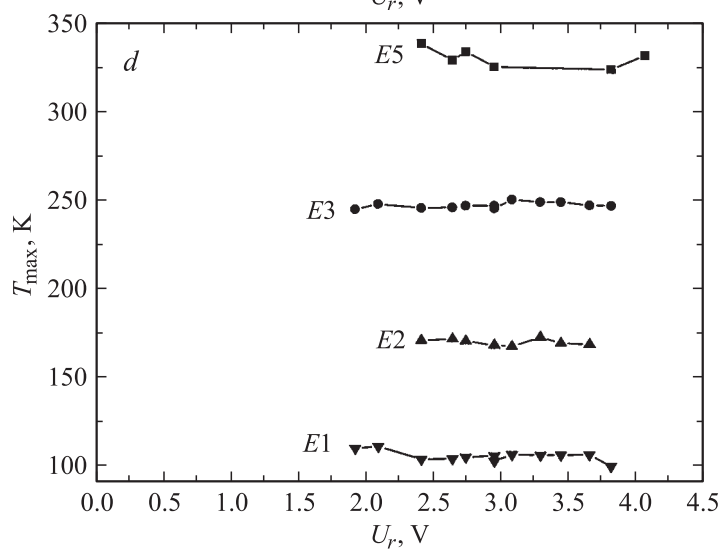
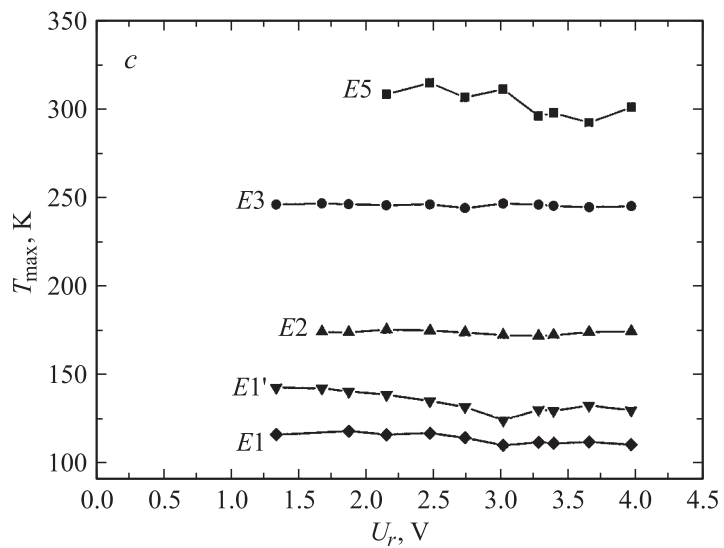
Мы провели измерения $C-V$ -характеристик $p-n$ -гетероструктур InAs/GaAs с ВККТ при температуре $T = 82$ К. В профилях распределения концентрации свободных электронов $n^*(U_r)$ всех структур наблюдались пики, проявление которых связывали с опустошением носителей, аккумулированных на квантовых состояниях точек. Для определения пространственной локализации DLTS-сигналов и природы уровней, идентифицируемых с этими сигналами, были проведены измерения спектров при постоянной величине напряжения импульса заполнения U_f и варьировании величиной импульса напряжения обратного смещения U_b , при котором регистрировался DLTS-сигнал.

DLTS-исследования позволили определить, что для структур с двумя рядами КТ наблюдалось пять DLTS-пигов: $E1$, $E2$, $E3$, $E4$ и $E5$. Для структуры с шестью рядами также наблюдалось пять DLTS-пигов: $E1$, $E2$, $E3$ и $E5$ и еще один, который мы обозначили как $E1'$. В этой структуре явно не проявился пик $E4$. Этот же пик отсутствовал в структурах с тремя и восьмью рядами КТ. Для них наблюдалось только четыре DLTS-пики: $E1$, $E2$, $E3$ и $E5$. Для определения природы уровней, ответственных за проявление DLTS-пигов во всех структурах с ВККТ, были проведены исследования зависимости спектров DLTS от условий предварительного изохронного отжига ($U_{ba} < 0$ или $U_{ba} = 0$) и при оптической подсветке белым светом. Измерения проводились для тех значений напряжения U_b , при которых наблюдались характерные изменения в поведении спектров DLTS [7–10]. Эти исследования показали, что DLTS-спектры практически не зависят от условий изохронного отжига, но изменяются при оптической подсветке. Для всех DLTS-пигов исследуемых структур наблюдался рост амплитуд DLTS-сигналов, что позволяло отождествить их с квантовыми состояниями ВККТ [11–13]. Подобные изменения амплитуд DLTS-сигналов авторы статьи ранее уже наблюдали и связывали этот эффект с изменениями положения уровня Ферми и степени заполнения пространственно локализованных состояний при измерении DLTS-спектров с оптической подсветкой белым светом [10–13]. Эта зависимость является отличительной характеристикой для DLTS-пигов, проявление которых связано с эмиссией носителей с пространственно локализованных состояний, и позволяет их отличать от глубоких уровней дефектов, распределенных по толщине полупроводника [10–13].

Для исследуемых нами структур с различным числом рядов КТ все DLTS-пики были атрибутируемы с квантовыми состояниями точек. Эти DLTS-пики ($E1$, $E1'$, $E2$, $E3$, $E4$ и $E5$) демонстрировали также смещение температурного положения их максимумов при изменении величины импульса напряжения U_b , при котором регистрировался DLTS-сигнал. Этот эффект обычно характеризуется проявлением квантово-ограниченного эффекта Штарка, приводящего к смещению уровней квантовых состояний [8–10]. Были построены зависимости смещения температурного положения максимумов DLTS-пигов при изменении U_b для структур с различным числом рядов КТ, которые показаны на рисунке, a , b , c , d . Кривые зависимости смещения Штарка пиков $E1$ – $E5$ от величины U_b структуры с двумя рядами КТ были подобны тем, что приведены в теоретической работе [5] и в нашей экспериментальной работе [10]. В этих работах было показано, что для массива, состоящего из двух рядов КТ при толщине прослойки GaAs между двумя рядами КТ порядка 40 Å, может произойти связывание КТ, приводящее к гибридизации основных и возбужденных квантовых состояний электронов и их расщеплению на связанные и антисвязанные состояния ($1s^+$, $1s^-$, $2p^+$, $2p^-$, $3d^+$). При этом сама система оказывается в фазе молекулы. Эти пять квантовых состояний наблюдаются в DLTS-спектрах [10]. В то же время для массива с толщиной прослойки $d_{\text{GaAs}} = 100$ Å между двумя рядами КТ система проявляет себя как пара несвязанных КТ и в DLTS-спектрах наблюдаются только два пика, идентифицируемых с основным и возбужденными состояниями КТ [10]. Результаты наших исследований при сопоставлении с результатами теоретических работ [5,6] позволили атрибутировать DLTS-пики структуры с двумя рядами КТ с состояниями молекулы КТ: $E5$ — $1s^+$, $E4$ — $2p^+$, $E3$ — $1s^-$, $E2$ — $2p^-$, $E1$ — $3d^+$, а также подтвердить тот факт, что связывание электронных состояний двух точек КТ-молекулы приводит к образованию связанных и антисвязанных, основных и возбужденных состояний $1s^+$, $1s^-$, $2p^+$, $2p^-$, $3d^+$, образующихся из состояний КТ. Результаты наших DLTS-исследований эффекта Штарка структур с числом рядов КТ большим, чем два, показывают, что увеличение числа рядов КТ до восьми в InAs/GaAs гетероструктуре с ВККТ не приводит к существенному изменению самого DLTS-спектра, идентифицируемого с эмиссией электронов (см. рисунок, b , c , d). Для этих структур, помимо некоторого изменения в DLTS-спектрах (отсутствие $E4$ -пика и появление $E1'$ -пика), наблюдается уменьшение величины смещения Штарка



Зависимости температурного положения максимумов пиков DLTS от величины импульса напряжения U_b для структур с различным числом рядов: a — 2 рядами, b — 3 рядами, c — 6 рядами, d — 8 рядами.



Продолжение рисунка.

для уровней энергии электронов E_3 , что, по-видимому, определяется уменьшением деформационного потенциала в окрестностях КТ при увеличении числа их рядов. Влияние деформационного потенциала мы ранее уже неоднократно наблюдали как при исследовании одиночных КТ InAs/GaAs, выращенных на подложках (100) и (311)A GaAs [14], так и на структурах с ВККТ, полученных разными группами технологов на оборудовании различных фирм [7–13]. На возможное уменьшение деформационного потенциала в окрестностях КТ при увеличении числа слоев КТ до семи по сравнению с одиночными КТ было также указано в теоретической работе [18].

Таким образом, в результате наших исследований InAs/GaAs ВККТ-гетероструктур с различным числом рядов КТ, полученных методами молекулярно-пучковой эпитаксии, было установлено, что при толщине прослойки $d_{\text{GaAs}} = 40 \text{ \AA}$ между двумя рядами КТ система находится в фазе молекулы независимо от числа рядов КТ в этой системе. Кроме того, увеличение числа рядов КТ приводит к уменьшению величины смещения Штарка, что обусловлено, по-видимому, уменьшением деформационного потенциала в окрестностях с ВККТ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 06-02-08088-офи).

Список литературы

- [1] *Korkusinski M., Hawrylak P.* // Phys. Rev. B. 2001. V. 63. P. 195 311.
- [2] *Li X.Q., Arakawa Y.* // Phys. Rev. A. 2000. V. 63. P. 012 302.
- [3] *Partoens B., Peeters F.M.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 4433–4436.
- [4] *Troiani F., Hohenester U., Molinari E.* // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. P. 161 301.
- [5] *Sheng W., Leburton J.-P.* // Appl. Phys. Lett. 2001. P. 1258–1260.
- [6] *Sheng W., Leburton J.-P.* // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. P. 167 401.
- [7] *Соболев М.М., Устинов В.М., Жуков А.Е., Мусихин Ю.Г., Леденцов Н.Н.* // ФТП. 2002. Т. 36. В. 9. С. 1089–1096.
- [8] *Sobolev M.M., Ustinov V.M., Cirilin G.E.* // Physica B. 2003. V. 340–342. P. 1103–1107.
- [9] *Соболев М.М., Цырлин Г.Э., Самсоненко Ю.Б., Поляков Н.К., Тонких А.А., Мусихин Ю.Г.* // ФТП. 2005. Т. 39. В. 1. С. 126–129.
- [10] *Соболев М.М., Жуков А.Е., Васильев А.П., Семенова Е.С., Михрин В.С., Цырлин Г.Э., Мусихин Ю.Г.* // ФТП. 2006. Т. 40. В. 3. С. 336–342.

- [11] *Соболев М.М., Ковш А.Р., Устинов В.М., Егоров А.Ю., Жуков А.Е., Мусихин Ю.Г.* // ФТП. 1999. Т. 33. В. 2. С. 184–193.
- [12] *Sobolev M.M., Kovsh A.R., Ustinov V.V., Egorov A.Yu., Zhukov A.E., Musikhin Yu.G.* // J. Electronic Mat. 1999. V. 28. Issue 5. P. 491–495.
- [13] *Sobolev M.M., Kochnev I.V., Lantratov V.M., Cherkashin N.A., Emtsev V.V.* // Physica B. Cond. matter. 1990. V. 273–274. P. 959–962.
- [14] *Соболев М.М., Цырлин Г.Э., Самсоненко Ю.Б., Поляков Н.К., Тонких А.А., Мусихин Ю.Г.* // ФТП. 2005. Т. 39. В. 9. С. 1088–1092.
- [15] *Bayer M., Hawrylak P., Hinzer K., Fafard S., Korkusinski M., Wasilewski Z.R., Stern O., Forchel A.* // Science. 2001. V. 291. P. 451.
- [16] *Shtrichman I., Metzner C., Gerardot B.D., Schoenfeld W.V., Petroff P.M.* // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. P. 081 303.
- [17] *Ortner G., Yugova I., Baldassarri G. et al.* // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 125 335.
- [18] *Hyunho Shin, Woong Lee and Yo-Han Yoo* // Nanotechnology. 2003. V. 14. P. 742–747.