

Смещение Штарка состояний дырок одиночных квантовых точек InAs/GaAs, выращенных на подложках (100) и (311)A GaAs

© М.М. Соболев[¶], Г.Э. Цырлин, Ю.Б. Самсоненко, Н.К. Поляков, А.А. Тонких

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

(Получена 7 декабря 2004 г. Принята к печати 22 декабря 2004 г.)

Сообщается о результатах исследований с помощью нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) эмиссии носителей из состояний одиночных квантовых точек p - n -гетероструктур InAs/GaAs, полученных на ориентированных подложках (100) и (311)A GaAs, в зависимости от величины напряжения обратного смещения U . Установлено, что эти структуры имеют различные зависимости смещения Штарка для уровней энергий квантовых состояний точек от величины U .

1. Введение

В последнее время наблюдается все возрастающий интерес к исследованиям по влиянию электрического поля на электронные свойства гетероструктур InGa/GaAs с самоорганизующимися квантовыми точками (КТ), имеющими фундаментальное и прикладное значение [1–13]. В таких системах, как показали результаты исследований, проводимых в целом ряде лабораторий, [1–13] имеется высокая степень свободы в управлении зонной структурой и оптическими свойствами с помощью внешнего и внутреннего встроенного электрического поля. Впервые на возможность управления зонной структурой систем с КТ было обращено внимание в работах авторов данной статьи, где наблюдалось влияние встроенного электрического поля бистабильного диполя, образованного локализованными в КТ носителями и ионизованными точечными дефектами, расположенными в ближайшей окрестности КТ [1–3]. При исследовании гетероструктур InGa/GaAs как с вертикально-сопряженными (coupled) КТ (ВСКТ), так и с одиночными КТ (ОКТ) методами нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) мы наблюдали смещение положения пика DLTS, определяемого процессом эмиссии носителей из квантового состояния ВСКТ и ОКТ, в высокотемпературную область спектра с ростом величины электрического поля [1,11]. Величина температурного смещения положения пика DLTS для структуры с ВСКТ была значительно больше, чем для структуры с ОКТ. Недавно появились работы по исследованию спектров фотолуминесценции (ФЛ) и фототока самоорганизованных КТ в системе InGaAs/GaAs, выращенных на плоскостях GaAs с различными индексами Миллера, в зависимости от величины электрического поля [4–8]. В этих работах наблюдали индуцированное встроенным электрическим полем красное смещение энергии оптических переходов. Явление, ответственное за это смещение, получило название квантово-ограниченного эффекта Штарка (КОЭШ) и для ОКТ-структур, полученных на подложках GaAs с высоким индексом Миллера, связывалось с комбинацией пьезоэлектрического

поля и постоянного (permanent) дипольного момента внутри КТ, обусловленного пространственным смещением волновых функций электронов и дырок [4–5]. Для ОКТ-структур на подложках (100) GaAs эффект Штарка, наблюдаемый в работе [6], связывали исключительно с диполем, обусловленным пространственным смещением волновых функций электронов и дырок. В работе [7] полагали, что наблюдаемое ими усиление экситон- LO -фононного связывания, а также сдвиг спектральных линий экситонов (эффект Штарка) обусловлены заряженными дефектами внутри и вокруг КТ. С учетом того, что эффект Штарка в структурах с КТ представляет собой новое физическое явление, а также имеет потенциальные возможности применения, представляется интересным экспериментально исследовать с помощью метода DLTS этот эффект для самоорганизованных КТ в системе InAs/GaAs, выращенных на плоскостях GaAs с различными индексами Миллера, в зависимости от величины электрического поля.

В данной работе представлены результаты вольт-фарадных $C-U$ - и DLTS-исследований эмиссии дырок из квантовых состояний одиночных квантовых точек в полупроводниковых гетероструктурах InAs/GaAs, полученных на подложках ориентаций (100) и (311)A, в зависимости от величины напряжения обратного смещения U , условий изохронного отжига при включенном/выключенном напряжении смещения и наличия оптической подсветки. Исследуемые гетероструктуры InAs/GaAs с одиночными квантовыми точками выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) с использованием эффектов самоорганизации.

2. Образцы и методы исследования

Исследуемые в работе гетероструктуры InAs/GaAs с ОКТ были получены методом МПЭ на подложках n^+ -GaAs с ориентацией (100) и (311)A. Массив ОКТ был сформирован в результате однократного осаждения 2 монослоев InAs. ОКТ были помещены в середину слоя p -GaAs толщиной 0.90 мкм, легированного Be до концентрации $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Сверху слой p -GaAs был покрыт

[¶] E-mail: m.sobolev@mail.ioffe.ru

p^+ -GaAs толщиной 0.2 мкм, легированным Be до концентрации $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. DLTS-исследования глубоких ловушек в гетероструктурах производились с помощью спектрометра DL4600 фирмы BIO-RAD, работающего в режиме двухстробного интегрирования. Для измерения емкости использовался мост Boonton-72B, работающий на частоте 1 МГц. Чувствительность этой установки равна $\Delta C/C \approx 10^{-4}$. Для проведения DLTS-измерений на подложку n^+ -GaAs и слой p^+ -GaAs были термически осаждены омические контакты. Перед каждым DLTS-измерением образец изохронно отжигался в течение 1 мин при фиксированной температуре и при одном из условий: при включенном ($U_a < 0$) или выключенном ($U_a = 0$) напряжении обратного смещения. Предварительно образец нагревался до 350 К и выдерживался в течение 1 мин при $U_a = 0$, если отжиг проводился при $U_a < 0$, а затем охлаждался до температуры отжига. При отжиге с $U_a = 0$ образец выдерживался предварительно с $U_a < 0$. Температуру отжига варьировали в пределах 80–350 К. После этого образец охлаждался до 80 К при одном из двух условий: $U_a < 0$ или $U_a = 0$. Далее начинался процесс DLTS-измерений в темноте или при освещении белым светом. Для определения профиля распределения носителей в гетероструктуре были проведены вольт-фарадные измерения. Энергия термической активации глубоких уровней E_a и сечения захвата на них носителей σ_p определяли из зависимости Аррениуса с применением метода окна темпов в стандартных DLTS-измерениях.

3. Результаты и их обсуждение

Были проведены измерения вольт-фарадных ($C-U$) характеристик $p-n$ -гетероструктур InAs/GaAs с ОКТ при температуре $T = 82 \text{ К}$. Изменения емкости C при варьировании напряжения смещения U для структур на подложках (311)A и (100) GaAs отражают типичное для локализованных состояний поведение [1,2]. В профилях распределения концентрации свободных дырок $p^*(U)$ (рис. 1, *a*, *b*), рассчитанных с использованием данных емкостных измерений при $T = 82 \text{ К}$, наблюдалось по одному пику, связанному с опустошением состояний квантовых точек. Для структуры на подложке (311)A GaAs (рис. 1, *a*, кривая 2) характерна сильная зависимость от оптической подсветки при проведении $C-U$ -измерений и менее сильная от условий предварительного изохронного отжига перед проведением измерений (на рисунке не показана). Такое поведение $C-U$ -характеристик структуры на подложке (311)A GaAs, согласно результатам наших более ранних работ [3,13], свидетельствует о том, что в матрице GaAs, в которой расположены ОКТ, имеются точечные дефекты с глубокими уровнями, концентрация которых сравнима с концентрацией мелких уровней фоновой примеси. Оптическая перезарядка этих глубоких уровней и приводит к существенному изменению $C-U$ -характеристик в результате изменения

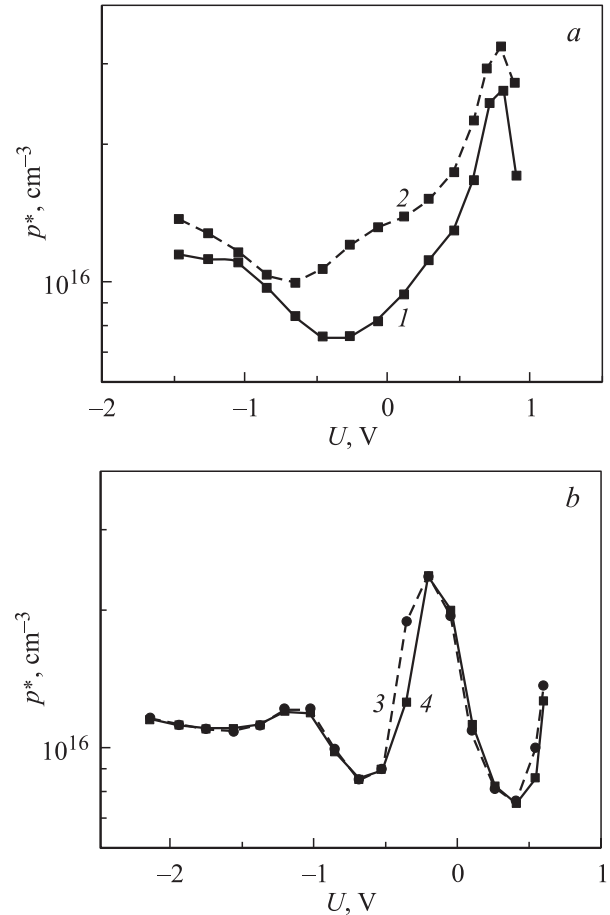


Рис. 1. Концентрационные профили $p^*(U)$ для $p-n$ -гетероструктур InAs/GaAs с ОКТ, полученных на подложках GaAs с ориентацией (311)A (*a*) и (100) (*b*). Профили определены из вольт-фарадных измерений при $T = 82 \text{ К}$ после предварительного изохронного отжига при температуре 350 К и $U_a < 0$. 1, 3 — измерения в темноте, 2, 4 — при освещении белым светом.

положения уровня Ферми. В случае ОКТ-структур на подложке (100) GaAs зависимость $C-U$ -характеристики от условий оптической подсветки была значительно слабее (рис. 1, *b*, кривая 4).

Из $C-U$ -измерений были определены диапазоны напряжений смещения, при которых в спектрах DLTS должны наблюдаться сигналы, связанных с эмиссией носителей из состояний ОКТ. Для определения пространственной локализации DLTS-сигналов и природы уровней, ответственных за эти сигналы, были проведены измерения спектров при постоянной величине напряжения импульса заполнения U_f и изменении величины импульса напряжения U , при котором регистрировался DLTS-сигнал (рис. 2, *a*, *b*). DLTS-исследования ОКТ-структуры на подложке (311)A GaAs показали наличие двух DLTS-пиков: HD1_{(311)A} и HD2_{(311)A}, образованных в результате эмиссии дырок, аккумулированных на глубоких ловушках (рис. 2, *a*). Измерения, проведенные при различных условиях предварительного изохронного

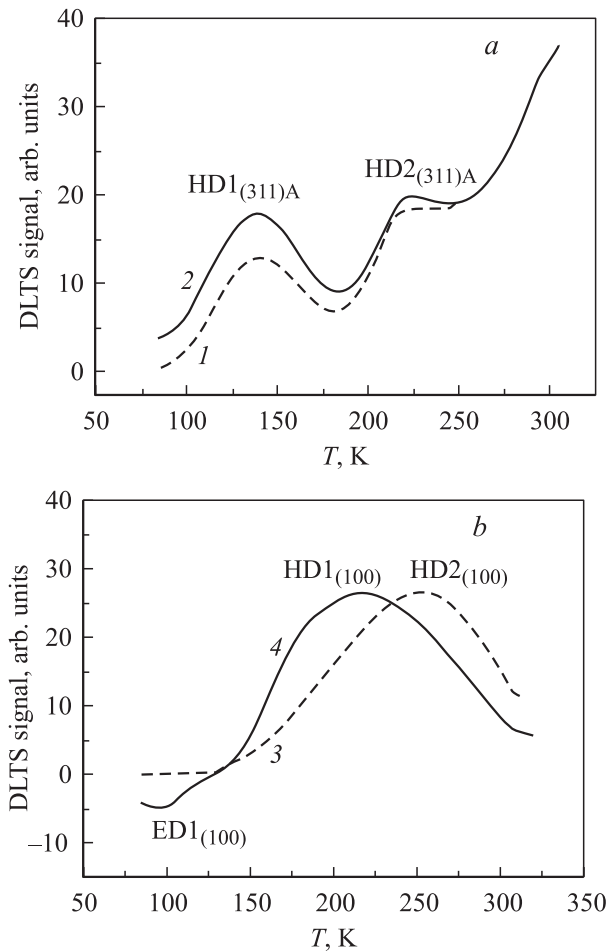


Рис. 2. Спектры DLTS p - n -гетероструктур InAs/GaAs с ОКТ, полученных на подложках GaAs ориентации (311)А (*a*) и (100) (*b*) при напряжениях импульса обратного смещения U_a , В: 1, 2 — (-0.25), 3 — (-0.22), 4 — (-0.64). Все спектры получены при окне темпов эмиссии 1000 см^{-1} , амплитуде импульса заполнения $U_f = 0.42 \text{ В}$, длительности импульса 25 мкс после предварительного изохронного отжига при температуре 350 К и $U_a < 0$. 1 — измерение при освещении белым светом, (2–4) — измерение в темноте.

отжига ($U_a < 0$, $U_a = 0$), показали незначительный рост амплитуд DLTS-пиков HD1_{(311)A} и HD2_{(311)A} при отжиге с $U_a = 0$ по сравнению с отжигом в случае $U_a < 0$, и этот рост становился значительным при оптической подсветке в процессе DLTS-измерений. Наблюдаемый рост амплитуд пиков HD1_{(311)A} и HD2_{(311)A} при отжиге с $U_a = 0$ и оптической подсветке, так же как и в случае $C-U$ -измерений, связывается с изменением положения уровня Ферми при перезарядке дефектов с глубокими уровнями в матрице GaAs [3,13]. В согласии с выводами, полученными в работах [3,13], DLTS-пики HD2_{(311)A} и HD1_{(311)A} обусловлены пространственно локализованными состояниями дырок. Они связываются соответственно с основным и возбужденным состояниями дырок в ОКТ. Кроме этих двух пиков, в DLTS-спектрах наблюдался также еще один пик (на рис. 2, *a* не показан).

Параметры дефекта с глубоким уровнем, ответственного за появление этого пика, определенные из зависимости Аррениуса, ($E_a = 331 \text{ мэВ}$ и $\sigma_p = 4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^2$) близки к параметрам дефектов HL7 и HL11 [14]. Дефекты HL7 и HL11 обычно образуются в слоях GaAs, полученных соответственно методом МПЭ и из расплава. При этом дефект HL11 очень близок по параметрам к дефекту HL5 [14], который, как установлено в нашей работе [15], представляет собой комплекс собственных дефектов, включающих вакансию мышьяка V_{As} . Этот дефект мы уже ранее наблюдали в гетероструктурах GaAs/InAs с ОКТ, полученных методом МПЭ [13]. DLTS-измерения спектров структуры с ОКТ на подложке (100) GaAs (рис. 2, *b*) также показали наличие трех пиков: пик ED1₍₁₀₀₎, связанный с эмиссией электронов с уровней ловушек, расположенных в верхней половине запрещенной зоны, и пики HD1₍₁₀₀₎ и HD2₍₁₀₀₎, связанные с эмиссией дырок с ловушек, расположенных в нижней половине запрещенной зоны. Для этой структуры были также проведены измерения при различных условиях предварительного изохронного отжига ($U_a < 0$, $U_a = 0$), которые показали, что для всех трех пиков наблюдается их смещение по температуре при изменении условий изохронного отжига. Смещение DLTS-пиков определяется наличием электростатического диполя, образованного носителями, локализованными в ОКТ, и ионизованными дефектами с глубокими уровнями. Смещение является характерным признаком, дающим основание идентифицировать DLTS-пики ED1₍₁₀₀₎, HD1₍₁₀₀₎ и HD2₍₁₀₀₎ как связанные с состояниями ОКТ или интерфейсными состояниями [3,13]. О принадлежности пиков ED1₍₁₀₀₎ и HD1₍₁₀₀₎ состояниям ОКТ свидетельствует совпадение пространственной локализации этих пиков в спектрах DLTS и пика в профиле распределения концентрации свободных дырок $p^*(U)$ (рис. 1, *b*), который связан с опустошением носителей, аккумулированных на состояниях квантовых точек. Область пространственной

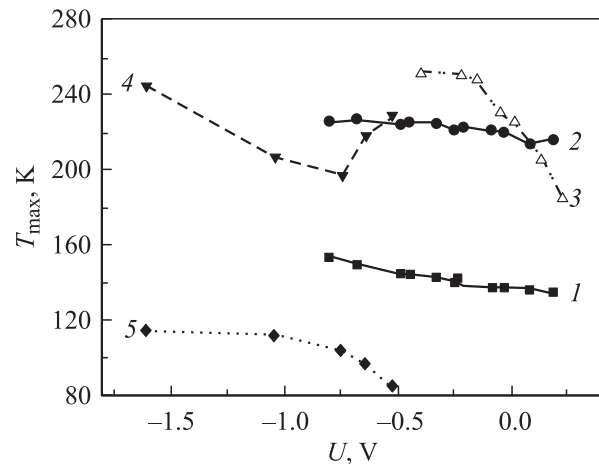


Рис. 3. Зависимости температурного положения пиков DLTS от величины импульса напряжения U : 1 — HD1_{(311)A}, 2 — HD2_{(311)A}, 3 — HD2₍₁₀₀₎, 4 — HD1₍₁₀₀₎, 5 — ED1₍₁₀₀₎.

локализации пика $HD_{2(100)}$ совпадает с гетерограницей смачивающий слой–ОКТ. Для всех структур были построены зависимости температурного положения DLTS-пиков T_{\max} от величины U (рис. 3). Для пиков $HD_{1(311)A}$ и $HD_{2(311)A}$ (рис. 3, кривые 1 и 2) наблюдалось смещение в область высоких температур с ростом абсолютной величины U , что соответствует изменению энергии термической активации от 52 до 61 мэВ и от 303 до 308 мэВ. В случае ОКТ-структуры на подложке (100) GaAs мы также наблюдали смещение положения DLTS-пиков (рис. 3): для $HD_{2(100)}$ в высокотемпературную область с изменением напряжения смещения от +0.22 до -0.40 В (кривая 3), для $HD_{1(100)}$ при изменении U от -0.52 до -0.75 В максимум смещается в область низких температур (кривая 4), а затем, при изменении U от -0.75 до -1.61 В, в сторону высоких температур. Это соответствует изменению энергии термической активации для уровня, соответствующего пику $HD_{2(100)}$, от 217 до 288 эВ, а пику $HD_{1(100)}$ от 239 до 156 мэВ, а затем до 215 мэВ. Положение пика $ED_{1(100)}$ с ростом абсолютной величины U (рис. 3, кривая 5) смещалось в область высоких температур, и при $U = -0.75$ В энергия термической активации уровня, соответствующего этому DLTS-пику, составляла 192 мэВ, а сечение захвата электрона $8.0 \cdot 10^{-13}$ см². Наблюдаемые зависимости положения DLTS-пиков, возникающих в результате эмиссии дырок с состояний квантовых точек, от величины приложенного к структуре напряжения смещения U для ОКТ-структуры на подложке (311)A GaAs связываются с проявлением эффекта смещения Штарка для уровней энергии квантового состояния в ОКТ [4–5]. Как было установлено в работе [5], смещение Штарка в этом случае, по-видимому, определяется комбинацией электрического поля p – n -перехода и пьезоэлектрического поля, возникающего в эпитаксиальных слоях GaAs при их росте на подложках с высоким индексом Миллера, и не превышает 10 мэВ. В случае ОКТ-структуры на подложке (100) GaAs зависимости положения DLTS-пиков, возникающих в результате эмиссии дырок, от величины приложенного к структуре напряжения смещения U (рис. 3) были подобны тем, что ранее наблюдались для структур с двумя вертикально-сопряженными квантовыми точками, которые также выращивались на подложках (100) GaAs [12]. Эти зависимости связывались с двумя явлениями, которые могут проявляться в структурах с ОКТ и давать противоположный вклад в величины энергии термической активации с ростом электрического поля, определяемые из DLTS-измерений:

1) полевым эффектом, понижающим барьер для термоэмиссии [16];

2) эффектом Штарка, смещающим уровни энергии квантового состояния в ОКТ [4–8].

Для этой ОКТ-структуры наблюдалось существенное увеличение смещения Штарка для основного состояния дырок в ОКТ, оно становилось ~ 60 мэВ. Появилась также сильная полевая зависимость энергии термической активации для эмиссии дырок с этого состояния, что

практически мы не регистрировали для ОКТ-структуры на подложке (311)A GaAs. Появилось интерфейсное состояние на гетерогранице смачивающий слой–ОКТ, для которого также наблюдали сильное смещение Штарка. Кроме квантовых состояний дырок для ОКТ-структур на подложках (100) GaAs в DLTS-спектрах наблюдалось также квантовое состояние электронов — пик $ED_{1(100)}$, для которого также было характерно проявление смещения Штарка.

4. Заключение

Таким образом, результаты наших DLTS-исследований ОКТ-гетероструктур, полученных на подложках GaAs с ориентацией (311)A и (100), показывают, что структуры различаются энергиями уровней квантовых состояний в ОКТ, которые характеризуются различным смещением Штарка. Кроме того, в ОКТ-структуре на подложке GaAs с ориентацией (100) наблюдалась полевая зависимость энергии термической активации для эмиссии дырок с этого квантового состояния в ОКТ и установлено наличие интерфейсного состояния на гетерогранице смачивающий слой–ОКТ, для которого также наблюдали сильное смещение Штарка. Эти различия в свойствах двух структур могут быть связаны с различиями в геометрической форме ОКТ [17], условиях формирования ОКТ [3] и обусловлены разной ориентацией поверхности подложки, на которой выращивались гетероструктуры с ОКТ [18]. Особенностью формирования ОКТ-структур на подложках (100) GaAs могут быть также наличие точечных дефектов решетки, расположенных вблизи ОКТ [1–3], и потенциального барьера для захвата носителей [9–10,19].

Работа выполнена при поддержке научной программы „Физика твердотельных наноструктур“ и РФФИ (проект № 00-02-16848).

Список литературы

- [1] М.М. Соболев, Ф.Р. Ковш, В.М. Устинов, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов. ФТП, **31**, 1249 (1997).
- [2] M.M. Sobolev, I.V. Kochnev, V.M. Lantratov, N.A. Cherkashin, V.V. Emtsev. Physica B: Condens Matter, **273–274**, 959 (1999).
- [3] М.М. Соболев, И.В. Кочнев, В.М. Лантратов, Н.А. Берг, Н.А. Черкашин, Н.Н. Леденцов, Д.А. Бедарев. ФТП, **34**, 200 (2000).
- [4] A. Patané, A. Levin, A. Polimeny, F. Schindler, P.C. Main, L. Eaves, M. Henini. Appl. Phys. Lett., **77**, 2979 (2000).
- [5] M. Gurioli, S. Sanguinetti, M. Henini. Appl. Phys. Lett., **78**, 931 (2001).
- [6] P.W. Fry, I.E. Itskevich, D.J. Mowbray, M.S. Skolnick, J.J. Finley, J.A. Barker, E.P. O'Reilly, L.R. Wilson, I.A. Larkin, P.A. Maksym, M. Hopkinson, M. Al-Khafaji, J.P.R. David, A.G. Gillis, G. Hill, J.C. Clark. Phys. Rev. Lett., **84** (4), 733 (2000).

- [7] A. Lemaitre, A.D. Ashmore, J.J. Finley, D.J. Mowbray, M.S. Skolnick, M. Hopkinson, T.F. Krauss. *Phys. Rev. B*, **63**, 161 309 (R) (2001).
- [8] W. Sheng, J.-P. Leburton. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 1258 (2001).
- [9] М.М. Соболев, И.В. Кочнев, В.М. Лантратов, Н.Н. Леденцов. *ФТП*, **35**, 1228 (2001).
- [10] М.М. Sobolev, V.M. Lantratov. *Physica B: Condens. Matter*, **308–310**, 1113 (2002).
- [11] М.М. Sobolev, V.M. Ustinov, G.E. Cirlin. *Physica B: Condens. Matter*, **340–342**, 1103 (2003).
- [12] М.М. Соболев, Г.Э. Цырлин, Ю.Б. Самсоненко, Н.К. Поляков, А.А. Тонких, Ю.Г. Мусихин. *ФТП*, **39**, 131 (2005).
- [13] М.М. Соболев, Ф.Р. Ковш, В.М. Устинов, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, Ю.Г. Мусихин. *ФТП*, **33**, 184 (1999).
- [14] A. Mitonneau, G.M. Martin, A. Mircea. *Electron. Lett.*, **13**, 666 (1977).
- [15] П.Н. Брунков, С. Гайбуллаев, С.Г. Конников, В.Г. Никитин, М.И. Папенцев, М.М. Соболев. *ФТП*, **25**, 338 (1991).
- [16] S. Anand, N. Carlsson, M.-E. Pistol, L. Samuelson, W. Seifert. *J. Appl. Phys.*, **67**, 3016 (1995).
- [17] W. Sheng, J.-P. Leburton. *Physica E*, **17**, 50 (2003).
- [18] M. Henini. *III-Vs Review*, **11**, 48 (1998).
- [19] H.L. Wang, F.H. Yang, S.L. Feng, H.J. Zhu, D. Ning, H. Wang, X.D. Wang. *Phys. Rev. B*, **61**, 5530 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

The Stark shift of hole states in single InAs/GaAs quantum dots grown on (100) and (311)A substrates

*M.M. Sobolev, G.E. Cirlin, Yu.B. Samsonenko,
N.K. Polyakov, A.A. Tonkikh*

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