

## ЕМКОСТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УРОВНЕЙ В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ InAs В МАТРИЦЕ GaAs

© П.Н.Брунков, С.Г.Конников, В.М.Устинов, А.Е.Жуков  
А.Ю.Егоров, М.В.Максимов, Н.Н.Леденцов, П.С.Копьев

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 2 октября 1995 г. Принята к печати 4 октября 1995 г.)

Проводились температурные исследования вольт-емкостных характеристик барьеров Шоттки на эпитаксиальных слоях GaAs *n*-типа проводимости, содержащих слой квантовых точек InAs. Представлена модель, основанная на решении уравнения Пуассона, для расчета вольт-емкостных характеристик, которая позволяет определить основные параметры квантовых точек: расстояние от слоя квантовых точек до поверхности образца, концентрацию квантовых точек и энергетическое положение уровня электрона в квантовой точке. Наблюдается достаточно хорошее соответствие с данными фотолюминесценции и просвечивающей электронной микроскопии. Объяснена температурная зависимость пороговой плотности тока лазера на квантовых точках.

В последнее время все больший интерес привлекают к себе гетероструктуры с квантовыми точками, в которых движение квазичастиц квантовано по всем трем координатам и спектр плотности состояний представляет собой набор  $\delta$ -функций [1-8]. Один из наиболее перспективных методов получения массива квантовых точек в полупроводниковой матрице основан на эффекте спонтанного образования однородных массивов упругонапряженных островков на поверхности полупроводников, наблюдаемом при достижении критической толщины псевдоморфного слоя [2-7]. Для конструирования реальных приборных структур на основе квантовых точек, таких как, например, инжекционные гетеролазеры [8], необходимо развитие методов неразрушающего контроля параметров квантовых точек и повышение уровня понимания физических процессов в таких структурах. В работе [4] было показано, что вольт-емкостная ( $C-V$ ) методика может быть использована для исследования структур с квантовыми точками. Авторы [4] использовали качественную модель в приближении нулевой температуры, позволяющую оценивать только форму плотности состояний в квантовых точках. В данной работе мы исследовали температурную зависимость  $C-V$ -характеристик структур с квантовыми точками InAs-GaAs. Нами представлена модель, основанная на решении уравнения Пуассона,

для расчета  $C-V$ -характеристик структуры  $n$ -типа проводимости, содержащих плоскость квантовых точек, ориентированную параллельно плоскости барьера Шоттки. Эта модель позволяет определить расстояние от слоя квантовых точек до поверхности образца, двумерную концентрацию квантовых точек ( $N_{qd}$ ), энергетическое положение уровня электрона в квантовой точке ( $E_{qd}$ ) и степень заполнения квантовых точек электронами в зависимости от температуры наблюдения.

## Образцы и методы исследования

Исследуемые структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Riber 32P с твердотельным источником мышьяка на  $n^+$ -подложке GaAs (100). Квантовые точки InAs были сформированы *in situ* в результате трансформации упругонапряженного слоя InAs с эффективной толщиной  $5 \text{ \AA}$  в массив островков. Переход от двухмерного к трехмерному распределению InAs на поверхности GaAs контролировался по изменению картины дифракции быстрых электронов на отражение [6]. Массив квантовых точек был помещен в середину нелегированного слоя GaAs толщиной  $200 \text{ \AA}$ , выращенного на буферном слое GaAs, легированном Si до уровня  $n \sim 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  с толщиной  $1 \text{ мкм}$ . Рост структуры был завершён осаждением слоя GaAs ( $n \sim 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) с толщиной  $0.5 \text{ мкм}$ .

Измерения  $C-V$ -характеристик проводились на частоте  $1 \text{ МГц}$  с помощью емкостного моста E7-12 в интервале температур от  $T = 77$  до  $400 \text{ К}$ . Амплитуда измерительного сигнала составляла  $25 \text{ мВ}$ .

Исследования спектров фотолюминесценции (ФЛ) проводились при  $T = 77 \text{ К}$  с использованием непрерывного гелий-неонового лазера с длиной волны  $632.8 \text{ нм}$ , монохроматора и охлаждаемого фотоумножителя, работающего в режиме счета числа фотонов. Плотность возбуждения была на уровне  $1 \text{ Вт/см}^2$ .

## Модель

В данной работе представлена модель для расчета  $C-V$ -характеристики структуры с барьером Шоттки на слое  $n$ -типа, выращенном на  $n^+$ -подложке. Пренебрегая влиянием неосновных носителей заряда, одномерное уравнение Пуассона (в направлении  $Z$ , перпендикулярном слою квантовых точек) можно записать в следующем виде:

$$\frac{d}{dz} \left( \epsilon_0 \epsilon(z) \frac{d}{dz} \right) \Phi(z) = q [N_d^+(z) - n_{3D}(z) - n_{qd}(z)], \quad (1)$$

где  $\epsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $\Phi(z)$  — электростатический потенциал,  $q$  — заряд электрона. Концентрация ионизованных доноров  $N_d^+$  задается в виде

$$N_d^+ = \frac{N_d}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_F - E_d}{kT}\right)}, \quad (2)$$

где  $N_d$  — концентрация доноров,  $E_d$  — энергия ионизации доноров,  $E_F$  — энергия уровня Ферми,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура.

Концентрация свободных носителей в зоне проводимости GaAs в равновесных условиях записывается как

$$n_{3D}(z) = N_C F_{1/2} \left( \frac{E_F - E_C}{kT} \right), \quad N_C = 2 \left( \frac{2\pi m^*(z)kT}{(2\pi\hbar)^2} \right)^{3/2}, \quad (3)$$

где  $E_C$  — энергия дна зоны проводимости,  $m^*$  — эффективная масса электронов,  $\hbar$  — приведенная постоянная Планка.

Двумерную концентрацию электронов ( $n_{qd}$ ), находящихся в квантовых точках, можно определить из интеграла произведения функции плотности состояний  $\rho(E)$  и функции распределения электронов по энергиям  $f(E)$  по всем возможным состояниям:

$$n_{qd} = \int_{E_{qd}}^{\infty} \rho(E) f(E) dE. \quad (4)$$

Детальные теоретические расчеты [9] показали, что в пирамидальных квантовых точках InAs с характерным размером менее  $200 \text{ \AA}$  существует только один уровень размерного квантования для электронов, на котором может находиться два электрона с противоположно направленными спинами. Экспериментально установлено [5–8], что квантовые точки в исследуемых образцах имеют незначительный разброс по размерам, а следовательно, и по энергиям, поэтому двумерную плотность состояний  $\rho(E)$  с учетом спина электрона можно представить в виде  $\delta$ -функции

$$\rho(E) = 2N_{qd}\delta(E - E_{qd}), \quad (5)$$

где  $N_{qd}$  — двумерная концентрация квантовых точек;  $E_{qd}$  — энергия электронного уровня в квантовой точке, отсчитываемая от дна зоны проводимости GaAs.

В равновесии вероятность заполнения каждого уровня определяется функцией Ферми–Дирака, поэтому интеграл (4) с учетом выражения (5) можно записать как

$$n_{qd} = \int_{E_{qd}}^{\infty} 2N_{qd}\delta(E - E_{qd}) \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} dE. \quad (6)$$

После интегрирования получим

$$n_{qd} = \frac{2N_{qd}}{1 + \exp\left(\frac{E_{qd} - E_F}{kT}\right)}. \quad (7)$$

Решая уравнение Пуассона (1) для разных величин обратного смещения  $V_{rev}$  на барьере Шоттки, определяем величину заряда в структуре на единицу площади из закона Гаусса:

$$Q = \varepsilon_0 \varepsilon E_{surf}, \quad E_{surf} = - \left. \frac{dq\Phi(z)}{dz} \right|_{surface}, \quad (8)$$

где  $E_{\text{surf}}$  — величина электростатического поля на поверхности структуры. Для расчета емкости структуры используем квазистатическое приближение

$$C|_{V=V_{\text{rev}}} = \frac{\Delta Q}{\Delta V}|_{V=V_{\text{rev}}}, \quad (9)$$

где  $\Delta Q$  есть изменение заряда в структуре, вызванное изменением величины обратного смещения на  $\Delta V$  около  $V_{\text{rev}}$ . Пользуясь приближением обедненного слоя, из  $C-V$ -характеристики рассчитываем профиль распределения концентрации свободных носителей ( $N_{CV}-W$ ):

$$N_{CV}(W) = \frac{C^3}{q\epsilon\epsilon_0 \left(\frac{dC}{dV}\right)}, \quad W = A \frac{\epsilon\epsilon_0}{C}, \quad (10)$$

где  $W$  — ширина области пространственного заряда,  $A$  — площадь барьера Шоттки.

### Обсуждение результатов

На рис. 1, *a, b* и рис. 2, *a, b* приведены  $C-V$ - и  $N_{CV}-W$ -характеристики исследуемых образцов, измеренные при  $T = 300$  и  $200$  К соответственно.  $C-V$ -характеристика имеет ступеньку, ширина которой значительно уменьшается с повышением температуры (рис. 1, *a, 2, a*). Концентрационный профиль  $N_{CV}-W$  (рис. 1, *b, 2, b*), рассчитанный из  $C-V$ -характеристик с использованием выражений (10), имеет пик при величине  $W$ , соответствующий глубине залегания плоскости квантовых точек. Такое поведение  $C-V$ - и  $N_{CV}-W$ -характеристик показывает, что в плоскости квантовых точек аккумулируются электроны.

Согласно расчетам, в рамках приведенной модели высота и ширина ступеньки на  $C-V$ -характеристике зависят от концентрации электронов, находящихся в слое квантовых точек  $n_{qd}$ , которая в свою очередь определяется при заданной температуре концентрацией квантовых точек  $N_{qd}$  и энергией электронного уровня  $E_{qd}$  из уравнения (7). Из значения емкости в области полочки можно определить глубину залегания плоскости квантовых точек.

На рис. 1, *a, b* и рис. 2, *a, b* представлены результаты расчетов  $C-V$ - и  $N_{CV}-W$ -характеристик для фиксированной двумерной концентрации квантовых точек  $N_{qd} = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  при варьировании положения энергии электронного уровня в квантовой точке относительно дна зоны

Параметры, используемые для расчета  $C-V$ -характеристик исследуемой структуры с квантовыми точками InAs-GaAs

| Номер слоя | Материал        | Толщина, нм | $N_d, 10^{16} \text{ см}^{-3}$ |
|------------|-----------------|-------------|--------------------------------|
| I          | GaAs            | 455.0       | 1.5                            |
| II         | GaAs            | 10.0        | 0.1                            |
| III        | Слой точек InAs | —           | —                              |
| IV         | GaAs            | 10.0        | 0.1                            |
| V          | GaAs            | 1000.0      | 1.3                            |

Примечание.  $\epsilon_{\text{GaAs}} = 12.9$  [ $^{10}$ ],  $m_{\text{GaAs}}^* = 0.063$  [ $^{10}$ ],  $E_d(\text{Si}) = 6 \text{ мэВ}$  [ $^{10}$ ].

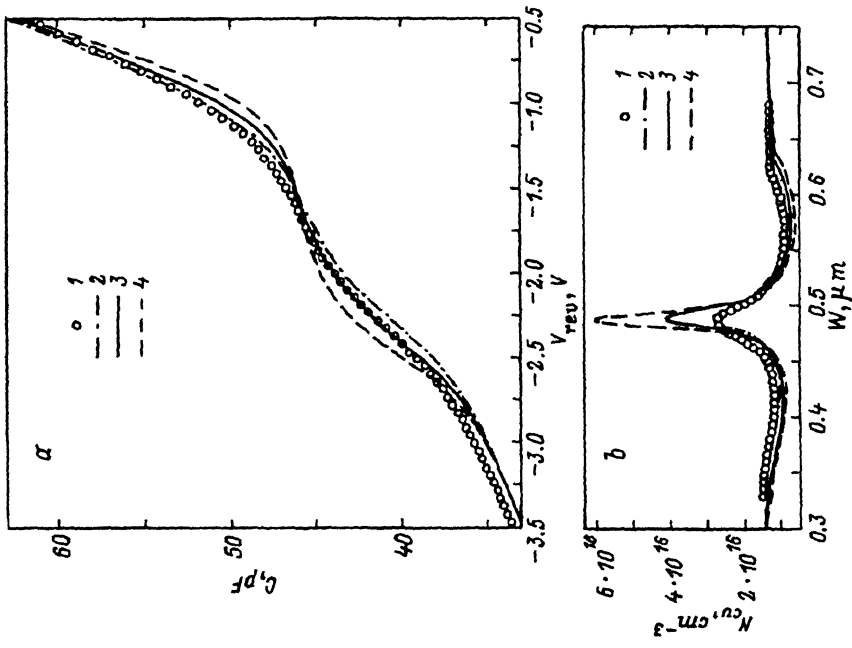


Рис. 1.  $C-V$ - (а) и  $N_{cv}W$ -характеристики (б) структуры с квантовыми точками InAs-GaAs при  $T = 300$  К: экспериментальные данные (1) и модельные расчеты при фиксированном значении  $N_{qd} = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $E_{qd} = 100 \text{ мэВ}$  (2),  $E_{qd} = 125 \text{ мэВ}$  (3) и  $E_{qd} = 100 \text{ мэВ}$  (4).

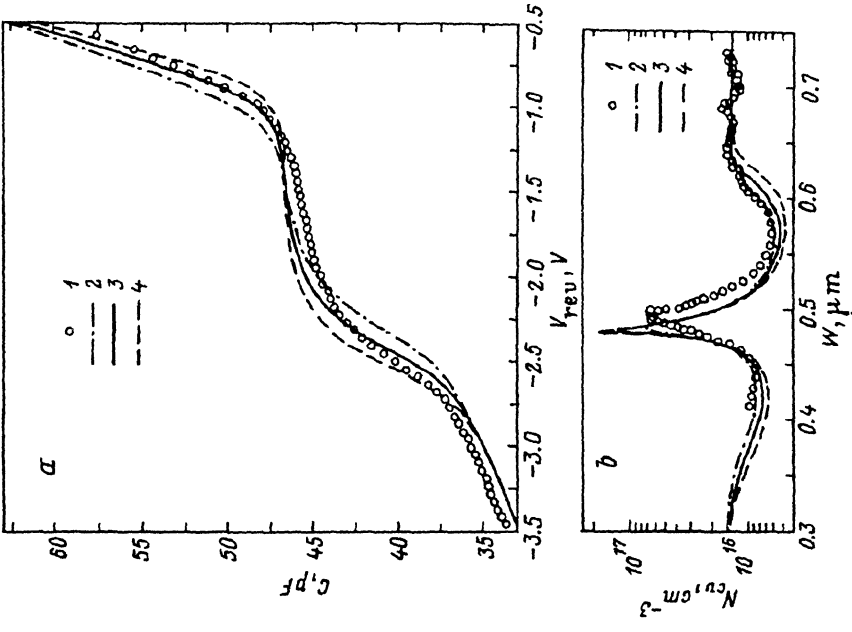


Рис. 2.  $C-V$ - (а) и  $N_{cv}W$ -характеристики (б) структуры с квантовыми точками InAs-GaAs при  $T = 200$  К: экспериментальные данные (1) и модельные расчеты при фиксированном значении  $N_{qd} = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $E_{qd} = 100 \text{ мэВ}$  (2),  $E_{qd} = 125 \text{ мэВ}$  (3) и  $E_{qd} = 100 \text{ мэВ}$  (4).

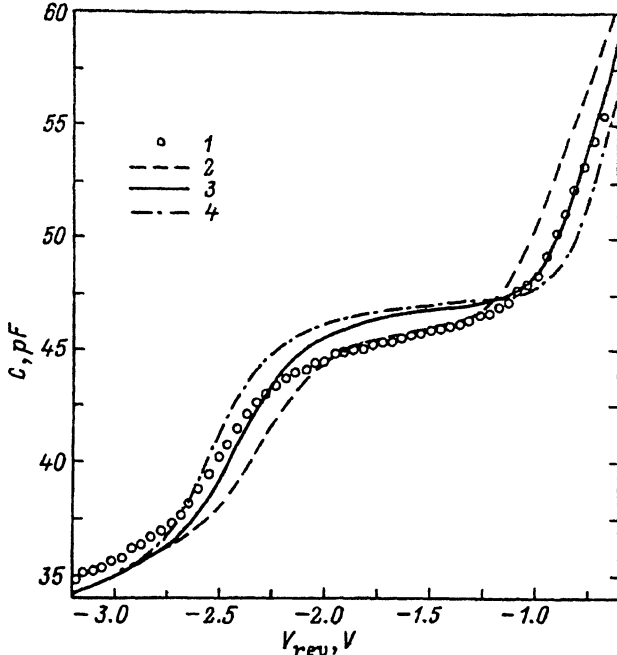


Рис. 3.  $C$ - $V$ -характеристики структуры с квантовыми точками InAs-GaAs при  $T = 200$  К: экспериментальные данные (1) и модельные расчеты при фиксированном значении  $E_{qd} = 125$  мэВ и  $N_{qd} = 1 \cdot 10^{11}$   $\text{см}^{-2}$  (2),  $N_{qd} = 4 \cdot 10^{11}$   $\text{см}^{-2}$  (3) и  $N_{qd} = 2 \cdot 10^{12}$   $\text{см}^{-2}$  (4).

проводимости GaAs. Параметры, используемые для вычислений, приведены в таблице, из которой следует, что уровень легирования слоев GaAs и глубина залегания плоскости квантовых точек близки к значениям, заданным при выращивании эпитаксиальных слоев. Как видно из сравнения экспериментальных данных с теоретическими расчетами (рис. 1, *a, b* и рис. 2, *a, b*), наиболее близкое совпадение наблюдается при энергии электронного уровня в квантовой точке  $E_{qd} = 125$  мэВ.

На рис. 3 приведены результаты расчетов  $C$ - $V$ -характеристик при  $T = 200$  К для фиксированной энергии электронного уровня в квантовой точке  $E_{qd} = 125$  мэВ при варьировании двумерной концентрации квантовых точек  $N_{qd}$  от  $1 \cdot 10^{12}$   $\text{см}^{-2}$ . Лучше всего экспериментальные данные описываются при  $N_{qd} = 4 \cdot 10^{11}$   $\text{см}^{-2}$ . Это значение достаточно хорошо совпадает с концентрацией квантовых точек, определенной из измерений с помощью просвечивающей электронной микроскопии [5,8].

В спектре ФЛ, измеренном на исследуемой структуре, наблюдаются два пика (рис. 4). Наибольшую амплитуду имеет пик ФЛ при  $E = 1.153$  эВ, связанный с электронно-дырочной рекомбинацией в квантовых точках [7]. Появление второго пика ФЛ при  $E = 1.508$  эВ связано с краевой люминесценцией объемного GaAs [7]. В работе [9] были проведены теоретические расчеты электронных и дырочных состояний в пирамидальных квантовых точках InAs-GaAs в зависимости от размера квадратного основания пирамиды. Установлено, что только один электронный и несколько дырочных уровней существуют в квантовых

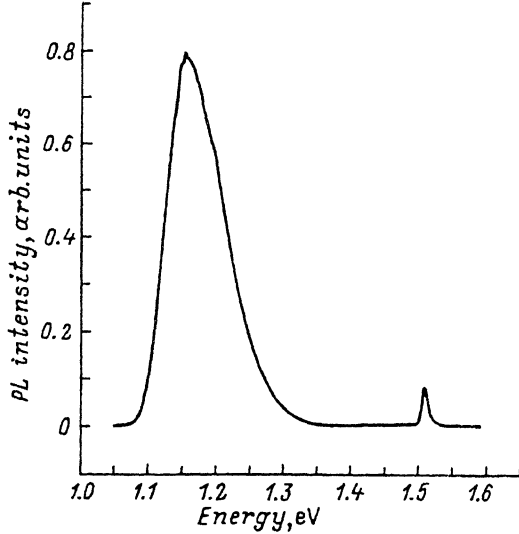


Рис. 4. Спектр фотолюминесценции структуры с квантовыми точками InAs-GaAs при  $T = 77$  К.

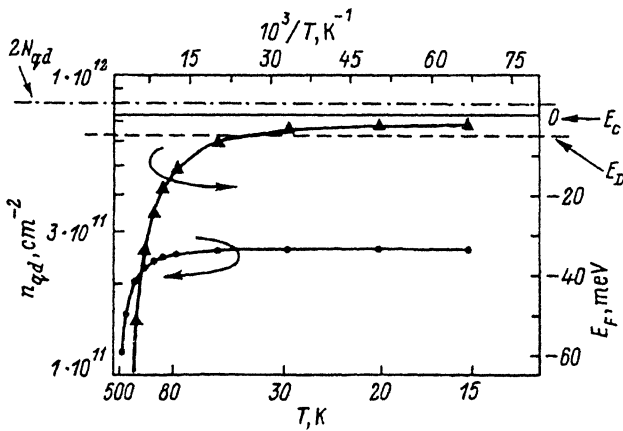


Рис. 5. Температурная зависимость концентрации электронов  $n_{qd}$ , локализованных в квантовых точках InAs-GaAs, и уровня Ферми  $E_F$  в слоях GaAs для  $N_{qd} = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $E_{qd} = 125 \text{ мэВ}$ .

точках InAs-GaAs с размером базы в интервале от 6 до 20 нм. Перекрывание волновых функций электронов и дырок в основном состоянии составляет около 90% [9], поэтому основной вклад в ФЛ квантовых точек дает рекомбинация носителей, находящихся в основном состоянии, и из энергетического положения пика ФЛ можно определить относительное положение электронного и дырочного уровней в квантовой точке. Затем, используя теоретические зависимости из работы [9], можно определить абсолютные значения энергии электронного и дырочного состояний, соответствующие одному и тому же размеру квантовой точки. Положение пика ФЛ квантовых точек InAs-GaAs при  $E = 1.153 \text{ эВ}$  соответствует размеру базы  $d = 95 \text{ \AA}$  и энергии электронного уров-

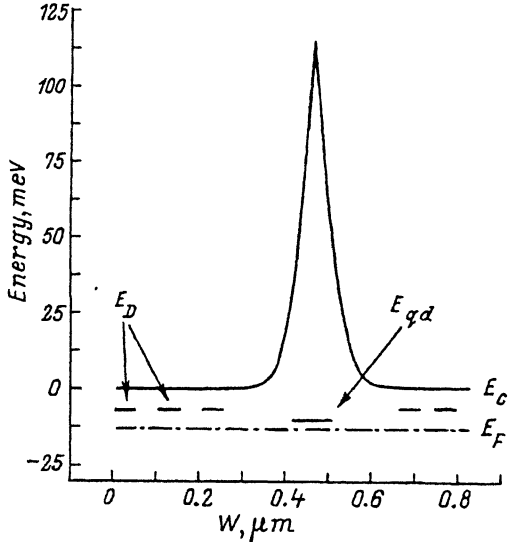


Рис. 6. Зонная диаграмма структуры с квантовыми точками InAs-GaAs при  $T = 80$  К для  $N_{qd} = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $E_{qd} = 125$  мэВ.

ня, расположенного на 125 мэВ ниже дна зоны проводимости GaAs, что достаточно хорошо согласуется с величиной  $E_{qd}$ , определенной из емкостных измерений.

На рис. 5 представлены расчеты температурной зависимости концентрации электронов  $n_{qd}$ , локализованных в квантовых точках InAs-GaAs, при  $N_{qd} = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $E_{qd} = 125$  мэВ. С понижением температуры  $n_{qd}$  увеличивается, однако при  $T < 80$  К наблюдается насыщение  $n_{qd}$  на уровне  $2.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , хотя плотность разрешенных квантовых состояний составляет  $2 \cdot N_{qd} = 8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Такое поведение  $n_{qd}$  обусловлено тем, что накапливающийся в плоскости квантовых точек отрицательный заряд электронов приводит к возникновению кулоновского отталкивающего потенциала и образованию областей пространственного заряда (ОПЗ) положительно ионизованных доноров с обеих сторон от плоскости квантовых точек (рис. 6). Увеличение концентрации электронов в плоскости квантовых точек приводит к ее «выталкиванию» и увеличению ширины ОПЗ. Баланс положительного и отрицательного зарядов определяется положением уровня Ферми в слоях GaAs. С понижением температуры уровень Ферми  $E_F$  приближается к уровню мелких доноров  $E_D$  (рис. 5), поэтому происходит насыщение роста концентрации электронов в плоскости квантовых точек при  $T < 80$  К.

### Заключение

В данной работе представлены емкостные исследования электронных состояний в квантовых точках InAs в матрице GaAs. Плоскость квантовых точек рассматривается как набор невзаимодействующих локальных центров с одинаковой энергией ионизации и двухкратным вырождением по спину. Равновесное заполнение электронных уровней в квантовых точках определяется функцией Ферми-Дирака. Пред-



ставленная физическая модель хорошо описывает экспериментальные данные и позволяет определять параметры квантовых точек, которые хорошо согласуются с данными ФЛ и просвечивающей электронной микроскопии. В отличие от ФЛ емкостная методика позволяет проводить раздельное исследование электронных и дырочных уровней в квантовых точках.

Показано, что в исследуемой структуре с модулированным легированием при понижении температуры концентрация электронов, локализованных в квантовых точках, насыщается на уровне 30% от возможного числа состояний. Это связано с возникновением отталкивающего кулоновского потенциала электронов, локализованных в плоскости квантовых точек. При температурах выше 80 К наблюдается экспоненциальное уменьшение концентрации электронов, находящихся в квантовых точках, обусловленное термическим выбросом электронов в зону проводимости GaAs. Данная модель объясняет повышение с температурой величины порогового тока в лазерах на квантовых точках, отмеченное ранее в работе [8].

### Список литературы

- [1] L. Goldstein, F. Glas, J.Y. Marzin, M.N. Charasse, G. Le Roux. *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 1099 (1985).
- [2] D. Leonard, M. Krishnamurthy, C.M. Reaves, S.P. Denbraars, P.M. Petroff. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 3203 (1993).
- [3] J.-Y. Marzin, J.-M. Gerard, A. Izrael, D. Barrier, G. Bastard. *Phys. Rev. Lett.*, **73**, 716 (1994).
- [4] G. Medeiros-Ribeiro, D. Leonard, P.M. Petroff. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 1767 (1995).
- [5] M. Grundmann, J. Christen, N.N. Ledentsov, J. Bohrer, D. Bimberg, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Richter, U. Gosele, J. Heydenreich, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 4043 (1995).
- [6] Ф.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, В.М. Устинов. *ФТП*, **28**, 1439 (1994).
- [7] Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, Г.Э. Цырлин, В.Н. Петров, Г.М. Гурьянов. *ФТП*, **29**, 1295 (1995).
- [8] N. Kristaedter, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V.M. Ustinov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, U. Richter, P. Werner, U. Gosele, J. Heydenreich. *Electron. Lett.*, **30**, 1416 (1995).
- [9] M. Grundmann, O. Stier, D. Bimberg. *Phys. Rev. B* (inprint).
- [10] *Handbook of Semiconductor Parameters*, ed. by M. Levinstein, S. Rumyantsev, M. Shur (Singapore, WorldScientific Publishing, 1993).

Редактор В.В. Чалдышев

# Capacitance spectroscopy of electron energy levels in InAs quantum dots in GaAs matrix.

*P.N.Brounkov, S.G.Konnikov, V.M.Ustinov, A.E.Zhukov, A.Yu.Egorov.  
V.M.Maximov, N.N.Ledentsov. P.S.Kop'ev*

A.F.Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences,  
194021 St.-Petersburg, Russia

We have studied temperature dependence of capacitance-voltage characteristics of Schottky-barrier structures with charged InAs quantum dots embedded in Si-doped GaAs matrix. The model based on a solution of Poisson's equation is proposed to determine basis parameters of the quantum dots: distance from the Schottky-barrier, the sheet concentration of quantum dots and the electron energy level in quantum dots. These parameters are in good agreement with data obtained from photoluminescence and transmission electron microscopy studies and explain the observed temperature behaviour of threshold current density in the quantum dots laser.

---