УДК 621.315.529

В.И.Зубков

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ПРОВОДИМОСТИ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК InAs/GaAs

The emission of electrons from ground and excited energy levels in InAs/GaAs self-organized quantum dots grown by MOCVD has been registered by means of admittance spectroscopy in the temperature range 10...140 K. From the analysis of the experimental spectra the apparent density of states function for the array of self-organized InAs/GaAs quantum dots has been obtained.

В гетероструктурах с квантовыми точками существует наивысшая степень размерного ограничения движения носителей заряда по всем трем координатам. При этом ожидается, что в них возможно получить систему бесконечно узких энергетических уровней, т.е. функция плотности энергетических состояний (DOS) может иметь вид δ -функции, что является очень привлекательным для создания принципиально новых приборов наноэлектроники. Поэтому в настоящее время наблюдается значительный интерес к исследованию гетероструктур с квантовыми точками (KT) InAs/GaAs, которые рассматриваются в качестве перспективного материала для создания полупроводниковых лазеров с длиной волны излучения 1,3 мкм [1]. Для изучения оптических переходов между энергетическими уровнями в квантовой точке широко используются оптические методы исследования (фотолюминесценция, возбуждение фотолюминесценции) [1-3], однако эти методы с необходимостью включают в рассмотрение как электронную, так и дырочную подсистемы, поэтому из них невозможно получить абсолютные величины энергетических уровней квантования.

С помощью спектроскопии полной проводимости (admittance spectroscopy) оказывается возможным отдельное изучение механизма электронной либо дырочной эмиссии [4]. В настоящей работе мы представляем результаты измерений и анализа спектров полной проводимости *p*-*n*-гетеропереходов InAs/GaAs с самоорганизующимися квантовыми точками, в которых обнаружена эмиссия с основного и возбужденного уровней в квантовой точке и предлагается оригинальный метод определения функции плотности энергетических состояний массива квантовых точек.

Гетероструктуры с квантовыми точками были выращены методом химического осаждения из металло-органических соединений (MOCVD) на сильно легированных подложках n^+ -GaAs. Массив квантовых точек заращивался сверху слоем *n*-GaAs толщиной 448 нм, а затем слой GaAs *p*-типа толщиной 650 нм напылялся для создания *p*-*n* перехода [5].

Измерения проводились с использованием RLC-мультиметра HP4284A в диапазоне частот 1 кГц÷1 МГц и температур 10÷300 К. Амплитуда измерительного сигнала составляла 50 мВ.

Спектры проводимости измерялись в частотном диапазоне от 1 кГц до 1 МГц. Отклик от перезарядки квантовых точек был обнаружен в диапазоне приложенных смещений $-2,2\div -3,7$ В. Ряд спектров для различных приложенных смещений приведен на рис.1. При больших смещениях (|U| > 3 В) в спектрах проводимости наблюдался один широкий пик. С понижением обратного смещения амплитуда сигнала проходила через максимум при U = -3,1 В. После этого второй, дополнительный, пик появлялся на низкотемпературной стороне спектров. На рис.2 построены амплитуды спектров проводимости, измеренных при разных обратных смещениях, как функции этого смещения.





Рис.1. Спектры проводимости гетероструктуры InAs/GaAs при различных приложенных смещениях; тестовая частота 1 МГц

Рис.2. Амплитуда спектров проводимости как функция приложенного смещения к образцу; правая ось относится к *LT* кривой

Мы связываем обнаруженные пики L1 и L2 с эмиссией электронов с основного и возбужденного энергетических уровней в квантовой точке. При U = -2,7 В, как видно из рис.2, оба пика имеют одинаковую амплитуду. Фактически вид кривых L1 и L2 отражает функцию плотности состояний слоя квантовых точек. Из рис.2 очевидно, что концентрация носителей на более высоких возбужденных уровнях КТ слишком мала, чтобы быть зарегистрированной спектроскопией проводимости.

В соответствии с [2] спектр проводимости массива квантовых точек с уширенной функцией плотности состояний имеет максимум, если выполняется условие $\omega/e_n = 2$, где ω — частота измерений; e_n — скорость термической эмиссии электронов из квантовой точки.

Определенная из графиков Аррениуса наблюдаемая («аррагеnt») энергия активации уровней L1 и L2 очень сильно зависела от приложенного смещения U_{rev} (рис.3). Для уровня L1 зарегистрированная энергия активации изменялась от 40 до 150 мэВ. Мы интерпретируем зависимость на рис.3 как текущее положение на шкале энергий, тестируемое спектроскопией проводимости при данном U_{rev} . Это явление отсутствует для глубоких уровней в объемном полупроводнике и хорошо известно для емкостных измерений и измерений проводимости структур с квантовыми ямами и квантовыми точками. Причина этого следующая. Несмотря на то, что при концентрации $n = 1,7 \cdot 10^{16}$ см⁻³ уровень Ферми находится существенно ниже дна

зоны проводимости объемного материала GaAs, тем не менее в равновесии уровни квантования L1 и L2 в квантовой точке лежат ниже уровня Ферми из-за большой величины разрыва зоны проводимости в InAs/GaAs гетеросистеме (0,917 эВ при 6,5 К [6]), в противоположность, например, псевдоморфно выращенным напряженным квантовым ямам в той же самой системе $In_xGa_{1-x}As/GaAs (x < 0,2)$ [7]. С увеличением обратного смещения сильное электрическое поле, проникая в слой квантовых точек, выталкивает энергетические уровни квантования вверх, и уровень электрохимического потенциала пересекает их один за другим, создавая условия для появления резонанса в эквивалентной измерительной цепи. Отметим, что при смещении U = -3,5 В измерен-





Рис.3. Зависимость наблюдаемой энергии активации основного (*L*1) и возбужденного (*L*2) уровней в КТ от обратного смещения



Рис.4. Рассчитанная из спектров проводимости функция плотности энергетических состояний в КТ InAs/GaAs; пунктир — Гауссова функция с параметрами *E_m* = 57 мэВ, σ = 18,3 мэВ

ная энергия активации ΔE_a оказалась примерно равной 105 мэВ, в хорошем согласии с энергией активации 94 мэВ, полученной из спектров DLTS [5].

Перестроим зависимость G_m из рис.2 как функцию энергии активации E_a рис.4. Получившаяся зависимость отражает количество носителей, участвующих в термоэмиссии с уровня с данной энергией E. Мы предлагаем рассматривать данный график как «наблюдаемую» функцию плотности состояний массива неоднородных КТ InAs/GaAs, модифицированную распределением Ферми — Дирака.

Из сравнения этой кривой с распределением Гаусса можно определить величину уширения функции плотности состояний в гауссовом приближении. Это дает $\sigma = 18$ мэВ.

Низкотемпературный пик (LT на рис.2) был обнаружен при очень низких температурах (< 40 K). Положение его максимума монотонно сдвигалось с изменением частоты, на низких частотах (< 20 кГц) его максимум оказывался недостижимым (ниже 10 K). Этот пик наблюдался в диапазоне приложенных смещений +0,8 ÷ -1,5 В. Его интенсивность была примерно в 20 раз выше интенсивности пика L1 (см. рис.2). Природа этого LT пика есть эффект вымораживания основных носителей заряда [8], что приводит к гигантскому увеличению последовательного сопротивления и, как следствие, к изменению параметров эквивалентной цепи LCR-мультиметра. В соответствии с [8] мы определили энергию активации E_a мелкой примеси из выражения

$$f_{peak} = AT^3 \exp(-E_a / kT),$$

где A — температурно-независимый множитель.

Это дает E_a около 4 мэВ в полном соответствии с известной энергией ионизации основной легирующей примеси Si в GaAs. Вместе с этим следует отметить, что экспериментальная кривая Аррениуса несколько отличается от прямой в координатах f_{peak}/T^3 vs 1/T. Это указывает на существенную роль в низкотемпературных измерениях полной проводимости туннельных механизмов, что также подтверждает результаты работы [5] по измерениям нестационарной емкостной спектроскопии самоорганизующихся квантовых точек.

^{1.} Bimberg D., Grundmann M., and Ledentsov N.N. Quantum Dot Heterostructures. Wiley, Chichester, 1998.

^{2.} Brunkov P.N., Kovsh A.R., Ustinov V.M., a.o. // J. Electron. Mater. 1999. V.28. N5. P.486.

^{3.} Maximov M.V., Tsatsul'nikov A.F., Sizov D.S., a.o. // Nanotechnology. 2000. V.11. N4. P.309.

Zubkov V.I., Rumyantsev A.Yu., Solomonov A.V. // Proc. of 12th Intern. Symp. «Nanostructures: Physics and Technology». St Petersburg, Russia, June 21-25, 2004 – Ioffe Institute. St Petersburg, 2004. P.266-267.

^{5.} Kapteyn C.M.A., Heinrichsdorff F., Stier O., a.o. // Phys. Rev. B. 1999. V.60. N20. P.14265.

^{6.} Stier O., Grundmann M., and Bimberg D. // Phys. Rev. B. 1999. V.59. N8. P.5688.

^{7.} V.I.Zubkov, M.A.Melnik, A.V.Solomonov, a.o. // Phys. Rev. B. 2004. V.70. N7. P.075312.

^{8.} Singh D.V., Rim K., Mitchell T.O., J.L.Hoyt, and Gibbons J.F. // J. Appl. Phys. 1998. V.85. N2. P.985-993.