

УДК 621.315.529

## СПЕКТРОСКОПИЯ ПРОВОДИМОСТИ ГЕТЕРОСТРУКТУР С In-As/GaAs КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ И КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

Кузнецова А.Н., Шулгунова И.С., Скопина А.Е., Зубков В.И.,  
Соломонов А.В.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ», Санкт-Петербург*

Подробная информация об авторах размещена на сайте

«Учёные России» - <http://www.famous-scientists.ru>

**Бурно развивающаяся отрасль нанотехнологии требует развития методов диагностики наноструктур. Новый метод спектроскопии полной проводимости является мощным инструментом характеризации наноструктур. В настоящей работе данным методом определены энергетические параметры гетероструктур с InAs/GaAs-квантовыми ямами и InAs/GaAs-квантовыми точками. Проведено сравнение спектров проводимости для образцов с квантовыми ямами и с квантовыми точками, полученными при различных частотах и значениях обратного смещения, определены энергии активации. По анализу CV-зависимостей проведена оценка и сравнение величин накопленного заряда в структурах с квантовыми точками и квантовыми ямами.**

### **Введение**

Благодаря интенсивному развитию нанотехнологии [1, 5] в последнее время были достигнуты значительные успехи в разработке и создании квантово-размерных гетероструктур и приборов на их основе. Дальнейший технологический прогресс требует разработки адекватных современных методов анализа и диагностики наноразмерных структур и всестороннего изучения их свойств.

В настоящее время для исследования полупроводниковых гетероструктур, которые успешно используются в качестве активной области для высокоэффективных лазерных диодов, оптических усилителей, модуляторов светового излучения, приемников инфракрасного излучения, устройств памяти и т.д., эффективно применяются электронно-зондовые, оптические, а также электрические методы [12], среди которых наиболее привлекательны емкостная спектроскопия, спектроскопия проводимости, нестационарная спектроскопия глубоких уровней DLTS [2, 7-10]. Спектроскопия полной проводимости (Admittance) является одним из наиболее простых, неразрушающих экспериментальных методов исследования энергетических и

динамических параметров как объемных полупроводников, так и гетероструктур с квантовыми точками, ямами, нитями, сверхрешетками и т.д. На основе анализа спектров проводимости может быть получена информация об энергии активации, разрывах зон, сечении захвата, скорости эмиссии и захвата [4, 13] и т.д.

### **Образцы**

Исследуемые образцы [3, 11] с квантовыми точками представляют собой диодные слоистые p-n-структуры GaAs, выращенные методом MOCVD на подложке  $n^+$ -GaAs. В этих образцах в режиме роста активная зона помещалась в середину толстого слоя GaAs, однородно легированного Si до  $n=1,78 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , и представляла собой три слоя вертикально связанных КТ толщиной 1,7 монослоя, разделенных барьерами GaAs толщиной 2,8 нм. Активные слои сформировались вследствие эффектов самоорганизации в процессе роста в режиме Странского-Крастанова. Кроме образцов с квантовыми точками была изготовлена вторая группа образцов для сравнения, содержащих только три смачивающих слоя InAs, которые, по сути, являются туннельносвязанными квантовыми ямами. Данные структуры формировались

в результате быстрого зарастивания осажденного слоя InAs, более тонкого (толщина 1,2 монослоя), чем для первой группы образцов, слоем GaAs тем самым препятствуя формированию трехмерных островков InAs. Все остальные параметры и условия роста для образцов были идентичны.

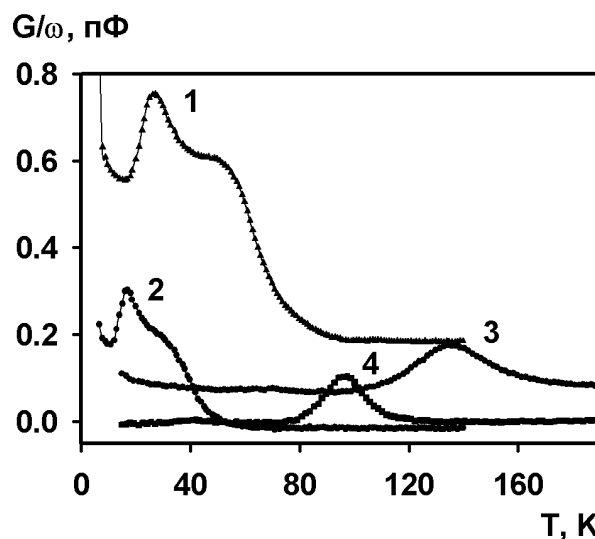
### Эксперимент

Исследования структур с квантовыми точками и квантовыми ямами проводились методом спектроскопии полной проводимости. В основе метода лежит сканирование образца по температуре с непрерывным измерением емкости и проводимости. При этом структура представляется в виде эквивалентной схемы, состоящей из параллельно или последовательно включенных резисторов и конденсаторов. Измеряется полная проводимость такой схемы – адмиттанс, которая является комплексной величиной и обратно пропорциональна полному сопротивлению – импедансу. Измерительный прибор – RLC-метр – позволяет регистрировать активную и реактивную составляющие полной проводимости. Активная составляющая – проводимость, реактивная составляющая имеет смысл емкости. Измерения полной проводимости исследуемых структур проводились в широком температурном диапазоне 10 К...300 К с шагом 1 К на нескольких частотах тестового сигнала от 1 кГц до 1 МГц. При этом к образцам прикладыва-

лось различное напряжение обратного смещения от -0,5 В до -4,5 В с шагом по напряжению -0,1 В. Диапазон смещений выбирался на основе анализа СВ-зависимостей. При приложении к исследуемой структуре малого переменного напряжения с частотой  $f$ , уровни квантования начинают колебаться относительно уровня Ферми, при этом происходит эмиссия носителей заряда в зону проводимости, а измеритель регистрирует сигнал проводимости.

### Анализ

Экспериментальные спектры проводимости для структур с квантовыми точками демонстрировали пики, положение которых менялось в зависимости от частоты тестового сигнала, а также в зависимости от приложенного к структуре обратного смещения. При увеличении частоты положение пика смещалось в область более высоких температур (рис. 1), при этом амплитуда пика увеличивалась. На рисунке 1 представлены спектры проводимости для образцов с квантовыми точками и со смачивающими слоями, полученные на частоте 1 МГц и 5 кГц при приложенном обратном смещении -2,7 В. В определенном диапазоне обратных смещений в спектрах наблюдалось два пика, соответствующих эмиссии носителей с двух уровней квантования в квантовых точках.



**Рис. 1.** Спектры проводимости для образцов с квантовыми точками (1, 2) и квантовыми ямами (3, 4) при фиксированном значении напряжения обратного смещения  $U_{rev} = -2,7$  В и различных частотах тестового сигнала  $f$ : 1 – 1 МГц; 2 – 5 кГц; 3 – 1 МГц; 4 – 5 кГц

Кроме того, спектры проводимости для структур с квантовыми точками являются уширенными, что связано с флуктуацией размеров и геометрической неоднородностью отдельных точек в массиве, а вследствие этого с различным положением уровней квантования. Проведена оценка уширения экспериментальных спектров, в предположении Гауссова уширения она составляла величину порядка 12,5...15,5 мэВ.

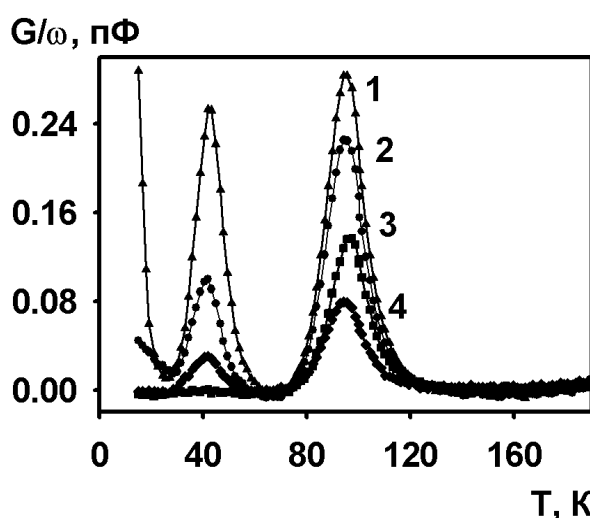
Вторая серия измерений включала исследование образцов со смачивающими слоями. Спектры проводимости, полученные при измерении образцов, не содержащих квантовые точки, демонстрировали несколько пиков, соответствующих уровням квантования в квантовых ямах. Для них наблюдалось аналогичное смещение пиков в спектрах проводимости в область более высоких температур при увеличении частоты тестового сигнала, при этом амплитуда пика также возрастала (см. рис. 1).

Ранее, в работе [11] проводилось исследование аналогичных образцов методом DLTS. Полученные спектры для структур с квантовыми точками демонстрировали единичный пик при температуре близкой к 40 К, обусловленный термической эмиссией с уровня квантования, а в более низкой температурной области в

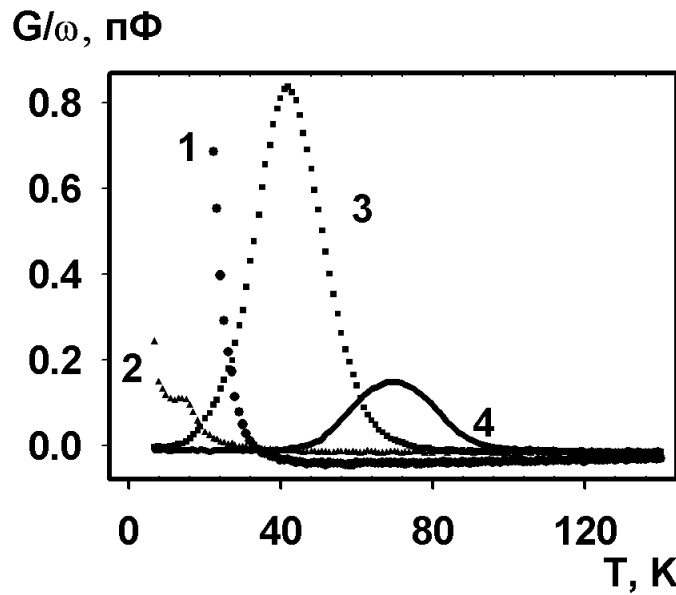
спектре наблюдалась «полочка», связанная с процессами туннелирования с участием фононов. В то же время, в структурах с квантовыми ямами пики в спектрах DLTS отсутствовали.

Сравнение полученных спектров образцов первой и второй группы показало, что наличие квантовых точек в исследуемых структурах обуславливает сигнал проводимости, значительно превышающий сигнал для образцов со смачивающими слоями.

При фиксированной частоте тестового сигнала в образцах со смачивающими слоями температурное положение пиков проводимости практически не меняется при изменении обратного смещения (рис. 2), тогда как в случае со структурами, содержащими квантовые точки, положение пика проводимости в сильной степени зависит от приложенного обратного смещения (рис. 3). Это является принципиальным отличием поведения спектров проводимости квантовых точек и квантовых ям. И в том и в другом случаях амплитуда максимумов проводимости сильно меняется от напряжения. В зависимости от приложенного смещения для структур с квантовыми ямами наблюдаются 1, 2 или 3 максимума проводимости.



**Рис. 2.** Спектры проводимости для образца с квантовыми ямами при фиксированной частоте тестового сигнала  $f=5$  кГц и различных напряжениях обратного смещения  $U_{rev}$ , В: 1 - -1,0; 2 - -2,5; 3 - -3,0; 4 - -3,5



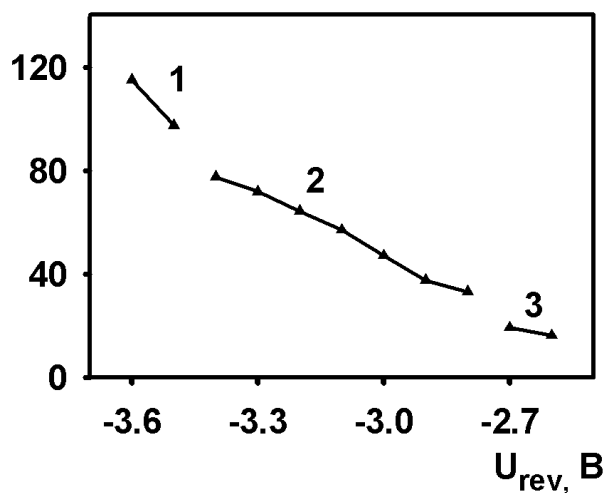
**Рис. 3.** Спектры проводимости для образца с квантовыми точками при фиксированной частоте тестового сигнала 5 кГц и различных напряжениях обратного смещения  $U_{rev}$ , В: 1 - -1,5; 2 - -1,0; 3 - -2,5; 4 - -4,4

Три пика в спектрах проводимости смачивающих слоев можно интерпретировать как 3 энергетических уровня, с которых происходит эмиссия носителей заряда. Тот факт, что обратное смещение не влияет на температурное положение пиков проводимости, говорит, что уровни не уширены.

Объяснение происхождения уровней следующее. Узкие идентичные квантовые

ямы, расположенные далеко друг от друга, имеют одинаковое положение уровней квантования. При уменьшении расстояния между ними происходит перекрытие волновых функций носителей заряда, ямы становятся взаимодействующими. Вследствие этого уровни квантования раздвигаются.

$E_a$ , мэВ



**Рис. 4.** Полученная энергии активации для структур с квантовыми точками: 1 – основной уровень; 2 – группа возбужденных уровней; 3 – уровень смачивающего слоя

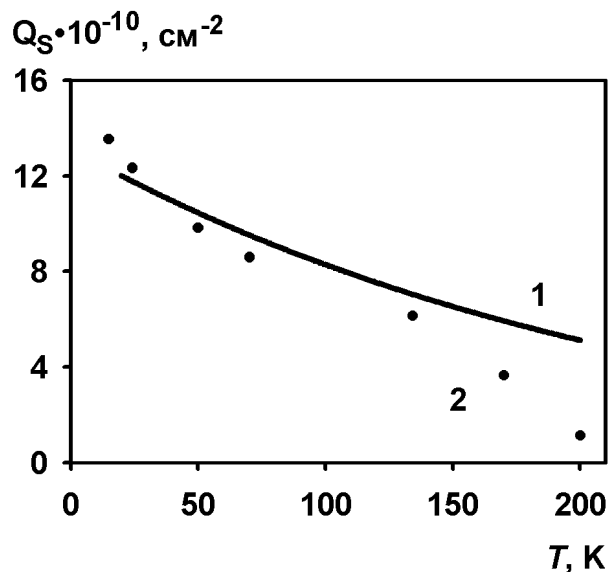
Энергии активации, рассчитанные по спектрам проводимости для структур с квантовыми точками, представлены на рисунке 4. В противоположность, для структур с квантовыми ямами наблюдалось отсутствие зависимости энергии активации от приложенного обратного смещения.

Анализ спектров полной проводимости исследуемых образцов показывает кардинальные отличия спектров для гетероструктур с квантовыми ямами и самоорганизующимися квантовыми точками, связанные с различной природой физических явлений, происходящих в этих структурах.

Благодаря эффекту пространственного ограничения квантовые ямы смачивающих слоев и квантовые точки эффективно накапливают заряд. Величину этого заряда можно оценить по вольт-фарадным характеристикам [6]. Как показано в работах [3, 6], в первом приближении для определения заряда достаточно вычислить произведение величины постоянной емкости на

плато на ширину плато по оси напряжения  $Q=C_p*\Delta U$ , при этом ширина переходных областей мала по сравнению с шириной плато.

Сравнение экспериментально полученной зависимости плотности заряда, накапливаемого смачивающими слоями, с аналогичными характеристиками для квантовых точек [6] позволяет утверждать, что квантовые ямы смачивающих слоев способны аккумулировать заряд примерно такой же по величине, что и массив квантовых точек, то есть могут играть существенную роль в процессе накопления заряда и процессе эмиссии носителей заряда. Характерно, что при низких температурах большее количество носителей заряда накапливается в смачивающих слоях, а при высоких – в квантовых точках (рис. 5). В структурах с квантовыми точками формируется более глубокий уровень для электронов, создается более высокая степень пространственного ограничения.



**Рис. 5.** Плотность заряда для образцов: 1 – с квантовыми точками; 2 – с квантовыми ямами

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Алфёров Ж.И. // История и будущее полупроводниковых гетероструктур. ФТП, том 32, №1, 1998, с. 3.
2. Брунков П.Н., Суворова А.А., Берт Н.А., Ковш А.Р., Жуков А.Е., Егоров А.Ю., Цацульников А.Ф., Леденцов Н.Н., Копьёв П.С., Конников С.Г., Ивс Л., Майн П.С. // Вольт-емкостное

профилирование барьеров Шоттки Au/n-GaAs, содержащих слой самоорганизованных квантовых точек InAs. ФТП, 1998, том 32, №10.

3. Brunkov P.N., Kovsh A.R., Ustinov V.M., Musikhin Yu.G., Konnikov S.G., Polimeni A., Patane A., Main P.C., Eaves L., and Kapteyn C.M.A. // Emission of Electrons from the Ground and First Excited States of

Self-Organized InAs/GaAs Quantum Dot Structures. *Journal of Electronic Materials*, vol.28, № 5, 1999

4. Zubkov V.I., Kapteyn C.M.A., Solomonov A.V. and Bimberg D. // Voltage-capacitance and admittance investigations of electron states in self-organized InAs/GaAs quantum dots. *J. of Physics: Condens. Matter*, 2005, v. 17, p. 2435.

5. Зубков В.И., Соломонов А.В. // Диагностика наногетероструктур методами емкостной спектроскопии. Раздел 3.4 в книге “Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы”. - Физматлит, 2006. с. 389-412.

6. Зубков В.И. // Емкостная спектроскопия – эффективный метод нанодиагностики квантово-размерных структур. *Петербургский журнал электроники*, №4, с. 52-61, 2006.

7. Зубков В.И. // Моделирование вольт-фарадных характеристик гетероструктур с квантовыми ямами с помощью самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона. *ФТП*, 2006. - т. 40, вып. 10, с. 1236-1240.

8. Зубков В.И. // Диагностика гетероструктур с квантовыми ямами  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  методом вольт-фарадных

характеристик: разрывы зон, уровни квантования, волновые функции. *ФТП*, 2007. - т. 41, вып. 3, с. 331-337.

9. Debbar N., Biswas D. and Bhattacharya P. // Conduction-band offset of pseudomorphic  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  quantum wells measured by DLTS. *Phys. Rev. B*, 40, 1058 (1989).

10. Gosh S., Koshman B., Singh J. and Bhattacharya P. // Conduction band offset in InAs/GaAs self-organized quantum dots measured by deep level transient spectroscopy. *App. Phys. Lett.*, v.76, 2000.

11. Kapteyn C.M.A., Heinrichsdorff F., Stier O., Heitz R., Grundmann M., Zakharov N.D. and Bimberg D. // Electron escape from InAs quantum dots. *Phys. Rev. B*, 60, 14256 (1999).

12. Schmalz K., Yassievich I.N., Rucker H., Grimmeiss H.G., Frankenfeld H., Mehr W. // Characterization of  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  quantum wells by space-charge spectroscopy. *Phys. Rev. B*, 50, 14287 (1994).

13. Wang J.B., Lu F., Zhang S.K., Zhang B., Gong D.W., Sun H.H., and Wang X. // Analysis of capacitance-voltage characteristics of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  quantum-well structures. *Phys. Rev. B* 54 (11), 7979 (1996).

#### **ADMITTANCE SPECTROSCOPY OF HETEROSTRUCTURES WITH InAs/GaAs QUANTUM WELLS AND QUANTUM DOTS**

Kuznetsova A.N., Shulgunova I.S., Skopina A.Ye., Zubkov V.I., Solomonov A.V.  
*St.Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St.Petersburg*

For rapidly developed nowadays nanotechnology it is necessary to develop new effective methods of nanostructure diagnostics. A new method of admittance spectroscopy is an effective tool for characterization of nanostructures. In present work by this method the electronic parameters of heterostructures with InAs/GaAs-quantum wells and InAs/GaAs-quantum dots have investigated. A comparison of admittance spectra for samples with quantum wells and quantum dots, taken at various frequencies and reverse biases, was carried out, and activation energies were obtained. From the C-V-curves the evaluation and comparison of the charge stored in the structures with quantum wells and quantum dots were performed.

