

## АДМИТТАНСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

В. А. Доросинец<sup>1</sup>, В. В. Золотоноша<sup>1</sup>, D. Reuter<sup>2</sup>, A. D. Wieck<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, *dorosinets@bsu.by*

<sup>2</sup>Ruhr University, Germany

### ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые квантовые точки в настоящее время находят применение в самых разнообразных областях техники. Перспективно применение лазеров на квантовых точках в волоконно-оптических линиях связи, что обусловлено их энергоэффективностью и возможностью перестройки путем управления параметрами энергетического спектра. Нашли коммерческое применение осветительные приборы на основе квантовых точек, для которых характерно сочетание приятного для глаз спектра излучения с высоким КПД. С использованием квантовых точек созданы новые типы высокоэффективных проекционных устройств, лазерных телевизоров и QD-LED дисплеев, квантовых компьютеров, сенсоров для мобильных телефонов [1].

Во многом успех разработки устройств на квантовых точках зависит от возможности получения идентичных точек заданного размера. Соответственно, разработка методов управления энергетическим спектром квантовых точек и методов его исследования представляет первоочередную задачу.

В данной работе излагаются результаты исследования энергетических спектров полупроводниковых квантовых точек n- и p-типа с помощью автоматизированного аппаратно-программного комплекса спектроскопии адмиттанса, разработанной на кафедре физики полупроводников и нанозлектроники БГУ.

### ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Квантовые точки InAs/GaAs выращивались с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии в процессе самоорганизации на кафедре прикладной физики Рурского университета г. Бохума. Квантовые точки InAs начинают формироваться при достижении определенной толщины смачивающего слоя InAs на эпитаксиальном слое GaAs из-за различия параметров решетки InAs и GaAs – процесс известный как метод Странского-Крастанова. Для создания структуры Шоттки, предназначенной для проведения емкостной спектроскопии, на выращенных квантовых точках наращивался слой эпитаксиального GaAs, на котором в свою очередь выращивалась сверхрешетка, состоящая из 20 чередующихся слоев AlAs/GaAs (3 нм/1 нм), на которой формировались контакты Шоттки. На обратной стороне структуры создавался омический контакт. Сверхрешетка имеет ширину запрещенной зоны, существенно превышающую ширину запрещенной зоны GaAs, что устраняет утечки тока и позволяет исследовать емкостные свойства созданной структуры.

Приложение напряжения к структуре вызывает смещение уровня Ферми в направлении, определяемом полярностью напряжения. При совпадении уровня Ферми с уровнем квантования в квантовой точке малый переменный сигнал приводит к периодической перезарядке уровня, что сопровождается резким увеличением емкости структуры [2, 3]. Изменение емкости регистрируется путем подачи на структуры пе-

ременного сигнала малой амплитуды. Для проведения емкостных измерений в эксперименте использовался LCR-метр Agilent E4980A, позволяющий работать в диапазоне до 2 МГц. Данный метод позволяет определить энергетическое расстояние между отдельными уровнями квантовых точек. Поскольку в процессе выращивания образуется двумерный массив квантовых точек наличие четкой картины пиков на спектрах или их размытие служит указанием на степень разброса размеров и формы квантовых точек и может служить в качестве характеристики технологии их получения. Емкостная спектроскопия удобна также для экспресс-диагностики при разработке техпроцесса модификации формы квантовые точки с целью достижения энергетического расстояния между уровнями соответствующего длинам электромагнитных волн, использующихся в средствах связи и телекоммуникации.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1 приведены спектры люминесценции структур при температуре  $T = 77$  К, обусловленных квантовыми точками. Для квантовых точек  $n$ -типа наблюдаются 2 полосы, соответствующие излучательным переходам  $e_1 - hh_1$  (0,99 эВ) и  $e_2 - hh_2$  (1,05 эВ), а для квантовых точек  $p$ -типа помимо вышеуказанных переходов с энергиями 0,99 и 1,06 эВ дополнительно наблюдается переход  $e_3 - hh_3$  (1,11 эВ), что обусловлено меньшим расстоянием между дырочными уровнями. Данные спектры дают первичную информацию о качестве квантовых точек и разбросе их размеров, но не позволяют определить количественные параметры спектров, поскольку включают одновременно электронные и дырочные энергетические уровни.

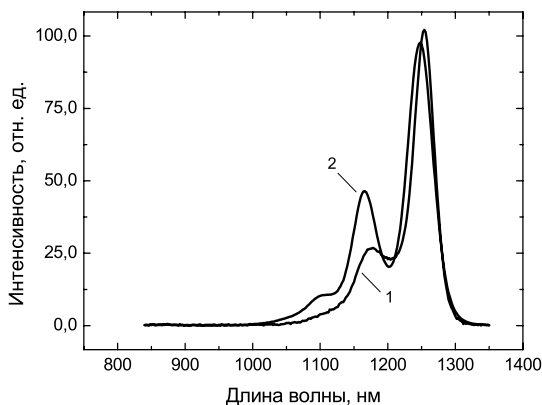


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции квантовых точек InAs  $n$ -типа (кривая 1) и  $p$ -типа (кривая 2)

Емкостная спектроскопия дает более детальную информацию о положении энергетических уровней в квантовых точках. На рис. 2 приведены зависимости емкости структуры от приложенного напряжения смещения, измеренные при температуре 2,4 К и частоте измерительного сигнала 100 кГц. Для структур с квантовыми точками  $n$ -типа на кривых зависимости емкости от напряжения наблюдаются две полосы с 2 пиками для  $s$ -состояний и 4-ми пиками для  $p$ -состояний.

Энергии уровней квантовых точек  $E_{C(V)}$  рассчитываются из значений напряжения смещения  $V_{gate}$ , соответствующих первым низкоэнергетичным пикам зависимости емкости от напряжения по формуле:

$$E_{C(V)} = e \frac{l_1}{l_1 + l_2} (V_{bi} \mu V_{gate})$$

где  $l_1$  и  $l_2$  - расстояния от плоскости квантовые точки до омического контакта и затвора, соответственно,  $V_{bi}$  - эффективная высота барьера при нулевом смещении.

Расщепление s- и p-состояний обусловлено кулоновской блокадой, т.е. энергетическое расстояние между 2 пиками, например, s-состояний соответствует энергии кулоновской блокады  $E_B$ , т.е. дополнительной энергии, которую нужно сообщить электрону для туннелирования из контакта в s-состояние квантовой точки, если в ней уже имеется один захваченный электрон. Это явление может быть объяснено изменением высоты энергетического барьера первым электроном для второго. Для исследованных структур  $E_B = 17.8$  мэВ, что находится в соответствии с литературными данными для данного типа квантовые точки.

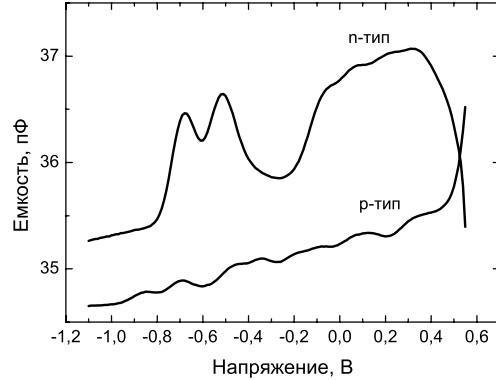


Рис. 2. Зависимость емкости структур Шоттки, содержащих квантовые точки n- и p-типа от приложенного напряжения

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Smyder, J.A.* Coming attractions for semiconductor quantum dots / J. A. Smyder, T. D. Krauss // *Materials Today*. 2011. Vol. 14. P. 382.
2. *Bock, C.* Valence-band structure of self-assembled InAs quantum dots studied by capacitance spectroscopy / C. Bock [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol.82. P. 2071.
3. *Reuter, D.* Frequency-dependent C(V) spectroscopy of the hole system in InAs quantum dots/ D. Reuter, P. Schafmeister, P. Kailuweit, A.D. Wieck // *Phys. E*. 2004. Vol. 21. P. 445.