

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР  
С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.  
ПРОЕКТ № 117**

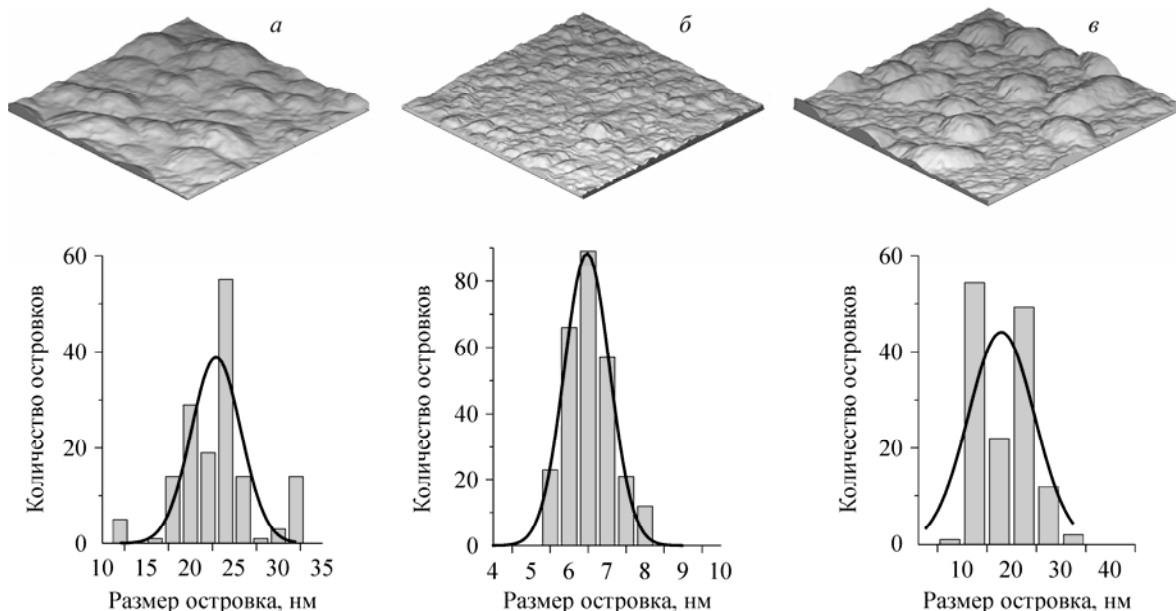
**Координаторы:** д-р физ.-мат. наук Двуреченский А. В., канд. физ.-мат. наук Эренбург С. Б.

**Исполнители:** ИФП, ИНХ, ИЯФ СО РАН

Методом спектроскопии EXAFS определены изменения микроскопических параметров структуры полупроводниковых нанокластеров (межатомных расстояний, координационных чисел, типов атомов окружения) при изменении условий приготовления материалов, содержащих гетероструктуры Ge/Si, GaN/AlN, InAs/AlAs. Установлено влияние условий приготовления на межфазную диффузию, параметры структуры полупроводниковых нанокластеров. Для всех гетероструктур с QD уста-

новлено уменьшение межатомных расстояний в первой сфере окружения Ge, Ga, In на величины  $\sim 0,02\text{--}0,04 \text{ \AA}$  по сравнению с кристаллическими Ge, GaN, InAs.

Для гетероструктур Ge/Si исследовано влияние температуры на различных этапах синтеза, ориентации подложки, ее предобработки, состава молекулярного потока, в частности, присутствия катионов  $\text{Ge}^+$ , на их локальное строение и элементный состав. Охарактеризована связь между размерами, формой



Снимки участков поверхности Ge на Si(100) размером  $100 \times 100 \text{ нм}$ , полученные методом сканирующей туннельной спектроскопии, и гистограммы распределения островков (квантовых точек) по размерам для: *a* — обычной эпитаксии из молекулярного пучка; *б* — эпитаксии в режиме импульсного (0,5 с) ионного облучения (100 эВ, ионы Ge); *в* — эпитаксии в режиме непрерывного ионного облучения.

STM images of  $100 \text{ нм} \times 100 \text{ нм}$  surface area and size distribution of 3D islands for three types of Ge/Si(100) heterostructures: *a*) conventional molecular beam epitaxy (MBE); *б*) MBE with pulsed (0.5 s) irradiation of 100 eV  $\text{Ge}^+$  ions; *в*) MBE with continuous ion irradiation.

наночастиц и их локальными пространственными характеристиками: межатомными расстояниями, стехиометрическим составом, характеристиками границ раздела фаз. В рамках модели валентных сил решена задача пространственного распределения упругих деформаций и вычислено распределение длин межатомных связей Ge–Ge и Ge–Si в структуре с квантовыми точками. Среднее значение длин связей составило  $\approx 2,38 \text{ \AA}$  (Ge–Si) и  $\approx 2,41 \text{ \AA}$  (Ge–Ge), в хорошем согласии с экспериментальными значениями.

При формировании гетероструктур с квантовыми точками ключевой проблемой является управление размерами квантовых точек, достижение малого разброса по размерам и высокой плотности. В ходе выполнения проекта предложен оригинальный метод в изменении морфологии поверхности, основанный на импульсном облучении собственными низкоэнергетическими ( $\sim 100 \text{ эВ}$ ) ионами в процессе гетероэпитаксии Ge/Si из молекулярных пучков в определенные моменты времени по степени заполнения монослоя. Установлено, что такой метод обеспечивает уменьшение размеров квантовых точек, повышение их однородности

по размеру, повышение плотности и не приводит к существенному перемешиванию слоев Ge и Si в исследованной области температур (см. рисунок). Предложена модель перехода от послойного роста к островковому в процессе гетероэпитаксии при рассогласовании по постоянной решетки между пленкой и подложкой. В основе модели лежит представление о том, что упругие деформации влияют на зарождение островков и поверхностную диффузию атомов через реконструкцию поверхности.

Разработан метод расчета электронного спектра дырочных состояний в массиве квантовых точек Ge/Si. Впервые из рентгеновских спектров поглощения (XANES-спектров) получена информация об энергетической структуре локализованных состояний в квантовых точках Ge в Si. Полученные результаты согласуются с данными, полученными другими методами.

Оригинальный опыт применения EXAFS и XANES спектроскопии, полученный в рамках выполнения проекта, показал перспективность их дальнейшего использования для исследования пространственного и электронного строения полупроводниковых гетеросистем.

### Основные публикации

1. *Dvurechenskii A. V., Smagina J. V., Zinovyev V. A. et al.* Modification of growth mode of Ge on Si by pulsed low-energy ion-beam irradiation// International J. of Nanoscience. 2004. V. 3, N 1, 2. P. 19—27.
2. *Erenburg S. B., Bausk N. V., Nikiforov A. I.* The structure of quantum dots by XAFS// IUCr Newsletter. Crystallography in Russia. 2004. V. 12, N 4. P. 18.
3. *Двуреченский А. В., Смагина Ж. В., Зиновьев В. А. и др.* Элементный состав нанокластеров, формируемых импульсным облучением низкоэнергетическими ионами в процессе эпитаксии Ge/Si// Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79, вып. 7—8. С. 411—415.
4. *Erenburg S. B., Bausk N. V., Mazalov L. N. et al.* Quantum dots microstructure and energy spectrum peculiarities// Physica Scripta. 2005. V. 115. P. 439—441.
5. *Erenburg S. B., Bausk N. V., Mazalov L. N. et al.* Microscopic parameters of materials containing GaN/AlN and InAs/AlAs heterostructures// Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. A. 2005. V. 543. P. 188—193.
6. *Dvurechenskii A. V., Smagina J. V., Groetzschel R. et al.* Ge/Si quantum dot nanostructure grown with low-energy ion beam-assisted epitaxy// Surface & Coating Technology. 2005. V. 196, N 1—3. P. 25—29.