

## Сравнительный анализ механизмов эмиссии носителей из In(Ga)As квантовых точек

Е. С. Шаталина<sup>1</sup>, А. С. Паюсов<sup>1</sup>, М. В. Максимов<sup>1</sup>, А. М. Надточий<sup>2</sup>, С. А. Блохин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АФТУ РАН, Санкт-Петербург, Россия

тел: (812) 297-31-82, эл. почта: Shatalina@mail.ioffe.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский физико-технологический научно-образовательный центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

Самоорганизующиеся квантовые точки (КТ) чрезвычайно перспективны для создания нового поколения лазеров и других оптоэлектронных приборов. Для оптимизации их характеристик необходимы исследования спектра энергетических состояний, а также особенностей кинетики носителей в массиве КТ. Цель данной работы состояла в анализе механизмов эмиссии носителей в зависимости от структурно-оптических параметров КТ с помощью спектроскопии фототока.

Обнаружено, что для InAs/InGaAs КТ в матрице GaAs уменьшение температуры приводит не только к коротковолновому сдвигу спектров поглощения, но и к последовательному исчезновению вклада в фототок от основного состояния и от возбужденных состояний при температуре до  $T_0=100\text{K}$ . Приложение обратного смещения (более 3В) приводит к появлению в низкотемпературном спектре фототока пиков, соответствующих энергетическим состояниям в КТ. Такое поведение коррелирует с результатами для InAs КТ в матрице GaAs [1] и может трактоваться следующим образом: при нулевом смещении основным механизмом эмиссии носителей является термическая активация и понижение температуры ниже  $T_0$  приводит к подавлению термического выброса носителей из КТ, в тоже время приложение внешнего электрического поля ведет к активизации другого механизма эмиссии носителей — тунеллирования через потенциальный барьер. В случае InAs/InGaAs КТ в матрице AlGaAs, обладающих большей энергией локализации носителей в КТ, характерная температура  $T_0$  достигает 150K, тогда как для InGaAs КТ в матрице GaAs, обладающих меньшей энергией локализации экситона, температура  $T_0$  падает до 70K.

Принципиально иное поведение было выявлено в случае вертикально-связанных InGaAs КТ в матрице GaAs: существенный вклад КТ в фототок сохраняется даже при низких температурах (вплоть до 20K). С одной стороны, приложение обратного смещения не приводит к заметному изменению формы спектра (как при 20K, так и при 300K). С другой стороны, при приложении к исследуемой структуре прямого смещения более  $\sim 0.7\text{В}$ , сигнал от КТ практически полностью пропадает (как при 300K, так и при 20K). Полученные результаты позволяют заключить, что вклад термической активации в фототок незначителен даже при комнатной температуре, а тунеллирование является доминирующим механизмом эмиссии носителей из КТ. Согласно работе [2], можно предположить, что электронное связывание КТ при вертикальном складировании, возникающее при толщинах спейсерного слоя порядка

высоты КТ, ведет к образованию минизон, которые обеспечивают эффективное тунелирование и разделение фотогенерированных носителей в массиве связанных КТ.

Выявлено, что  $\delta$ -легирование примесью р-типа несвязанных InAs/InGaAs КТ в матрице GaAs кардинально изменяет эволюцию спектров фототока с температурой: вклад КТ в фототок сохраняется во всем диапазоне температур, что позволяет сделать вывод о преобладании тунеллирования над остальными механизмами эмиссии носителей из КТ. Причина такого поведения подлежит дальнейшему исследованию.

В работе были получены спектры фототока для разного типа КТ в широком диапазоне температур и при приложении прямого/обратного смещения. Проведенные исследования позволили идентифицировать механизмы эмиссии носителей из КТ и продемонстрировать эффект электронного связывания КТ.

Работа была поддержана СПбНЦ РАН и программой фундаментальных исследований Президиума РАН.

### Литература

1. P. W. Fry et. al. , Phys. Rev. B 62, 16 784 (2000).
2. N. N. Ledentsov et. al. , Phys. Rev. B 54, 8743 (1996).