

УДК 621.315.592

*А.А. ПИЩАГИН\**, *К.А. ЛОЗОВОЙ\**, *А.П. КОХАНЕНКО\**, *А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ\**, *А.И. НИКИФОРОВ\*\****ИССЛЕДОВАНИЕ SI/GE P-I-N СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ GE МЕТОДОМ АДМИТТАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

В работе представлены результаты экспериментов по синтезу гетероструктур Si/Ge с квантовыми точками Ge и исследованию их электрофизических свойств методом адмиттансной спектроскопии. Для двух типов структур были рассчитаны энергии активации эмиссии, построены темновые и световые вольт-амперные характеристики.

**Ключевые слова:** квантовые точки, кремний, германий, адмиттансная спектроскопия.

Низкоразмерные полупроводниковые гетероструктуры привлекают к себе все большее внимание. Пространственная локализация носителей заряда приводит к существенному отличию электрофизических и оптических свойств низкоразмерных структур по сравнению с объемными полупроводниками. Среди широкого класса полупроводниковых гетероструктур можно выделить структуры Si/Ge, которые совместимы с современной кремниевой технологией. Это позволяет использовать их как для совершенствования традиционных элементов кремниевой нано- и микроэлектроники, так и для создания новых электронных и оптоэлектронных устройств [1, 2].

В работе представлены результаты экспериментов по синтезу гетероструктур Si/Ge p-i-n структур с квантовыми точками в i-области и их исследованию методом адмиттансной спектроскопии.

Синтез структур проводился на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100». Установка содержит электронно-лучевые испарители для напыления Si и Ge, и эффузионные ячейки для испарения примесей (В и Sb). Для *in situ* контроля за процессом синтеза в камере МЛЭ установлены кварцевые измерители толщины, квадрупольный масс-спектрометр и дифрактометр быстрых электронов.

Синтез квантовых точек Ge проводился на подложках Si(100) с разориентацией не более  $0.5^\circ$ . На поверхности Si был сформирован массив hut-кластеров Ge прямоугольной формы с высотой 1,5-3 нм, латеральными размерами 10-40 нм, и плотностью  $\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

Структуры исследовались на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса [3]. Принцип спектроскопии адмиттанса структур с квантовыми точками основан на измерении комплексной проводимости системы, возникающей при перезарядке КТ вследствие эмиссии носителей заряда из КТ в разрешенные зоны и их захвате на локализованные состояния в КТ. Образцы с квантовыми точками, результаты измерений которых обсуждаются в данной работе, представляют собой p-i-n структур с квантовыми точками Ge в собственной области изготовленные в ИФП СО РАН. Образцы типа 1 содержат в i-области 30 слоев квантовых точек Ge толщиной по 6 монослоев, разделенных 5 нм слоями Si. В образцах типа 2 через каждые 10 слоев квантовых точек дополнительно нанесен слой Si толщиной 100 нм.

В сложившейся практике обработки экспериментальных данных спектроскопии адмиттанса обычно строятся температурные спектры проводимости  $G-T$  (как наиболее информативные) при разных частотах вынуждающего сигнала. Поскольку для характеристики глубокого уровня необходимо два параметра (энергия активации и сечение захвата), то требуется как минимум 2 температурных спектра проводимости, снятых на разных частотах. С учетом неизбежного экспериментального шума берется несколько (5-10) частот, и два искомого параметра находятся аппроксимацией с помощью метода наименьших квадратов [3].

Для исследуемых структур строились температурные спектры проводимости  $G-T$  при разных частотах вынуждающего сигнала (Рис. 1). Обработка температурных спектров дала типичные семейства графиков Аррениуса для нахождения энергии активации эмиссионного процесса. В точках максимумов температурных спектров проводимости выполняется условие  $\omega = e_p$ , где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота тестового сигнала,  $e_p$  – скорость эмиссии носителей. Построением графика Аррениуса в координатах  $\omega = f(1/T)$  для положений температурных максимумов  $T_{max}$  спектров проводимости определяется энергия активации, характеризующая положение уровней квантования. Для каждой частоты выставляются точки с координатами  $\ln(e_p/T^2)$ ,  $1/T_{max}$ , и методом наименьших

квадратов строится аппроксимирующая прямая. По углу наклона этих прямых рассчитываются энергии активации.

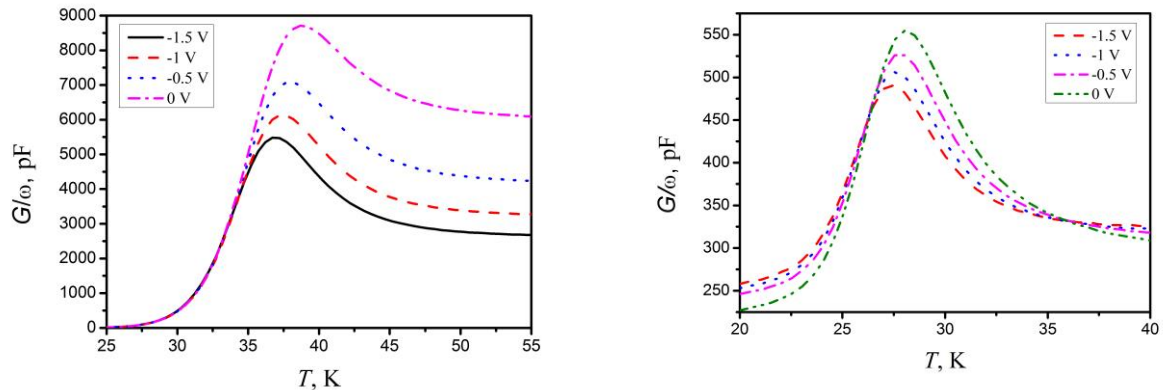


Рис. 1. Температурные зависимости проводимости образцов типа 1 (а) и типа 2 (б), измеренные на фиксированной частоте зондирующего напряжения  $f = 100$  кГц при различных обратных смещениях.

В некоторых температурных спектрах проводимости образцов типа 2 наблюдается два максимума (Рис. 2). Второй максимум наблюдается только при положительных смещениях при более высоких температурах и наиболее ярко выражен при низких частотах, в то время как первый максимум наблюдается и при отрицательных смещениях. Для обоих образцов была рассчитана энергия активации для первого второго максимума проводимости. Для первого пика энергия активации не зависит от приложенного напряжения и составляет  $38 \pm 5$  мэВ и  $46 \pm 4$  мэВ для образцов 1 и 2 типа соответственно. Рассчитанная энергия активации для второго пика при напряжении смещения 1 В составила  $65 \pm 10$  мэВ, при напряжении смещения 2 В составила  $165 \pm 30$  мэВ.

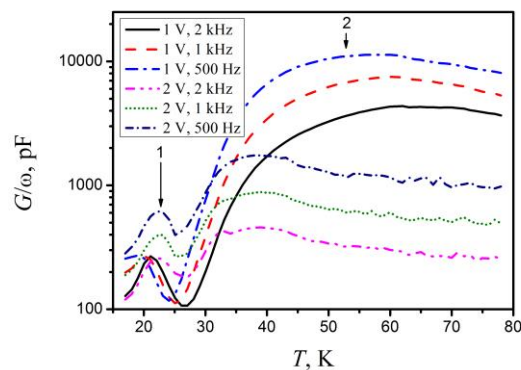


Рис. 2. Температурные спектры проводимости образца типа 2, измеренные при смещениях +1В и +2В на различных частотах.

Можно сделать предположение, что проявляющийся в исследованной нами структуре дискретный энергетический уровень с энергией активации  $\sim 45$ - $50$  мэВ, соответствующий первому пику температурной зависимости проводимости не связан с размерным квантованием в наноструктурах. Второй пик температурной зависимости проводимости обнаружен при напряжениях смещения 1 В и 2 В. Этот пик уширен и, вероятно, соответствует не одному дискретному уровню, а системе близко лежащих уровней, что связано с неоднородностью таких параметров квантовых точек как их латеральные размеры и высота, форма и плотность в массиве.

Кроме того, были проведены измерения вольт-амперных характеристик. Измерения проводились в диапазоне температур 10-300 К, измерялись темновые ВАХ и ВАХ при освещении лампой накаливания и галогенной лампой. Анализ зависимостей показал, что КПД и филл-фактор образцов повышаются с понижением температуры и имеют максимум в области 20-30 К. Ток короткого замыкания имеет максимум в этом же температурном диапазоне и его положение совпадает с максимумами температурных спектров проводимости на низкой частоте.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкляев А. А., Ичикава М. // УФН. – 2008. – Т. 178. – № 2. – С. 139–169.

2. Yakimov A. I. // Optoelectron., Instrum. and Data Process. – 2013. – V. 49. – No. 5 – P. 467–475.
3. Зубков В. И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. – СПб.: Элмор, 2007. – 220 с.

\*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

\*\*Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

E-mail: pisch@mail.tsu.ru

---

Пищажин Антон Александрович, магистрант;  
Лозовой Кирилл Александрович, аспирант;  
Коханенко Андрей Павлович, д.ф.-м.н., профессор;  
Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор;  
Никифоров Александр Иванович, к.ф.-м.н., зав. лаб. ИФП СО РАН;

A.A. PISHCHAGIN\*, K.A. LOZOVOI\*, A.P. KOKHANENKO\*, A.V. VOITSEKHOVSKII\*, A.I. NIKIFOROV\*\*

### INVESTIGATION OF SI/GE P-I-N STRUCTURES WITH GE QUANTUM DOTS BY ADMITTANCE SPECTROSCOPY METHOD

The experimental results on synthesis of Si/Ge p-i-n structures with Ge quantum dots in the *i*-region and their investigation by the method of admittance spectroscopy are presented. The activation energies of the emission process from localized states are calculated for two types of structures. Current-voltage characteristics without illumination and under illumination are measured.

**Keywords:** *quantum dots, silicon, germanium, p-i-n structure, admittance spectroscopy.*

#### REFERENCES

1. Shklyayev A. A., Ichikawa M., Extremely dense arrays of germanium and silicon nanostructures, Phys. Usp., 2008., vol. 178., no 2., pp. 139–169. (In Russ.)
2. Yakimov A. I., Ge/Si Heterostructures with Ge Quantum Dots for Mid-Infrared Photodetectors, Optoelectron., Instrum. and Data Process., 2013., v. 49., no. 5, pp 467–475.
3. Zubkov V. I., Diagnostics of semiconductor nanoheterostructures by admittance spectroscopy methods., Saint-Petersburg, Elmor, 2007, 220 p. (In Russ.)

\*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia,

\*\*Rzanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia,

E-mail: pisch@mail.tsu.ru

---

Pishchagin Anton Aleksandrovich, Master Student;  
Lozovoi Kirill Aleksandrovich, Graduate Student;  
Kokhanenko Andrei Pavlovich, Prof., Dr. Sc;  
Voitsehovskii Aleksandr Vasilevich, Prof., Dr. Sc;  
Nikiforov Aleksandr Ivanovich, Lab. Head ISP SB RAS, PhD;