

## Разрывы валентной зоны в напряженных слоях SiGeSn/Si с различным содержанием олова

© А.А. Блошкин<sup>1,2</sup>, А.И. Якимов<sup>1,3</sup>, В.А. Тимофеев<sup>1</sup>, А.Р. Туктамышев<sup>1</sup>,  
А.И. Никифоров<sup>1,3</sup>, В.В. Мурашов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090 Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Томский государственный университет,  
634050 Томск, Россия

<sup>4</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
630073 Новосибирск, Россия

E-mail: bloshkin@isp.nsc.ru

(Получена 2 июня 2016 г. Принята к печати 14 июня 2016 г.)

Методом спектроскопии адмиттанса исследованы состояния дырок в квантовых ямах Si<sub>0.7-y</sub>Ge<sub>0.3</sub>Sn<sub>y</sub>/Si в диапазоне содержания олова  $y = 0.04-0.1$ . Установлено, что энергия связи дырки растет с увеличением содержания олова. В рамках 6-зонного **kp**-метода определены энергии размерного квантования дырок в структурах, содержащих псевдоморфный слой Si<sub>0.7-y</sub>Ge<sub>0.3</sub>Sn<sub>y</sub> в матрице Si. Комбинацией результатов математического моделирования и экспериментальных данных определена величина разрыва валентной зоны на гетерогранице Si/Si<sub>0.7-y</sub>Ge<sub>0.3</sub>Sn<sub>y</sub>. Установлено, что зависимость экспериментальных значений разрыва валентных зон между псевдоморфными слоями Si<sub>0.7-y</sub>Ge<sub>0.3</sub>Sn<sub>y</sub> и Si от содержания олова описывается выражением  $\Delta E_V^{\text{exp}} = (0.21 \pm 0.01) + (3.35 \pm 7.8 \cdot 10^{-4})y$  эВ.

DOI: 10.21883/FTP.2017.03.8343

### 1. Введение

Кремний является основным материалом микро- и наноэлектроники, но в оптоэлектронике его применение ограничено. Связано это с двумя особенностями материала. Во-первых, главный минимум зоны проводимости Si смещен относительно центра зоны Бриллюэна, что резко уменьшает эффективность излучающих структур на базе Si. Во-вторых, ширина запрещенной зоны Si составляет 1.12 эВ при комнатной температуре, делая кремний прозрачным в среднем и дальнем инфракрасном (ИК) диапазонах. Из-за этого факта реализация фотонных ИК фотоприемников на базе чистого кремния вызывает проблемы. На преодоление указанных ограничений тратится много усилий, и применяются различные подходы, такие как использование сплавов элементов IV группы таблицы Менделеева и наноструктур на их основе. В разные годы предлагалось рассматривать гетероструктуры GeSi с квантовыми точками (КТ) [1–4]. Данный подход дал определенные результаты, но из-за малой плотности квантовых точек не удастся получить значительную величину квантового выхода в фотоприемных устройствах. В качестве альтернативного пути рассматривается использование тройного соединения SiGeSn на подложках Si. Для сплава GeSn предсказывалась теоретически [5,6] и наблюдалась экспериментально [7–9] смена характера фундаментального поглощения с непрямозонного на прямозонный при малых содержаниях олова. Полученные результаты

дают надежду на реализацию светоизлучающих приборов на кремниевой подложке с тройным соединением SiGeSn в качестве активного элемента. Кроме того, поскольку  $\alpha$ -Sn является полупроводником с инвертированной зонной структурой, вариация содержания олова в сплавах дает значительно больший диапазон ширины запрещенной зоны, которые могут быть использованы в приборах на основе твердых растворов SiGeSn, по сравнению с приборами на SiGe. На данный момент имеется множество работ экспериментального характера, посвященных формированию тройных соединений SiGeSn [10–13], измерению оптических свойств этих полупроводников [13–17] и изготовлению отдельных приборных структур с использованием рассматриваемых твердых растворов [18–20]. Существуют теоретические работы, посвященные моделированию зонной структуры как напряженных, так и релаксированных [5,6] тройных соединений. Однако в большинстве таких работ рассматривается лишь вопрос о ширине запрещенной зоны в гетероструктурах и совсем не затрагивается проблема установления разрыва зон на гетерогранице Si/SiGeSn. Иногда разрыв валентных зон Ge и Sn рассчитывается в модели, предложенной в [21]. Вместе с тем величина разрыва зон на границе Si/SiGeSn имеет важное значение для формирования приборных структур. В настоящей работе методом спектроскопии адмиттанса были исследованы гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) SiGeSn, сформированными в матрице Si, и определены энергии локализации дырок и разрыв валентной зоны.