

УДК 621.315.592

*А.Р. ТУКТАМЫШЕВ\*, В.А. ТИМОФЕЕВ\*, А.И. НИКИФОРОВ\*\*\*, В.И. МАШАНОВ\*, М.Ю. ЕСИН\*, С.А. ТИЙС\****ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МЛЭ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ НАНОСТРУКТУР Ge–Si–Sn НА Si(100) ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ И ФОТОНИКЕ<sup>1</sup>**

Экспериментально определена зависимость критической толщины 2D–3D-перехода  $\text{Si}_x\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-x-y}$ -пленок, рассогласованных по параметру решетки с подложкой Si(100) от 3 до 5 % и выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии в диапазоне температур 150–450 °С. Методами СТМ и АСМ получены зависимости среднего размера и плотности квантовых точек. С увеличением температуры роста от 200 до 400 °С увеличивается средний размер квантовых точек от 4.7 до 23.6 нм.

*Ключевые слова:* МЛЭ, наноструктуры  $\text{SiGeSn}$ , квантовые ямы, квантовые нити, квантовые точки.

На сегодняшний день наноструктуры являются интересными объектами для использования в фотонике, опто- и наноэлектронике. Наноструктуры с пространственным ограничением носителей заряда по одному (квантовые ямы), по двум (квантовые нити) и по трем направлениям (квантовые точки) могут быть использованы для создания приборов с новыми оптическими и электронными свойствами [1–3]. Прорыв в данной области связан с эффектом самоорганизации полупроводниковых наноструктур при гетероэпитаксиальном росте полупроводниковых систем [4]. Одной из эффективных методик получения таких структур является молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). Ее отличительная характеристика заключается в высоком уровне контроля параметров растущей пленки во время эпитаксиального роста.

Интерес к наноструктурам Ge, GeSn, GeSiSn связан с возможностью получения прямозонных материалов на основе этих соединений, совместимых с кремниевыми технологиями [5, 6]. Тройные соединения Si–Ge–Sn обладают независимой регулировкой ширины запрещенной зоны и параметра постоянной решетки [7]. Это получено впервые в полупроводниках IV группы и может быть использовано для создания приборов на основе квантовых ям и квантовых точек.

Период решетки алмазоподобных твердых растворов Si–Ge–Sn следует правилу Вегарда, поэтому линейная интерполяция постоянных решетки между Si, Ge и  $\alpha$ -Sn позволяет получить постоянную решетки тройного соединения  $\text{Si}_x\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-x-y}$  от 5.4 до 6.5 Å. Рост GeSiSn, GeSn, как и рост чистого Ge на Si(100) следует механизму Странского – Крастанова. В начале роста происходит зарождение двумерного гладкого смачивающего слоя, затем на поверхности смачивающего слоя происходит эффект самоорганизации трехмерных островков, которые могут обладать пространственным ограничением носителей заряда, то есть выступать в качестве квантовых точек.

Методом низкотемпературной МЛЭ на подложках Si(100) были выращены пленки тройного раствора  $\text{Si}_x\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-x-y}$  в диапазоне температур 150–450 °С. Методом дифракции быстрых электронов (ДБЭ) был исследован рост этих пленок [8]. С помощью ДБЭ в процессе эпитаксиального роста была определена критическая толщина перехода от двумерного к трехмерному росту для структур  $\text{Si}_x\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-x-y}/\text{Si}(100)$ , которая зависит от температуры роста, при рассогласовании параметра решетки подложки Si(100) с растущей пленкой Si–Ge–Sn от 2 до 5 %. На рис. 1 представлена температурная зависимость критической толщины 2D–3D-перехода пленок Si–Ge–Sn с рассогласованием параметра решетки с подложкой Si(100) равным 2 %. Таким образом, контролируя такие параметры, как состав тройного раствора, температуру роста, толщину растущей пленки, можно контролировать морфологию пленки и получать структуры либо с квантовыми ямами, либо с самоорганизующимися квантовыми точками.

Методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) были получены изображения поверхности тройных соединений  $\text{Si}_4y\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-5y}$  ( $y$  может меняться от 0 до 0.2) и проведен анализ этих изображений в области трехмерного роста. На поверхности наблюдаются SiGeSn-островки. Были получены зависимости среднего размера и плотности самоорганизующихся островков при различных температурах роста и для различных составов тройного раствора. На рис. 2 представлено СТМ-изображение пленки  $\text{Si}_{0.32}\text{Sn}_{0.08}\text{Ge}_{0.6}$ , выращенной при температуре 250 °С.

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-29-07153-офи\_м.