

# Начальные стадии роста тройных соединений Si–Ge–Sn, выращенных на Si(100) методом низкотемпературной МЛЭ

© А.Р. Туктамышев<sup>†</sup>, В.И. Машанов, В.А. Тимофеев, А.И. Никифоров, С.А. Тийс

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 22 апреля 2015 г. Принята к печати 12 мая 2015 г.)

Экспериментально определена зависимость критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту пленок  $\text{Ge}_{1-5x}\text{Si}_4x\text{Sn}_x$ , выращенных на Si(100) методом молекулярно-лучевой эпитаксии в диапазоне температур 150–450°C. Данная зависимость имеет немонотонный характер, подобна зависимости критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту при осаждении чистого Ge на Si(100) и обусловлена изменением механизма двумерного роста. Получены зависимости среднего размера, плотности островков, а также отношение высоты островков к их латеральному размеру методами атомно-силовой и сканирующей туннельной микроскопии. С увеличением температуры роста от 200 до 400°C увеличивается средний размер наноструктур от 4.7 до 23.6 нм.

## 1. Введение

Микро- и оптоэлектронные приложения материалов IV группы ограничены из-за несоответствия постоянной решетки между элементарными полупроводниками Si, Ge и их соединениями, а также из-за малого смещения зоны проводимости при изменении состава в гетеропереходах для этих материалов. Попытки, направленные на то, чтобы научиться независимо контролировать ширину запрещенной зоны и напряжения, вызванные несоответствием параметров решетки пленки и подложки, стимулировали усилия для разработки новых полупроводниковых соединений.

В последнее время были изучены тройные растворы Si–Ge–Sn. Они обладают интересными электронными и транспортными свойствами. В частности, независимая регулировка ширины запрещенной зоны и параметра решетки была показана в семействе тройных соединений Si–Ge–Sn, имеющих параметр решетки элементарного германия [1,2]. Это получено впервые в полупроводниках IV группы, и отсюда делается возможным создание новых оптоэлектронных приборов, совместимых с кремниевой технологией, занимающих область применения от коммуникаций [3–6] до высокоэффективных солнечных элементов [7]. Кроме того, за счет уменьшения ширины запрещенной зоны увеличивается оптическая чувствительность  $p-i-n$  фотодетекторов на основе соединений GeSn по сравнению с германиевыми детекторами [8]. Некоторые исследования показали, что соединения Si–Ge–Sn могут вести себя как прямозонные полупроводники [9,10].

Эпитаксиальный рост полупроводниковых соединений  $\text{Si}_x\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-x-y}$  осложнен рассогласованием в постоянной решетки между Sn и Ge (15%), Sn и Si (19%), малой равновесной растворимостью Sn в Si и Ge (< 1%), а также нестабильностью алмазоподобной структуры  $\alpha$ -Sn и тенденцией к поверхностной сегрегации Sn [11]. Однако, используя неравновесные методики роста, например

низкотемпературную молекулярно-лучевую эпитаксию (МЛЭ), можно вырастить монокристаллические пленки SiGeSn с содержанием олова вплоть до 25% [12]. Успех в получении таких соединений становится возможным вследствие значительных уровней замещения атомов Ge и Si атомами Sn в неравновесных условиях при низких температурах роста 100–350°C.

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 раствора  $\text{Si}_x\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-x-y}$ , равную постоянной решетки элементарного Ge. Эта особенность использовалась в данной работе с целью изучения начальных стадий роста тройных соединений  $\text{Si}_x\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-x-y}$ , имеющих параметр решетки Ge. Ранее были получены данные о начальных стадиях роста двойных соединений GeSn на Si(100) [13]. При этом рост GeSn, как и рост чистого Ge на Si(100), следует механизму Странского–Крастанова.

В данной работе были получены зависимости критической толщины 2D–3D перехода тройных растворов  $\text{Si}_x\text{Sn}_y\text{Ge}_{1-x-y}$ , имеющих параметр решетки элементарного германия, а также статистические данные о размере и плотности Si–Ge–Sn островков в зависимости от состава твердого раствора в диапазоне температур роста 150–450°C.

## 2. Эксперимент

Гетероструктуры на базе материалов Si–Ge–Sn выращивались в условиях сверхвысокого вакуума ( $10^{-7}$  Па) на установке МЛЭ „Катунь“, укомплектованной электронно-лучевым испарителем для кремния и двумя эффузионными ячейками Кнудсена для получения молекулярных пучков германия и олова. Аналитическое оборудование ростовой камеры включает в себя масс-спектрометр, кварцевый измеритель толщины, дифрактометр быстрых электронов (20 кВ). Использовались подложки Si(100)  $p$ -типа. После химической очистки

<sup>†</sup> E-mail: tuktamyshev@isp.nsc.ru