Синтез и свойства нанокристаллов GeSn в слоях Si и SiO_2

Содержание

- Введение
- Обзор зарубежных исследований по сплавам GeSn
- Перспективы
- МЛЭ структуры GeSn/Si
- Имплантация Ge и Sn в SiO_2/Si
- Малые концентрации Sn в МЛЭ слоях Ge/Si

Введение

Современное состояние технологии микроэлектроники:
Базовый материал - кремний. Более 95% полупроводниковых устройств создается на основе Si.

Тенденция:
Увеличение степени интеграции, потребляемой мощности и тепловыделения ИС, приближение к пределу вычислительных способностей ИС на Si.

Перспектива:
Поиск новых способов создания внутрисхемных коммуникаций и эффективных светоизлучающих устройств совместимых с Si технологией.

Сплавы Sn_xGe_{1-x}:
При определенных условиях вид зонной структуры сплавов Sn_xGe_{1-x} изменяется от непрямозонного к прямозонному.
Исследуется возможность управления шириной запрещенной зоны сплавов Sn_xGe_{1-x} и условиями перехода к прямой запрещенной зоне.

Обзор зарубежных исследований по сплавам GeSn

Выращивание когерентных, однородных эпитаксиальных пленок Sn_xGe_{1-x}/Ge(001)

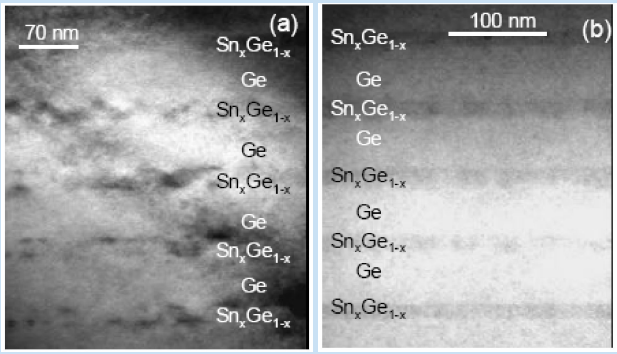


Рис. 1. ПЭМ микрофотографии структуры из 5 слоев $Sn_{0.02}Ge_{0.98}$/Ge

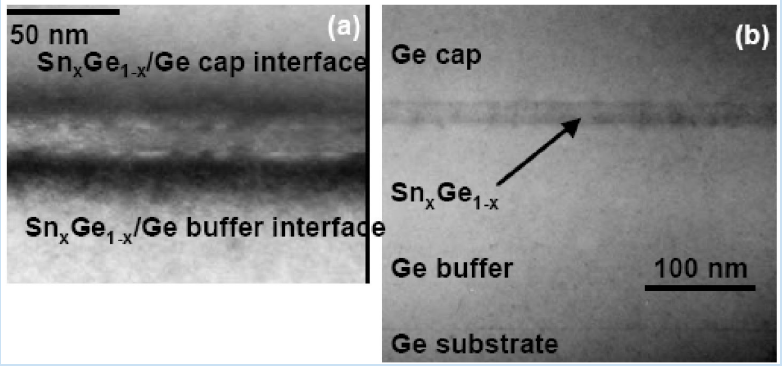


Рис. 2. ПЭМ микрофотографии структуры $Sn_{0.03}Ge_{0.97}$/Ge (23 нм).

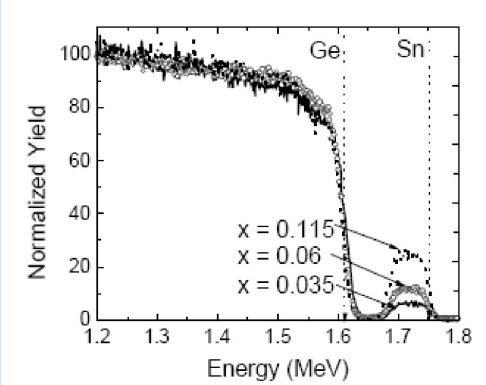
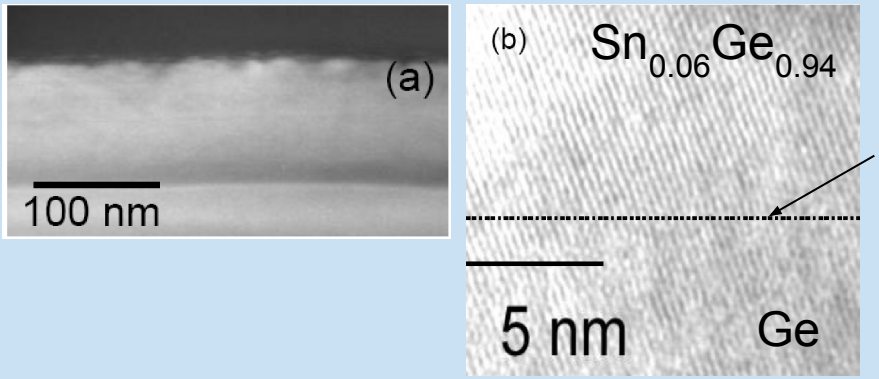


Рис. 3. Спектр РОР от структуры Sn_xGe_{1-x}/Ge (100 нм).



Граница раздела

Рис. 4. ПЭМ микрофотографии структуры $Sn_{0.06}Ge_{0.94}$/Ge (23 нм).

Оптические характеристики эпитаксиальных пленок Sn_xGe_{1-x}/Ge(001)

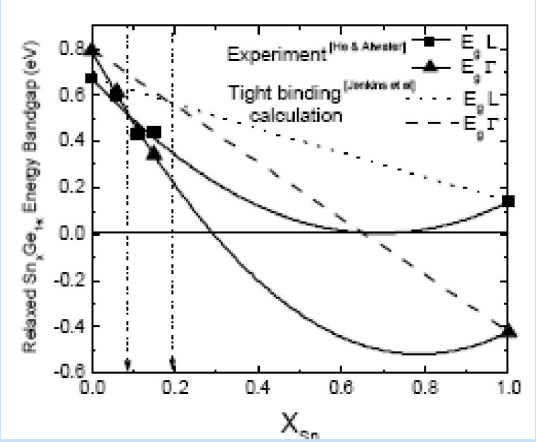


Рис. 4.

Зависимость ширины запрещенной зоны в сплаве Sn_xGe_{1-x} от содержания Sn.

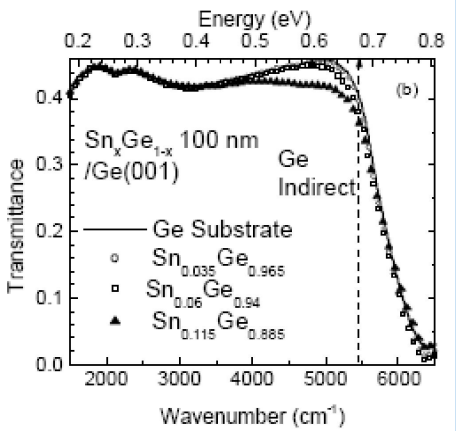


Рис. 5.

Зависимость пропускания излучения (отн. ед.) пленками Sn_xGe_{1-x} (100 нм) от энергии излучения.

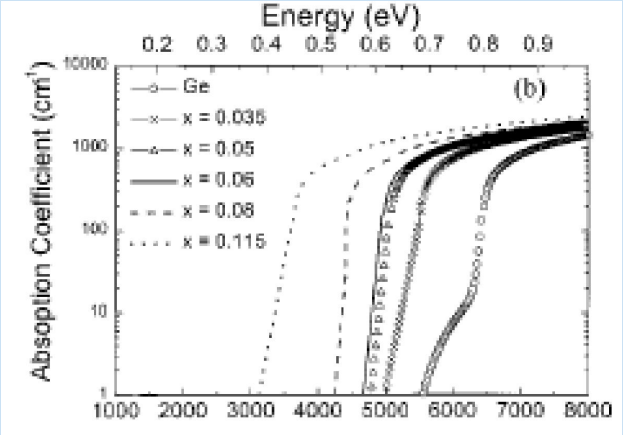


Рис. 6.

Зависимость коэффициента поглощения в сплаве Sn_xGe_{1-x} (100 нм) от энергии излучения

Перспективы

1 НАПРАВЛЕНИЕ

Исследование сплавов GeSn:

Теория: Сплавы $Ge_{1-x}Sn_x$:
- имеют прямую запрещенную зону при x<0,15,
- обладают управляемой запрещенной зоной при изменении состава;
- обладают высокой подвижностью свободных носителей заряда.

Эксперимент: Сплавы $Ge_{1-x}Sn_x$ обладают прямой зоной при 0.035<x<0.115,
рост x приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны от 0,8 до 0,35 эВ.

Применение:
- Использование оптических связей на основе неравновесных сплавов полупроводников IV группы $Si_{1-x}Sn_x$, $Ge_{1-x}Sn_x$, и $Si_{1-x-y}Ge_xSn_y$ GeSn.
- Слои сплавов GeSn могут быть использованы для разработки новых светоизлучающих устройств.

Сложности формирования сплавов GeSn:
- большое (~17%) несоответствие постоянных решеток между кристаллическими фазами Ge и Sn;
- нестабильность алмазоподобной структуры α-Sn (сегрегация Sn за пределы выращиваемого слоя Sn_xGe_{1-x});
- малая величина равновесной растворимости Sn в Ge и Sn в Si ~10^{19} и 5×10^{19} ат/см^3 (~0,5 ат. %).

Результат: слои Sn_xGe_{1-x} нестабильны и их синтез требует неравновесных условий.

Решение проблемы:
Изготовление пересыщенных структур с высоким содержанием Sn неравновесными методами:
1. Молекулярно-лучевая эпитаксия;
2. Ионная имплантация.

2 НАПРАВЛЕНИЕ

Исследование структур (Ge+Sn)/Si:

Теория: Существует возможность реализации прямого оптического перехода в системе Si/Ge при условии осаждения Ge в форме островков с малыми размерами.

Способ получения структур: МЛЭ тонких слоев Ge на Si-подложках в режиме Странски-Крастанова.

Движущая сила формирования островков: различие постоянных решеток Si и Ge (4,2%).

Проблема:

Осаждение Ge при типичных температурах МЛЭ (500-550°C) приводит к формированию крупных островков.

Решение:

Добавление в эпитаксиальный слой Ge небольшого (~1-3 ат.%) количества атомов примеси с большим, чем у Ge ковалентным радиусом (например, Sn).

МЛЭ структуры GeSn/Si

Методические особенности

ПОДЛОЖКА: пластины n-типа (001) – Si

РОСТ: МЛЭ для Si, Ge, Sn осаждения

Последовательность роста:

1. буферный слой Si (100 нм).
2. сплав C1 (3 нм) или сплав C2 (1 нм), 150°C.
3. Si (20 нм), 150°C

Скорость роста:

Si – 2 Å/s,

C1 и C2 – 0,22 Å/s.

ОТЖИГ: сухой O_2,

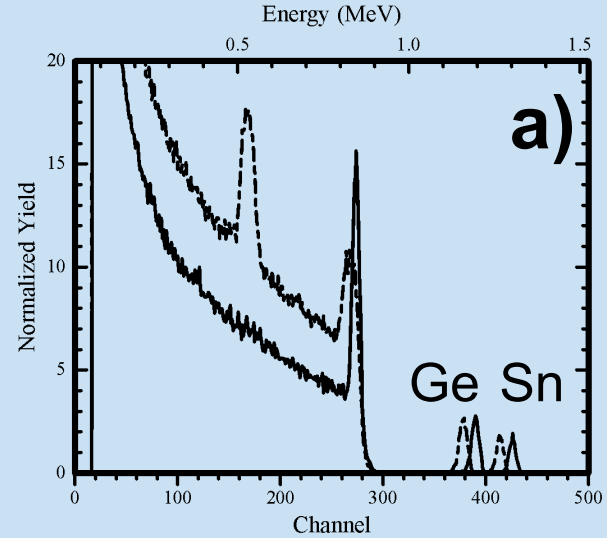
T=925°C или 950°C,

15-130 мин.

ИССЛЕДОВАНИЯ:

Химический состав – РОРКИ (He^+, 1,5 МэВ).

Структурно-фазовый состав – ПЭМ (ЭМ 125, 100кВ).



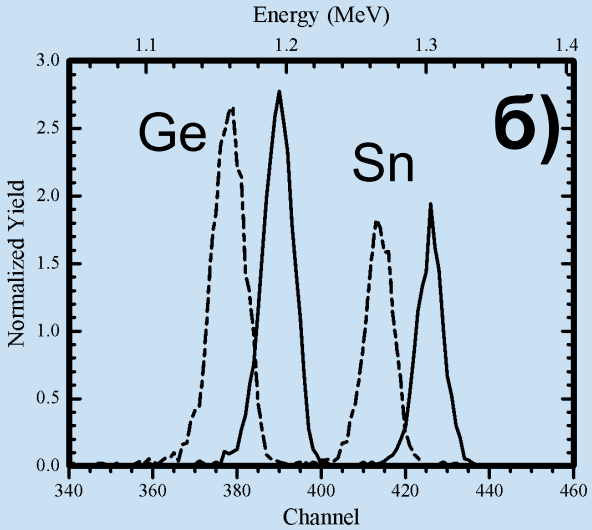


Рис. 1. Спектры РОРКИ:
а) — исходная структура,
- - отжиг 925 °C 60 мин
б) область каналов 350-450 спектра а)

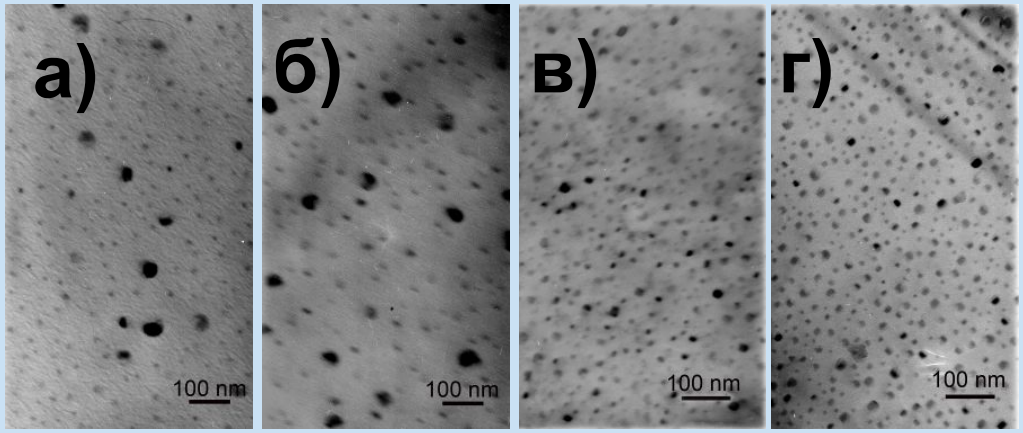


Рис. 2. Светлопольные ПЭМ микрофотографии от образцов
C2 а) 925 °C 60 мин б) 950 °C 60 мин
C1 в) 925 °C 60 мин г) 925 °C 130 мин

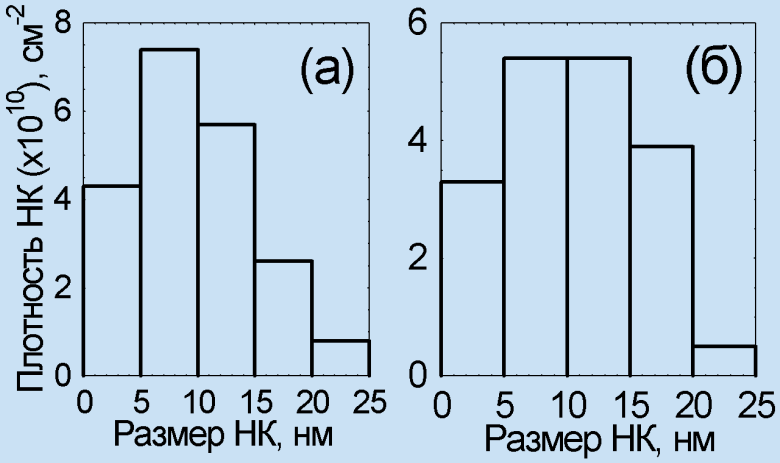


Рис. 3. Распределение НК по размерам.
(а) - Si/Ge0,93Sn0,07/Si,
(б) - Si/Si0,4Ge0,5Sn0,1/Si

Выводы

- Сформированные нанокластеры $Ge_{1-x}Sn_x$ имеют средний размер ~10 нм, поверхностную плотность ~4.5×10^{10} $см^{-2}$

- Формирование нанокластеров $Ge_{1-x}Sn_x$ является результатом сегрегационного оттеснения Sn и Ge при движении границы раздела SiO_2/Si.

Имплантация Ge и Sn в SiO_2/Si

Методические особенности

ПОДЛОЖКА: пластины p-типа (001) – Si

СЛОЙ SiO2/Si: 200 нм, сухой O_2, 1050°C

ИМПЛАНТАЦИЯ : Ge^+ и Sn^+

2 серии образцов:

A – E_{Ge}=150 keV, E_{Sn}=220 keV, $D_{Ge}=9.3\times10^{15}$ см$^{-2}$, $D_{Sn}=8.3\times10^{14}$ см$^{-2}$,

B– E_{Ge}=150 keV, E_{Sn}=220 keV, $D_{Ge}=1.4\times10^{17}$ см$^{-2}$, $D_{Sn}=1.25\times10^{16}$ см$^{-2}$.

Результат: - R_p (Ge,Sn)=100 нм;

- Ge:Sn=10:1 по всей глубине (формирование сплава $Ge_{0.9}Sn_{0.1}$, который соответствует прямой запрещенной зоне E_g=0.45 эВ в случае массивного материала).

ОТЖИГ:

N_2, 400-900°C

30 мин

ИССЛЕДОВАНИЯ:

Структура слоев – ПЭМ (ЭМ-125, 100 кВ).

Химический состав – РОР (He^+, 1.5 МэВ, 170°).

Катодолюминесценция (КЛ) – Возбуждение: E_e=11.8 кэВ;

Регистрация: 77 K, Ge:Cu детектор, охлаждаемый жидким азотом.

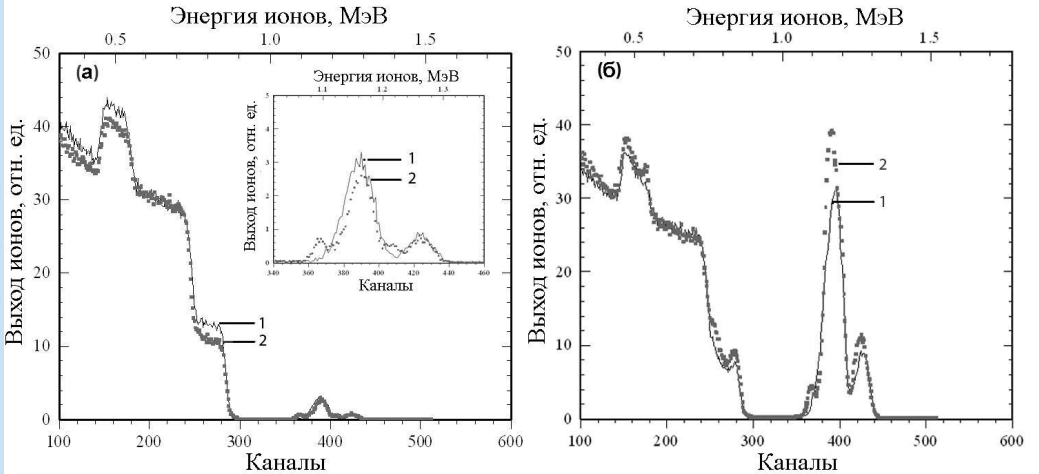


Рис.1. Спектр РОР от образцов “А” (*а*) и “В” (*б*) после отжига в атмосфере сухого азота в течение 30 мин при: 1 - 650°С и 2 - 900°С.

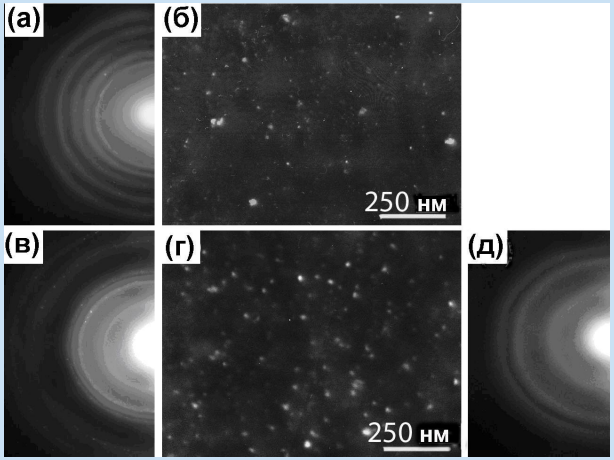


Рис.2. Изображения электронной дифракции (*а, в, д*) и темнопольные ПЭМ микрофотографии (б, *г*) образцов “А” отожженных при 408°С (а, *б*), 650°С (в, *г*) и 900°С (*д*) в течение 30 мин в атмосфере сухого азота.

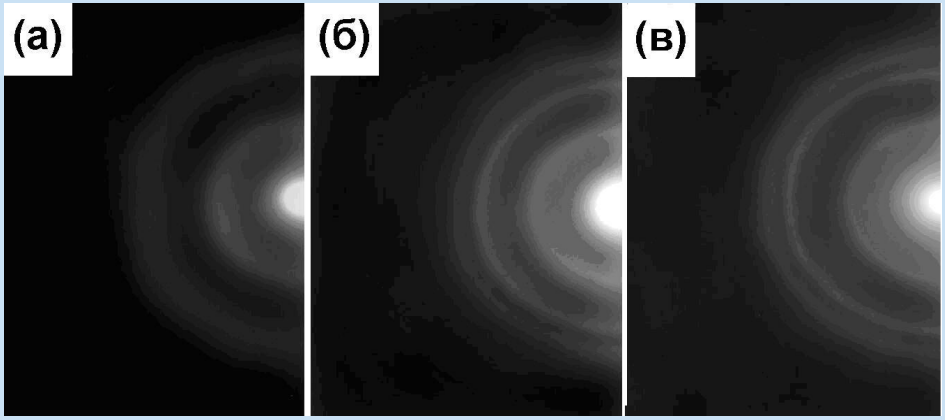


Рис.3. Изображения электронной дифракции, полученные от образцов “В”, отожженных в атмосфере сухого азота в течение 30 мин при: (*а*) 408°С, (*б*) 650°С и (*в*) 900°С.

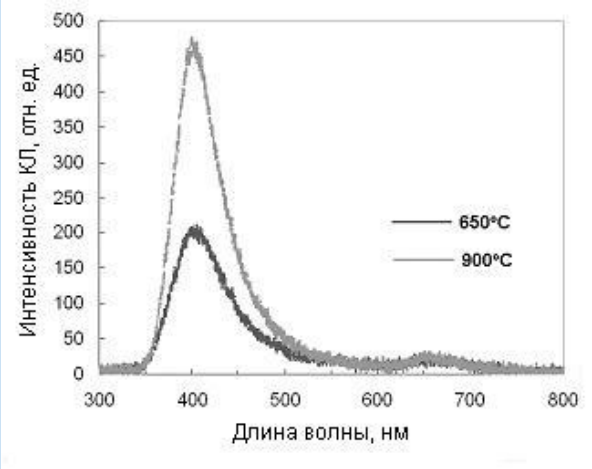


Рис.4. Спектры катодолюминесценции от образцов “А“, отожженных в атмосфере сухого азота в течение 30 мин при 650°С (черный) и 900°С (серый).

Выводы

- Слои SiO_2 содержат нанокластеры Ge и Sn.
- Средний размер и плотность нанокластеров варьируются в зависимости от условий ионной имплантации и термообработки и составляют 10-20 нм и 10^{10}–10^{11} $см^{-2}$ соответственно.
- После термообработки при 400–800°C видимого перераспределения Ge и Sn не наблюдается и только при 900°C, в образце, имплантированном с высокой дозой ионов, имеет место медленная сегрегация (оттеснение) примесей к границе раздела SiO_2/Si.
- Спектры катодолюминесценции (КЛ) от структур SiO_2(Ge+Sn)/Si содержат интенсивные пики в синей области и области, близкой к ИК-излучению. которые могут быть приписаны наличию дефектов и нанокластеров в слое SiO_2(Ge+Sn).

Малые концентрации Sn в МЛЭ слоях Ge/Si

Методические особенности

ПОДЛОЖКА: пластины (001) – Si

РОСТ: МЛЭ для Si, Ge, Sn осаждения
(режим Странски-Крастанова).

Последовательность роста:

1 – слой Ge+Sn; 450°C, 500°C или 550°C,
Sn (1,5% или 2,5% от всего слоя Ge)

2 – слой Ge (10-12 Å);

3 – слой Si (3 Å).

Скорость роста Si – 2 Å/c
Ge и Sn – 0,22 Å/c

ИССЛЕДОВАНИЯ:

Структура слоев – ПЭМ (ЭМ-125, 100 кВ).

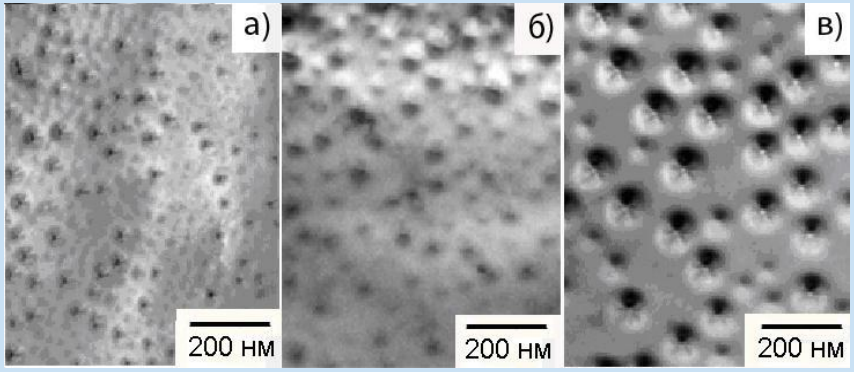


Рис. 1. ПЭМ микрофотографии образцов структуры (11Å Ge + 2,5% Sn), выращенной при температурах МЛЭ: *а* – ТМЛЭ=450°С; *б* – $T_{МЛЭ}$=500°С;*в* –$T_{МЛЭ}$=550°С.

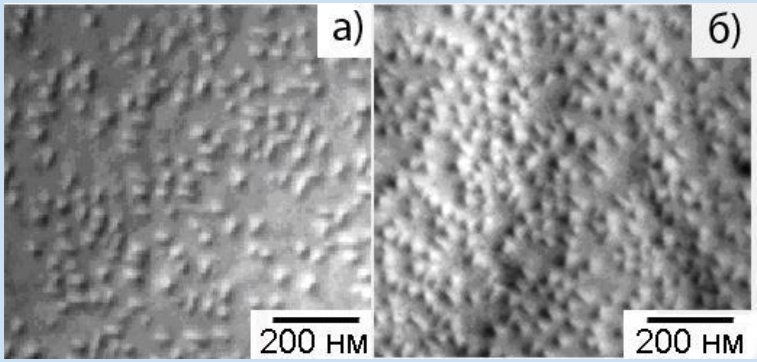


Рис. 2. ПЭМ микрофотографии образцов структур, выращенных методом МЛЭ при 500°С: *а* – 10Å Ge; *б* – 10Å Ge + 1,5% Sn.

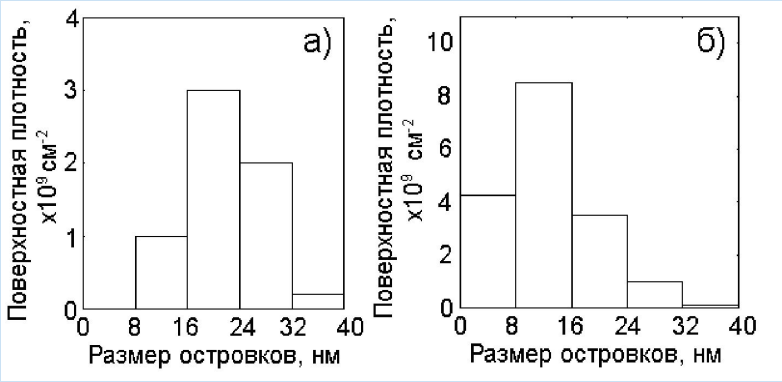


Рис. 3. Распределение островков по размерам для структур, выращенных методом МЛЭ при 500°С: *а* – (10Å Ge); *б* **–** (10Å Ge + 1,5% Sn).

Выводы

- при низких температурах роста (450°C) формируются островки преимущественно типа *hut*, при высоких температурах (500°C-550°C) – островки типа *dome*.
- осаждение Ge с малыми добавками атомов Sn приводит к увеличению поверхностной плотности островков и сокращению их размеров.

Результаты могут быть объяснены с точки зрения кинетической модели формирования упругонапряженных островков в гетероэпитаксиальных системах, рассогласованных по параметру решетки.

Очевидно, что примесь Sn приводит к изменению как энергетических, так и кинетических свойств системы.

1) уменьшается диффузионная длина перемещения атомов на поверхности, что приводит к уменьшению скорости роста островков по сравнению с осаждением чистого Ge.

2) понижается активный барьер зарождения островков, что приводит к увеличению их числа, уменьшению среднего размера и снижению критической толщины образования островков.

Электронный вариант презентации доступен на сайте www.prokopyev-rf2007.narod.ru