

Синтез и свойства нанокристаллов GeSn в слоях Si и SiO₂

Содержание

- Введение
- Обзор зарубежных исследований по сплавам GeSn
- Перспективы
- МЛЭ структуры GeSn/Si
- Имплантация Ge и Sn в SiO₂/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 $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$:

При определенных условиях вид зонной структуры сплавов $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$ изменяется от непрямозонного к прямозонному.

Исследуется возможность управления шириной запрещенной зоны сплавов $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$ и условиями перехода к прямой запрещенной зоне.

Обзор зарубежных исследований по сплавам GeSn

Выращивание когерентных, однородных эпитаксиальных пленок $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Ge}(001)$

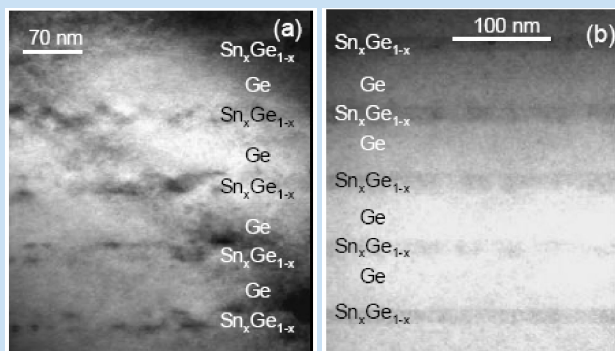


Рис. 1. ПЭМ микрофотографии структуры из 5 слоев $\text{Sn}_{0.02}\text{Ge}_{0.98}/\text{Ge}$

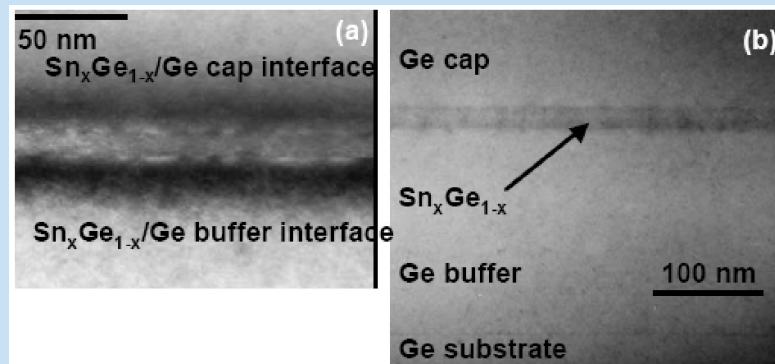


Рис. 2. ПЭМ микрофотографии структуры $\text{Sn}_{0.03}\text{Ge}_{0.97}/\text{Ge}$ (23 нм).

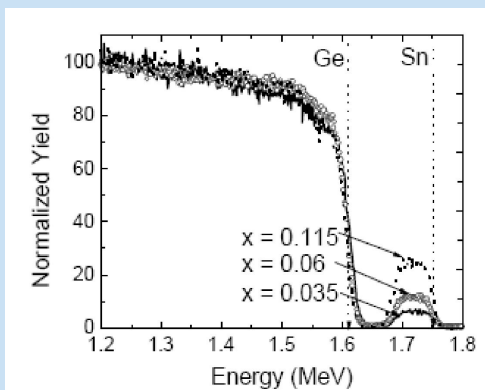


Рис. 3. Спектр POP от структуры $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Ge}$ (100 нм).

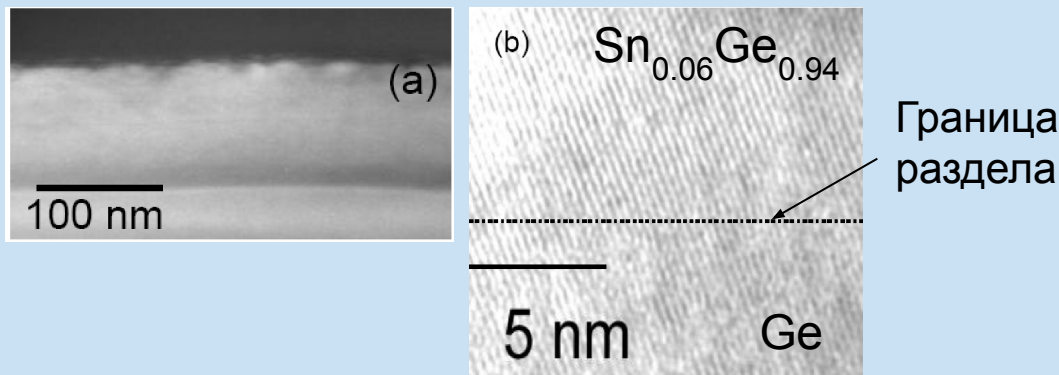


Рис. 4. ПЭМ микрофотографии структуры $\text{Sn}_{0.06}\text{Ge}_{0.94}/\text{Ge}$ (23 нм).

Оптические характеристики эпитаксиальных пленок $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Ge}(001)$

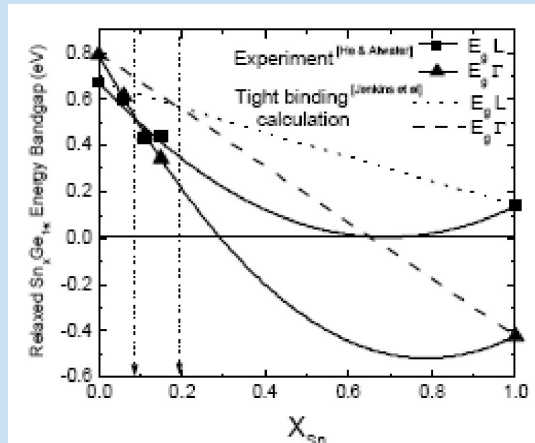


Рис. 4.

Зависимость ширины запрещенной зоны в сплаве $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$ от содержания Sn.

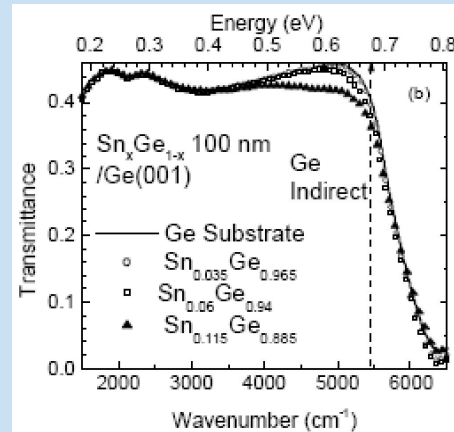


Рис. 5.

Зависимость пропускания излучения (отн. ед.) пленками $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$ (100 нм) от энергии излучения.

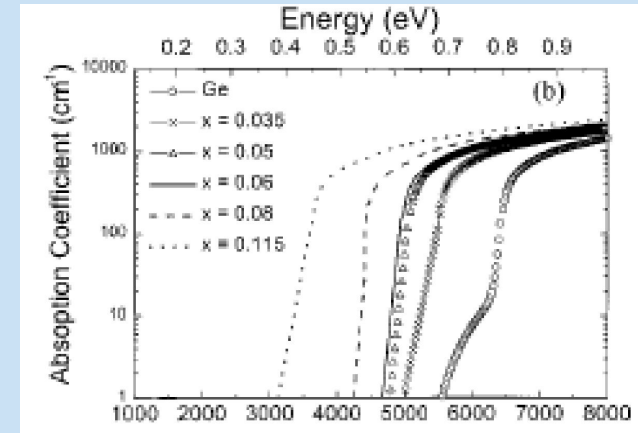


Рис. 6.

Зависимость коэффициента поглощения в сплаве $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$ (100 нм) от энергии излучения

Перспективы

1 НАПРАВЛЕНИЕ

Исследование сплавов GeSn:

Теория: Сплавы $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$:

- имеют прямую запрещенную зону при $x < 0,15$,
- обладают управляемой запрещенной зоной при изменении состава;
- обладают высокой подвижностью свободных носителей заряда.

Эксперимент: Сплавы $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 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 $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$, $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{Sn}_y\text{GeSn}$.
- 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 $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$);
- малая величина равновесной растворимости Sn в Ge и Sn в Si $\sim 10^{19}$ и 5×10^{19} ат/см³ (~0,5 ат. %).

Результат: слои $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$ 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 O₂,
T=925°C или 950°C,
15-130 мин.

ИССЛЕДОВАНИЯ:

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

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

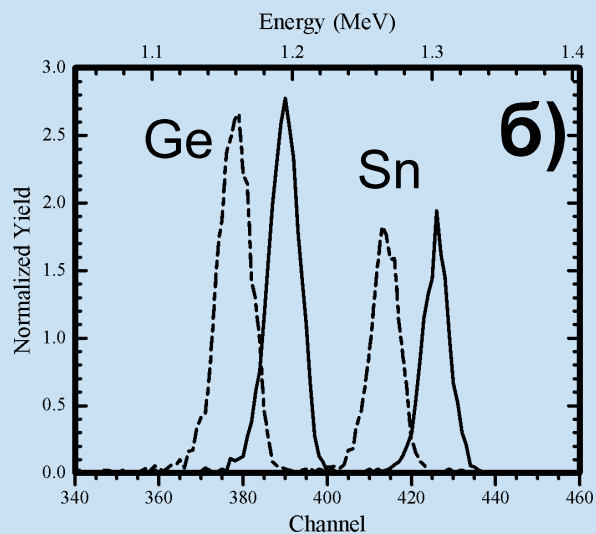
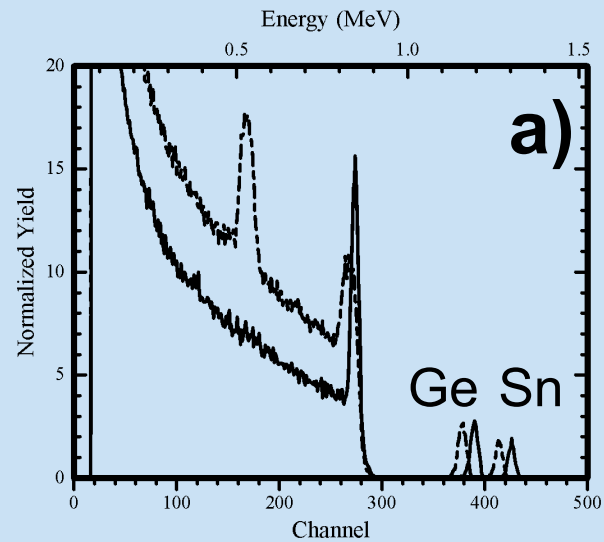


Рис. 1. Спектры РОРКИ:

- а) — исходная структура,
 - - отжиг 925 °C 60 мин
 б) область каналов 350-450 спектра а)

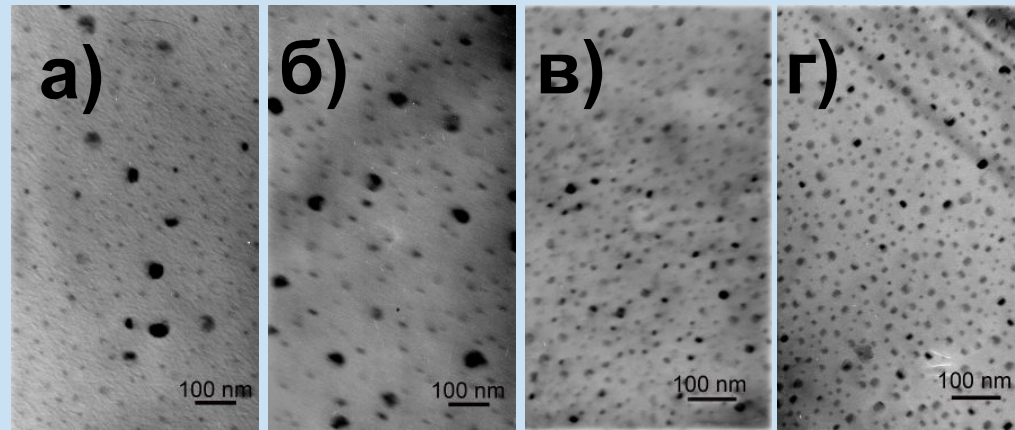


Рис. 2. Светлопольные ПЭМ

микрофотографии от образцов

- С2 а) 925 °C 60 мин б) 950 °C 60 мин
 С1 в) 925 °C 60 мин г) 925 °C 130 мин

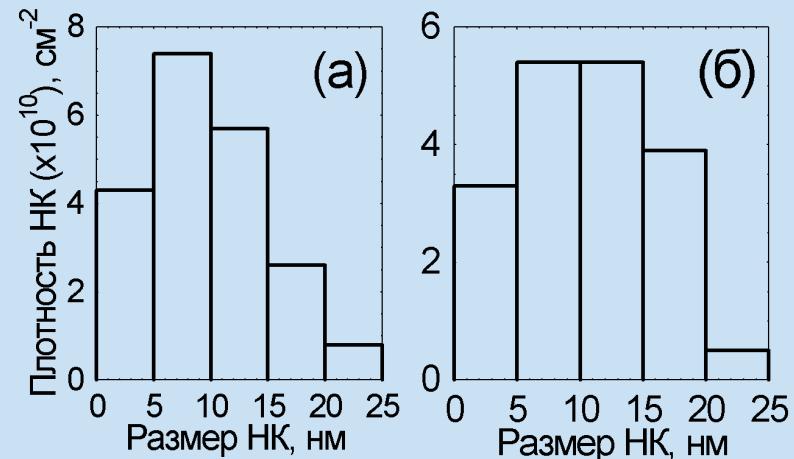


Рис. 3. Распределение НК по размерам.

- (а) - Si/Ge_{0,93}Sn_{0,07}/Si,
 (б) - Si/Si_{0,4}Ge_{0,5}Sn_{0,1}/Si

Выводы

- Сформированные нанокластеры $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ имеют средний размер ~ 10 нм, поверхностную плотность $\sim 4.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$
- Формирование нанокластеров $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ является результатом сегрегационного оттеснения Sn и Ge при движении границы раздела SiO_2/Si .

Имплантация Ge и Sn в SiO₂/Si

Методические особенности

ПОДЛОЖКА: пластины p-типа (001) – Si

СЛОЙ SiO₂/Si: 200 нм, сухой O₂, 1050°C

ИМПЛАНТАЦИЯ : Ge⁺ и Sn⁺

2 серии образцов:

A – E_{Ge}=150 keV, E_{Sn}=220 keV, D_{Ge}=9.3×10¹⁵ см⁻², D_{Sn}=8.3×10¹⁴ см⁻²,

B – E_{Ge}=150 keV, E_{Sn}=220 keV, D_{Ge}=1.4×10¹⁷ см⁻², D_{Sn}=1.25×10¹⁶ 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:

N₂, 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 К, Ge:Si детектор,
охлаждаемый жидким азотом.

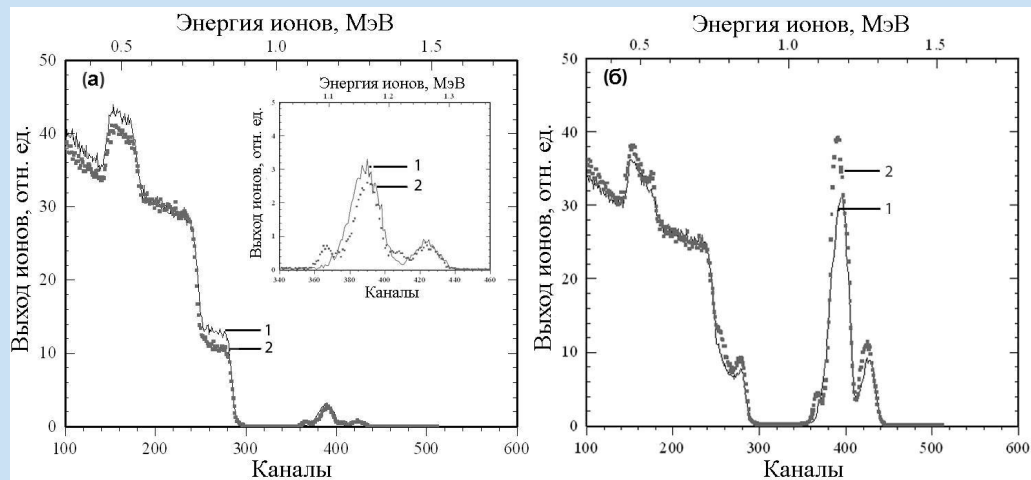


Рис.1. Спектр РОР от образцов “А” (а) и “В” (б) после отжига в атмосфере сухого азота в течение 30 мин при: 1 - 650°C и 2 - 900°C.

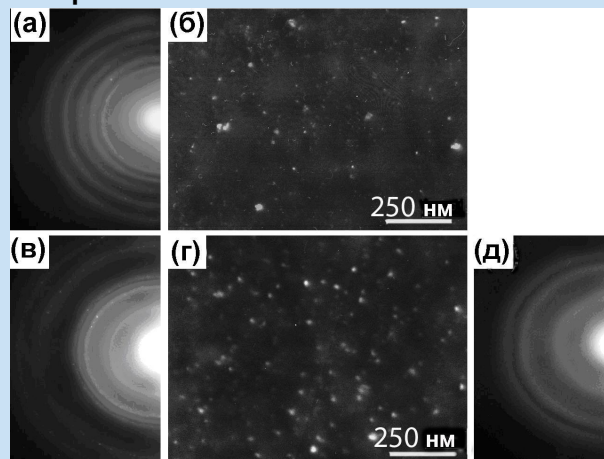


Рис.2. Изображения электронной дифракции (а, в, д) и темнопольные ПЭМ микрофотографии (б, г) образцов “А” отожженных при 408°C (а, б), 650°C (в, г) и 900°C (д) в течение 30 мин в атмосфере сухого азота.

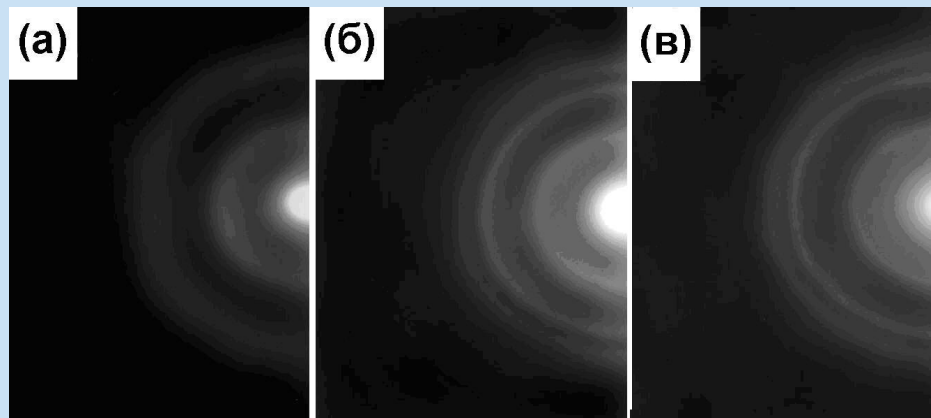


Рис.3. Изображения электронной дифракции, полученные от образцов “В”, отожженных в атмосфере сухого азота в течение 30 мин при: (а) 408°С, (б) 650°С и (в) 900°С.

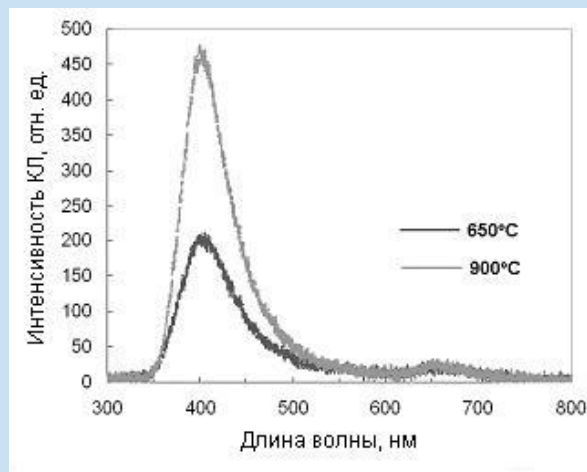


Рис.4. Спектры катодолуминесценции от образцов “А”, отожженных в атмосфере сухого азота в течение 30 мин при 650°С (черный) и 900°С (серый).

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 катодoluminesценции (КЛ) от структур $\text{SiO}_2(\text{Ge}+\text{Sn})/\text{Si}$ содержат интенсивные пики в синей области и области, близкой к ИК-излучению. которые могут быть приписаны наличию дефектов и нанокластеров в слое $\text{SiO}_2(\text{Ge}+\text{Sn})$.

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/с

Ge и Sn – 0,22 Å/с

ИССЛЕДОВАНИЯ:

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

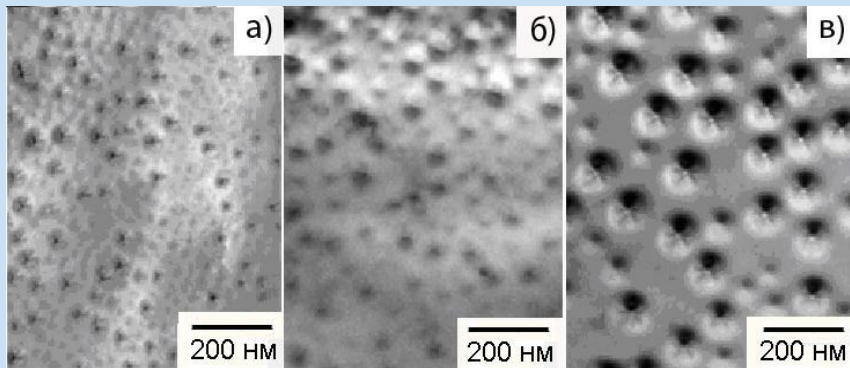


Рис. 1. ПЭМ микрофотографии образцов структуры (11\AA Ge + 2,5% Sn), выращенной при температурах МЛЭ:
a – $T_{\text{МЛЭ}}=450^\circ\text{C}$; *б* – $T_{\text{МЛЭ}}=500^\circ\text{C}$; *в* – $T_{\text{МЛЭ}}=550^\circ\text{C}$.

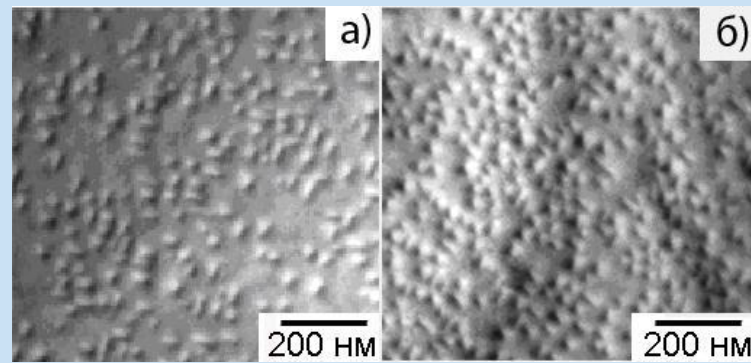


Рис. 2. ПЭМ микрофотографии образцов структур, выращенных методом МЛЭ при 500°C :
a – 10\AA Ge; *б* – 10\AA Ge + 1,5% Sn.

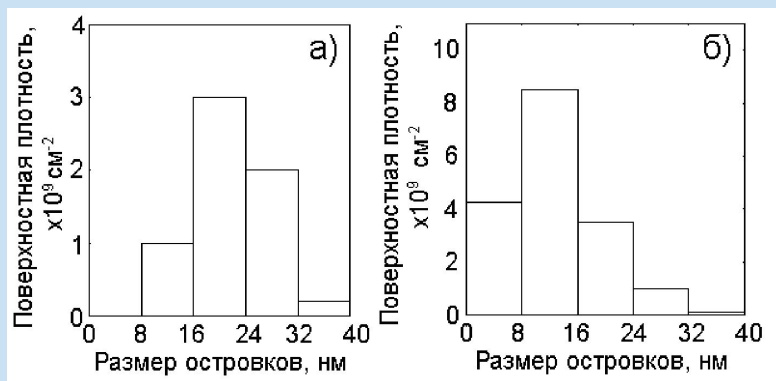


Рис. 3. Распределение островков по размерам для структур, выращенных методом МЛЭ при 500°C :
a – (10\AA Ge); *б* – (10\AA Ge + 1,5% Sn).

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