

**В. Г. Шенгуров**, канд. физ.-мат. наук,  
**С. П. Светлов**, канд. физ.-мат. наук,  
**В. Ю. Чалков**, аспирант,  
**Г. А. Максимов**, д-р хим. наук,  
 Научно-исследовательский физико-технический  
 институт Нижегородского государственного  
 университета,  
**З. Ф. Красильник**, д-р физ.-мат. наук,  
**Б. А. Андреев**, канд. физ.-мат. наук,  
**Ю. Н. Дроздов**, канд. физ.-мат. наук,  
 Институт физики микроструктур РАН  
 (г. Нижний Новгород)

## ФОРМИРОВАНИЕ ИЗЛУЧАЮЩИХ ТРЕХМЕРНЫХ ОСТРОВКОВ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ПРИ СУБЛИМАЦИИ КРЕМНИЯ В СРЕДЕ ГЕРМАНА<sup>1</sup>

*Представлены результаты исследования условий роста островков сплавов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на подложках  $\text{Si}(100)$  при выращивании их методом сублиминационной молекулярно-лучевой эпитаксии в среде германа. При высоких температурах (~850 °C) растут пирамидообразные, а при более низких (~650–800 °C) — куполообразные островки меньших размеров. На образцах первого типа при  $x = 14\text{--}17\%$  наблюдалась интенсивная фотолюминесценция.*

### Введение

Самоорганизующиеся островки GeSi в последние годы представляют значительный интерес для оптоэлектронных приложений на основе кремниевой технологии. Работы, посвященные исследованию островков GeSi, выполнены в основном при наращивании их методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) или методом пиролиза гидридов кремния и германия в высоком вакууме. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки. Основным недостатком метода МЛЭ является нестабильность процесса испарения из жид-

кой фазы в вакууме, а гидридного — монотонное уменьшение скорости роста с понижением температуры. Для преодоления этих недостатков был разработан новый вариант метода эпитаксии  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  [1], сочетающий метод МЛЭSi, в котором атомарный поток Si получается путем сублимации монокристалла этого элемента, с разложением на поверхности роста молекулярного потока германа ( $\text{GeH}_4$ ), напускаемого в ростовую камеру. На выращенных данным методом тонких слоях твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  была обнаружена фотолюминесценция на длине волны ~7800 см<sup>-1</sup> [2].

Целью данной работы являлось исследование возможности формирования самоорганизующихся островков  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  при использовании сублиминационной МЛЭSi в среде  $\text{GeH}_4$  и выявление фотолюминесценции (ФЛ) в них.

### Методика эксперимента

Исследуемые образцы представляли собой тонкие слои твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , выращенные на подложках Si(100) при температуре 500–850 °C методом сублиминационной МЛЭ в среде германа [2]. Толщину и состав слоев сплава определяли из измерений рентгеновской дифракции (РД). Низкотемпературные измерения фотолюминесценции были выполнены с помощью вакуумного Фурье-спектрометра "Bomem DA3". В качестве источника возбуждающего излучения использовали Kr-лазер ( $\lambda = 647$  нм). Поверхностную морфологию образцов исследовали с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) "TopMetrix" TMX-2100 на воздухе в контактном режиме.

Структуры обычно представляли собой буферный слой толщиной ~100 нм, выращенный при температуре подложки 1000 °C, на который осаждался слой сплава GeSi с эквивалентной толщиной от 20 до 100 нм со скоростью ~0,05 нм/с. Для фотолюминесцентных исследований поверхность слоя сплава был выращен покрывающий слой.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Известно, что на морфологию поверхности эпитаксиальных слоев влияет несоответствие параметров решетки слоя и подложки. На рис. 1, а, б (см. третью сторону обложки) приведены снимки, снятые на АСМ со слоями, которые выращены при

<sup>1</sup>Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 01-02-16439 и 00-02-16141), МНТП "Фундаментальная спектроскопия" (проект 08.02.043) и проектом INTAS 99-1872.

Параметры роста и состава островковых слоев

| Параметр                | Номер образца       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                         | 16                  | 20                  | 25                  | 32                  | 99                  | 100                 | 101                 | 118                 |
| $T_p$ , °C              | 650                 | 650                 | 800                 | 800                 | 850                 | 850                 | 650                 | 800                 |
| $P_{\text{GeH}_4}$ , Па | $6,7 \cdot 10^{-3}$ | $1,3 \cdot 10^{-2}$ | $6,7 \cdot 10^{-3}$ | $6,7 \cdot 10^{-2}$ | $6,7 \cdot 10^{-3}$ | $6,7 \cdot 10^{-3}$ | $2,7 \cdot 10^{-3}$ | $6,7 \cdot 10^{-3}$ |
| $x$ , %                 | 20                  | 21                  | 15                  | 25                  | 17                  | 14,5                | 13,5                | 13,5                |

температуре  $\sim 650^\circ\text{C}$  и при различных давлениях германа. Видно, что при повышении давления германа размер куполообразных островков растет. Куполообразные островки растут вплоть до температуры  $800^\circ\text{C}$  (рис. 1, в, см. третью сторону обложки).

Повышение температуры до  $\sim 850^\circ\text{C}$  приводит к появлению пирамидообразных кластеров с разме-

рами, превышающими размеры куполообразных островков (рис. 1, з, см. третью сторону обложки).

Параметры выращенных структур приведены в таблице, из которой видно, что при температуре роста  $850^\circ\text{C}$  содержание германия несколько ниже, чем в слоях, выращенных при  $650^\circ\text{C}$  при одинаковом давлении германа  $P_{\text{GeH}_4} = 6,7 \cdot 10^{-3}$  Па (сравнить образцы № 16 и № 99).

Увеличение размеров островков при повышении температуры роста связано, вероятно, со значительным увеличением упругих напряжений в основаниях островков. Изменение формы островков от куполообразной к пирамидообразной можно связать, по-видимому, с диффузией кремния в островки при высоких температурах роста [3]. Об этом свидетельствует снижение доли германия в островках, выращенных при более высокой температуре.

На рис. 2, а приведены спектры фотолюминесценции трех различных образцов с островками пирамидальной формы. На рисунке видно, что на спектрах наблюдается бесфононные пики (NP) и фононное повторение (ТО), связанное с Si-Si фононными колебаниями, положение которых соответствует рекомбинационным экситонным переходам в гетероструктуре  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ . В спектре слоя с куполообразной формой островков (образец № 25) также наблюдается NP и ТО пики (рис. 2, б). Там же приведены спектры, снятые при различных температурах. Видно, что с ростом температуры наблюдается гашение фотолюминесценции.

\*\*\*

Установлены режимы роста самоорганизующихся наноструктур  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  в методе сублимационной МЛЭ Si в среде германа. При относительно низких температурах ( $\sim 650\text{--}800^\circ\text{C}$ ) растут островки куполообразной формы, а при повышенной температуре ( $\sim 850^\circ\text{C}$ ) — пирамидальной формы. В последних наблюдается интенсивная фотолюминесценция.

Авторы выражают благодарность П. А. Шилеву за проведение измерений на АСМ.

#### Список литературы

1. Толмачев В. А., Рубцова Р. А., Светлов С. П., Корнаухов А. В., Гудкова А. Д. Гетероэпитаксия слоев  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  на Si(100) из атомарного потока Si и молекулярного потока  $\text{GeH}_4$  // Изв. вузов, сер. "Цветная металлургия". 1994. № 1—2. С. 172—175.
2. Светлов С. П., Шенгуров В. Г., Чалков В. Ю., Красильник З. Ф., Андреев Б. А., Дроздов Ю. Н. Гетероэпитаксиальные структуры  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(100)$ , полученные сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксией кремния в среде  $\text{GeH}_4$  // Изв. РАН, сер. физическая. 2001. Т. 65. № 2. С. 204.
3. Востоков Н. В., Гусев С. А., Дроздов Ю. Н., Красильник З. Ф., Лобанов Д. Н., Молдавская Л. Д., Новиков А. В., Постников В. В., Филатов Д. О. Упругие напряжения и состав самоорганизующихся наноструктур  $\text{GeSi}$  на Si (001) // ФТП, 2000. Т. 34. № 1. С. 8—12.

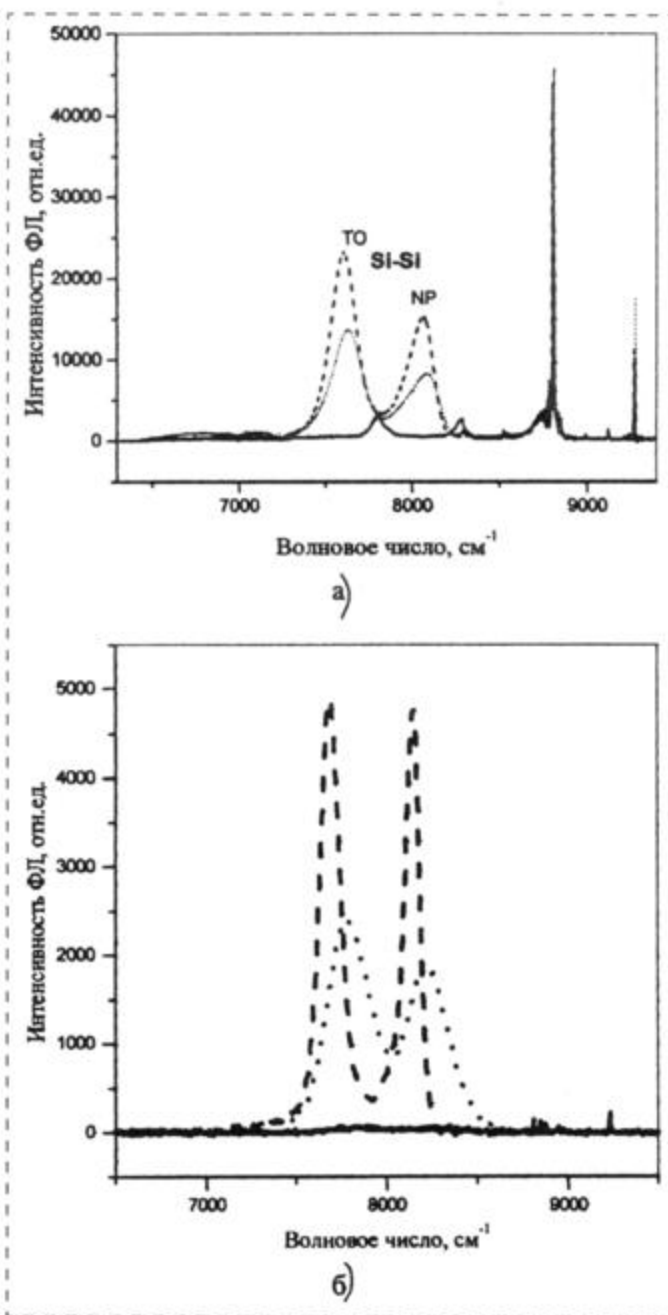


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) структур:  
а)  $\cdots$   $T_n = 850^\circ\text{C}$ ,  $x = 17\%$ ,  $\cdots$   $T_n = 850^\circ\text{C}$ ,  $x = 14,5\%$ ,  $\cdots$   $T_n = 850^\circ\text{C}$ ,  $x = 13,5\%$ ; б)  $T_n = 650^\circ\text{C}$ ,  $x = 15\%$  при  $T = 4\text{ K}$   $\cdots$ , при  $T = 80\text{ K}$   $\cdots$ , при  $T = 120\text{ K}$   $\cdots$