

# Влияние скорости осаждения Ge на рост и фотолюминесценцию самоформирующихся островков Ge(Si)/Si(001)

© Н.В. Востоков, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, А.Н. Яблонский

Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: shaleev@ipm.sci-nnov.ru

Представлены результаты исследований роста и фотолюминесценции (ФЛ) самоформирующихся островков Ge(Si)/Si(001), полученных в широком интервале скоростей ( $v_{\text{Ge}} = 0.1\text{--}0.75 \text{ \AA/s}$ ) осаждения Ge при температуре  $T_g = 600^\circ\text{C}$ . АСМ-исследования показали, что для всех скоростей осаждения Ge доминирующим типом островков на поверхности являются dome-островки. Обнаружено, что латеральный размер островков уменьшается, а их поверхностная плотность растет с увеличением  $v_{\text{Ge}}$ . Уменьшение латерального размера связывается как с увеличением содержания Ge в островках, так и с увеличением доли поверхности, занятой ими. Обнаруженное смещение положения пика ФЛ в область меньших энергий также объясняется повышением содержания Ge в островках при увеличении  $v_{\text{Ge}}$ .

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 02-02-16792, проекта INTAS NANO N 01-444 и программ Минпромнауки РФ.

## 1. Введение

Образование трехмерных самоформирующихся островков, вызванное рассогласованием кристаллических решеток Ge и Si, экспериментально наблюдается в широком интервале температур роста и скоростей осаждения Ge на поверхность Si(001) [1–3]. Проведенные ранее исследования показали [1,4], что рост самоформирующихся островков Ge(Si)/Si(001) при температурах осаждения  $T_g \geq 600^\circ\text{C}$  начинается с появления на поверхности пирамидальных островков. При возрастании количества осажденного Ge эти островки увеличиваются в размерах с сохранением формы. Достигнув некоторого критического объема, пирамидальные островки трансформируются в куполообразные (dome) [5], имеющие больший по сравнению с пирамидальными угол между боковыми гранями и основанием. Рост куполообразных островков происходит в основном за счет увеличения их высоты с практически неизменным размером в плоскости роста. Для температур роста  $T_g \geq 600^\circ\text{C}$  и эквивалентной толщины осаждаемого Ge  $d_{\text{Ge}} > 7 \text{ ML}$  ( $1 \text{ ML} \approx 0.14 \text{ nm}$ ) доминирующим типом островков на поверхности являются куполообразные островки нанометрового размера. При уменьшении температуры осаждения Ge ниже  $600^\circ\text{C}$  на поверхности структур появляются hut островки [6,7] — „квантовые точки“ пирамидальной формы, имеющие прямоугольное основание, вытянутое вдоль направления типа [100] или [010]. При температурах роста  $T_g \leq 550^\circ\text{C}$  на поверхности наблюдаются только hut островки, а куполообразные отсутствуют. Одним из объяснений данного резкого изменения морфологии поверхности, происходящего в узком температурном интервале, может служить существенное увеличение поверхностной плотности островков при понижении температуры осаждения Ge [8]. Из-за высокой поверхностной плотности островков при низких температурах осаждения Ge пирамидальные островки

могут не достигать критического размера, необходимого для их перехода в островки куполообразного типа.

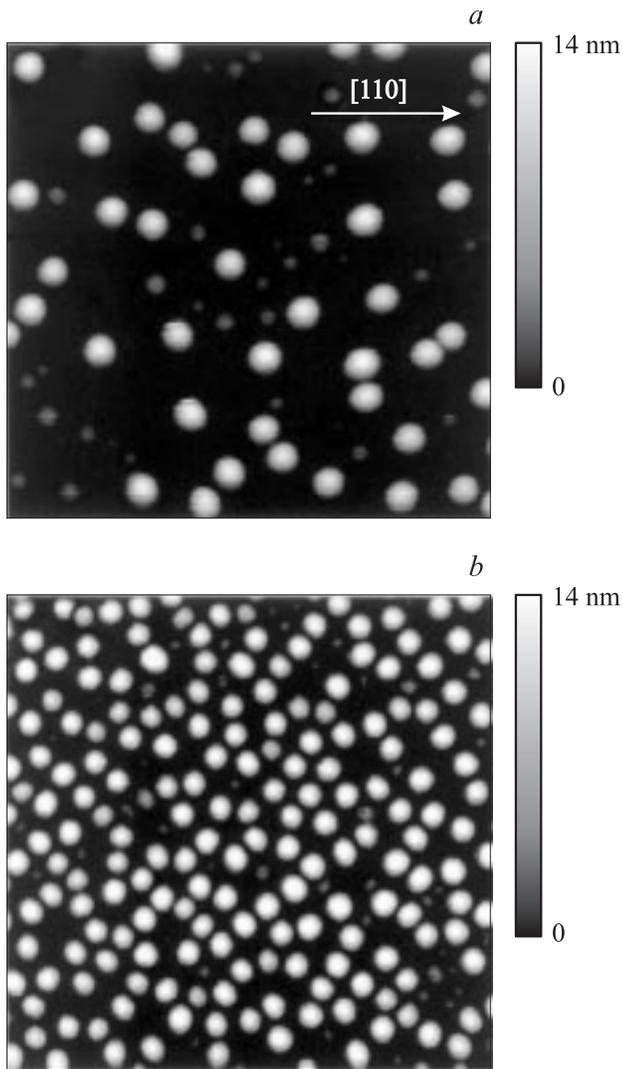
В данной работе представлены результаты исследований влияния поверхностной плотности островков, выращенных при температуре осаждения Ge  $T_g = 600^\circ\text{C}$ , на морфологию поверхности. Изменение поверхностной плотности островков достигалось за счет варьирования скорости осаждения Ge. Исследовано также влияние скорости осаждения Ge на оптические свойства структур с островками, выращенными при  $600^\circ\text{C}$ .

## 2. Методика эксперимента

Исследуемые структуры были выращены на подложках Si(001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии из твердых источников. Структуры для исследований морфологии поверхности состояли из буферного слоя Si толщиной 150–200 nm и слоя Ge с эквивалентной толщиной  $d_{\text{Ge}} = 7\text{--}8 \text{ ML}$ , сформированного при  $T_g = 600^\circ\text{C}$  в интервале скоростей осаждения Ge  $v_{\text{Ge}} = 0.1\text{--}0.75 \text{ \AA/s}$ . В структурах для оптических исследований после осаждения Ge выращивался покровный слой Si. Исследования морфологии поверхности структур выполнены с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) „Solver“ P4 с использованием бесконтактной моды. Для регистрации спектров фотолюминесценции (ФЛ) применялся Фурье-спектрометр BOMEM DA3.36 с охлаждаемым InSb-детектором. Оптическая накачка осуществлялась  $\text{Ar}^+$ -лазером (линия 514.5 nm).

## 3. Результаты и их обсуждение

Проведенные АСМ-исследования структур с самоформирующимися островками Ge(Si)/Si(001), выращенных при  $T_g = 600^\circ\text{C}$ , показали, что для всех скоростей оса-



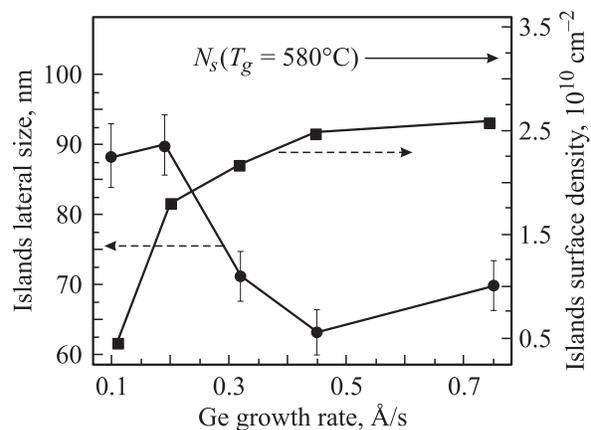
**Рис. 1.** АСМ-снимки поверхности структур, выращенных при  $v_{\text{Ge}} = 0.1$  (a) и  $0.3 \text{ \AA/s}$  (b). Размер снимков  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ .

ждения Ge, лежащих в интервале  $v_{\text{Ge}} = 0.1\text{--}0.75 \text{ \AA/s}$ , на поверхности структур наблюдаются островки двух типов: пирамидальные и куполообразные с преобладанием последних (рис. 1). На рис. 1 приведены АСМ-снимки поверхности структур, выращенных при скоростях осаждения Ge  $v_{\text{Ge}} = 0.1$  и  $0.3 \text{ \AA/s}$ . Именно в интервале скоростей осаждения Ge  $0.1\text{--}0.3 \text{ \AA/s}$  происходят основные изменения параметров островков (рис. 1). При увеличении скорости осаждения Ge от  $v_{\text{Ge}} = 0.1$  до  $0.3 \text{ \AA/s}$  поверхностная плотность куполообразных островков возрастает  $\sim$  в 5 раз (с  $4.4 \cdot 10^9$  до  $2.2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ), а их латеральный размер уменьшается  $\sim$  на 30% (с 90 до 63 nm) (рис. 2). При дальнейшем увеличении скорости осаждения Ge (до  $0.75 \text{ \AA/s}$ ) поверхностная плотность и латеральный размер островков изменяются слабо и выходят на некоторые предельные значения: поверхностная плотность возрастает до  $2.6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ , а латеральный размер лежит в диапазоне 60–70 nm.

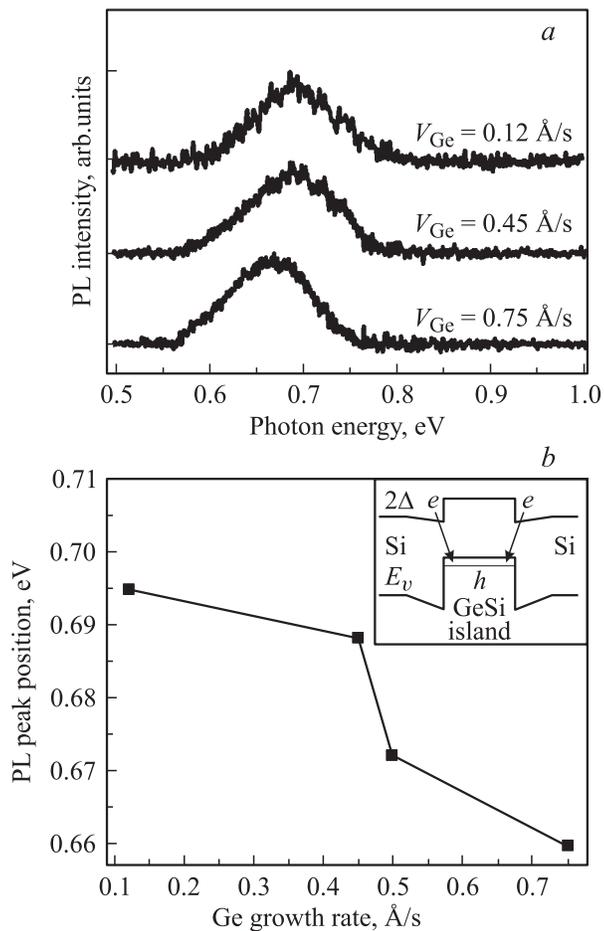
Анализ зависимости поверхностной плотности островков от  $v_{\text{Ge}}$  показал, что ее максимальное значение для  $T_g = 600^\circ\text{C}$  не достигает (оказывается  $\sim$  в 1.3 раза меньше) значения плотности островков в структурах, выращенных при  $T_g = 580^\circ\text{C}$  (рис. 2), т.е. при той температуре, при которой на поверхности появляются hut островки. Полагается, что именно более низкая поверхностная плотность островков, выращенных при  $T_g = 600^\circ\text{C}$ , приводит к тому, что на поверхности таких структур даже при больших скоростях осаждения Ge не наблюдается образования hut островков.

Одной из причин уменьшения латерального размера куполообразных островков при увеличении скорости осаждения Ge может являться зависимость состава островков от скорости осаждения Ge. При фиксированной толщине осажденного слоя Ge с увеличением скорости роста сокращается время, в течение которого формируются островки, а следовательно, и время, в течение которого происходит диффузия Si в незарожденные островки. Уменьшение почти на порядок времени осаждения слоя Ge при увеличении  $v_{\text{Ge}}$  от 0.1 до  $0.75 \text{ \AA/s}$  может привести к росту среднего содержания Ge в островках. Проведенные ранее теоретические [5] и экспериментальные [9] исследования роста островков Ge(Si)/Si(001) показали, что размеры пирамидальных и куполообразных островков уменьшаются с увеличением доли Ge в них. Следовательно, увеличение содержания Ge в островках с ростом скорости осаждения Ge может служить одной из причин экспериментально обнаруженного уменьшения латеральных размеров куполообразных островков.

Другой причиной изменения латерального размера куполообразных островков может являться увеличение доли поверхности, занятой островками, при повышении  $v_{\text{Ge}}$  (рис. 1). Как было показано в [10], упругие взаимодействия между островками при высокой доле поверхности, занятой ими, также могут приводить к уменьшению критического размера пирамидальных островков, а следовательно, и к уменьшению латерального размера куполообразных островков.



**Рис. 2.** Зависимости поверхностной плотности и среднего латерального размера островков от скорости осаждения Ge.



**Рис. 3.** а) Спектры ФЛ структур с островками, выращенными при различных скоростях осаждения Ge. б) Положение максимума пика ФЛ от островков в зависимости от  $v_{Ge}$ . Спектры ФЛ записаны при  $T = 4\text{ K}$  с помощью InSb-детектора.

Исследования спектров ФЛ выращенных структур показали, что в низкоэнергетической части спектра всех исследованных структур наблюдается широкий пик ФЛ (рис. 3, а). Данный пик ФЛ связывается с непрямым оптическим переходом между дырками, локализованными в островках, и электронами, находящимися в Si на гетерогранице типа II с островком [11] (см. вставку на рис. 3, б).

Сравнение спектров ФЛ структур, выращенных при различных скоростях осаждения Ge, показало, что при увеличении скорости роста происходит смещение положения пика ФЛ от островков в область меньших энергий. Величина сдвига составляет  $\sim 35\text{ meV}$  при увеличении скорости осаждения Ge от  $v_{Ge} = 0.1$  до  $0.75\text{ Å/s}$  (рис. 3, б). Данное смещение пика ФЛ от островков связывается с повышением содержания Ge в островках при увеличении скорости роста. Как отмечалось выше, увеличение  $v_{Ge}$  может привести к росту доли Ge в островках за счет уменьшения времени, в течение которого происходит диффузия Si из буферного слоя в незаросшие островки. Рост среднего содержания Ge

в островках вызывает увеличение разрыва валентных зон между кремнием и островком, что в результате приводит к уменьшению энергии непрямого оптического перехода (см. вставку на рис. 3, б) [9] и к экспериментально наблюдаемому смещению положения пика ФЛ от островков в область меньших энергий при увеличении скорости осаждения Ge.

## 4. Заключение

В настоящей работе исследованы рост и ФЛ самоформирующихся островков Ge(Si)/Si(001), выращенных при  $600^\circ\text{C}$ , в зависимости от скорости осаждения Ge. Показано, что при всех используемых скоростях осаждения Ge ( $0.1\text{--}0.75\text{ Å/s}$ ), несмотря на значительное увеличение поверхностной плотности островков при повышении скорости роста, доминирующим типом островков на поверхности остаются куполообразные. Уменьшение латерального размера таких островков при возрастании скорости осаждения Ge связывается с увеличением как доли Ge в них, так и доли поверхности, занятой островками. Обнаруженное смещение пика ФЛ от островков в область меньших энергий при увеличении скорости осаждения Ge также объясняется ростом содержания Ge в островках.

## Список литературы

- [1] T.I. Kamins, E.C. Carr, R.S. Williams, S.J. Rosner. *J. Appl. Phys.* **81**, 211 (1997).
- [2] О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, А.В. Двуреченский, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, А.И. Якимов, Б. Фойхтлендер. *ФТП* **34**, 1281 (2000).
- [3] M.W. Dashiell, U. Denker, C. Muller, G. Costantini, C. Manzano, K. Kern, O.G. Schmidt. *Appl. Phys. Lett.* **80**, 1279 (2002).
- [4] A.V. Novikov, B.A. Andreev, N.V. Vostokov, Yu.N. Drozdov, Z.F. Krasil'nik, D.N. Lobanov, L.D. Moldavskaya, A.N. Yablonskiy, M. Miura, N. Usami, Y. Shiraki, M.Ya. Valakh, N. Mesters, J. Pascual. *Mater. Sci. Eng. B* **89**, 62 (2002).
- [5] F.M. Ross, J. Tersoff, R.M. Tromp. *Phys. Rev. Lett.* **80**, 984 (1998).
- [6] Y.-W. Mo, D.E. Savage, B.S. Swartzentruber, M.G. Lagally. *Phys. Rev. Lett.* **65**, 1020 (1990).
- [7] O.G. Schmidt, C. Lange, K. Eberl. *Phys. Stat. Sol. (b)* **215**, 319 (1999).
- [8] Н.В. Востоков, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, А.Н. Яблонский. *ФТТ* **46**, 1, 63 (2004).
- [9] Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский. *Письма в ЖЭТФ* **76**, 365 (2002).
- [10] J.A. Floro, G.A. Lucadamo, E. Chason, L.B. Freund, M. Sinclair, R.D. Twisten, R.Q. Hwang. *Phys. Rev. Lett.* **80**, 4717 (1998).
- [11] В.Я. Алешкин, Н.А. Бекин, Н.Г. Калугин, З.Ф. Красильник, А.В. Новиков, В.В. Постников, Х. Сейрингер. *Письма в ЖЭТФ* **67**, 46 (1998).