

Фотолюминесценция GeSi/Si(001) самоорганизующихся наноостровков различной формы

© 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: anov@ipm.sci-nnov.ru

Представлены результаты исследования зависимости спектров фотолюминесценции структур с самоорганизующимися островками GeSi/Si(001) от температуры осаждения Ge. Обнаружен немонотонный характер зависимости положения максимума пика фотолюминесценции от островков при понижении температуры осаждения Ge. Сдвиг пика фотолюминесценции от островков в область больших энергий при понижении температуры роста с 600 до 550°C связывается с происходящим в этом температурном интервале изменением формы островков, которое сопровождается резким уменьшением средней высоты островков.

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

Образование трехмерных самоорганизующихся островков, вызванное рассогласованием кристаллических решеток Ge и Si, экспериментально наблюдалось в широком интервале температур осаждения Ge на поверхность Si(001) [1–3]. За счет изменения температуры осаждения Ge можно получать как большие наноостровки с латеральным размером > 100 nm [1,2], так и предельно малые островки (квантовые точки), максимальный размер которых не превосходит 15–20 nm [2,3]. Температура роста оказывает влияние не только на размеры островков, но и на их форму [1] и состав [4]. Размеры островков, их форма и состав являются параметрами, определяющими положение энергетических зон в структурах с наноостровками. Зависимость этих параметров от температуры роста должна приводить к существенному различию в зонных диаграммах структур с наноостровками, выращенных при различных температурах, что в свою очередь должно повлиять на их оптические свойства. В настоящей работе представлены результаты исследований роста и фотолюминесценции (ФЛ) структур с самоорганизующимися островками GeSi/Si(001), выращенными в широком (460–700°C) интервале температур осаждения Ge.

1. Методика эксперимента

Исследуемые структуры были выращены на Si(001) подложках методом молекулярно-лучевой эпитаксии из твердых источников. Структуры для исследования морфологии поверхности состояли из буферного слоя Si, выращенного при 700°C, и слоя Ge с эквивалентной толщиной $d_{Ge} = 7–8$ монослоев (ML) ($1 \text{ ML} \approx 0.14 \text{ nm}$), осажденного в интервале температур $T_p = 460–700^\circ\text{C}$. В структурах для оптических исследований после осаждения Ge выращивался покровный слой Si, температура роста которого совпадала с температурой осаждения Ge. Исследования морфологии поверхности структур выполнены с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) „Solver“ Р4. Для регистрации спектров

ФЛ использовался Фурье-спектрометр BOMEM DA3.36 с охлаждаемым InSb детектором. Оптическая накачка осуществлялась Ar^+ лазером (линия 514.5 nm).

2. Результаты и обсуждение

Ранее проведенные исследования роста наноостровков GeSi при температурах осаждения Ge $T_p \geq 600^\circ\text{C}$ показали [1–4], что при эффективной толщине осажденного Ge $d_{Ge} = 7–8 \text{ ML}$ на поверхности структур наблюдаются два типа островков, различающиеся своей формой и размерами: пирамидальные (pyramid) и куполообразные (dome) островки. Было обнаружено [4], что большое влияние на рост островков при $T_p \geq 600^\circ\text{C}$ оказывает образование сплава GeSi в островках, вызванное диффузией Si в островки, ускоренной полями упругих напряжений от островков. Исследования структур, проведенные с помощью АСМ, показали, что доминирующим типом островков при $d_{Ge} = 7–8 \text{ ML}$ являются куполообразные островки, имеющие по сравнению с пирамидальными островками большую высоту и размер в плоскости роста (рис. 1, *a*). При понижении T_p с 700 до 600°C происходит монотонное уменьшение размеров островков (рис. 1, *d*) и увеличение их поверхностной плотности (рис. 1, *e*). Рост поверхностной плотности островков вызван уменьшением поверхностной диффузии атомов при понижении температуры. Уменьшение размеров островков при понижении T_p связано с подавлением диффузии Si в островки и увеличением в них доли Ge [4].

При понижении температуры осаждения Ge с 600 до 550°C происходит качественное изменение в росте самоорганизующихся островков (рис. 1). Понижение T_p всего на 50°C приводит к увеличению на порядок поверхностной плотности островков (рис. 1, *e*), а высота островков уменьшается примерно в 5 раз (рис. 1, *d*). Резкое изменение параметров островков связано с появлением на поверхности так называемых hut-островков [5]: островков, имеющих прямоугольное основание, вытянутое в

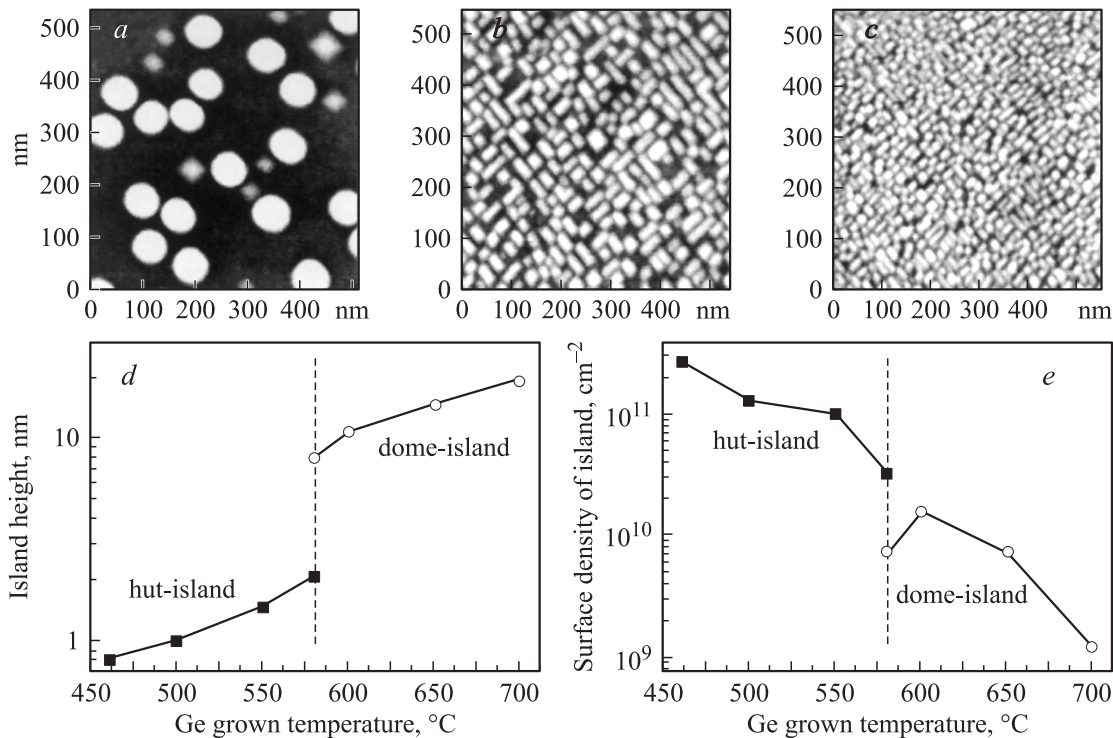


Рис. 1. *a–c* — АСМ снимки поверхности структур, выращенных при 600, 550 и 460°C соответственно. Размер снимков 500 × 500 nm. *d* и *e* — зависимости средней высоты островков и их поверхностной плотности от температуры осаждения Ge. Штриховая линия на частях *c* и *d* разделяет области существования hut- и dome-островков и соответствует $T_p = 580^\circ\text{C}$.

направлении $\langle 100 \rangle$ или $\langle 010 \rangle$ (рис. 1, *b*). Островки данного типа появляются при $T_p = 580^\circ\text{C}$ [6] (рис. 1), а при $T_p \leq 550^\circ\text{C}$ и $d_{\text{Ge}} = 7\text{--}8\text{ ML}$ они становятся основным типом островков, наблюдаемым на поверхности структур (рис. 1, *b*). При уменьшении T_p с 550 до 460°C высота hut-островков монотонно уменьшается, а их поверхностная плотность растет (рис. 1). При $T_p = 460^\circ\text{C}$ высота hut-островков составляет 0.7–1 nm, размер в плоскости роста лежит в диапазоне 15–30 nm, а поверхностная плотность островков равна $N_s = 2.5 \times 10^{11}\text{ cm}^{-2}$ (рис. 1, *c*).

Исследования спектров ФЛ выращенных структур показали, что в низкоэнергетической части спектра ФЛ всех исследованных структур наблюдается широкий пик ФЛ (рис. 2, *a*). Данный пик ФЛ связывается с непрямым оптическим переходом между дырками, локализованными в островках, и электронами, находящимися в Si на гетерогранице типа II с островком [7]. В работе [8] было показано, что значительная часть сигнала ФЛ от островков, выращенных при $T_p \leq 650^\circ\text{C}$, расположена при энергиях, меньших низкоэнергетической границы рабочего диапазона охлаждаемого Ge детектора. Для того, чтобы избежать модификации сигнала ФЛ от островков спектральной характеристикой Ge детектора, в настоящей работе для регистрации спектров ФЛ использовался менее чувствительный охлаждаемый InSb детектор, имеющий более длинноволновую границу рабочего диапазона.

Сравнение спектров ФЛ структур, выращенных при различных температурах осаждения Ge, показало немонотонный характер зависимости положения максимума пика островковой ФЛ (E_{isl}) от T_p (рис. 2). Как и в случае роста островков, зависимость $E_{isl}(T_p)$ можно разбить на два участка (рис. 2, *b*).

На первом участке, при $T_p \geq 600^\circ\text{C}$, E_{isl} монотонно уменьшается с понижением температуры роста. На энергию оптического перехода в островках при понижении температуры оказывают влияние два основных фактора: уменьшение размеров островков и изменение их состава. При $T_p \geq 600^\circ\text{C}$ первый фактор оказывает слабое влияние на энергию оптического перехода в островках, так как даже при $T_p = 600^\circ\text{C}$ высота незаросших куполообразных островков больше 10 nm (рис. 1, *d*) и эффекты размерного квантования оказывают слабое влияние на положение первого уровня размерного квантования дырок в островках. В результате этого энергетический уровень дырок в островках лежит вблизи потолка валентной зоны (рис. 3, *a*). Основное влияние на положение пика ФЛ от островков оказывает зависимость состава островков от температуры роста. Смещение пика ФЛ от островков в область меньших энергий связано с подавлением диффузии Si в островки при понижении температуры роста и соответственно с увеличением доли Ge в них [4]. Увеличение доли Ge в островках приводит к росту разрыва валентных зон на гетерогранице кремний–островок и, следовательно,

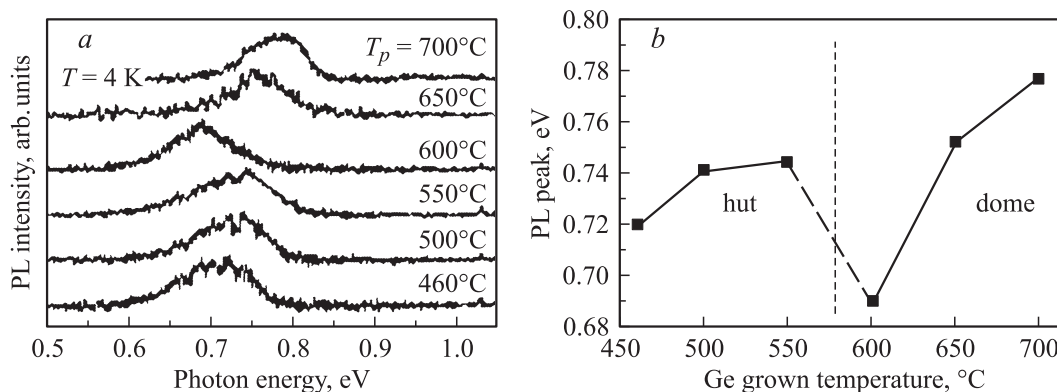


Рис. 2. Спектры ФЛ структур с островками, выращенными при различных температурах осаждения Ge (*a*) и положение максимума пика ФЛ от островков в зависимости от T_p (*b*). Спектры ФЛ записаны при 4 К с помощью InSb детектора.

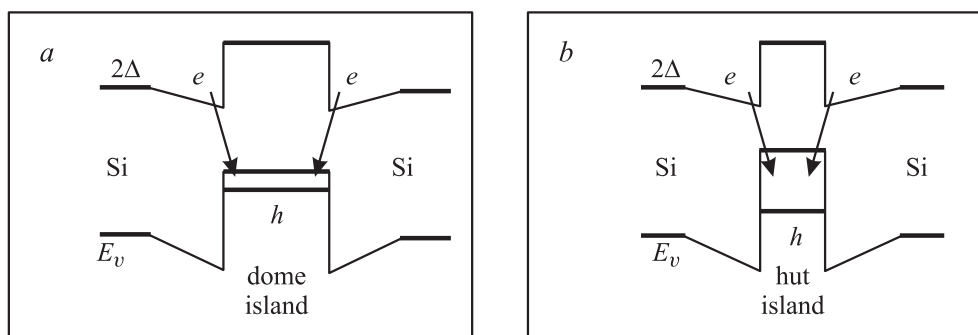


Рис. 3. Схематическое изображение модели непрямого оптического перехода для dome- (*a*) и hut- (*b*) островков. На рисунке показано положение потолка валентной зоны и 2Δ долин электронов в островках и их окрестностях. Стрелками отмечен не прямой оптический переход.

к уменьшению энергии непрямого оптического перехода [8] (рис. 3, *a*).

Зависимость (T_p) имеет особенность в диапазоне $T_p = 550\text{--}600^\circ\text{C}$: пик ФЛ от островков смещается примерно на 50 meV в область больших энергий при понижении T_p с 550 до 600°C (рис. 2). Исследования роста островков показали, что именно в этом интервале T_p происходит существенное изменение в морфологии островков (рис. 1). Как было показано выше, при $T_p > 580^\circ\text{C}$ на поверхности структур преобладают dome-островки, имеющие высоту > 10 nm, а при температурах $T_p < 580^\circ\text{C}$ — hut-островки, высота которых ≤ 2 nm (рис. 1, *d*). Резкое уменьшение высоты островков вызывает существенное увеличение влияния квантово-размерных эффектов на положение энергетических уровней дырок в островках. Это приводит к тому, что несмотря на увеличение разрыва валентных зон на гетерогранице Si-островок, связанное с увеличением доли Ge в островках при понижении T_p , первый уровень размерного квантования дырок в островках смещается („выталкивается“) к потолку валентной зоны Si (рис. 3, *b*), в результате чего происходит увеличение энергии оптического перехода в островках и наблюдаемый сдвиг линии ФЛ.

Монотонное уменьшение E_{ist} при понижении T_p с 550 до 460°C связывается с подавлением изменения параметров островков при их зарастании. Известно [9], что при росте покровного слоя Si происходит увеличение доли Si в островках и уменьшение их высоты. В работе [10] было показано, что при понижении температуры зарастания в 500 до 390°C эти процессы в значительной мере подавляются. Таким образом, при уменьшении температуры роста с 550 до 460°C происходит увеличение высоты заросших островков и увеличение средней доли Ge в них. Оба этих процесса приводят к уменьшению энергии оптического перехода в островках (рис. 3, *b*) и соответственно к сдвигу пика ФЛ от островков в область меньших энергий.

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] U.-W. Mo, D.E. Savage, B.S. Swartzentruber, M.G. Lagally. *Phys. Rev. Lett.* **65**, 1020 (1990).
- [6] O.G. Schmidt, C. Lange, K. Eberl. *Phys. Stat. Sol. (b)* **215**, 319 (1999).
- [7] 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).
- [8] Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский. *Письма в ЖЭТФ* **76**, 6, 425 (2002).
- [9] P. Sutter, E. Mateeva, J.S. Sullivan, M.G. Lagally. *Thin Solid Films* **336**, 262 (1998).
- [10] A. Rastelli, E. Muller, H. von Kanel. *Appl. Phys. Lett.* **80**, 1438 (2002).