

Фотолюминесценция Si/Ge-наноструктур, выращенных при низких температурах молекулярно-пучковой эпитаксии

© Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, А.О. Погосов, М.М. Рзаев, Н.Н. Сибельдин, В.А. Цветков

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

E-mail: burbaev@maill.lebedev.ru

Исследованы фотолюминесценция и атомно-силовая микроскопия многослойных Si/Ge-наноструктур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии при низких (250–300°C) температурах осаждения германия. Сделано предположение, что при низкотемпературной эпитаксии смачивающий слой формируется путем сращивания двумерных (2*d*) и трехмерных (3*d*) nanoостровков.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 03-02-17191), Программы Президиума РАН „Низкоразмерные квантовые структуры“ (проект 7.12) и Программы поддержки ведущих научных школ.

Известно, что при высоких температурах (500–700°C) эпитаксия германия на кремнии идет по механизму Странски–Крастанова (СК). При толщине слоя германия начиная примерно с двух монослоев (МС) происходит образование сплошного напряженного слоя германия (смачивающего слоя), который в матрице кремния проявляется как квантовая яма для дырок. При превышении критической толщины (4 МС) на напряженном смачивающем слое возникают трехмерные nanoостровки — квантовые точки [1–4]. Известно также, что при температурах эпитаксии 360°C и ниже формирование островков подавлено из-за низкой скорости диффузии адатомов [4]. Эти данные, на первый взгляд, не соответствуют результатам ряда работ [5–7], в которых исследовались свойства островков, полученных при температурах эпитаксии 200–300°C.

Мы исследовали методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и фотолюминесценции (ФЛ) структурные и оптические свойства Si/Ge-наноструктур, выращенных при низких температурах (250–300°C) молекулярно-пучковой эпитаксии. Структуры были изготовлены на установке „Riber SIVA 45“ в Институте физики полупроводников университета Линца (Австрия). Отметим, что при изменении толщины слоя германия всего на 1 МС морфология и оптические свойства структур существенно меняются, поэтому все исследуемые структуры необходимо выращивать на одной и той же установке. Все структуры имели 4–5 слоев. Каждый слой состоял из слоя кремния толщиной 25.5 nm и слоя германия со средней „технологической“ толщиной 2–12 МС. У части образцов верхний слой германия не был закрыт кремнием для исследований методом АСМ. Скорость роста Si и Ge была равной 0.005 nm/s.

В процессе роста наблюдались картины дифракции быстрых электронов на отражение. При 250°C начальная реконструкция кремниевой поверхности сохранялась на протяжении роста всех структур (самый толстый слой имел 10 МС германия). Наблюдалось только небольшое размытие и утолщение основных рефлексов. При 300°C трехмерный рост наблюдался только при тех-

нологической толщине германия 12 МС. Таким образом, уже при анализе процесса роста можно было сделать вывод, что трехмерных островков по механизму СК при 250°C не образуется, а при 300°C они образуются, начиная с толщины германия 12 МС.

Анализ морфологии поверхности проводился на атомно-силовом микроскопе AFM SOLVER P47. Измерения спектров ФЛ проводились при температуре 2 К. Источником возбуждения служил полупроводниковый лазер с длиной волны $\lambda = 0.66 \mu\text{m}$ (энергия кванта $h\nu = 1.87 \text{ eV}$). Максимальная мощность излучения была равна 70 mW, плотность мощности излучения на образце обычно составляла 4 W/cm^2 . Излучение от образцов регистрировалось с помощью охлаждаемого жидким азотом германиевого *pin*-фотодиода.

На рис. 1 показаны результаты исследований методом АСМ поверхности характерных структур, выращенных при 300°C. При толщине слоя германия, превышающей 2 МС, на поверхности структуры становятся заметны большие плоские ($500 \times 500 \times 0.5 \text{ nm}^3$) островки, не перекрывающие протяженные участки поверхности. При толщине 3 МС латеральные размеры островков уменьшаются до $\approx 30 \text{ nm}$ и покрывают протяженные участки (рис. 1, *a*). Однако при повышении толщины слоев германия до 5 МС поверхность становится гладкой — островковый рельеф исчезает (рис. 1, *b*). Островки с латеральным размером $\geq 50 \text{ nm}$ вновь появляются при средней толщине германия 10–12 МС (рис. 1, *c*).

Полагаем, что при 300°C в диапазоне толщины 3–5 МС смачивающий слой образуется путем слияния двумерных (2*D*) и трехмерных (3*D*) nanoостровков. При толщине 10–12 МС на смачивающем слое начинают появляться квантовые точки по механизму СК.

Результаты исследований спектров ФЛ, представленные на рис. 2, подтверждают этот вывод. На рис. 2, *a* показана трансформация спектров излучения 2*D* и 3*D* nanoостровков при повышении толщины слоя германия. При увеличении толщины от 2 до 3 МС интенсивность излучения квантовой ямы уменьшается, а квантовых точек — растет. Однако при дальнейшем повышении

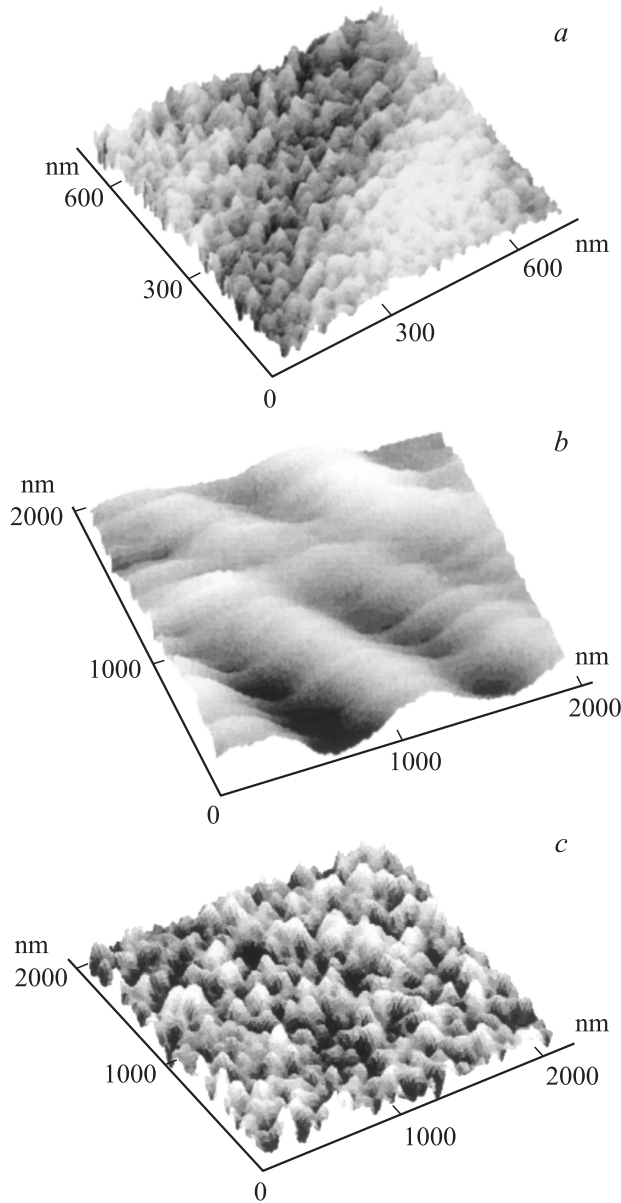


Рис. 1. АСМ изображения поверхности структур, выращенных при 300°C. Средняя толщина слоев германия в структурах: *a* — 3, *b* — 5, *c* — 12 нм.

толщины до 5 нм излучение 2D и 3D наноструктур почти исчезает, но появляется линия с энергией 1080 мэВ, отвечающая смачивающему слою. При толщине германия, превышающей 7 нм, излучение от смачивающего слоя также исчезает, и на спектрах проявляется только излучение от кремниевой подложки.

Отметим, что график зависимости энергетического положения бесфононной линии ФЛ 2D наноструктур от средней толщины слоя германия лежит существенно ниже теоретической зависимости для напряженного слоя Ge на кремнии [8] и соответствует частично релаксированному слою. Линия ФЛ смачивающего слоя находится при энергии (1080 мэВ), близкой к ожидае-

мой из теоретической зависимости [8], и соответствует напряженному слою германия. Аналогичный вывод о частичной релаксации слоя германия, предшествующей образованию смачивающего слоя, был сделан нами на основании спектров комбинационного рассеяния света для структур, выращенных на установках типа „КАТУНЬ“ [9]. Отметим, что образующиеся на таком смачивающем слое по механизму СК квантовые точки дают слабую ФЛ.

Трансформация спектров ФЛ 2D и 3D наноструктур при увеличении толщины слоя германия для структур, выращенных при 250°C, представлена на рис. 2, *b*. В этом случае сплошной смачивающий слой не образуется ни при какой толщине слоя германия. С повышением толщины в узком диапазоне 5–6 нм наблюдается сильное сужение линии ФЛ 3D наноструктур и резкое повышение ее интенсивности.

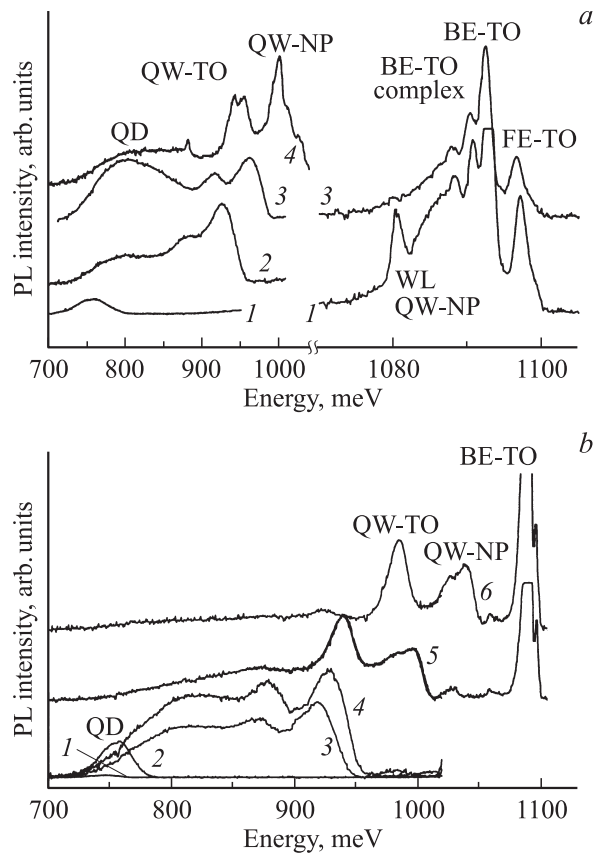


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции Si/Ge-структур. Для наглядности спектры смещены по оси ординат. *a* — температура роста 300°C. Средняя толщина слоев германия: 1 — 5, 2 — 3.5, 3 — 3, 4 — 2.5 нм. *b* — температура роста 250°C. Средняя толщина слоев германия: 1 — 7, 2 — 5, 3 — 3.5, 4 — 3, 5 — 2.5, 6 — 2 нм. QW-TO и QW-NP — соответственно фононная (Si) и бесфононная линии излучения квантовых ям; QD — линия излучения квантовых точек; BE-TO и BE-TO complex — соответственно фононные линии излучения связанных экситонов и связанных экситонных комплексов в кремнии; FE-TO — линия излучения свободных экситонов в кремнии; WL — смачивающий слой.

Таким образом, полученные результаты показывают, что при понижении температуры молекулярно-пучковой эпитаксии до 300–250°C механизм роста германия на кремнии существенно меняется. 2D и 3D наноструктуры формируются на начальном этапе роста без образования протяженного смачивающего слоя.

Авторы выражают благодарность проф. Ф. Шеффлеру за предоставленную возможность работы в его лаборатории.

Список литературы

- [1] О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитинов, А.В. Двуреченский, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, А.И. Якимов, Б. Фойхтлендер. *ФТП* **34**, 11, 1281 (2000).
- [2] G. Abstreiter, P. Schittenhelm, C. Engel, E. Silveira, A. Zrenner, D. Meertens, W. Jäger. *Semicond. Sci. Technol.* **11**, 1521 (1996).
- [3] P. Schittenhelm, C. Engel, F. Findeis, G. Abstreiter, A.A. Darhuber, G. Bauer, A.O. Kosogov, P. Werner. *J. Vac. Sci. Technol. B* **16**, 3, 1575 (1998).
- [4] O.G. Schmidt, C. Lange, K. Eberl. *Appl. Phys. Lett.* **75**, 1905 (1999).
- [5] А.Б. Талочкин, А.В. Ефанов, В.А. Марков, А.И. Никифоров. *Изв. РАН. Сер. физ.* **63**, 2, 290 (1999).
- [6] V.A. Markov, H.H. Cheng, Chin-ta-Chia, A.I. Nikiforov, V.A. Cherepanov, O.P. Pchelyakov, K.S. Zhuravlev, A.B. Talochkin, E. McGlynn, M.O. Henry. *Thin Solid Films* **369**, 79 (2000).
- [7] Т.М. Бурбаев, Т.Н. Заварицкая, В.А. Курбатов, Н.Н. Мельник, В.А. Цветков, К.С. Журавлев, В.А. Марков, А.И. Никифоров. *ФТП* **35**, 3, 979 (2001).
- [8] J. Brunner, J.F. Nützel, M. Gail, U. Mencezgar, G. Abstreiter. *J. Vac. Sci. Technol. B* **11**, 1097 (1993).
- [9] Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, Т.Н. Заварицкая, Н.Н. Мельник, А.О. Погосов, В.А. Цветков, Н.Н. Сибельдин. *Изв. РАН. Сер. физ.* **67**, 2, 163 (2003).