

Фотолюминесценция квантовых ям и квантовых точек германия в кремнии, полученных при низких температурах молекулярно-пучковой эпитаксии

© Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов[¶], А.О. Погосов, М.М. Рзаев, Н.Н. Сибельдин

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

(Получена 28 мая 2002 г. Принята к печати 3 июня 2002 г.)

Исследована низкотемпературная (при 2 К) фотолюминесценция Si/Ge-структур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии при низких температурах (250–350 °С) осаждения германия. Обнаружены существенные изменения в спектрах люминесценции, когда средняя толщина слоя германия превышает 6 монослоев: линия излучения псевдоморфного слоя (квантовой ямы), сохраняя свое спектральное положение, возрастает по интенсивности за счет линии люминесценции островков (квантовых точек), которая при этом полностью исчезает. Полученные результаты показывают, что механизм низкотемпературного эпитаксиального роста заметно отличается от реализующегося при обычно используемых температурах роста (500–700 °С).

Обычно полагают, что эпитаксия германия на кремнии идет по механизму Странски–Крастанова — на начальном этапе происходит образование сплошного псевдоморфного слоя германия, который в матрице кремния проявляется как квантовая яма (КЯ) для дырок, а по достижении критической толщины послойный рост сменяется ростом самоорганизующихся нанокристаллов — островков (квантовых точек, КТ) [1]. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований структур, изготовленных при температурах эпитаксии 500–750 °С [2–4]. Вместе с тем считается, что при температурах эпитаксии 360 °С и ниже формирование островков подавлено [4] из-за низкой скорости диффузии адатомов. Это противоречит, однако, результатам ряда работ [5–7], в которых исследовались свойства островков, полученных при температурах эпитаксии 200–300 °С.

Здесь мы приводим результаты исследований фотолюминесценции (ФЛ/PL) Si/Ge-структур, выращенных при низких температурах (250–350 °С), которые обнаруживают аномальное поведение фотолюминесценции КЯ и КТ германия в кремнии — по мере роста средней толщины нанесенного слоя германия (в некотором интервале толщин) интенсивность излучения КТ снижается с одновременным повышением интенсивности излучения КЯ.

Структуры со слоями германия толщиной 6–9.5 монослоев (МС/ML) в кремнии были изготовлены на установках „Катунь“ (в ФИАН — Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук и в ИФП СО РАН — Институте физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук) и „Riber Siva 45“ (в Институте физики полупроводников университета Линца, Австрия). Все образцы имели 4–5 слоев германия, разделенных слоями кремния толщиной 10 нм („Катунь“, 300 °С) или 25.5 нм („Riber“, 250 и 350 °С), направление роста [100]. Исключение составлял образец со средней толщиной слоя германия 9.5 МС (300 °С),

который содержал лишь один слой германия. У части образцов, использовавшихся для исследований методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), верхний слой германия не был закрыт кремнием.

Полученные результаты суммированы на рис. 1, где они представлены в координатах (средняя толщина нанесенного слоя германия) — (энергетическое положение бесфонной линии фотолюминесценции). На том же рисунке показаны результаты работы [2] для температуры роста 740 °С, которые демонстрируют известные положения: с началом образования островков толщина псевдоморфного слоя стабилизируется (позиция линии ФЛ КЯ почти не изменяется), нанесенный „избыточный“ германий собирается в островки, которые по мере роста претерпевают изменения в форме, затем пронизываются

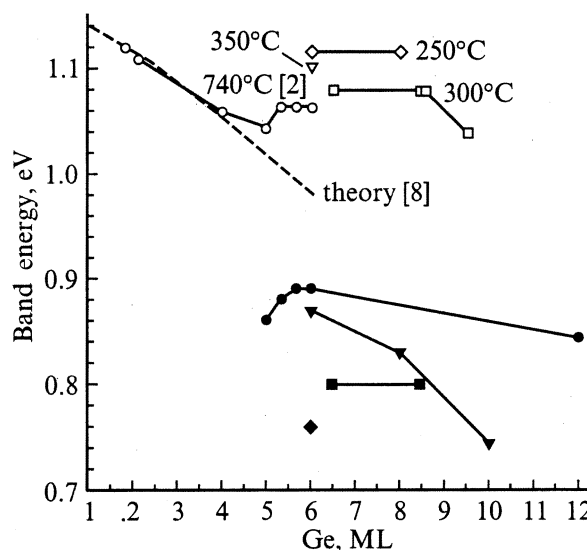


Рис. 1. Энергия бесфонных линий фотолюминесценции в зависимости от средней толщины слоя германия, нанесенного при различных температурах. Вверху — данные для квантовых ям, внизу — для квантовых точек.

[¶] E-mail: kurbatov@mail.lebedev.ru

дислокациями несоответствия и прекращают люминесцировать.

Для температуры эпитаксии 350°C полученные нами результаты в целом согласуются с принятыми представлениями: при некоторой толщине нанесенного слоя (в данном случае 6 МС) наблюдается излучение как квантовых ям, так и квантовых точек, при увеличении толщины нанесенного слоя излучение КЯ исчезает, при этом линия излучения КТ сдвигается вниз по энергии и быстро спадает по интенсивности (последнее видно из спектров ФЛ, которые мы здесь не приводим).

Для образцов, изготовленных при температурах эпитаксии германия 300 и 250°C, наблюдается обратная картина — с ростом толщины слоя германия излучение КТ исчезает, при этом излучение КЯ по-прежнему наблюдается и даже растет по интенсивности. Так, для структур, выращенных при температуре эпитаксии 250°C, излучение, связанное с островками (КТ), наблюдается у образца, содержащего слой германия со средней толщиной 6 МС; при повышении средней толщины до 8 МС фотолюминесценция КТ пропадает, а интенсивность излучения, связанного с КЯ, при этом повышается (рис. 2).

Отметим, что в области энергий, соответствующих излучению электронно-дырочных капель в кремнии — 1086 мэВ (ehL на рис. 2), наблюдается люминесценция, избыточная по отношению к люминесценции, наблюдаемой при возбуждении структуры со стороны подложки. Этот эффект в большей или меньшей степени наблюдается на всех исследованных структурах.

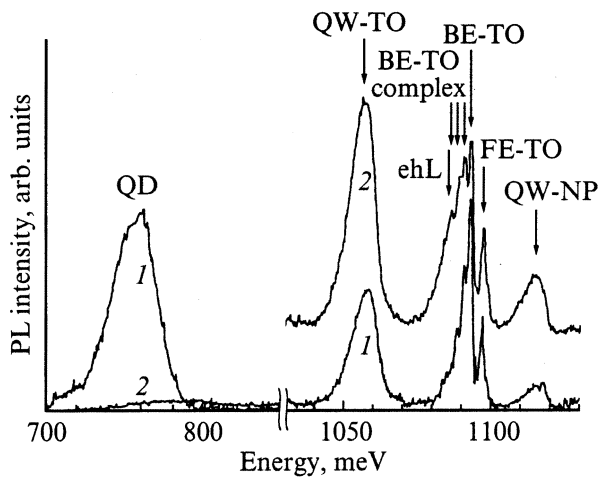


Рис. 2. Спектры низкотемпературной фотолюминесценции Si/Ge-структур со слоями германия, нанесенными при 250°C, средней толщиной 6 МС (1) и 8 МС (2). Температура измерения $T = 2$ К. Спектр 2 в области высоких энергий поднят над осью абсцисс. QW-TO и QW-NP — соответственно фононная (Si) и бесфононная линии излучения КЯ. QD — линия излучения КТ. 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, ehL — линия излучения электронно-дырочных капель в кремнии.

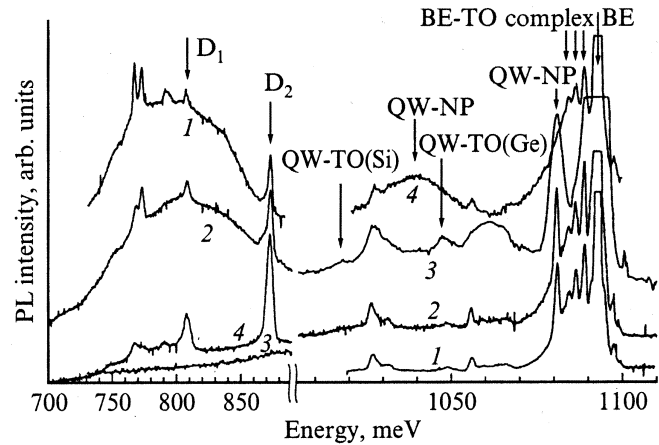


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции Si/Ge-структур, выращенных при 300°C. Температура измерения $T = 2$ К. Средняя толщина слоев германия в структурах: 1 — 6 МС, 2 — 8.5 МС, 3 — 8.5 МС, 4 — 9.5 МС. Спектры 2, 3, 4 в области высоких энергий и спектры 1, 2 в области низких энергий подняты над осью абсцисс. D_1, D_2 — линии излучения дислокаций. Остальные обозначения те же, что на рис. 2.

На рис. 3 показаны спектры излучения образцов 1–4, выращенных на установках „Катунь“ при температуре эпитаксии германия 300°C. Здесь, как и в предыдущем случае (250°C), излучение в области энергий ~ 800 мэВ, которое можно связать с островками, наблюдается для структур с меньшими толщинами слоев германия. В области излучения КЯ (1000–1100 мэВ) образцы 1, 2, 3, несмотря на заведомо различные толщины слоев германия (образцы 1 и 2) и неизбежный технологический разброс (образцы 2 и 3 изготовлены на различных установках), обнаруживают практически идентичные характеристики излучения КЯ: линия бесфононного излучения для всех трех образцов имеет с высокой точностью одинаковую энергию — 1080 мэВ, при этом ширина линии, как показали более подробные измерения, не превышает 1 мэВ. Это свидетельствует об исключительно высокой однородности псевдоморфного слоя, образующегося в использованных технологических условиях. Неслучайным в связи с этим может оказаться и совпадение экспериментальных значений энергетического положения линий излучения КЯ с вычисленными [8] для целого числа монослоев: 2 МС при температуре эпитаксии 250°C и 3 МС при 300°C (рис. 1). Имеющиеся данные не позволяют выделить одну причину реализации такого процесса. Здесь может играть роль совокупность условий — температура и время процесса, геометрические характеристики и даже количество и тип примесей, неконтролируемо вносимых в процессе эпитаксии. В этой связи отметим, что фононное повторение линии КЯ в спектре фотолюминесценции, связанное с фононом германия, ранее наблюдалось лишь для структур, специально легированных в процессе эпитаксии [9].

Преращение люминесценции КТ при росте количества осажденного германия позволяет предположить, что площадь сплошного псевдоморфного слоя (КЯ) возрастает в результате рекристаллизации оснований островков, начало которой может провоцироваться их сращиванием при повышении плотности. Заметим, что при малых размерах островков последние покрывают всю поверхность структуры уже при небольшом количестве нанесенного материала — так, для пирамидальных островков с размерами основания 10 нм требуется всего 2.5 МС. АСМ-изображение поверхности одного из образцов (8.5 МС, 300°C — см. спектр 3 на рис. 3) обнаруживает непрерывный рельеф с характерным периодом ~ 30 нм, который является, по-видимому, результатом сплошного заполнения поверхности островками и их сращивания, о чем говорит и малая глубина рельефа, ~ 0.5 нм. Можно предположить, что при понижении температуры эпитаксии ниже 350°C рост осажденного слоя происходит по механизму Фольмера–Вебера: островки начинают формироваться уже на начальном этапе роста, без образования сачивающего слоя. Такая смена механизмов роста — от роста по Странски–Крастанову к росту по Фольмеру–Веберу — была обнаружена, в частности, при осаждении InAs на кремнии при понижении температуры ниже 400°C [10].

Совокупность полученных результатов показывает, что при понижении температуры молекулярно-пучковой эпитаксии ниже 350°C механизм роста германия на кремнии претерпевает существенные изменения.

Авторы выражают благодарность проф. О.П. Пчелякову, предоставившему для исследований структуры, изготовленные в ИФП СО РАН, а также проф. Ф. Шеффлеру за предоставленную возможность работы в его лаборатории.

Работа выполнена при поддержке Программы президиума РАН „Низкоразмерные квантовые структуры“, Федеральной целевой научно-технической программы России (контракты № 37.039.1.1.0041 и № 40.072.1.1.1180) и Программы поддержки ведущих научных школ (грант № 00-15-96568).

Список литературы

- [1] О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, А.В. Двуреченский, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, А.И. Якимов, Б. Фойхтлендер. *ФТП*, **34**, 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**, 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. Sol. 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**, 979 (2001).
- [8] J. Brunner, J.F. Nutzel, M. Gail, U. Mencezgar, G. Abstreiter. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **11**, 1097 (1993).
- [9] L.P. Rokhinson, D.C. Tsui, J.L. Benton, Y.-H. Xie. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2413 (1999).
- [10] Д.В. Денисов, В.М. Устинов, Г.Э. Цырлин, В.А. Егоров. *Материалы совещания „Нанопотоника“* (Н. Новгород, 2002) с. 161.

Редактор Л.В. Шаронова

Photoluminescence of germanium quantum wells and quantum dots in silicon grown by molecular beam epitaxy at low temperatures

T.M. Burbaev, V.A. Kurbatov, A.O. Pogosov, M.M. Rzaev, N.N. Sibeldin

P.N. Lebedev Physical Institute,
Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

Abstract The low-temperature ($T = 2\text{ K}$) photoluminescence of Si/Ge-structures, grown by molecular beam epitaxy at low temperatures (250–350°C) of germanium deposition, has been investigated. Essential changes of the photoluminescence spectra have been found, when the average Ge thickness was exceeding 6 monolayers: the photoluminescence line of the wetting layer (that of the quantum well) did not change its position but increased its intensity at the expense of an island (quantum dot) luminescence line, which after all entirely disappeared. The results obtained have shown, that the mechanism of the low-temperature epitaxy growth noticeably differs from the commonly accepted one, which is realized at conventional growth temperatures (500–700°).