

Морфологическая перестройка слоя германия на кремнии при низких температурах молекулярно-пучковой эпитаксии

© Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, М.М. Рзаев, А.О. Погосов, Н.Н. Сибельдин, В.А. Цветков, H. Lichtenberger*, F. Schäffler*, J.P. Leitao**, N.A. Sobolev**, M.C. Carmo**

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

* Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes Kepler Universität,
Linz, Austria

** Department of Physics, University of Aveiro,
Aveiro, Portugal

E-mail: burbaev@mail1.lebedev.ru

Методами фотолюминесценции и атомно-силовой микроскопии исследованы Si/Ge-наноструктуры, выращенные при низких ($< 350^\circ\text{C}$) температурах молекулярно-пучковой эпитаксии, при различной толщине слоя германия. Обнаружена морфологическая перестройка слоя германия при достижении его толщины ~ 5 монослоев: островковый рельеф сменяется гладким волнообразным рельефом.

Работа выполнена при поддержке INTAS (проект N 03-51-5015), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 03-02-20007, 03-02-17191), программы НКС РАН и FCT Португалии (проект N 41574/2001).

1. Введение

Известно, что Si/Ge-структуры с трехмерными квантовыми точками (КТ), образующимися по механизму Странского–Крастанова (СК) при температурах молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) $T_g = 600\text{--}700^\circ\text{C}$, обычно представляют собой структуры второго рода [1–4]. Вероятность экситонной рекомбинации в таких структурах невелика, так как она непрямая как в реальном, так и в обратном k -пространстве [5]. Перспективы использования таких структур в качестве излучателей (в частности, в важной для приложений области спектра $1.3\text{--}1.6\ \mu\text{m}$), по-видимому, неудовлетворительны. В ряде работ, однако, сообщается о Si/Ge-структурах, выращенных как при высоких ($T_g = 600^\circ\text{C}$) [6], так и при низких ($T_g = 250\text{--}300^\circ\text{C}$) температурах [7–9], с двумерными (2D) КТ, механизм образования которых отличается от механизма СК. Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии, эти КТ представляют собой двумерные дискообразные наноструктуры с латеральным размером около $10\ \text{nm}$ [6,9]. Малый размер таких точек снимает запрет на непрямую рекомбинацию в k -пространстве из-за соотношения неопределенностей. Показано также [6], что такие структуры могут быть структурами первого рода и перспективны для создания излучателей.

Мы исследовали Si/Ge-наноструктуры с 2D- и 3D-наноструктурами, выращенные при низких ростовых температурах ($T_g < 350^\circ\text{C}$). При низких T_g эффект перемешивания германия и кремния в соседних слоях незначителен. Большое содержание германия в КТ в таких структурах сдвигает спектр излучения в сторону меньших энергий по сравнению со структурами, выращенными при высоких температурах, что часто необходимо для приложений. Отметим также, что такие структуры в меньшей степени исследованы. Для выяснения особенностей формирования смачивающего слоя и

островков германия на кремнии при низких температурах эпитаксии мы провели исследования этих структур методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), фотолюминесценции (ФЛ) и дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение.

2. Методика эксперимента

Si/Ge-наноструктуры были выращены методом МПЭ на подложках Si(001) с использованием установок „Riber SIVA-45“ и „Катунь“. Обычно структуры имели четыре-пять слоев германия, разделенных кремниевыми барьерами. Толщина кремниевого слоя составляла $25\ \text{nm}$, а толщина германия изменялась от 2 до $12\ \text{ML}$. Для исследования морфологии поверхности методом АСМ у части образцов верхний слой германия не был покрыт кремнием. Температуры роста германиевых и кремниевых слоев составляли $250\text{--}300$ и $300\text{--}450^\circ\text{C}$ соответственно, а скорость осаждения германия была равна $0.005\text{--}0.01\ \text{nm/s}$. Часть структур была изготовлена при температурах роста $300\text{--}350^\circ\text{C}$ („Катунь“), при этом изменялись как толщина и количество слоев германия, так и толщина кремниевых барьеров.

Исследования морфологии слоев германия проводились на атомно-силовом микроскопе SOLVER P-47. Спектры ФЛ измерялись при температурах 2 и 5 К и длинах волн возбуждающего излучения $\lambda = 660, 488\ \text{nm}$. Излучение регистрировалось с помощью охлаждаемого жидким азотом германиевого ррп-фотодиода.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны спектры ФЛ двух серий многослойных структур ($T_g = 250$ и 300°C) с различной толщиной слоев германия.

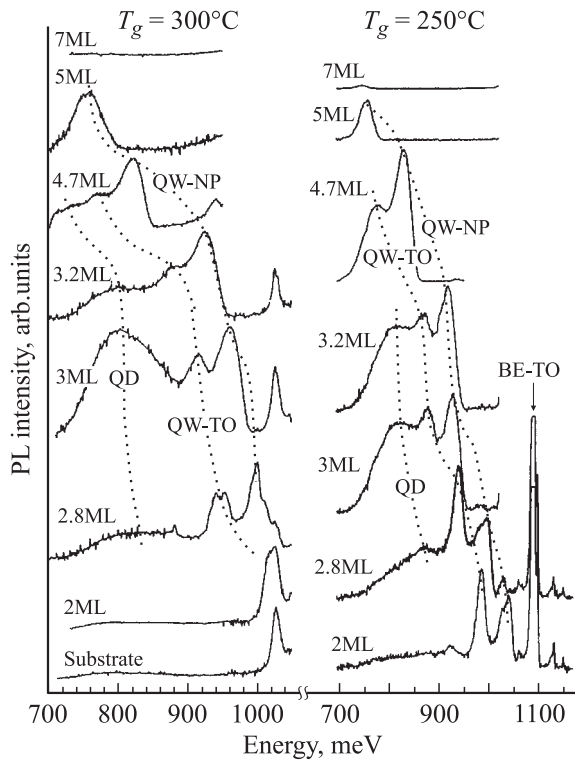


Рис. 1. Изменение спектров фотолюминесценции при увеличении толщины покрытия германия (толщина указана в монослоях). $T = 2\text{ K}$, $\lambda = 0.66\ \mu\text{m}$. QW-TO и QW-NP — соответственно фонная (Si) и бесфонная линии излучения квантовых ям, QD — линия излучения квантовых точек, BE-TO — фонная линия излучения связанных экситонов.

В спектрах наблюдаются две линии излучения, связанного со смачивающим слоем: фонная и бесфонная, а также излучение островков (КТ). Спектры обрезаны со стороны низких энергий ($\sim 0.7\text{ eV}$) из-за спектральных ограничений фотодетектора (германий).

Сравнивая полученные спектры со сходными спектрами для структур, выращенных при более высоких температурах [2–4], можно видеть, что в нашем случае необычным является поведение излучения островков, которое начинает отчетливо проявляться уже при толщине слоя германия 2.8 ML, достигает максимума при 3 ML и резко снижается по сравнению с излучением смачивающего слоя при дальнейшем повышении толщины покрытия германия. В структурах, выращенных при высокой температуре эпитаксии, излучение двумерного слоя гаснет на фоне роста излучения островков по мере роста толщины слоя. Отметим также, что фонные повторения КТ в нашем случае слабо выражены либо вообще не проявляются, что свидетельствует в пользу квазипрямых переходов. Картины ДБЭ, которые наблюдались в процессе роста структур, регистрировали переход к трехмерным образованиям, лишь начиная с толщины слоя германия $> 7\text{ ML}$.

На рис. 2, *a* показано характерное АСМ-изображение поверхности образцов, выращенных при $T_g = 250\text{--}300^\circ\text{C}$,

с толщиной покрытия германия 3 ML. Видно, что морфология поверхности образцов с толщиной слоев германия менее 5 ML представляет собой мелкий островковый рельеф; с увеличением толщины слоя до 5 ML поверхность существенно сглаживается (рис. 2, *b*), при этом сглаживание рельефа происходит одновременно с резким снижением интенсивности излучения наноструктур (рис. 1). При достижении толщины 10–12 ML в АСМ-изображениях снова наблюдаются островки несколько более крупные, чем на начальном этапе роста. Аналогичная морфологическая перестройка слоя германия на кремнии, выращенного при $T_g = 300^\circ\text{C}$ получена нами в работе [10]. Эффект сглаживания в таких слоях выражен еще сильнее.

Сопоставление найденных на основании спектров ФЛ энергий бесфонных линий, связанных с квантовыми ямами, с теоретическим расчетом [11] показано на рис. 3. Видно, что начиная с 3 ML экспериментальные данные свидетельствуют о более толстом, чем среднее, покрытии германия. Это означает, что имеющийся на поверхности кремния двумерный слой несплошной (двумерность слоя подтверждается спектрами ФЛ и данными ДБЭ).

Кратковременный (120 s) отжиг структур при температуре $400\text{--}500^\circ\text{C}$ приводит к образованию сплошного слоя и его сглаживанию (рис. 3, 4).

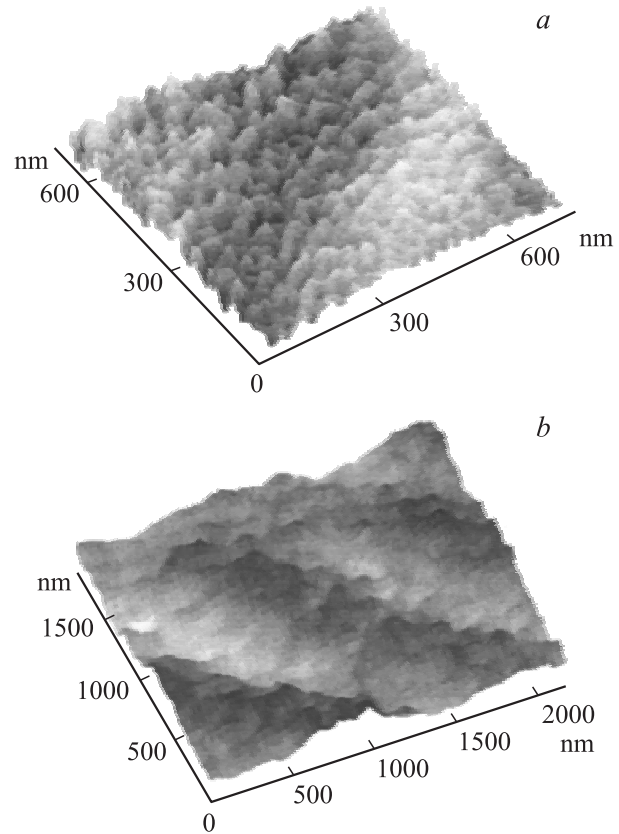


Рис. 2. Изображения поверхности структур, полученные методом атомно-силовой микроскопии. *a* — $T_g = 250\text{--}300^\circ\text{C}$, толщина слоя германия равна 3 ML; *b* — $T_g = 250^\circ\text{C}$, толщина слоя германия равна 5 ML.

Необычным для спектров ФЛ структур с $T_g = 300^\circ\text{C}$ является возникновение узкой линии (1080 meV), сохраняющей свое спектральное положение при изменении технологической толщины слоя германия (рис. 5, *a*). На рис. 5, *b* представлен спектр ФЛ, измеренный при оптимальных условиях ее наблюдения: температура несколько выше гелиевой при возбуждении аргоновым лазером, структура с толщиной слоя германия 5 ML. Подобная линия наблюдалась нами ранее [8,10]. Линия возникает

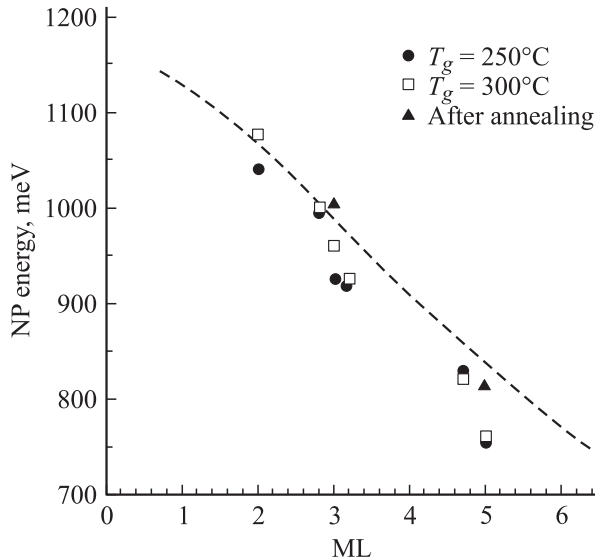


Рис. 3. Зависимость энергетического положения бесфононной (NP) линии излучения, связанного с квантовыми ямами германия в кремнии, от толщины слоев германия (толщина указана в монослоях). Штриховой линией показана расчетная зависимость [11].

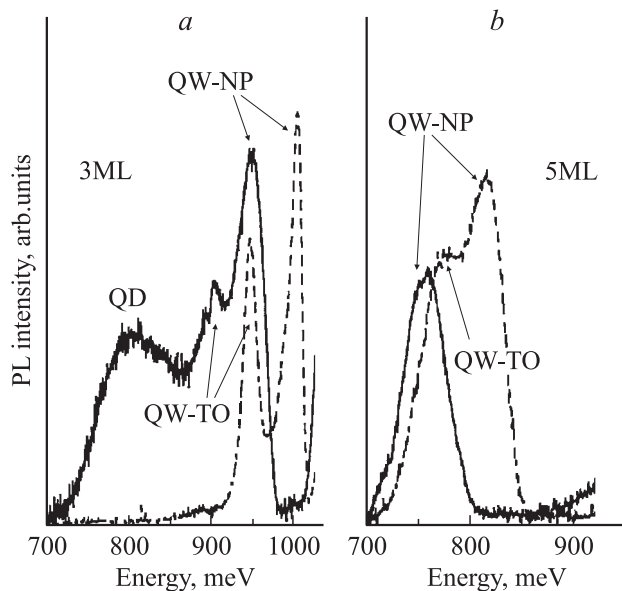


Рис. 4. Трансформация спектров фотолуминесценции структур в результате отжига. Сплошная линия — спектр до отжига, штриховая — после отжига. *a* — $T_g = 250^\circ\text{C}$, отжиг в режиме $500^\circ\text{C}/2\text{ min}$; *b* — $T_g = 300^\circ\text{C}$, отжиг в режиме $400^\circ\text{C}/2\text{ min}$.

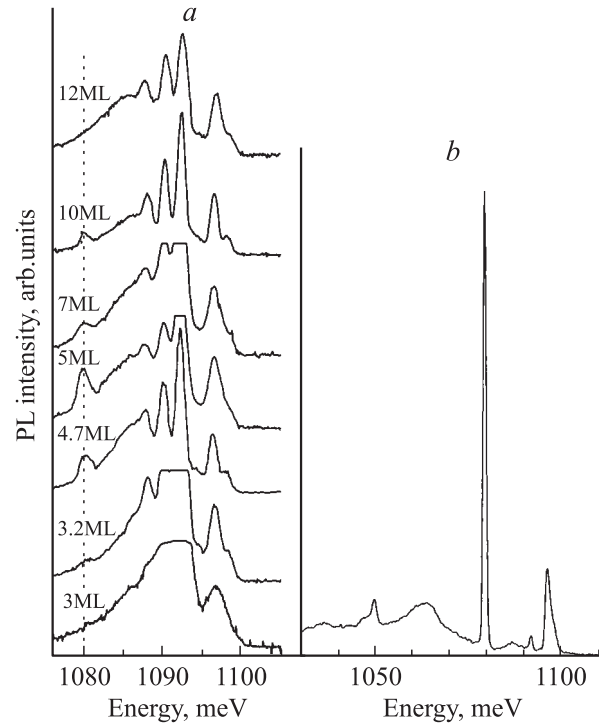


Рис. 5. *a*) Зависимость интенсивности линии с энергией 1080 meV от толщины слоя Ge. *b*) Линия 1080 meV при оптимальных условиях наблюдения (5 ML, $T = 5\text{ K}$, $\lambda = 0.488\ \mu\text{m}$).

при толщине слоя германия 3.2 ML одновременно с началом снижения интенсивности излучения островков, достигает максимума при толщине 5 ML и исчезает при дальнейшем возрастании покрытия германия. При $T_g = 250^\circ\text{C}$ эта линия не наблюдается. Для исследования зависимости поведения данной линии от температуры роста был изготовлен ряд структур (на установке „Катунь“) при $T_g = 300\text{--}350^\circ\text{C}$. Исследования, проведенные на этих структурах, показали, что количество слоев германия и протяженность кремниевых барьеров между слоями германия не сказываются на характеристиках линии. Выяснение природы линии с энергией 1080 meV требует дальнейших исследований. Несмотря на отчетливую корреляцию с морфологической перестройкой слоя германия, необычайно узкая спектральная ширина ($\sim 1\text{ meV}$) затрудняет ее интерпретацию как излучения, связанного с квантовой ямой, тем более что линия наблюдается одновременно с излучением смачивающего слоя в условиях, когда он не является сплошным. Узкие спектральные линии в этой области спектра порождаются радиационными дефектами в кремнии, легированном бором [12].

4. Заключение

При температурах МПЭ $250\text{--}300^\circ\text{C}$ на начальном этапе роста (3–5 ML) двумерный слой германия не является сплошным. Это подтверждается сопоставлением

спектров ФЛ до и после отжига с теоретическим расчетом. В области толщины до 3 ML формируются мелкие аморфные островки, которые проявляются в спектрах ФЛ и регистрируются с помощью АСМ, но не идентифицируются как трехмерные образования по данным ДБЭ. Переход к трехмерным образованиям по данным ДБЭ проявляется начиная с толщины, превышающей 7 ML. В области 3–5 ML происходит структурная перестройка поверхности, состоящая в том, что мелкий (50 nm) островковый рельеф сменяется гладким волнообразным, при этом интенсивность излучения КТ резко снижается. Морфологическая перестройка поверхности к волнообразному рельефу сопровождается появлением линии ФЛ (1080 meV), которая пропадает в результате отжига или при увеличении толщины слоя германия, когда поверхность зарастает островками по механизму СК.

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**, 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.В. Двуреченский, А.И. Якимов. *ФТП* **35**, 9, 1143 (2001).
- [6] А.Г. Макаров, Н.Н. Леденцов, А.Ф. Цацульников, Г.Э. Цырлин, В.А. Егоров, Н.Д. Захаров, P. Werner. *ФТП* **37**, 2, 219 (2003).
- [7] 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).
- [8] 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**, 8, 979 (2001).
- [9] M.M. Rzaev, T.M. Burbaev, V.A. Kurbatov, N.N. Melnik, M. Mühlberger, A.O. Pogosov, F. Schäffler, N.N. Sibeldin, V.A. Tsvetkov, P. Werner, N.D. Zakharov, T.N. Zavaritskaya. *Phys. Stat. Sol. (c)* **0**, 1262 (2003).
- [10] Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, А.О. Погосов, М.М. Рзаев, Н.Н. Сибельдин, В.А. Цветков. *ФТТ* **46**, 1, 74 (2004).
- [11] L. Vescan, M. Gorlin, T. Stoica, P. Gartner, K. Grimm, O. Chretien, E. Matveeva, C. Dieker, B. Holländer. *Appl. Phys. A* **71**, 423 (2000).
- [12] K. Thonke, J. Weber, J. Wagner, R. Sauer. *Physica B* **116**, 252 (1983).