

Влияние предосаждения $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ слоя на рост $\text{SiGe}/\text{Si}(001)$ самоформирующихся островков

© Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский, M. Stoffel*, U. Denker*, O.G. Schmidt*, O.M. Горбенко**, И.П. Сошников***

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

* Max-Planck-Institut für Festkörperforschung,

D-70569 Stuttgart, Germany

** Институт аналитического приборостроения Российской академии наук,

190103 Санкт-Петербург, Россия

*** Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,

194021 Санкт-Петербург, Россия

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

Исследован рост $\text{Ge}(\text{Si})$ самоформирующихся островков на напряженном $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ слое ($0 < x < 20\%$). Обнаружено, что размеры и поверхностная плотность островков увеличиваются с ростом содержания Ge в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ слое. Рост поверхностной плотности островков связывается с увеличением шероховатости поверхности после осаждения SiGe слоя. Рост размеров островков объясняется уменьшением толщины смачивающего слоя, которое вызвано дополнительной упругой энергией, накопленной в SiGe слое, и увеличением диффузии Si из $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ слоя в островки. Увеличение доли поверхности, занятой островками, приводит к большему упорядочению взаимного расположения островков.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 02-02-16792 и 02-02-17846-a), INTAS NANO N 01-444 и BRHE Program.

1. Введение

Самоформирующиеся наноструктуры Ge , выращенные эпитаксиально на $\text{Si}(001)$, являются объектом активного исследования более десяти лет. Интерес к ним вызван тем, что гетеропара $\text{Ge}/\text{Si}(001)$ может рассматриваться как модельная система для понимания физики гетероэпитаксиального роста ([1] и ссылки там). Кроме того, островки германия в матрице Si могут быть использованы для создания нового поколения электронных и оптоэлектронных приборов.

Среди различных параметров, характеризующих рост островков, поверхностная плотность островков является основным параметром, определяющим интенсивность сигнала люминесценции островков [2]. Поверхностную плотность можно увеличивать с помощью увеличения скорости осаждения Ge или понижением температуры роста, однако одновременное уменьшение размеров островков не позволяет получать массивы плотно упакованных островков [3], необходимые для многих практических применений. Эта цель тем не менее может быть достигнута с помощью роста на предосажденных полностью напряженных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с малым содержанием Ge .

2. Эксперимент

В данной работе представлены результаты исследования влияния предосаждения слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 < x < 20\%$) на последующий рост самоформирующихся островков Ge . Исследуемые структуры выращены на подложках $\text{Si}(001)$ методом молекулярно-

лучевой эпитаксии из твердых источников при температуре роста 700°C . Структуры с самоформирующимися наноструктурами состояли из буферного слоя Si толщиной 100 nm и слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ толщиной 10 nm и $0 \leq x \leq 20\%$, на который осаждался Ge с эквивалентной толщиной от 3.8 до 12 монослоев (ML). Структуры для фотолюминесцентных измерений имели покровный слой Si , рост которого проходил при 700°C . Исследования морфологии поверхности выращенных структур выполнены *ex-situ* с помощью атомно-силовой микроскопии (AFM) в полуконтактном режиме. Рентгенодифракционные (RD) исследования выполнены на дифрактометре ДРОН-4. Спектры фотолюминесценции (PL) GeSi гетероструктур записывались с помощью Фурье-спектрометра BOMEM DA3.36. Для регистрации спектров использовался охлаждаемый Ge детектор. Для возбуждения PL использовался Ar^+ (514.5 nm) лазер.

3. Результаты

С помощью анализа AFM снимков образцов с островками, выращенными на Si буферном слое и на предосажденном слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с разным содержанием Ge , обнаружено, что поверхностная плотность островков возрастает с увеличением содержания Ge в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (рис. 1). Было предположено, что известное из литературы увеличение шероховатости поверхности в результате осаждения упруго напряженного слоя SiGe на $\text{Si}(001)$ [4] приводит к уменьшению диффузионной длины адатомов и, таким образом, к росту поверхностной плотности островков. Было обнаружено, что среднеквадратичная (СК) шероховатость поверхности SiGe

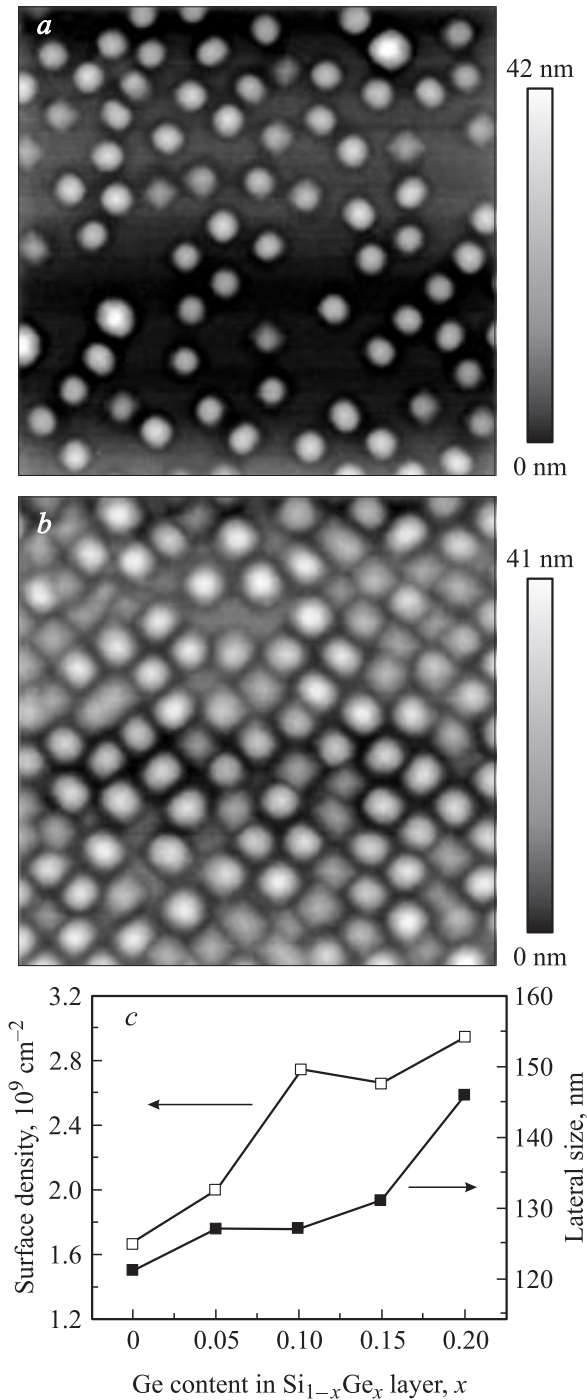


Рис. 1. АСМ снимки островков, выращенных на предосажденном слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с содержанием Ge $x = 0$ (a) и 10% (b). Эквивалентная толщина осажденного чистого Ge составляла 9 МС. Размер скана $2 \times 2 \mu\text{m}^2$. c – зависимости поверхностной плотности и среднего латерального размера островков от содержания Ge в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.

слоя, вычисленная из АСМ снимков, возрастает с увеличением содержания Ge в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ слое и увеличивается более чем в 2 раза после осаждения слоя $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ (с 1.05 до 2.2 Å). Следует отметить, что по данным АСМ исследований поверхность структур после осаждения

слоя GeSi оставалась планарной. Таким образом, мы полагаем, что увеличение шероховатости поверхности значительно уменьшает длину поверхностной диффузии и в конечном итоге приводит к увеличению поверхностной плотности островков.

Увеличение поверхностной плотности островков и более равномерное распределение островков по поверхности, как мы предполагаем, ответственно за то, что при росте островков на слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ удается осадить на 2–3 МС Ge больше по сравнению с ростом на Si буфере до начала образования дислокационных островков.

Кроме увеличения поверхностной плотности обнаружено увеличение размеров островков с увеличением содержания Ge в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (рис. 1, c). Одновременное увеличение поверхностной плотности и размеров островков означает, что в формировании островков принимает участие большее количество атомов, поскольку суммарный объем островков возрастает. Было сделано предположение, что дополнительный поток атомов в островки возникает за счет уменьшения толщины смачивающего слоя. При уменьшении толщины смачивающего слоя высвобождается часть атомов Ge, которые идут на формирование островков. Чтобы проверить это предположение, были проведены эксперименты по определению критической толщины (d_{2D}) двумерного роста Ge на слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ как функции x . Критическая толщина $2D-3D$ перехода определялась методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). В результате было обнаружено, что с ростом содержания Ge в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ происходило уменьшение d_{2D} (рис. 2) с 4.4 ± 0.2 МС при росте на Si буферном слое до 1.6 ± 0.2 МС, когда Ge осаждался на слой $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$. Таким образом, толщина смачивающего слоя также уменьшается с увеличением содержания Ge в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, поскольку она не может быть больше критической толщины планарного роста пленки Ge. Это уменьшение также может быть подтверждено измерениями ФЛ образцов, выращенных с и без предосаждения слоя SiGe. Было обнаружено, что когда островки были

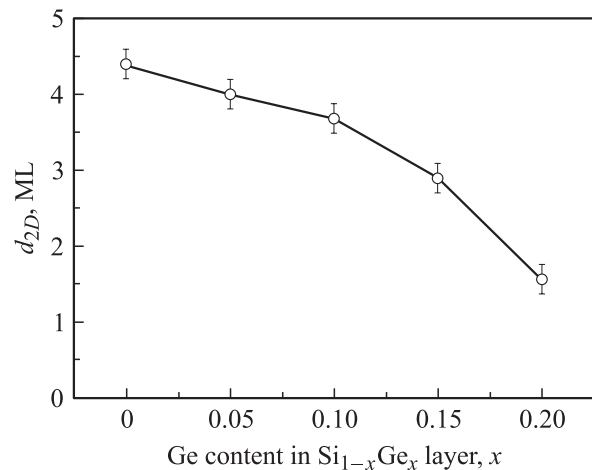


Рис. 2. Зависимость критической толщины слоя Ge (d_{2D}) от содержания Ge в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.

выращены на слое SiGe , сигналы ФЛ от смачивающего слоя смещены в сторону больших энергий в сравнении с образцом без предсаждения слоя SiGe . Последнее может быть связано с двумя причинами: во-первых, с уменьшением толщины смачивающего слоя, а во-вторых, с увеличением содержания Si в смачивающем слое. Поскольку рост образцов проходил в одинаковых условиях, мы связываем этот сдвиг с уменьшением толщины смачивающего слоя, которое приводит к сдвигу уровня дырок в направлении края валентной зоны Si за счет квантоворазмерных эффектов и, таким образом, к увеличению энергии сигнала ФЛ.

Сегрегация Ge , которая имеет место при наших условиях роста, может также вносить вклад в уменьшение $d_{2D}(x)$ (рис. 2). Однако, в результате сегрегации Ge на поверхности слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ может появиться дополнительно не более 1 МС Ge . Поскольку уменьшение d_{2D} при росте Ge на предсажденном слое $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ достигает 2.8 ± 0.4 МС, это означает, что только сегрегацией Ge невозможно объяснить наблюдающееся уменьшение d_{2D} .

Другой причиной уменьшения d_{2D} может быть дополнительная упругая энергия, накопленная в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Упругие энергии, накопленные в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и в пленке Ge , были вычислены по отдельности в соответствии с известной формулой теории упругости

$$E = 2G \cdot ((1 + \nu)/(1 - \nu)) \cdot \varepsilon^2 \cdot d, \quad (1)$$

где G — модуль сдвига, ν — коэффициент Пуассона, ε — xx или yy компонента тензора деформации, d — толщина слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (в нашем случае 10 nm) или критическая толщина пленки Ge (d_{2D}). Упругая энергия слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ была вычислена с учетом сегрегации Ge . Полная упругая энергия (E_{tot}), накопленная в структуре, перед началом формирования островков была вычислена сложением упругой энергии слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (E_{SiGe}) и упругой энергии слоя Ge критической толщины d_{2D} (E_{Ge})

$$E_{tot} = E_{\text{SiGe}} + E_{\text{Ge}}. \quad (2)$$

На рис. 3 показаны результаты наших вычислений в единицах упругой энергии, накопленной в слое Ge толщиной $d_{2D} = 4.4 \pm 0.2$ МС, которая была получена во время роста Ge на буферном слое Si . Можно видеть, что полная упругая энергия, накопленная в структуре на границе перехода от $2D$ к $3D$ росту, остается почти неизменной и немного увеличивается с ростом содержания Ge в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Небольшое увеличение E_{tot} может быть обусловлено частичной релаксацией на увеличившейся шероховатости поверхности.

Увеличение размеров островков, выращенных на предсажденном слое SiGe , может происходить не только за счет дополнительного потока атомов Ge в результате уменьшения толщины смачивающего слоя, но и в результате увеличения диффузии Si в островки. Ранее было показано, что с увеличением размеров островка содержание Si в нем растет [6]. В результате рентгеноструктурного анализа было обнаружено, что среднее

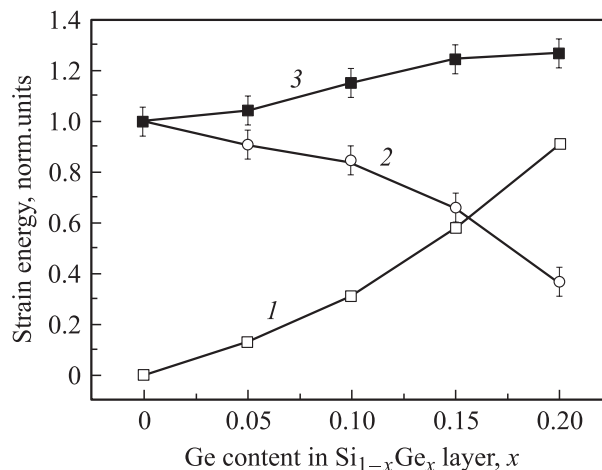


Рис. 3. Зависимости упругих энергий, накопленных: 1 — в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (E_{SiGe}), 2 — слое чистого Ge критической толщины (E_{Ge}) и 3 — их суммы (E_{tot}) от содержания Ge в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Все энергии нормированы на величину упругой энергии, накопленной в Ge слое критической толщины при росте на буфере Si ($d_{2D} = 4.4 \pm 0.2$ ML).

содержание Ge в островках уменьшается с $52 \pm 3\%$ до $41 \pm 3\%$ при увеличении содержания Ge в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с $x = 0$ до 15%. С другой стороны, это может показаться странным, поскольку в объемной диффузии атомов из подслоя в островки должна возрастать доля атомов Ge , таким образом увеличивая содержание Ge в островках. Очевидно, что в островки из слоя SiGe диффундируют в основном атомы Si , уменьшая упругие напряжения за счет образования раствора SiGe . Обнаруженное экспериментально уменьшение толщины смачивающего слоя Ge также уменьшает барьер для диффузии Si из слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в островки. В результате содержание Si в островках увеличивается с увеличением содержания Ge в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, что вместе с уменьшением толщины смачивающего слоя позволяет объяснить экспериментально наблюдаемое увеличение размеров островков.

В результате увеличения размеров островков и их поверхностной плотности происходит увеличение доли поверхности, занятой островками, в результате чего соседние островки начинают эффективно взаимодействовать друг с другом, и появляются эффекты корреляции во взаимном расположении островков. Направление упорядочения близко к направлению $\langle 100 \rangle$. Из-за анизотропии упругих констант поля упругие напряжения от островков на поверхности значительно быстрее спадают от периметра островка в направлении $\langle 110 \rangle$ по сравнению с направлением $\langle 100 \rangle$ [6]. Степень упорядочения островков была исследована с помощью автокорреляционной функции поверхности [7]. Наличие трех пиков на профиле автокорреляционной функции в направлении $\langle 110 \rangle$ указывает на сильную корреляцию ближнего порядка во взаимном расположении островков до третьего соседнего островка.

4. Заключение

В настоящей работе выполнены исследования роста Ge(Si) самоформирующихся островков на напряженных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 < x < 20\%$). Обнаружено, что размеры и поверхностная плотность островков увеличиваются с ростом содержания Ge в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Увеличение шероховатости поверхности в результате осаждения слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ приводит к увеличению поверхностной плотности островков. Рост размеров островков объясняется более высоким содержанием Si в островках, что является результатом увеличения диффузии из слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в островки из-за экспериментально наблюдаемого уменьшения толщины смачивающего слоя. Значительное уменьшение толщины смачивающего слоя во время осаждения Ge на слой $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ связывается с накопленной в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ упругой энергией. Увеличение относительной площади поверхности, занятой островками, в результате увеличения размеров и поверхностной плотности островков приводит к большему упорядочению взаимного расположения островков. Упорядочение островков исследовано с помощью анализа автокорреляционной функции поверхности.

Список литературы

- [1] B. Voigtländer. Surf. Sci. Rep. **43**, 127 (2001).
- [2] U. Denker, M. Stoffel, O.G. Schmidt, H. Sigg. Appl. Phys. Lett. **82**, 454 (2003).
- [3] B. Cho, T. Schwartz-Selinger, K. Ohmori, David G. Cahill. Phys. Rev. B **66**, 195 407 (2002).
- [4] P. Sutter, M.G. Lagally. Phys. Rev. Lett. **84**, 4637 (2000).
- [5] N.V. Vostokov, S.A. Gusev, Yu.N. Drozdov, Z.F. Krasil'nik, D.N. Lobanov, N. Mesters, M. Miura, L.D. Moldavskaya, A.V. Novikov, J. Pascual, V.V. Postnikov, Y. Shiraki, V.A. Yakhimchuk, N. Usami, M.Ya. Valakh. Phys. Low-Dim. Struct. **3/4**, 295 (2001).
- [6] M. Meixner, E. Schöll, M. Schmidbauer, H. Raidt, R. Köler. Phys. Rev. B **64**, 245 307 (2001).
- [7] Christian Teichert. Phys. Rep. **365**, 335 (2002).