

# Эффекты латерального упорядочения самоорганизованных SiGe наностроек выращенных на напряженных Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> буферных слоях

М.Я. Валах<sup>1</sup>, А.С. Николенко<sup>1</sup>, В.В. Стрельчук<sup>1</sup>, П.М. Литвин<sup>1</sup>, В.П. Кладько<sup>1</sup>,  
А.И. Гудымеко<sup>1</sup>, Н.В. Слободян<sup>1</sup>, З.Ф. Красильник<sup>2</sup>, А.А. Новиков<sup>2</sup>, Д.Н. Лобанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников имени В.Е. Лашкарева НАН Украины, просп. Науки 45, Киев, 03028, Украина

<sup>2</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

В настоящее время актуальной является проблема контролируемого управления размерами полупроводниковых квантовых точек (КТ), их дисперсией и пространственным упорядочением непосредственно в процессе молекулярно-пучковой эпитаксии. Одним из возможных путей решения данной проблемы является формирования пространственно упорядоченных плотных массивов GeSi островков при их выращивании на напряженных Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub> буферных слоях. В данной работе исследовалось влияние параметров роста буферного SiGe слоя на латеральное упорядочение GeSi островков в однослойной структуре.

В работе исследовались структуры, сформированные на подложках Si (001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии при 700°C. После выращивания буферного слоя Si толщиной 100 нм, на нём выращивался дополнительный напряженный Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> подслоя толщиной 10 нм с долей Ge  $x = 0.22$ . Самоорганизованные Ge островки формировались на Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> подслое в режиме роста Странского-Крастанова осаждением слоя Ge толщиной от 9 до 11 монослоёв (МС).

Морфология поверхности исследуемых структур изучалась с помощью атомно-силового микроскопа Nanoscope IIIa. Измерения спектров КРС проводились в геометрии на отражение при комнатной температуре с помощью рамановского спектрометра T-64000 Horiba Jobin-Yvon. Рентгеноструктурные исследования проводились на высоко-разрешающем дифрактометре PANalytical X'Pert PRO MRD.

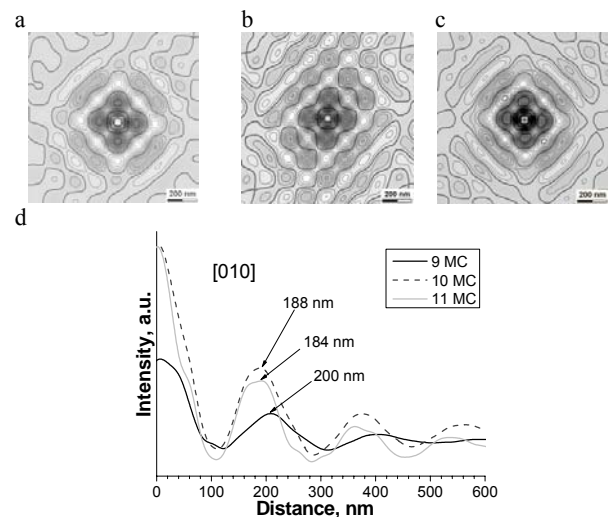
Показано, что увеличение номинальной толщины осаждаемого слоя Ge от 9 до 11 МС приводит к переходу от бимодального распределения размеров и формы островков типа удлинённых hut-кластеров и пирамид к одномодальному ансамблю куполообразных островков. При этом улучшается упорядочение островков, а также наблюдается увеличение их суммарного объема над количеством номинально осажденного Ge в 3.3 и 5 раз соответственно.

Оценка компонентного состава и деформаций по спектрам КРС исследуемых структур при 11 МС Ge даёт значения для SiGe подслоя  $x = 0.33$ ,  $\epsilon_{xx} = -0.012$ , и для островков  $x = 0.32$ ,  $\epsilon_{xx} = 0.001$ . Разница в изменении толщины и компонентного состава буферного слоя позволяет оценить соотношение атомов Si и Ge, покинувших буферный слой. Показано, что вследствие процессов интердиффузии из буферного SiGe слоя в островки концентрация атомов Ge в островках составляет  $\approx 16\%$ . Диффузия Ge в область с изначально большим его содержание объяснена действием эффекта Горского в поле неоднородных упругих напряжений.

В данном случае именно он стимулирует диффузию атомов кремния в островки и одновременно обеспечивает восходящую диффузию атомов германия из SiGe подслоя с меньшим его содержанием в островки, где содержание германия первоначально существенно выше [1, 2].

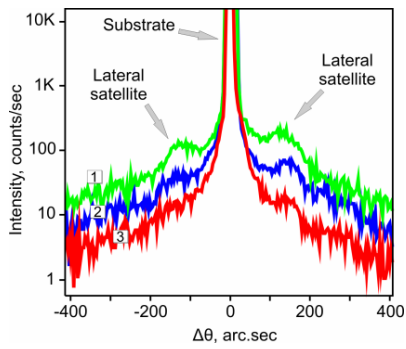
Количество и размещение максимумов 2D автокорреляционных функций построенных по АСМ сканам четко указывают на формирование характерной ортогональной сетки в латеральном расположении наностроек (рис.1). При этом латеральные направления упорядочения островков, как и ориентация формы основы островков, ориентированы по ортогональным направлениям [010] и [-100]. Наличие трёх максимумов на сечениях автокорреляционных функций проведенных вдоль обозначенных направлений указывает на сильную корреляцию ближнего порядка во взаимном размещении островков вплоть до третьего соседнего островка. Наиболее сильно это проявляется при толщине германия 10 МС, для которой четко наблюдается максимум 2D автокорреляции четвертого порядка. При этом четко фиксируется уменьшение периода размещения островков при увеличении толщины осажденного германия от 9 до 11 МС.

Для выяснения причин вызывающих латераль-



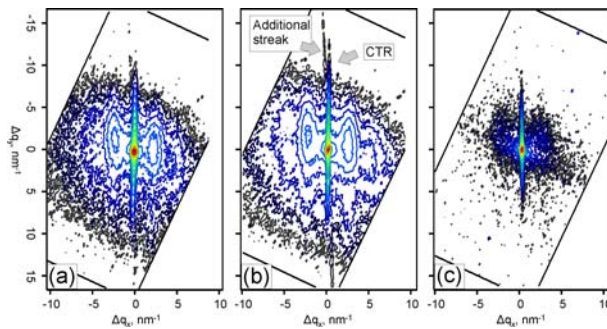
**Рис.1.** 2D автокорреляционные карты сканов поверхностей исследуемых структур при номинальных толщинах Ge 9 МС, 10 МС и 11 МС соответственно (a, b, c); Сечение автокорреляционных карт в направлениях [010] (d).

ное упорядочение островков, было исследовано влияние ориентации поверхности подложки на расположение островков вдоль кристаллографических



**Рис.2.**  $\omega$ -сканы для образцов с 9, 10 и 11 МС осажденного Ge, соответственно, (1, 2, 3).

направлений. Подложка была слабо разориентирована в направлении близком к  $[-100]$ , с соответствующими компонентами вдоль направления  $[-1-10]$  около 0.4 градуса и в перпендикулярном направлении  $[-110]$  – 0.3 градуса. В свою очередь, буферный слой SiGe разориентирован только в направлении  $[-110]$  на 0.2 градуса. Причина разориентации слоя на мискатной подложке подробно описана в [3]. Эти отклонения от точной кристаллографической ориентации поверхности и будут спусковым механизмом для формирования анизотропно упорядоченной системы квантовых островков вследствие различных условий для диффузионных процессов.



**Рис. 3.** 113 ВР-КОП для образцов с 9, 10 и 11 МС осажденного Ge, соответственно, (a, b, c).

Кроме того, рост напряженного слоя SiGe на разориентированной поверхности кремния будет вызывать упорядоченное модулирование напряжений по поверхности, усиливая, таким образом, степень упорядочения образовавшихся КТ. При увеличении концентрации Ge в буферном слое эффект разориентации слоя должен увеличиваться, приводя к более сильному уровню модулированных напряжений вдоль поверхности.

На отдельных сканах, измеренных для отражений 113 и 404, отчетливо наблюдаются латеральные сателлиты, что свидетельствует об упорядочении системы SiGe островков (рис.2) [4]. Угловое расстояние между максимумами сателлитов на кривых позволяет определить среднее расстояние между островками: из отражения 113 – в направлении  $[110]$ , а из отражений типа  $\{404\}$  – вдоль  $[100]$  и  $[010]$ . Эти значения различные для направлений  $[110]$  и  $[010]$ .

Измерение карт обратного пространства для асимметричных 113 и 404 узлов обратной решетки подтвердило наше утверждение о характере упоря-

дочения островков при изменении толщины осажденного Ge (рис.3). Наилучшее упорядочение наблюдалось при толщине германия 10 МС, наихудшее – при 11 МС. О наилучшем упорядочении островков и однородности их распределения по размерам и форме при толщине германия 10 МС свидетельствует следующее. На картах обратного пространства для 113 рефлекса наблюдается «полоска» под небольшим углом к СТР. Мы считаем, что данный дифракционный эффект является результатом зеркального отражения рентгеновского луча от окантки островков. На картах при 9 и 11 МС Ge таких полосок нет, так как нет отражения от ребер граней островков.

Степень упорядочения точек увеличивается при изменении толщины Ge от 9 МС до 10 МС, о чем свидетельствует появление на дифракционных кривых и картах обратного пространства латеральных сателлитов второго порядка. Размытие и исчезновение сателлитов при росте общего диффузного фона для 11 МС германия можно объяснить ухудшением структурных свойств системы в целом. При этом уширение диффузного фона перпендикулярно вектору дифракции может свидетельствовать о появлении хаотически распределенных дислокаций, приводящих к релаксации системы (рис.3с). Как было показано в [3], об улучшении упорядочения при увеличении толщины Ge от 9 МС к 10 МС свидетельствуют также большая интенсивность максимумов высших порядков профилей автокорреляции АСМ изображений. При дальнейшем увеличении толщины Ge до 11 МС происходит также удлинение островков, и их форма становится ближе к эллиптической, что связано с более сильным проявлением анизотропного характера диффузии при увеличении интенсивности последней.

Таким образом, рост наноструктур на напряженном буферном слое не только стимулирует эффект их пространственного упорядочения, но и усиливает роль интердиффузионных процессов. Последние стимулируются неоднородным полем упругих напряжений, обеспечивая anomalously интенсивные потоки атомов из буфера в островки, в которых происходит частичная релаксация упругих напряжений.

Работа выполнена в рамках проектов: НАН Украины (Проект №3.5.1.12 Государственной научно-технической программы “Нанотехнологии и наноматериалы”) и МОН Украины (Проект № М90/2010).

1. M.Ya. Valakh, P.M. Lytvyn, A.S. Nikolenko, V.V. Strelchuk, Z.F. Krasilnik, D.N. Lobanov, A.V. Novikov Appl. Phys. Lett. **96**, 141909 (2010).
2. V.O. Yukhymchuk, A.M. Yaremko, M.Ya. Valakh, A.V. Novikov, E.V. Mozdor, P.M. Lytvyn, Z.F. Krasilnik, V.P. Klad'ko, V.M. Dzhanan, N. Mestres, J. Pascual Materials Science and Engineering C, **23** 1027 (2003).
3. O. Yefanov, V. Kladko, O. Gudymenko, V. Strelchuk, Yu. Mazur, Zh. Wang, G. Salamo Phys. Stat. Sol. (a) **203**, 154 (2006).
4. V.P. Klad'ko, L.I. Datsenko, J. Bqk-Misiuk, S.I. Olikhovskii, V.F. Machulin, I.V. Prokopenko, V.B. Molodkin, Z.V. Maksimenko J. Phys. D: Appl. Phys., **34** A87 (2001).