

# Самоформирование системы высокоупорядоченных наностроек германия при эпитаксии на профилированные кремниевые (111) подложки в условиях электропереноса

И. В. Закурдаев, С. Ю. Садофьев, А. О. Погосов\*

Рязанская государственная радиотехническая академия, 391000 Рязань, Россия

\* Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 117924 Москва, Россия

Поступила в редакцию 11 декабря 2001 г.

При помощи атомно-силового микроскопа проведено исследование топографии поверхности SiGe структур, сформированных при эпитаксии Ge на профилированные подложки Si(111) в условиях электромиграции. Получены системы высокоупорядоченных наностроек германия размерами (10–20) нм и плотностью  $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Показана принципиальная возможность управляемого воздействия на геометрические параметры самоорганизующихся наностроек за счет выбора условий формирования и послеростового отжига структур.

PACS: 61.46.+w

В последние 5–10 лет наблюдается устойчивый интерес исследователей во всем мире к гетероэпитаксиальной системе  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  из-за высокого технологического потенциала самоорганизующихся SiGe островков (“квантовых точек”) для возможных приборных приложений. Несмотря на большое число экспериментальных работ, направленных на изучение формирования и эволюции SiGe островков на подложках различной ориентации, задача создания структур с “квантовыми точками” как элементной базы приборов нового поколения пока еще далека от своего окончательного решения. Основные проблемы, препятствующие получению качественных структур с квантовыми точками, заключаются в больших размерах самоорганизующихся островков германия, не позволяющих проявляться квантовым свойствам системы, а также случайном характере локализации островков в плоскости гетероперехода пленка – подложка. В связи с этим актуальными являются работы, ориентированные на изучение возможности дополнительного влияния на механизм самоорганизации поверхности и отработку элементов технологии создания подобных структур. В данной работе представлены предварительные результаты исследования процесса самоформирования наностроек германия при эпитаксии на Si(111) профилированные подложки в условиях электромиграции адатомов германия.

Исследуемые образцы были получены методом эпитаксии из молекулярных пучков на экспериментальной сверхвысоковакуумной установке, принципиальное отличие которой от стандартных установок молекулярно-лучевой эпитаксии заключается в воз-

можности отжига образца как посредством косвенного нагрева от внешнего источника, так и прямым пропусканием через кристалл переменного или постоянного тока заданной полярности. Установка оборудована стандартным молекулярным источником германия, представляющим собой тигель из нитрида бора, окруженный танталовым нагревателем и системой теплозащитных экранов. Источником кремния являлся дополнительный кристалл кремния, расположенный на расстоянии 15 мм над поверхностью подложки. Для быстрого прерывания молекулярного потока в непосредственной близости от источника германия расположена танталовая заслонка на сильфонном вводе.

В качестве подложек использовались разориентированные на  $4.4^\circ$  монокристаллы кремния КЭС-0.1 (111), выколотые в форме прямоугольных полосок размером  $0.3 \times 5 \times 15$  мм вдоль направления [121]. Температура образца в процессе отжига контролировалась с помощью оптического пирометра, а также термопары хромель-алюмель в области низких температур.

После загрузки образца в вакуумную камеру и достижения предельного вакуума  $p = 3 \cdot 10^{-10}$  мм рт.ст. производилась очистка поверхности подложки от слоя естественных окислов и включений карбида кремния кратковременным (1.5 мин) высокотемпературным отжигом прямым пропусканием переменного тока при температуре  $1300^\circ\text{C}$ . Затем температура подложки снижалась до  $400^\circ\text{C}$  и наносился буферный слой кремния толщиной 50 нм. После этого производился отжиг кристалла прямым пропускани-

ем постоянного тока при температуре 1250 °С в течение некоторого времени (от 0.5 до 2 мин), необходимого для формирования на поверхности заданного профиля террас и наноступеней [1]. Далее, за счет уменьшения плотности пропускаемого через образец постоянного тока температура подложки снижалась до 550–600 °С и производилось осаждение пленки германия толщиной от 5 до 15 монослоев (ML) с послеростовым отжигом в течение нескольких минут без изменения направления и величины пропускаемого тока. Скорость осаждения германия составляла 0.05 нм/с. Исследование топографии поверхности полученных структур проводилось с помощью атомно-силового микроскопа Solver P47-SPM MDT.

В результате отмеченной выше тепловой обработки подложки на поверхности формировалась система наноступеней с периодическими изломами, которые при последующем осаждении германия являлись местами “зацепления” адатомов, инициирующих развитие наностройков. Осаждение пленки в процессе электропереноса являлось дополнительным фактором, стимулирующим движение адатомов германия к краям наноступеней и закрепления их вдоль фронта наноступеней подложки. Применение данной методики позволило получать массивы высокоупорядоченных наностройков германия размерами 10–20 нм, плотность которых составляет  $(2..6) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Типичное изображение топографии поверхности полученных при помощи атомно-силового микроскопа структур с высокоупорядоченными наностройками германия представлено на рис.1. Следует отметить, что пространственные характеристики получаемых островков определяются как размерами ступеней подложки, так и эффективной толщиной пленки германия и временем послеростового отжига образца. Варьируя данные ростовые параметры, можно наблюдать различные стадии перестройки поверхности, начиная от разрыва пленки на отдельные островки и заканчивая образованием больших кластеров, формирующихся в результате коалесценции наностройков. В частности, на рис.2 представлено изображение стадии распада упруго-напряженной пленки германия, покрывающей ступени подложки, на отдельные островки. В данном случае после осаждения пленки германия с эффективной толщиной, близкой к 12 ML, образец отжигался прямым пропусканием постоянного тока в течение 3 мин при температуре 550 °С. Проведение процесса осаждения германия при достаточно высоких температурах подложки позволяет, по нашему мнению, избежать возникновения дефектов кристаллической структу-

Рис.1. Система высокоупорядоченных наностройков Ge на профилированной поверхности Si(111). Эффективная толщина пленки германия 7 ML, послеростовой отжиг образца происходит прямым пропусканием постоянного тока в течение 10 мин при температуре 600 °С

Рис.2. Распад упруго-напряженной пленки германия, покрывающей профилированную подложку, на отдельные островки. Эффективная толщина пленки германия 12 ML, послеростовой отжиг образца происходит прямым пропусканием постоянного тока в течение 3 мин при температуре 550 °С

ры наностройков, которые могут иметь место в случае низких температур эпитаксии (200 °С) [2].

Таким образом, в данной работе предложен новый оригинальный подход к формированию высокоупорядоченных структур с наностройками германия на кремнии, позволяющий получать плотные массивы островков размером 10–20 нм. Полученные результаты указывают на принципиальную возможность

направленного воздействия на процесс самоорганизации поверхности гетероструктур за счет введения дополнительной силы электропереноса с целью создания массивов наноостровков с заранее прогнозируемыми параметрами.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты

# 99-02-17795 и # 01-02-06484) и программ Министерства образования РФ.

- 
1. Y.-N. Yang, E. S. Fu, and E. D. Williams, Surf Sci. **36**, 101 (1996).
  2. О. П. Пчеляков, Ю. Б. Болховитянов, А. В. Двуреченский и др., ФТП **34**, 1281 (2000).