

06

Формирование нанокристаллического кремния на сапфире методом молекулярно-лучевой эпитаксии

© Д.А. Павлов, П.А. Шилияев, Е.В. Коротков, Н.О. Кривулин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород
E-mail: korotkov_ev@phys.unn.ru

Поступило в Редакцию 12 января 2010 г.

Показано, что на начальных стадиях молекулярно-лучевой эпитаксии кремния на сапфире на поверхности подложки образуется массив островков кремния. При низких температурах подложки (меньше 650°C) островки имеют пирамидальную форму. При температурах подложки выше 650°C форма островков — куполообразная. С повышением температуры роста латеральный размер кластеров кремния увеличивается, а их плотность уменьшается. Максимальная плотность островков составила $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, латеральный размер не превышает 20 nm, а высота — 3 nm.

Огромный интерес к изучению массивов самоорганизованных в процессе роста квантовых точек обусловлен возможностью управления спектром носителей заряда путем контроля их размеров и плотности, что особенно важно для оптоэлектронных применений: длина волны излучающих устройств с активной областью на основе гетероструктур с квантовыми точками зависит от их размера, в то время как поверхностная плотность определяет интенсивность излучения [1]. Чрезвычайно важно иметь возможность контролируемо изменять параметры получаемых квантовых точек путем варьирования параметров ростового процесса. Особенно интересным является получение кремниевых квантовых точек, что открывает путь для интеграции кремниевой технологии с оптоэлектронными устройствами, и усилия многих исследователей направлены на создание кремниевых нанокластеров, проявляющих люминесцентные свойства.

В предыдущих работах [2] нами изучались структура, морфология поверхности и особенности формирования сверхтонких слоев кремния на сапфире (КНС), получаемых методом сублимационной молекулярно-

лучевой эпитаксии (МЛЭ). Основной целью данной работы было исследование особенностей геометрии островков кремния (форма, размеры, плотность), формирующихся на начальных стадиях, и закономерностей их коалесценции.

Наиболее распространенными методами получения структур КНС является метод газофазной эпитаксии (ГФЭ) и МЛЭ. При ГФЭ кремния на сапфире рост слоев осуществляется по механизму Фольмера–Вебера путем образования и последующей коалесценции трехмерных зародышей кремния [3,4]. В работе [4] показано, что на начальной стадии эпитаксии островки Si имеют полусферическую форму (высота островков практически совпадает с радиусом основания). Плотность островков доходит до 10^{10} см^{-2} . В более поздних работах [5] была продемонстрирована возможность получения самоорганизованных наноразмерных нитей кремния на R-срезе (ориентация $(1\bar{1}02)$). Для достижения этой цели сапфировую подложку предварительно отжигали для создания фасетированной поверхности. При пиролизическом разложении дисилана на поверхности сапфира в области ступенек формировались протяженные нити кремния. Характерная ширина нитей Si составляла 50 nm, а их высота — около 1 nm.

В данной работе эпитаксиальные слои кремния на сапфире выращивались методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии. Источник кремния разогревался до 1330–1350°C пропусканием через него постоянного тока. Температура источника измерялась оптическим пирометром. Сапфировая подложка предварительно отжигалась при температуре 1300°C в течение 30 min. Температура подложки во время роста варьировалась от 450 до 800°C. Давление в камере в процессе эпитаксии не превышало $7 \cdot 10^{-7} \text{ Torr}$. Время осаждения варьировалось от 10 s до 10 min, скорость роста составляла 2.5–3 Å/s.

Морфология поверхности слоев КНС исследовалась методами атомно-силовой микроскопии на сканирующем зондовом микроскопе Solver (производства NT-MDT, Зеленоград). Кристаллическое совершенство эпитаксиальных слоев изучалось посредством электронограмм на отражение на электронографе ЭМР-102 при ускоряющем напряжении 50 kV.

В качестве подложки использовалась пластина сапфира ориентацией $(1\bar{1}02)$ (R-срез). R-плоскость Al_2O_3 , имеющая псевдосимметрию четвертого порядка, является основой для роста кремния (001). Рассогласование решеток, в случае R-среза сапфира, составляет

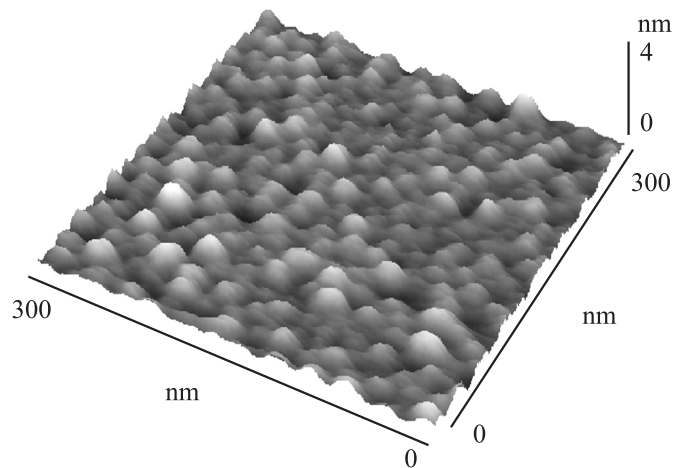


Рис. 1. Топограмма поверхности кремния на сапфире, выращенного в течение 30 s при температуре 600°С.

4.4% в направлении $[100] \text{ Si} \parallel [\bar{1}101] \text{ Al}_2\text{O}_3$ и 12.3% в направлении $[010] \text{ Si} \parallel [\bar{1}\bar{1}20] \text{ Al}_2\text{O}_3$ [6].

Результаты атомно-силовой микроскопии показали, что на начальных стадиях молекулярно-лучевой эпитаксии слоев КНС на поверхности формируется массив трехмерных островков кремния, которые при дальнейшем осаждении атомов коалесцируют, образуя сплошной слой. Последующий рост эпитаксиального слоя сопровождается увеличением размеров кристаллитов за счет поглощения соседних зерен.

Так, при низких температурах (ниже 650°С) при осаждении кремния в течение 30 s размеры островков не превышают 20 nm. Максимальная плотность островков достигает $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ (при температуре подложки 600°С, рис. 1). Островки кремния имеют форму усеченной пирамиды (рис. 2, а). Средний угол наклона граней пирамиды по отношению к основанию составляет 15°. Латеральные размеры островков примерно в 10 раз превышают высоту островков.

С повышением температуры подложки размеры островков при тех же временах осаждения становятся больше, а их плотность уменьшается, что можно объяснить увеличением диффузионной длины адатомов кремния, ведущей к уменьшению плотности центров заро-

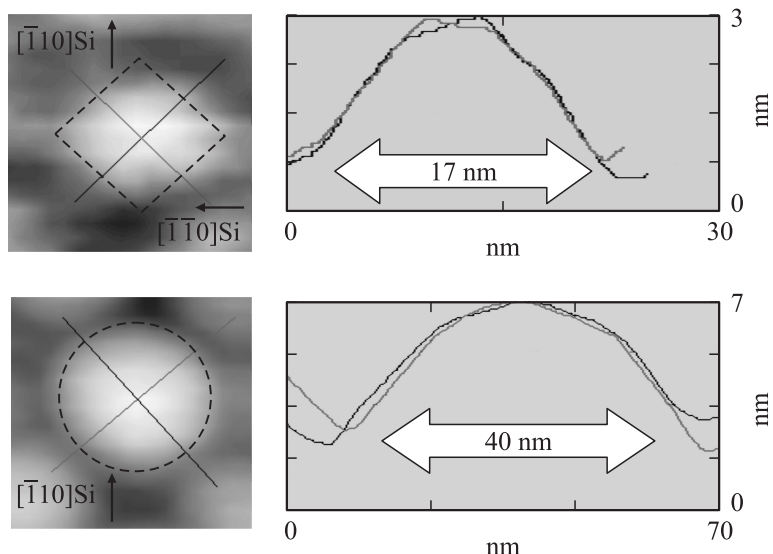


Рис. 2. Островки кремния на сапфире: *a* — пирамидальной формы; *b* — куполообразной формы.

дышеобразования и увеличению скорости роста латеральных размеров островков.

При низких температурах роста (меньше 650°C) кристаллиты Si, покрывающие подложку, наиболее однородны по размерам. При температуре подложки больше 650°C помимо пирамидальных островков на поверхности слоя появляются островки куполообразной формы (рис. 2, *b*). Распределение островков по размерам при этом имеет бимодальный вид. Форма таких островков напоминает форму dome-кластеров германия на кремнии [7]. Средние латеральные размеры куполообразных островков кремния на сапфире составляют 40 nm (при температуре подложки 700°C), а их средняя высота — 6 nm. Поверхностная плотность таких куполообразных островков достигает $4 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$. При увеличении температуры роста до 800°C практически все кристаллиты на поверхности слоя кремния преобразуются в куполообразную форму. При этом островки неоднородны по своим

размерам: на фоне мелких островков (размерами 40 nm) на поверхности присутствуют крупные кристаллиты размером до 80 nm.

По своей кристаллической структуре исследуемые островки являются монокристаллическими и ориентированы одинаково по всей поверхности образца, что подтверждается наличием точечных рефлексов на соответствующих электронограммах. Интенсивность рефлексов ослабевает, а интенсивность фона увеличивается по мере снижения температуры подложки. Это свидетельствует об уменьшении числа монокристаллических островков. При температурах осаждения меньше 500°C остается только фон, соответствующий аморфной фазе кремния.

По данным электронографических исследований скоалесцировавший слой Si имеет структуру мозаичного монокристалла с ориентацией (001). Типичная электронограмма для таких слоев представляет собой набор точечных рефлексов. Помимо основных рефлексов на электронограммах присутствует фон дополнительных рефлексов, возникающих в результате отражения электронов на дефектах двойникования и разориентированных кристаллитов Si. Минимальный фон дополнительных рефлексов наблюдался на электронограммах от слоев КНС, выращенных при температуре подложки 700°C.

Таким образом, рост кремния на сапфире выглядит следующим образом. На начальном этапе образуются островки кремния на сапфире, размер и плотность которых зависят от условий осаждения. Причем размеры могут достигать нескольких нанометров, а плотность — $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. При дальнейшем осаждении атомов кремния происходит коалесценция островков, сопровождающаяся уменьшением их поверхностной плотности и увеличением размеров. Во время срастания происходит рекристаллизация с формированием дефектов двойникования на границах срастающихся кристаллитов. После этого рост слоя осуществляется путем поглощения более крупных кристаллитами мелких соседних зерен. С увеличением времени осаждения размеры кристаллитов кремния растут (рис. 3, *a*), а их плотность уменьшается (рис. 3, *b*). Рост зерен осуществляется путем поглощения мелких кристаллитов более крупными.

В отличие от метода ГФЭ, где минимальная толщина сплошного слоя КНС составляет 80–100 nm [6], при МЛЭ полная коалесценция кластеров кремния происходит уже при 30 nm. Это объясняется тем, что понижение температуры роста с 1000–1100°C при ГФЭ до 500–800°C при МЛЭ ведет к увеличению концентрации центров зародышеобразования [8].

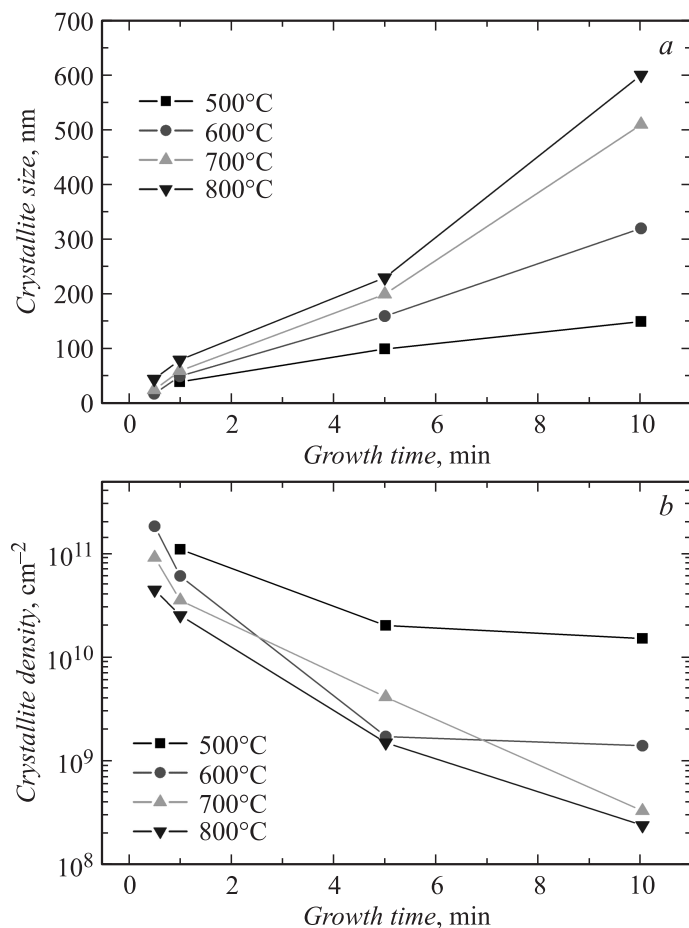


Рис. 3. Зависимости: *a* — латеральных размеров кристаллитов кремния на сапфире от времени осаждения; *b* — поверхностной плотности кристаллитов кремния на сапфире от времени осаждения.

Таким образом, методом МЛЭ возможно выращивание нанометровых островков кремния на поверхности сапфира. При этом достигаются высокая плотность и однородность островков по размерам. Размеры, плотность и форма островков контролируемо изменяются путем ва-

рирования условий осаждения. По нашему мнению, данные структуры представляют собой интерес для дальнейших исследований их свойств.

Работа была выполнена при поддержке грантов Рособразования РПН 2.1.1/3626 и CRDF Post-Doctoral Fellowship Supplemental Award Y4-P01-07.

Список литературы

- [1] Дубровский В.Г. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2003. В. 17. С. 41–48.
- [2] Шиляев П.А., Павлов Д.А., Коротков Е.В. и др. // Материалы электронной техники. 2008. № 2. С. 62–68.
- [3] Папков В.С., Сузовиков М.В., Маркова Т.И. // Неорганические материалы. 1971. Т. VII. № 9. С. 1481–1484.
- [4] Abrahams M.S. et al. // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. N 12. P. 5139–5150.
- [5] Yanagiya S. et al. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. N 10. P. 1409–1411.
- [6] Dubbelday W.B. Residual strain and defects in solid phase epitaxial regrown Si and SiGe on sapphire and device application // Diss. PhD in Electrical engineering/ W.B. Dubbelday — San Diego, 1998. 165 p.
- [7] Пчеляков О.П., Болховидянов Ю.Б., Двуреченский А.В. и др. // ФТП. 2000. Т. 34. В. 11. С. 1281–1299.
- [8] Технология тонких пленок: Справочник / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. М.: Сов. радио, 1977. Т. 2. 768 с.