

Исследование кристаллической структуры наностроек кремния на сапфире

© Н.О. Кривулин[¶], А.В. Пирогов, Д.А. Павлов, А.И. Бобров

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 23 мая 2014 г. Принята к печати 16 июня 2014 г.)

В работе представлены результаты исследований кристаллической структуры наноразмерных островков кремния на сапфире. Показано, что основными дефектами в наностройках кремния на сапфире являются дефекты двойникования. В результате формирования таких дефектов в островках кремния на сапфире формируются различные кристаллографические ориентации. На начальных стадиях молекулярно-лучевой эпитаксии кремния на сапфире присутствуют две основные ориентации — (001) параллельно поверхности и (001) под углом 70° к поверхности.

Нанокристаллический кремний интересен тем, что, в отличие от обычного кристаллического кремния, способен эффективно излучать свет в видимой и ближней инфракрасной областях спектра [1]. Ранее нами была показана возможность формирования плотных массивов наностроек кремния на *r*-срезе сапфира (01 $\bar{1}$ 2) и построена модель их роста [2,3]. Поверхностная плотность наностроек может достигать величин $\sim 10^{11}$ см $^{-2}$, что сравнимо с результатами, получаемыми в системе кремний–германий [4,5]. При этом размеры островков измеряются единицами нанометров. Нанокристаллический кремний на сапфире представляет собой совершенно новую, мало изученную разновидность самоорганизованных структур на основе кремния, и любая информация о ней представляется актуальной, в первую очередь с фундаментальной точки зрения. В данной работе приводятся результаты исследования кристаллической структуры наностроек кремния на сапфире.

Для получения наностройковых структур кремния на сапфире использовался метод сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии, подробно описанный в [2,6]. Исследование поперечного среза полученных образцов проводилось в просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100F (JEOL, Япония) в режиме высокого разрешения, ускоряющее напряжение составляло 200 кВ.

Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на начальных стадиях молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в островках не содержится никаких дефектов. При этом по форме наностройки представляют собой сегмент сферы. Когда высота островка достигает 8 нм, он начинает расти преимущественно в латеральных направлениях. Начиная с этого момента островок по форме становится похожим на усеченный купол. На некоторых островках шириной 25 нм и более были обнаружены дефекты двойникования. На рис. 1 представлен типичный островок кремния на сапфире с таким дефектом. Двойники ориентированы под углом 70° по отношению к подложке сапфира — это двойники по плоскости (111), типичные для эпитаксиального слоя

кремния с ориентацией (001) [7]. При этом непонятно, являются ли данные дефекты крупных островков следствием коалесценции более мелких островков, или это ростовые дефекты, которые возникают в них при укрупнении. Таким образом, мы можем предположить, что при коалесценции двух и более островков дефекты формируются в местах их соприкосновения, либо наличие таких дефектов можно объяснить релаксацией напряжений в кремниевых островках. Так как постоянная решетки кремния больше, чем постоянные решетки сапфира в плоскости *r*-среза, кремниевый островок оказывается сжатым. При росте островка напряжения, образующиеся в результате сжатия, накапливаются, и в какой-то момент происходит релаксация этих напряжений с образованием дефекта. Второй механизм образования дефектов на самых ранних стадиях более вероятен, так как расстояния между островками составляют в среднем 10–15 нм. К тому же этот механизм считается основным в системе кремний–сапфир [8,9].

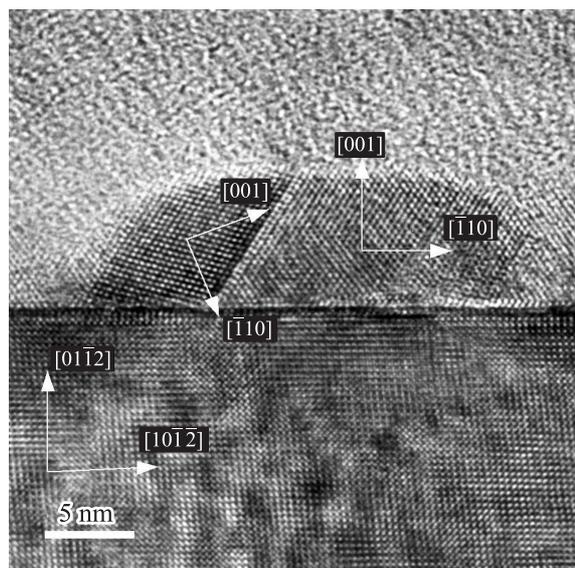


Рис. 1. ПЭМ-снимок высокого разрешения поперечного среза островка кремния с дефектом двойникования.

[¶] E-mail: krivulin@phys.unn.ru

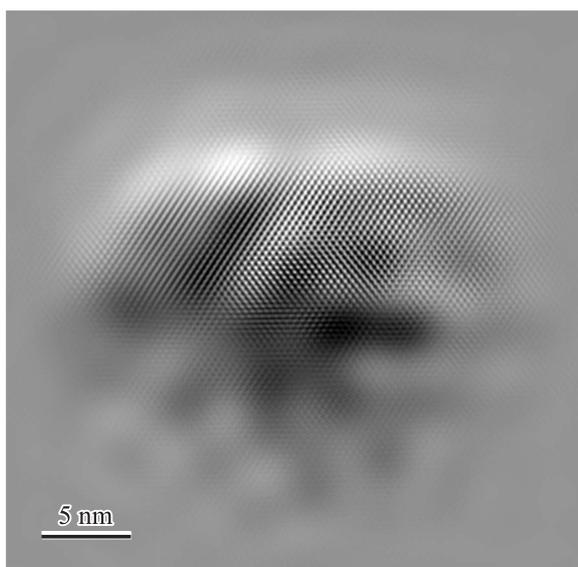


Рис. 4. Фильтрация картины высокого разрешения по рефлексам правой части островка.

типа $\{111\}$. Угол между ними составляет 70.6° . Направление $[001]$ этой части островка совпадает с нормалью к поверхности. Слева от границы двойникования также присутствует 2 семейства плоскостей типа $\{111\}$, угол между ними тот же. Однако направление типа $[001]$ для данной области уже не совпадает с нормалью, а отклоняется от нее на угол 70.6° . Такие исследования проведены для серии образцов. При этом на каждом образце вычислялись объемные доли каждой ориентации. Было получено соотношение: 60% — ориентация (001) , 40% — ориентация (001) под углом 70.6° к поверхности.

Таким образом, на начальных стадиях молекулярно-лучевой эпитаксии кремния на сапфире, присутствуют две основные ориентации — (001) параллельно поверхности ($\sim 60\%$) и (001) под углом 70.6° к поверхности ($\sim 40\%$).

Список литературы

- [1] L.T. Canham. Appl. Phys. Lett., **57** (10), 1046 (1990).
- [2] Д.А. Павлов, Е.В. Коротков, П.А. Шилиев, Н.О. Кривулин. Письма ЖТФ, **36** (12), 16 (2010).
- [3] Н.О. Кривулин, Д.А. Павлов, П.А. Шилиев. ФТП, **47** (12), 1621 (2013).
- [4] A. Portavoce, K. Hoummda, I. Berbezier, A. Ronda, D. Mangelinck. Appl. Phys. Lett., **100**, 164 105 (2012).
- [5] A.I. Nikiforov, V.A. Timofeev, S.A. Teys, A.K. Gutakovsky, O.P. Pchelyakov. Thin Sol. Films, **520**, 3319 (2012).
- [6] Д.А. Павлов, П.А. Шилиев, Н.О. Кривулин и др. Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Физика твердого тела, № 4 (1), 38 (2013).
- [7] П.Д. Браун, Ю.Ю. Логинов, У.М. Стоббс, К. Дж. Хамфрейс. ФТТ, **38** (1), 284 (1996).
- [8] M.S. Abrahams, V.L. Hutchison, G.R. Booker. Phys. Status Solidi A, **63** (1), K3 (1981).
- [9] M.E. Twig, E.D. Richmond, J.G. Pellegrino. Appl. Phys. Lett., **54** (18), 1766 (1989).
- [10] С.А. Денисов, С.П. Светлов, В.Ю. Чалков и др. Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Физика твердого тела, **1** (9), 185 (2006).
- [11] M.J. Hytch, E. Snoeck, R. Kitaas. Ultramicroscopy, **74**, 131 (1998).
- [12] M. Takeda, J. Suzuki. J. Opt. Soc. Am. A, **13**, 1495 (1996).

Редактор Л.В. Шаронова

The crystal structure of silicon-on-sapphire nanoisland

N.O. Krivulin, D.A. Pavlov, A.V. Pirogov, A.I. Bobrov

N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The paper presents the results of study of the crystal structure of nanoscale silicon islands on sapphire. It is shown that the main defects in silicon-on-sapphire nanoislands are twinning defects. As a result of such defects in the silicon islands on sapphire different crystallographic orientations are formed. At the initial stages of molecular-beam epitaxy of silicon on sapphire, there are two main orientations — (001) parallel to the surface and (001) at an angle of 70° to the surface.