

УДК 548.12

## НАНОТЕХНОЛОГИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**Ю.М. Смирнов, Ю.В. Кузнецова**

Тверской государственный университет,  
кафедра прикладной физики,  
кафедра магнетизма

Синтезированы и методами атомно–силовой микроскопии изучены некоторые наноструктуры на основе германия и кремния

Наноструктуры можно получать различными методами. В работе [1] кратко перечислены некоторые из них: химические реакции в твердом теле, механические методы, применение высоких технологий. Нами на начальном этапе исследований выбрана кристаллизация. В первой серии опытов слой германия напылялся на кремниевую монокристаллическую пластину. Использовалась установка ВУП–5М с вольфрамовым испарителем. Процесс осуществлялся в вакууме  $\sim 10^{-5}$  мм Нг, расчетная скорость осаждения германия  $\approx 50$  нм·с<sup>-1</sup>. Полученные структуры исследовались методами атомно–силовой микроскопии на установке Solver P47.

Вторая серия опытов заключалась в выращивании монокристалла германия в бездислокационном режиме. Из практики выращивания известно, что в этом случае выращивание кристаллов происходит при достаточно высоких переохлаждениях расплава (на уровне 2–4 К на фронте кристаллизации) [2].

Известно, что поверхность раздела фаз и фронт кристаллизации при росте по Чохральскому – неидентичные понятия. Фронт кристаллизации – поверхность, образуемая при отрыве монокристалла от расплава. Истинная поверхность раздела фаз маскируется слоем, образующимся при кристаллизации пленки расплава, удерживаемой на кристалле поверхностным натяжением. Фронт кристаллизации одного из бездислокационных монокристаллов показан на рис. 1.

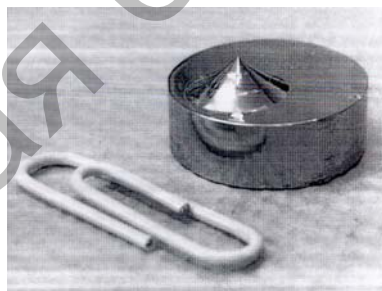


Рис. 1. Плоский фронт кристаллизации монокристалла германия

Высота прилипшего слоя определялась как теоретически, так и экспериментально. Для рассматриваемого случая она находилась в пределах 5–15 мкм. Слой кристаллизовался в условиях, отличающихся от кристаллизации основной части кристалла. Это обстоятельство

создавало возможность дополнительного возрастания переохлаждения. Структура слоя отличалась от структуры основной части монокристалла. Оптические и электронно-микроскопические исследования протравленной поверхности продольного шлифа одного из подобных монокристаллов показали наличие явной границы раздела между слоем и поверхностью раздела фаз. Кроме того, на легированных монокристаллах всегда имеются неоднородности распределения примеси ("полосы роста"). На слое наблюдались коллективизированные полосы с высотами порядка 0,2 мкм, что на порядок превышает величины таких полос в остальной части монокристалла. Это тоже подтверждает нестационарность процесса кристаллизации. Фронт кристаллизации бездислокационных монокристаллов германия обычно представляет собой плоскую грань (111). Классические теории кристаллизации считают механизм бездислокационного роста тангенциальным. Тем не менее, при детальном исследовании оказалось, что поверхность (111) является ступенчатой.

На рис. 2 схематично показан принцип действия атомно-силового микроскопа. Зонд подводится к поверхности образца.

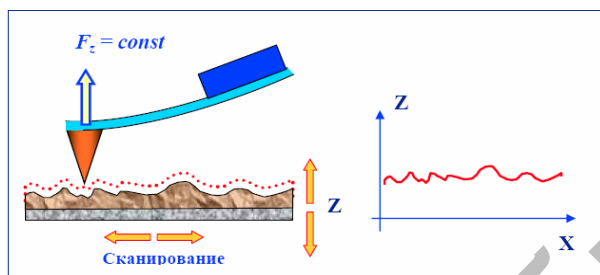


Рис. 2. Схема принципа работы атомно-силового микроскопа

Луч лазера, отражаясь от поверхности кантилевера, регистрируется четырьмя фотодиодами. Острие кантилевера может находиться в контакте с образцом (контактный режим), а может совершать колебания над поверхностью образца (полуcontactный или прерывисто-контактный режим). В нашей работе для получения рельефа поверхности в контактном режиме сканирования были применены методы постоянной силы и рассогласования. Таким образом, регистрация поверхности является опосредованной.

На рис. 3 показано изображение наноструктуры, полученное на металлографическом микроскопе Neophot-30. Она состоит из кластеров германия, кристаллизовавшихся на кремниевой подложке. Ориентационная роль подложки сказалась на облике кластеров. Он – плоскочерепитчатый.

Возможно, что сами кластеры имеют монокристаллическую структуру, но их границы (контакты) или мелкокристаллически, или аморфизированы. Довольно интенсивный режим напыления не позволял рассчитывать на получение монокристаллического слоя. Линейные размеры отдельных кластеров – от 20 до 40 мкм. Интересно,

что структура подобного вида наблюдалась при спекании кластеров оксида железа при твердотельной химической реакции [1].

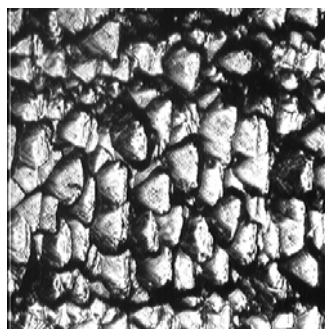


Рис. 3. Черепитчатая структура германий–кремний. Размеры поля зрения 300×300 мкм

Во второй серии опытов оказалось, что плоский в видимом диапазоне спектра фронт кристаллизации на самом деле состоит из ряда коллективизированных слоев. При анализе фронта в перпендикулярном к нему направлении слои являются серией круглых пластин, а их границы – концентрическими окружностями с центром, близким к геометрическому центру фронта кристаллизации. Участок поверхности в 45×45 мкм показан на рис. 4, а уступ между слои – на рис. 5. Высота уступа – порядка 1,0–1,5 мкм, а расстояния между границами слоев на периферии фронта 20–25 мкм. Но наиболее интересной морфологической особенностью оказались иглоподобные образования, видимые на рис. 5. На германии они, вероятно, обнаружены впервые. А на кремнии их характеристики изучены в работе [3], где они названы кремниевыми нанопроволоками. Следуя указанной работе, полученные нами структуры тоже можно назвать германиевыми нанопроволоками. Причиной образования этих игл на германии мы считаем высокий уровень переохлаждения расплава при кристаллизации на последней стадии процесса (при отрыве от расплава). Ранее нами замечались случаи образования сходных по форме иглообразующих макроструктур на фронте кристаллизации, перпендикулярных к поверхности фронта, т.е. с усредненным направлением кристаллизации  $\langle 111 \rangle$ , но состоящих из цепочек октаэдрических микрокристаллитов, ограненных гранями  $\{111\}$ .

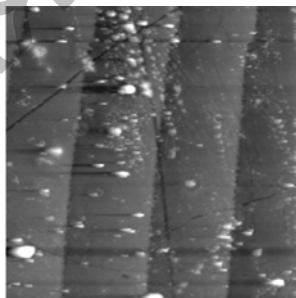


Рис. 4. АСМ–изображение участка фронта кристаллизации с границами концентрических слоев. Размеры поля зрения 45×45 мкм.

Атомно–силовая картина для германиевых нанопроволок представлена на рис. 6. Их условные поперечные близки к 5–6 нм, а высота – 20–30 нм. Интересно, что эти размеры сравнимы с размерами кремниевых нанопроволок по [3], что может свидетельствовать об одинаковом механизме формирования, связанном с уровнем переохлаждения.

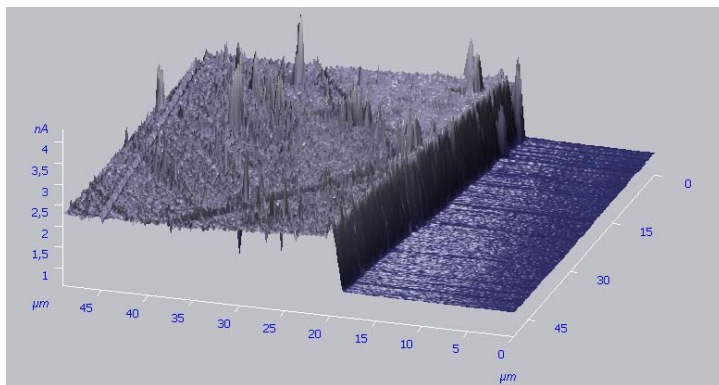


Рис. 5. Уступ между концентрическими слоями на фронте кристаллизации

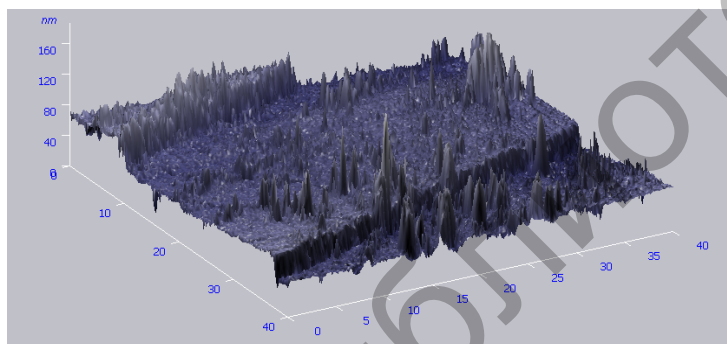


Рис. 6. 3D–АСМ–изображение уступа между концентрическими слоями на фронте кристаллизации

В данном случае представляется маловероятным, что эти образования являются аморфизированными. С учётом их местоположения и уровня переохлаждения можно предположить, что здесь мы имеем дело с монокристаллическими объектами (нановискерами).

Исследования выполнялись в рамках АВЦП "Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 гг.)".

#### Список литературы

1. Сузданов И.П. Нанотехнология: физико–химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: КомКнига, 2006.
2. Смирнов Ю.М. Переохлаждение при выращивании монокристаллов германия различными способами //Изв. АН СССР. Сер. физ. 1976. Т. 40, № 7. С.1344–1345.
3. Нежданов А.В., Макгин А.И., Разуваев А. //Поверхность. 2006. № 2. С.36–39.