

8. С.И. Платов С.И., Дема Р.Р., Амиров Р.Н. и др. Исследование и оценка загруженности главных приводов непрерывной группы клетей стана 2000 горячей прокатки в зависимости от сортамента выпускаемой продукции//Производство проката 2014. №2. С. 13 – 16.
9. С.И. Платов С.И., Дема Р.Р., Амиров Р.Н. и др. Разработка модели прогнозирования энерго-силовых параметров горячей прокатки при подаче смазочного материала на валки непрерывного широкополосного стана //Производство проката 2014. №4. С. 3 – 9.

ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛА ВИСМУТА

Марков О.И., Хрипунов Ю.В.

Орловский государственный университет, г. Орел, Россия

O.I.Markov@mail.ru, Phyrexia@yandex.ru

Актуальной проблемой современного материаловедения является создание высококачественных атомно-чистых поверхностей монокристаллов желаемой наноморфологии. При этом формирование микрорельефа поверхности часто сопровождается перестройкой ее электронного спектра и, соответственно, изменением электрических характеристик. Поэтому актуальными задачами современной физики поверхностных явлений являются изучение свойств чистых поверхностей монокристаллов и процессов формирования на них наноструктур, исследование основных атомных механизмов, связанных с самоорганизацией наноструктур на поверхности.

Процессы самоорганизации – это процессы, протекающие в условиях далеких от термодинамического равновесия. Процессы самоорганизации структур на поверхности монокристаллов имеют разную физическую природу, отличающихся по механизму и условиям протекания. Выявление характера самоорганизации сложных систем позволяет понять закономерности их поведения в неравновесных условиях. Образование низкоразмерных систем на поверхности монокристаллов и их свойства определяются сложным характером межатомного взаимодействия. При этом большое значение имеет выбор кристаллографической ориентации поверхности монокристалла, свойства которого определены особенностями строения решетки.

В качестве исследуемой поверхности использовалась плоскость скола монокристалла висмута, выращенного методом зонной перекристаллизации. Для предотвращения дополнительного дефектообразования использовался электроискровой способ вырезания из слитков образцов необходимых размеров. При подготовке поверхности образцы скалывались по плоскости совершенной спайности после замораживания в жидком азоте. Исследовались монокристаллы висмута плотностью дислокаций 10^9 см^{-2} . Дефекты распределены по поверхности скола приблизительно равномерно.

Для создания условий, далеких от равновесия необходимо сделать систему открытой, подводя энергию извне. С этой целью монокристалл висмута облучался потоком атомарного водорода (АВ). В опытах использовался водород чистотой 99,995%. Диссоциированный на радикалы водород с концентрацией активных частиц $10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$, получался в результате высокочастотного электрического разряда. Эксперименты проводились в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника. Образец монокристалла висмута обрабатывался атомарным водородом в течение часа.

Микротопография поверхности монокристаллов висмута до и после облучения АВ исследовалась с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа СММ-2000. До облучения поверхность кристалла была гладкой и однородной. Полученные изображения результатов обработки поверхности монокристалла висмута АВ с использованием программного обеспечения СММ-2000 в виде трехмерного представления приведены на ри-

сунке 1. Обнаружено, что в результате облучения АВ на поверхности монокристалла висмута формируются образования в виде выступов субмикронных и наноразмеров.

Хорошо видны образования одиночных и скоплений треугольных пирамид с длинами сторон основания 150–200 нм. Углы между сторонами основания пирамид составляют $\sim 60^\circ$, т.е. они направлены вдоль бинарных осей монокристалла. Угол наклона грани по отношению к плоскости скола монокристалла составляет $\sim 54^\circ$ – 56° , что соответствует наклону граней менее совершенной спайности монокристалла висмута.

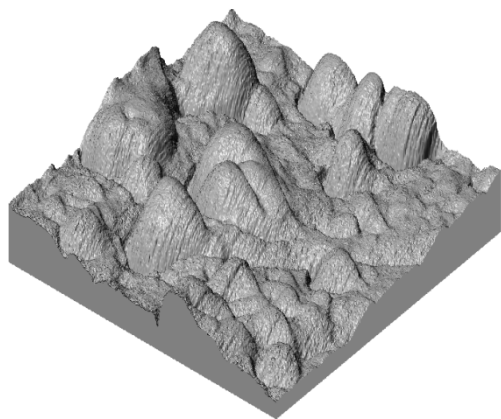


Рис.1. 3D-изображение структуры участка поверхности монокристалла висмута после облучения атомарным водородом.

Некоторые нарушения формы образования связаны с наличием притупления при вершине пирамиды. Округлые образования сложены несколькими неизолрованными пирамидами. Микровыступы расположены на фоне однородного нанорельефа мелких нановыступов. Плотность выступов всех размеров составляет $2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Между пирамидами видны треугольные ямки с четким ограничением дна и углом 60° между сторонами, являющиеся местами выхода дислокаций. Распределение образований по высотам имеет вид кривой с резким максимумом (рис.2) при 37,6 нм. Доля образований с размерами меньшими наиболее вероятных составляет 37%. Верхняя граница высот составляет 184 нм, что соответствует верхней границе распределения по диаметрам.

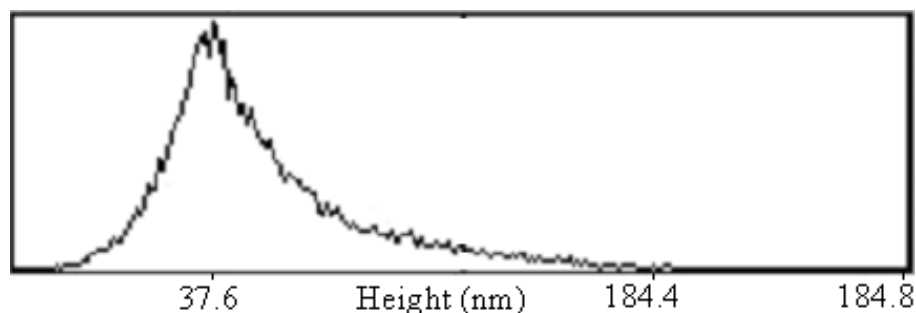


Рис.2. Распределение образований по высотам.

В данном докладе для объяснения возникновения микрорельефа предлагается модель самоорганизации. Причиной появления фигур роста является взаимодействие атомарного водорода с поверхностью монокристалла висмута. Одинаковый наклон микровыступов указывает на основные атомные механизмы, играющие роль в формировании границы раздела во время самоорганизации атомов на поверхностях (111). Физико-химические процессы, происходящие при взаимодействии поверхности твердых тел с активной газовой средой, сопровождаются активным энергообменом. При рекомбинации атомарного водорода на поверхности кристалла выделяется значительная энергия 4,48 эВ на один акт рекомбинации. Физическое распыление поверхностных атомов обрабатываемой пластины, осуществляется за счет кинетической энергии, когда энергия ионов превышает пороговую энергию распыления.

Энергия, выделяющаяся в результате образования молекулярного водорода в случае ее передачи поверхностным атомам, может стимулировать диффузионные процессы в приповерхностных областях полупроводниковых кристаллов, приводить к деградации и распылению кристаллов. Активированные атомы кристалла могут мигрировать вдоль поверхности. Распыленные атомы висмута, осаждаясь на поверхность кристалла, теряют од-

ну степень свободы, также могут мигрировать по поверхности. Поверхностная диффузия является структурно чувствительным процессом. Мигрирующие атомы будут встраиваться в решетку в положениях, наиболее энергетически выгодных. Благодаря этим процессам происходит модификация поверхности монокристалла. Известно, что существует прямая связь между скоростями роста и растворения кристалла. Поэтому образования на поверхности монокристалла напоминают фигуры роста висмута. Наноструктуры можно создавать либо «снизу» путем выращивания с помощью исходной нанозатравки, либо «сверху» путем дисперсии макроскопического кристалла. В том случае, когда наноструктуры образуются на поверхности кристалла, то возможны оба пути одновременно. На поверхности кристалла всегда найдутся нанозатравки, на которых будет агрегироваться нанокристалл. В связи с этим появляется задача поиска причин возникновения мест локализации процессов самоорганизации на поверхности облучаемого материала. Материал для строительства используется с соседних участков, которые подвергаются разрушению. Такими участками могут быть места выхода дислокаций на поверхность кристалла.

Поскольку рост происходит на поверхности монокристалла, то образования обладают структурными особенностями массивного кристалла. Согласно принципам Кюри и Неймана точечная группа габитуса нанообразования должна быть подгруппой симметрии кристалла. Поэтому форма нанообразований должна быть правильной треугольной пирамидой. Образование в виде треугольной пирамиды особенно устойчиво, что связано с ее топологией.

Таким образом, в результате исследования, проведено изучение воздействия атомарного водорода (H), получаемого путем диссоциации молекулярного водорода (H₂) высокочастотным разрядом, на топологию поверхности монокристалла висмута. Установлено, что при облучении АВ на сколе монокристалла висмута возникают пространственно самоорганизованные структурные элементы. Обнаружена иерархия структурных элементов на разных масштабных уровнях. Предполагается, что микроструктура, зарегистрированная после облучения АВ, тесно связана с дефектной структурой кристаллов (примерно одинаковая концентрация дислокаций на поверхности кристалла и образований в пересчете на см⁻²).

Обработка монокристаллов висмута в рабочей среде атомарного водорода открывает новые возможности модификации поверхностной структуры кристаллов. Применение самособирающихся и самоорганизующихся наноразмерных частиц в нанотехнологии открывает новые возможности для создания веществ и материалов с заданными физико-химическими свойствами. Такой подход открывает возможности для создания принципиально новых квантово-размерных систем в двухмерных структурах, примером которых являются самоорганизующиеся структуры при создании ансамблей низкоразмерных систем.

Список литературы

1. Марков, О.И. Самоорганизация структур на поверхности монокристалла висмута в атмосфере атомарного водорода [Текст] / О.И. Марков, Ю.В. Хрипунов, В.Ф. Харламов, Д.А. Коростелев / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2013. - №1. - С.76-79.
2. Марков, О.И. Влияние атомарного водорода на реструктуризацию поверхности скола монокристалла висмута [Текст] / О.И. Марков, Ю.В. Хрипунов / Труды МФТИ. - 2014. - Т. 6. - № 1. - С. 66–71.