

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Труды XXVII Международного симпозиума

13–16 марта 2023 г., Нижний Новгород

Том 2

Секция 3

Полупроводниковые наноструктуры: электронные, оптические свойства, методы формирования

Секция 5

Многослойная и кристаллическая рентгеновская оптика

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2023

Влияние Si и Be барьерных слоёв на термическую стабильность многослойных зеркал Cr/Sc

А. В. Соломонов*, С. С. Сахоненков, Е. О. Филатова

Санкт-Петербургский государственный университет, ул. Ульяновская, д. 1, Петродворец, Санкт-Петербург, 198504
*asolomonov78@gmail.com

Установлено, что система $\text{Si}/[\text{Cr}/\text{Sc}]_{200}$ не является термически стабильной при температурах отжига выше 250 °С. По мере повышения температуры прослеживается дополнительное перемешивание слоев Cr и Sc. При температуре отжига 450 °С наблюдается полное перемешивание слоев, сопровождающееся текстурированием образца в направлении $\text{Sc}[001]$. Введение барьерного слоя Be в систему Cr/Sc ограничивает перемешивание слоев хрома и скандия в процессе отжига, но только до температуры 350 °С. При температуре 450 °С прослеживается деградация структуры: происходит полное перемешивание слоев с поверхностной сегрегацией скандия. Барьерный слой Be предотвращает рост зерен и текстурирование в системе, но не препятствует процессу кристаллизации. Слой Si, введенный между слоями скандия и хрома, ограничивает их перемешивание, сохраняя слоистость структуры и ее аморфность в диапазоне изученных температур (до 450 °С).

Введение

Предложенная более 25 лет назад как наиболее перспективная структура для диапазона «водного окна» многослойная структура Cr/Sc теоретически обладает высоким коэффициентом отражения, достигающим до 55% (на длине волны 3,12 нм) для почти нормального падения, что позволяет эффективно использовать ее в рентгеновской микроскопии, в частности, в микроскопии биологических объектов и в синхротронных приложениях. В результате воздействия высоких температур и сильного потока излучения для многослойных зеркал (МЗ) Cr/Sc чрезвычайно важна устойчивость их оптических параметров к процессам нагрева. В результате нагрева возможно нарушение структурной целостности МЗ из-за тепловой диффузии, что приводит к ухудшению их оптических характеристик [1]. Введение барьерного слоя может заметно улучшить термическую стабильность многослойных зеркал.

Методика эксперимента

Были изучены многослойные структуры $[\text{Cr}/\text{Sc}]_{200}$ с барьерными слоями и без них (Si и Be), синтезированные методом магнетронного распыления. Номинальная толщина слоев Cr и Sc составляла 0,7 и 0,8 нм, соответственно, толщина барьерного слоя 0,1 нм. Для определения химического состава образцов использовался метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Также в исследовании использовались методы рентгеновской рефлектометрии (XRR), рентгеновской дифракции (XRD) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) для комплексного понимания процессов, происходящих в структуре до и после отжига.

Результаты и обсуждение

Анализ данных, полученных методом ПЭМ, указывает на частичное перемешивание слоев Cr и Sc в неотожженной системе $\text{Si}/[\text{Cr}/\text{Sc}]_{200}$. Кроме того, система без барьерных слоев обладает минимальным отражением. Согласно исследованиям, проведенным методом РФЭС, отжиг этой системы усиливает перемешивание слоев. Анализ фотоэлектронных спектров Sc-2р и Cr-2р обнаруживает увеличение вклада ме-

таллических скандия и хрома с ростом температуры. Однако при температуре 450 °С эта закономерность нарушается резким увеличением интенсивности пиков Sc-2р, и резким уменьшением вклада хрома. Это свидетельствует о поверхностной сегрегации скандия в образце, нагретом до температуры 450 °С, что является следствием дополнительного перемешивания слоев Cr и Sc.

Исследования, проведенные методом рентгеновской дифракции (рис. 1), подтвердили сделанное предположение. Установлено укрупнение зерна в образце, сопровождающееся его текстурированием с предпочтительной ориентацией Sc [001] перпендикулярно подложке. Кривая отражения образца, отожженного при 450 °С, полученная методом рентгеновской рефлектометрии (рис. 2, а), вообще не содержит брэгговского пика, что также свидетельствует о полном перемешивании слоев Cr и Sc. Стоит отметить, что процесс кристаллизации является следствием полного перемешивания слоев в образце.

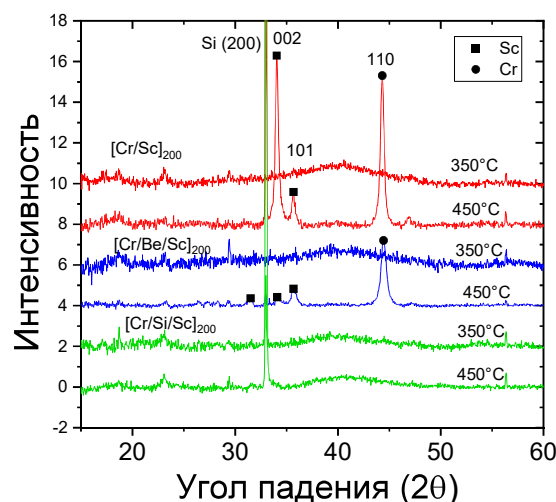


Рис. 1. Картины рентгеновской дифракции многослойных зеркал $\text{Si}/[\text{Cr}/\text{Sc}]_{200}$, $\text{Si}/[\text{Cr}/\text{Be}/\text{Sc}]_{200}$ и $\text{Si}/[\text{Cr}/\text{Si}/\text{Sc}]_{200}$, отожженных при 350 и 450 °С

Введение в структуру Be в роли барьерного слоя ограничивает перемешивание слоев вплоть до 350 °С, однако при отжиге до 450 °С отмечается сегрегация атомов Cr на поверхность образца. Дифракционные исследования образца, отожженного до 450 °С (рис. 1),

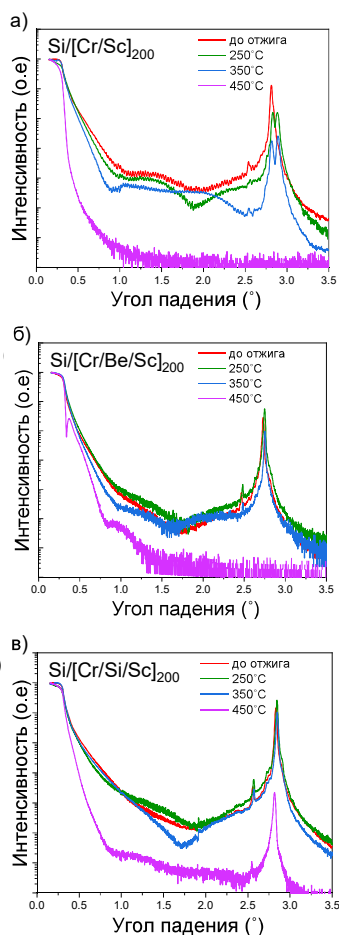


Рис. 2. Кривые рентгеновского отражения, полученные для многослойных структур (а) $\text{Si}/[\text{Cr}/\text{Sc}]_{200}$, (б) $\text{Si}/[\text{Cr}/\text{Be}/\text{Sc}]_{200}$ и (в) $\text{Si}/[\text{Cr}/\text{Si}/\text{Sc}]_{200}$ до и после отжига при 250 °С, 350 °С и 450 °С.

обнаруживают дифракционные пики, указывающие на образование кристаллитов в объеме исследуемой системы. Обратившись к данным XRR (рис. 2, б), можно констатировать лишь незначительное изменение интенсивности брэгговского пика в системе, отожженной до 350 °С. Однако при повышении температуры до 450 °С можно наблюдать отсутствие брэгговского пика, как и в случае системы без прослойки, что означает разрушение структуры многослойного рентгеновского зеркала: полное перемешивание слоёв с последующей кристаллизацией.

Анализ Sc-2р и Cr-2р фотоэлектронных спектров системы с Si барьерным слоем не обнаруживает существенных изменений в форме спектров в широком диапазоне температур, вплоть до 450 °С. Данные XRD (см. рис. 1) также указывают на отсутствие дифракционных пиков в спектрах, измеренных в широком диапазоне температур, что подтверждает сохранение аморфности структуры. На кривых рентгеновского отражения образца, отожженного до 450 °С (рис. 2, в), наблюдается брэгговский пик, что свидетельствует о том, что система сохраняет свою многослойность. На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что тонкий слой кремния способен предотвратить полное перемешивание слоев.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 19-72-20125.

Литература

1. N. Ghafoor et al. // Journal of Materials Research. **79–95**. 10944087 (2009).