

Управление составом и протяженностью межфазных границ в многослойных рентгеновских зеркалах с целью повышения их отражательной способности

Е. О. Филатова^{1,*}, С. С. Сахоненков¹, А. У. Гайсин¹, В. Н. Полковников²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, ул. Ульяновская, д. 1, Петродворец, Санкт-Петербург, 198504

²Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 603087
*elenaofilatova@mail.ru

Реализован комплексный подход к разделному определению параметров переходных слоев в многослойных зеркалах (шероховатости, химического состава и протяженности) путем совместного применения рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и рентгеновской рефлектометрии, а также других вспомогательных методов. Предложена методология исследований, учитывающая все особенности систем, которая позволила достоверно определить состав переходных областей, образующихся в процессе нанесения слоев и дать им теоретическое обоснование. Установлено полное перемешивание соседних слоев в короткопериодных многослойных зеркалах. Предложены пути решения данной проблемы. Установлены оптимальные конфигурации исследованных многослойных зеркал, обеспечивающие их максимальную отражательную способность.

Введение

Основным фактором, приводящим к понижению экспериментальных значений коэффициентов отражения многослойных зеркал (МЗ), является снижение оптического контраста между слоями в результате формирования переходного слоя, обусловленного межслоевой шероховатостью и/или перемешиванием материалов слоев с образованием химических соединений или взаимодиффузией. В различных многослойных структурах протяженность переходного слоя может составлять от десятых до единиц нанометров. Особенно критичным формирование переходных слоев становится в короткопериодных зеркалах (период $d < 3$ нм), где их протяженность может быть сопоставима с толщиной всего слоя. Для уменьшения протяженности переходных слоев применяют различные методики, среди которых можно выделить ионное ассистирование, нитридизацию и использование тонких барьерных слоев на границах раздела. Именно методика барьерных слоев была применена к многослойным структурам на основе пар материалов Mo/Be, W/Be, Cr/Be, Al/Be, Ru/Sr, Cr/Ti и Cr/Sc с целью управления их отражательными характеристиками.

Поскольку рассмотренные МЗ являются перспективными оптическими элементами для космического, литографического и синхротронного приложений, для них чрезвычайно важна устойчивость оптических параметров к процессам нагрева: используемые зеркала подвергаются воздействию высоких температур и сильного потока излучения.

Основным методом исследования является метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), общепризнанный метод элементного и химического анализа веществ, но до недавнего времени практически не использовавшийся при анализе строения многослойных структур.

В то же время, как показали проведенные исследования, он является весьма эффективным методом, а при использовании дополнительных методов исследования, таких как XRR, XRD и ПЭМ, позволяет получить полную информацию о многослойной структуре.

Детали эксперимента

Все МЗ были синтезированы методом магнетронного распыления. Анализ химического состава слоев, составляющих многослойные покрытия, проводился с использованием РФЭС на 4 различных установках: лабораторной установке Escalab 250 Xi ресурсного центра «Физические методы исследования поверхности» научного парка СПбГУ; лабораторном модуле ЭСХА экспериментальной станции НаноФЭС Курчатовского специализированного источника синхротронного излучения «КИСИ-Курчатов»; станции P22 NAXPES, установленной на канале вывода синхротронного излучения P22 накопительного кольца PETRA-III; станции RGL-PES, установленной на российско-германском канале вывода синхротронного излучения накопительного кольца BESSY-II. Метрологические исследования МЗ проводились на станции «Reflectometer», установленной на канале вывода синхротронного излучения «Optics beamline PM-1» (BESSY-II).

Эксперименты с использованием просвечивающей электронной микроскопии проведены на микроскопе Zeiss Libra 200FE ресурсного центра «Нанотехнологии» СПбГУ. Рентгеновская рефлектометрия (XRR) и рентгеновская дифракция скользящего падения (GIXRD) были реализованы на приборе Bruker «D8 DISCOVER».

Результаты и обсуждение

Разноплановое изучение узкополосного зеркала Si/[Mo/Be]₁₁₀, рассчитанного на длину волны $\approx 11,3$ нм, позволило продвинуться в область жесткой ультрафиолетовой литографии, что представляет огромный интерес при создании объективов для проекционной литографии. Определена конфигурация многослойного зеркала Si/[Mo/B₄C/Be]₁₁₀, обеспечивающая наибольший пиковый коэффициент отражения и термическую стабильность зеркала до 300 °С, таким образом, расширяется область рабочих температур структуры.

Изучение короткопериодных структур W(Cr)/Be и Cr/Sc позволило выявить полное перемешивание соседних слоев, поэтому была применена техника

барьерных слоев. Установлено, что осаждение Si как на поверхность Ве, так и на поверхность W несколько уменьшает шероховатость поверхности. Введение тонкого барьерного слоя В₄С привело к небольшому ограничению перемешивания исходных слоев в результате формирования борида и/или карбида W, что позволило увеличить отражательную способность МЗ в 1.6 раза независимо от порядка осаждения барьерного слоя.

Исследование термической стабильности МЗ Cr/Sc с барьерными слоями и без них обнаружило поверхностную сегрегацию скандия в случае отжига при температуре 450 °С, что является следствием дополнительного перемешивания слоев Cr и Sc в процессе отжига. По мере повышения температуры происходит укрупнение зерна в структуре, сопровождающееся ее текстурированием в направлении Sc[001]. Нанесение Ве барьерного слоя на хром в структуре Cr/Sc приводит к большей отражательной способности системы [Cr/Ве/Sc]₂₀₀ (~53%) по сравнению с инверсной системой [Sc/Ве/Cr]₂₀₀ (~44%). В целом введение Ве барьерного слоя предотвращает текстурирование в системе по мере повышения температуры отжига, но не препятствует процессу кристаллизации при высоких температурах. Введение Si барьерного слоя позволяет получить еще большее отражение (~70%) и позволяет ограничить перемешивание Cr и Sc, сохраняя слоистость структуры и ее аморфность в диапазоне рассмотренных температур (до 450 °С).

В МЗ на основе пары материалов Ru и Sr (рабочий диапазон длин волн 9–12 нм) установлено сильное перемешивание материалов слоев Sr и Ru. Использование слоев В₄С/Ru с номинальными толщинами 0.4 нм и 1.9–2.5 нм соответственно позволило

вблизи поверхности ограничить окисление слоев стронция и существенно улучшить временную стабильность системы.

Установлено, что высокотемпературный отжиг МЗ Ti/Cr с $d = 4.34$ нм приводит к образованию в многослойной структуре кристаллитов чистого титана и TiCr₂. При отжиге до температуры 500 °С в структуре появляются внутренние напряжения. Отжиг до 700 °С приводит к полному перемешиванию многослойного покрытия с подложкой с образованием CrSi₂. Для предотвращения образования соединения Cr-Ti можно использовать нитридизацию слоев, а также, учитывая область длин волн, в которой предполагается использование МЗ, оксидирование.

Для МЗ Al/Ве достигнут пиковый коэффициент отражения 43% при $\lambda = 17.14$ нм, при теоретически возможном ~70%. Нанесение барьерного слоя Si на слой Ве позволило увеличить коэффициент отражения с 43% до 60% при $\Delta\lambda = 0.4$ нм, что является рекордом на данный момент. Исследование термической стабильности МЗ Ве/Al указывает на усиление диффузии бериллия к поверхности начиная с 200 °С. При этом оксиды Ве и Al в качестве поверхностных защитных слоев остаются стабильными вплоть до температуры 500 °С. Нанесение барьерного слоя Si на Ве повышает термостойкость системы. Нанесение слоя кремния на слой алюминия приводит к образованию двух направлений роста кристаллитов алюминия, что должно приводить к росту величины шероховатости на границах.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-72-20125.