

Микроструктура переходных границ в многослойных Mo/Be-системах

© Р.М. Смертин,¹ В.Н. Полковников,¹ Н.Н. Салащенко,¹ Н.И. Чхало,¹ П.А. Юнин,¹ А.Л. Тригуб²

¹ Институт физики микроструктур РАН,
607680 Нижний Новгород, Россия

² Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия
e-mail: smertin_ruslan@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 22 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 22 апреля 2020 г.

Принято к публикации 22 апреля 2020 г.

Методами рентгеновской рефлекто- и дифрактометрии и EXAFS-спектроскопии исследована микроструктура Mo/Be многослойных периодических систем. Установлено, что в Mo/Be-системе на границах образуются перемешанные зоны разного состава. На границе Mo-на-Be — перемешанная зона, схожая по составу с MoBe₂₂, а на границе Be-на-Mo — с MoBe₂. В результате термического отжига в течение 1 h структура переходных границ в многослойной системе остается стабильной. При дальнейшем отжиге происходят диффузионные процессы, которые приводят к образованию другого соединения на границе раздела — MoBe₂ вместо MoBe₂₂, однако период структуры при этом остается неизменным. Такое поведение объясняет рост коэффициента отражения Mo/Be-зеркал после отжига в течение 1 h и дальнейшее падение коэффициента отражения при большем времени отжига.

Ключевые слова: многослойные зеркала, EXAFS-спектроскопия, межслоевые области, термическая стабильность, рентгеновское излучение.

DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49979.142-20

Введение

Интерес к многослойным зеркалам (МЗ) на основе Mo/Be пробудился в 1990-х годах и был связан с проекционной литографией в ВУФ-диапазоне [1–4]. Выбор осуществлялся между рабочими длинами волн 11.2 и 13.5 nm. В этот период уделялось большое внимание изучению зеркал Mo/Be, оптимизированных на окрестность длины волны 11.2 nm [5,6]. При том, что на длине волны 11.3 nm получено рекордное пиковое значение коэффициента отражения 70.2% [6], приоритет был отдан литографии с рабочей длиной волны 13.5 nm и оптике на основе кремния. Следует отметить, что зеркала Mo/Si обладали в полтора раза более широкой спектральной шириной пика отражения на половине высоты при чуть меньшем пиковом значении коэффициента отражения.

В 2000-х годах продолжались работы по изучению возможностей литографии с рабочей длиной волны короче 13.5 nm. Достаточно развитая на сегодняшний день технология 13.5 nm позволяет без возрастающей сложности достигать разрешения порядка 10 nm [7]. Дальнейшее снижение этой величины связано с рядом технических сложностей. В то же время переход к более короткой длине волны (11 nm) автоматически на 20% повышает разрешение проекционного объектива при фактическом сохранении принципиальных составляющих отработанного технологического процесса. Дополнительный плюс связан с возможностью использования газовой мишени (ксеноновая плазма) взамен оптимальной для 13.5 nm

оловянной. Такая мишень не дает тех загрязнений оптики, источником которых служит олово.

Оценки показывают, что пропускная способность системы из 10 зеркал, оптимизированных на $\lambda = 11.2$ nm (Mo/Be, Ru/Be), может быть вдвое выше, чем такая же величина для зеркал Mo/Si на 13.5 nm, что с учетом коэффициента конверсии соответствующих источников излучения говорит о предпочтительности развития технологии литографии с рабочей длиной волны 11.2 nm [8]. Однако разработке многозеркальных проекционных схем должно предшествовать изучение возможностей создания высокоэффективных зеркал нормального падения, оптимизированных на $\lambda = 11.2$ nm.

Прекращенные в конце 1990-х годов работы по изучению свойств бериллий-содержащих МЗ были возобновлены в 2014 г. в ИФМ РАН, где создана уникальная бериллиевая лаборатория [9]. В ходе исследований на длине волны 11.3 nm для МЗ на основе Mo/Be был получен коэффициент отражения 70.25% [10], что совпадает с результатами, ранее опубликованными в [7].

Следует отметить, что теоретическим пределом для Mo/Be на этой длине волны является 76%. Основной причиной несоответствия теоретического предела достигнутому на практике значениям являются уширенные переходные области на границах раздела между материалами структуры. Внедрение методики барьерных слоев [8] формально не привело к улучшению отражательной способности МЗ. Однако в этом исследовании было показано, что кремниевый буферный слой приводит к

сглаживающему эффекту, т. е. к уменьшению величины межслоевой шероховатости.

Изучение этого эффекта было продолжено на примере зеркал Mo/Be/Si, оптимизированных на окрестность длины волны 13.5 nm. Экспериментально достигнуты значения пикового коэффициента отражения $R = 71.9\%$ на 13.5 nm и 72.8% на 12.9 nm [11]. Полуширина спектральной кривой отражения на 13.5 nm составила около 0.52 nm, что практически не уступает классическим Mo/Si-зеркалам, полуширина которых составляет около 0.54 nm.

Важным преимуществом МЗ Mo/Be над Mo/Si является их высокая термическая стойкость. В работах [12,13] показано, что вплоть до температур 350°C МЗ Mo/Be сохраняют отражательные свойства. Более того, при определенных режимах отжига наблюдается некоторое увеличение коэффициента отражения (порядка абсолютного 1%).

Тем не менее и в данном случае теоретический предел отражения не достигнут. Проблема связана не только с наличием геометрической шероховатости на границах раздела, но также с возможным образованием в пограничных областях химических соединений материалов, силицидов и бериллидов. И если вопрос образования силицидов молибдена уже изучался [14–17], то изучение бериллидов и вообще структуры границ в тонкопленочных периодических структурах на основе Mo/Be практически не проводилось.

Единственной работой, затрагивающей вопрос структуры границ в многослойных структурах Mo/Be, является [18]. Здесь методами фотоэлектронной спектроскопии была исследована микроструктура переходных границ в системе Mo/Be с разным количеством периодов — от одного до ста. При этом период структуры и соотношение толщин слоев были близки к значениям, обеспечивающим максимальное значение коэффициента отражения в окрестности длины волны 11.4 nm. Было установлено образование разных соединений Mo и Be на разных границах. Так, на границе Mo-на-Be образуется перемешанная зона, моделируемая как $\text{MoBe}_{1.0-1.6}$, а на границе Be-на-Mo — как $\text{MoBe}_{4.0-5.0}$. Однако, исходя из данных фазовой диаграммы Mo–Be-системы [19,20], таких соединений нет. Данные [20] объясняются тем, что в ходе расчета учитывалось среднее количество атомов, находящихся в переходной области. Толщины соединений, исходя из моделирования, составляют по 1 nm на каждой границе. Однако, исходя из данных [10], ширины переходных границ имеют другие значения. Граница Mo-на-Be порядка 0.7 nm, Be-на-Mo — порядка 0.35 nm.

Эти противоречия, а также важность установления подробностей эволюции структуры пограничных областей при отжиге Mo/Be, делают необходимыми дальнейшие исследования. Настоящая работа посвящена изучению структуры пограничных областей МЗ Mo/Be (отожженных и неотжженных) методами рефлектометрии, дифрактометрии и EXAFS-спектроскопии.

1. Методика эксперимента

МЗ Mo/Be изготавливались методом магнетронного напыления при постоянном токе ($I(\text{Mo}) = 0.2 \text{ A}$, $I(\text{Be}) = 0.9 \text{ A}$, напряжения около 300 V) в среде Ag при давлении газа $\sim 0.2 \text{ Pa}$. Зеркала осаждались на гладкие (величина среднеквадратичной микрошероховатости $\sim 0.2 \text{ nm}$) кремниевые пластины. Структурные параметры многослойных систем определялись с использованием расширенной модели по данным малоугловой рентгеновской рефлектометрии (длина волны 0.154 nm). Подробнее о методах синтеза и восстановления параметров структур по данным рентгеновской дифракции можно прочитать в [9,21].

В ходе экспериментов изучались периодические структуры Mo/Be различных типов. Толщины слоев Mo в них составляли: ~ 0.2 , ~ 0.6 , ~ 1 и $\sim 2.3 \text{ nm}$. Количество периодов выбиралось таким, чтобы общая толщина Mo в структурах составляла $\sim 100 \text{ nm}$. Толщина слоев Be во всех структурах оставалась постоянной и составляла $\sim 3.5 \text{ nm}$. Также для исследований была изготовлена пленка Mo толщиной $\sim 100 \text{ nm}$. Точность определения толщины составляет 1%.

Структуры каждого типа изготавливались в количестве трех экземпляров. Одна сохранялась в исходном виде. Две другие подвергались отжигу в течение 1 и 4 h соответственно. Отжиг структур проводился в вакуумной печи при давлении $6 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ и при $T = 280^\circ\text{C}$. Эта величина соответствует значению, при котором происходит увеличение коэффициента отражения при отжиге в течение 1 h [12]. Температура контролировалась термопарой хромель-алюмель с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$. Время нагрева и охлаждения не учитывалось.

Для определения степени кристалличности слоев и наличия соединений бериллия и молибдена (бериллидов молибдена) в Mo/Be-структурах применялась широкоугольная рентгеновская дифракция с использованием дифрактометра Bruker D8 Discover. Измерение спектров XANES и EXAFS вблизи K -края поглощения Mo выполнено на станции СТМ Курчатовского центра синхротронного излучения. Энергетическое разрешение $\Delta E/E \sim 2E - 4$, размер пучка на образце $3 \times 1 \text{ mm}$, монокроматор — прорезной монокристалл кремния с отражающей поверхностью (220), для детектирования флуоресцентного излучения использовался SDD-детектор АМРТЕК. Образец стоял перпендикулярно излучению. Излучение проходит сквозь исследуемый образец. После образца излучение проходит ионизационную камеру, эталон и следующую ионизационную камеру. В качестве эталона использовался прессованный порошок чистого Mo. Спектр поглощения исследуемого образца определяется по выходу флуоресценции, а эталона — исходя из разницы излучения в двух ионизационных камерах до и после прохождения эталона. Подробнее о схеме и проведении EXAFS-эксперимента можно найти в [22,23].

Определение структурных параметров из спектров EXAFS выполнено путем подгонки расчетных спектров

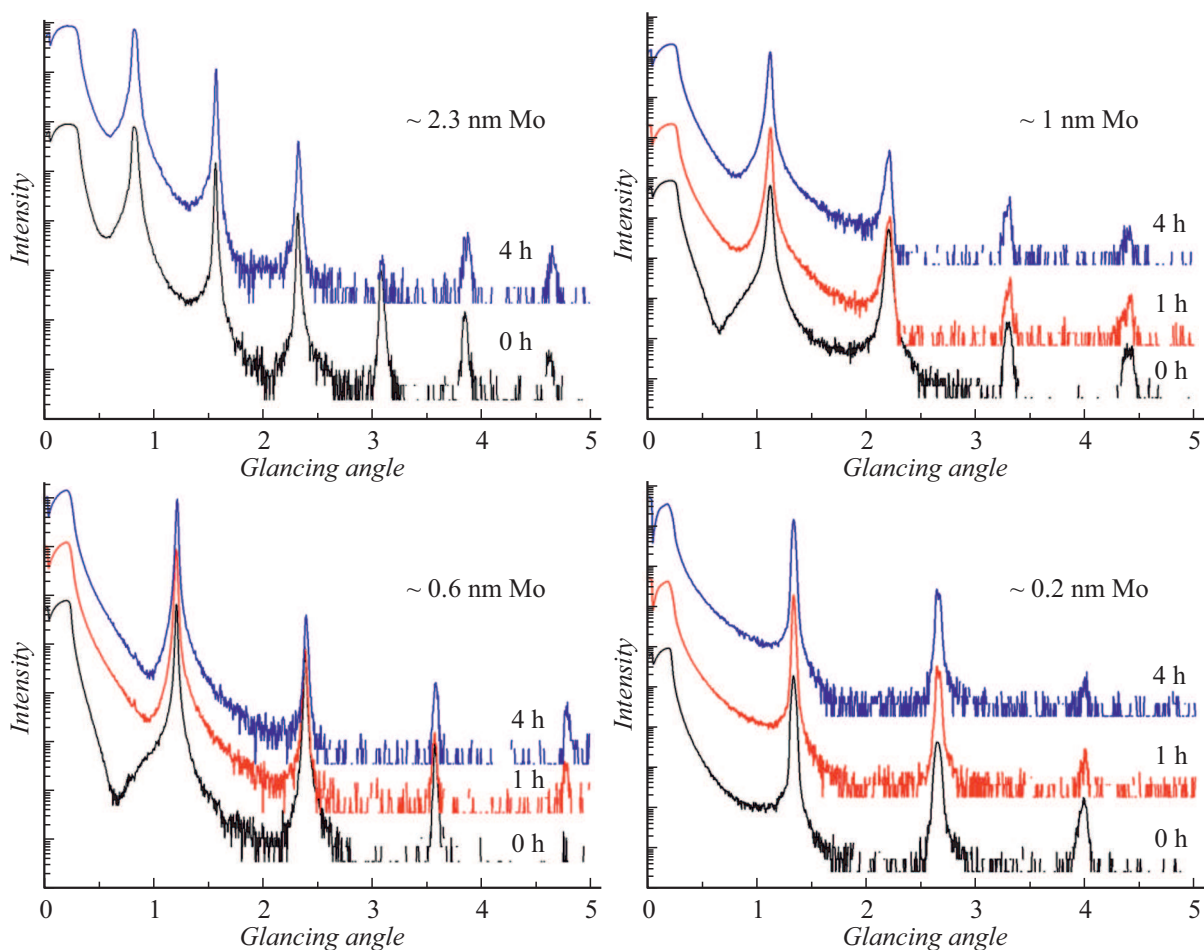


Рис. 1. Малоугловая рентгеновская рефлектометрия ($\lambda = 0.154$ nm) от многослойных периодических систем Mo/Be с разными толщинами Mo в структуре в исходном состоянии и после отжига.

к экспериментальным. Для этого использовался пакет программ IFFEFIT [24]. После стандартной процедуры вычитания предкраевой фоновой кривой, нормализации спектра и выделения осциллирующей части спектра, путем варьирования межатомных расстояний, координационных чисел и параметров Дебая-Валлера выполнена подгонка расчетного спектра к экспериментальному. Параметры, необходимые для расчета EXAFS-спектра (длина свободного пробега фотоэлектрона, амплитуда рассеяния и величина фазового сдвига при рассеянии фотоэлектрона на атомах окружения)? рассчитаны программой FEFF6 [25].

Теоретические расчеты XANES-спектров, измеренных на *K*-крае Mo, выполнены методом конечных разностей (FDM), как это реализовано в программе FDMNES [26,27]. Выполнен самосогласованный расчет электронной плотности с обменно-корреляционным потенциалом в приближении локальной плотности [28]. Плотность электронных состояний возбужденного атома рассчитана с учетом полной экранировки дырочного состояния. Расчет выполнен для атомных кластеров радиуса 5 Å, построенных на основании кристаллогра-

фических данных для фаз MoBe₂, MoBe₁₂ и MoBe₂₂ [29]. Расчет спектра поглощения проводится путем свертки плотности незанятых электронных состояний с кривой Лоренца. При этом наилучшее согласие расчета с экспериментом достигается, когда ширина кривой Лоренца зависит от энергии, как арктангенс [30].

2. Экспериментальные результаты

По результатам малоугловой рентгеновской рефлектометрии были определены периоды многослойных структур и соотношения толщин материалов. Из рис. 1 видно, что многослойные структуры Mo/Be обладают хорошей периодичностью даже при толщинах слоев Mo ~ 0.2 nm. Периоды всех структур не меняются при отжиге. Это говорит о высокой термической стойкости многослойной системы Mo/Be.

Как видно из XANES- и EXAFS-спектров (рис. 2), положение осцилляций и положение края поглощения у пленки Mo и эталона Mo совпадают, однако интенсивность пиков в спектрах и в функции радиального

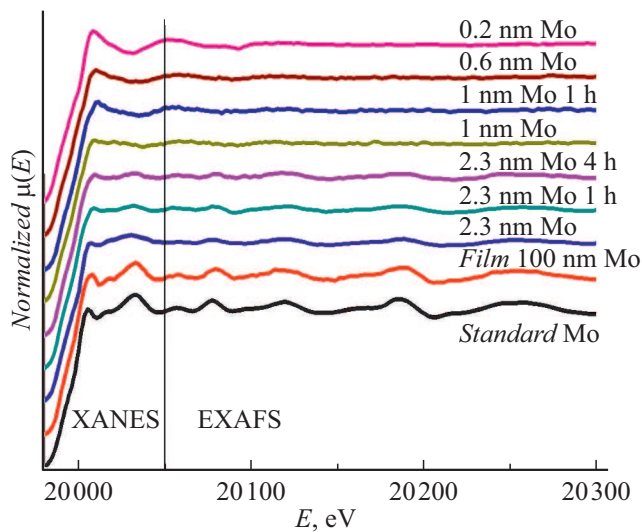


Рис. 2. XANES- и EXAFS-спектры многослойных периодических систем Mo/Be с разной толщиной слоя Mo (0,2, 0,6, 1 и ~ 2,3 nm Mo) в исходном состоянии и после отжига, тонкой пленки Mo, толщиной 100 nm и эталона Mo.

распределения (рис. 3) ниже, чем у эталона, что говорит о наличии дефектов в пленке Mo.

Спектры от многослойной системы Mo/Be с толщиной Mo ~ 2,3 nm имеют близкие положения осцилляций с таковыми у пленки Mo и эталона (рис. 2, 3, *a*). Положение края поглощения смещено на 0,7 eV относительно эталонного значения, что указывает на наличие дополнительной фазы в Mo-слое. Положение пиков в функции радиального распределения (рис. 3, *b*) близко к положению таковых в пленке, а после термическо-

го отжига смещается в сторону эталонного Mo. Пик, описывающий первую координационную сферу, имеет несимметричный вид с плечом, расположенным со стороны меньших расстояний. Как видно из рис. 3, *b*, аналогичная асимметрия пика наблюдается и в пленке Mo, и в эталоне Mo. При разложении пика, описывающего первую координационную сферу, на две компоненты было установлено, что второй пик, характеризующий левое плечо, имеет интенсивность ниже фонового значения, что не позволяет уверенно говорить о присутствии бериллидной фазы в системе Mo/Be с толщиной Mo в структуре ~ 2,3 nm.

Анализ XANES- и EXAFS-спектров многослойных систем Mo/Be с толщинами слоев Mo ~ 1, ~ 0,6 и ~ 0,2 nm обнаруживает несоответствие XANES-структуры спектру как эталонного Mo, так и толстой пленки Mo, а также отсутствие осцилляций в EXAFS-области (рис. 2). В спектрах XANES систем Mo/Be наблюдается сдвиг края поглощения в сторону меньших энергий относительно эталонного Mo. Сдвиг тем сильнее, чем меньше толщина Mo-слоя: 1 eV для системы Mo/Be с толщиной Mo ~ 1 nm, 1,1 eV для ~ 0,6 nm Mo и 2,1 eV для ~ 0,2 nm Mo. Исходя из обнаруженного сдвига края поглощения в XANES-спектрах систем Mo/Be, можно предположить образование в них новой фазы — соединения Mo с Be. Однако сопоставление положения краев поглощения в спектрах XANES образцов с разной толщиной Mo в структуре и теоретически рассчитанных спектров бериллидов (рис. 4) указывает на то, что спектры образцов с толщинами слоя Mo ~ 0,6 nm (рис. 4, *b*) и ~ 1 nm (рис. 4, *a*) не соответствуют спектрам ни одного из теоретически рассчитанных бериллидов как в исходном состоянии, так и после отжига.

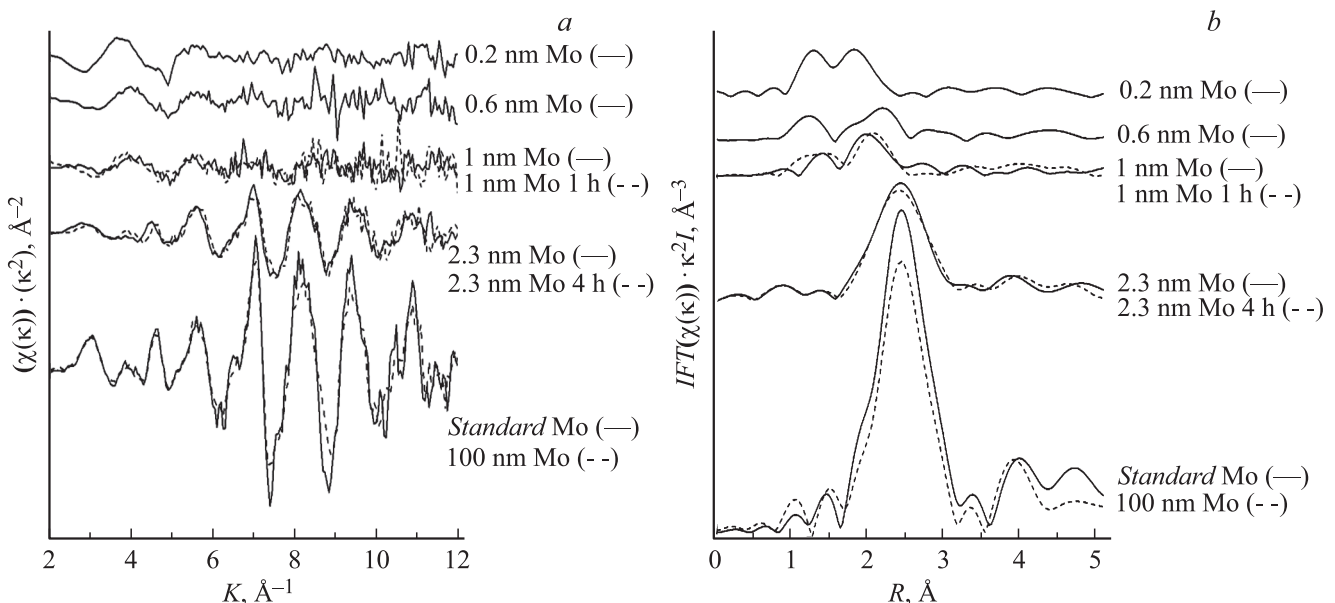


Рис. 3. Спектры EXAFS (*a*) и функция радиального распределения атомов (*b*) в многослойных периодических системах Mo/Be (0,2, 0,6, 1 и ~ 2,3 nm Mo) в исходном состоянии и после отжига, тонкой пленки Mo, толщиной 100 nm и эталона Mo.

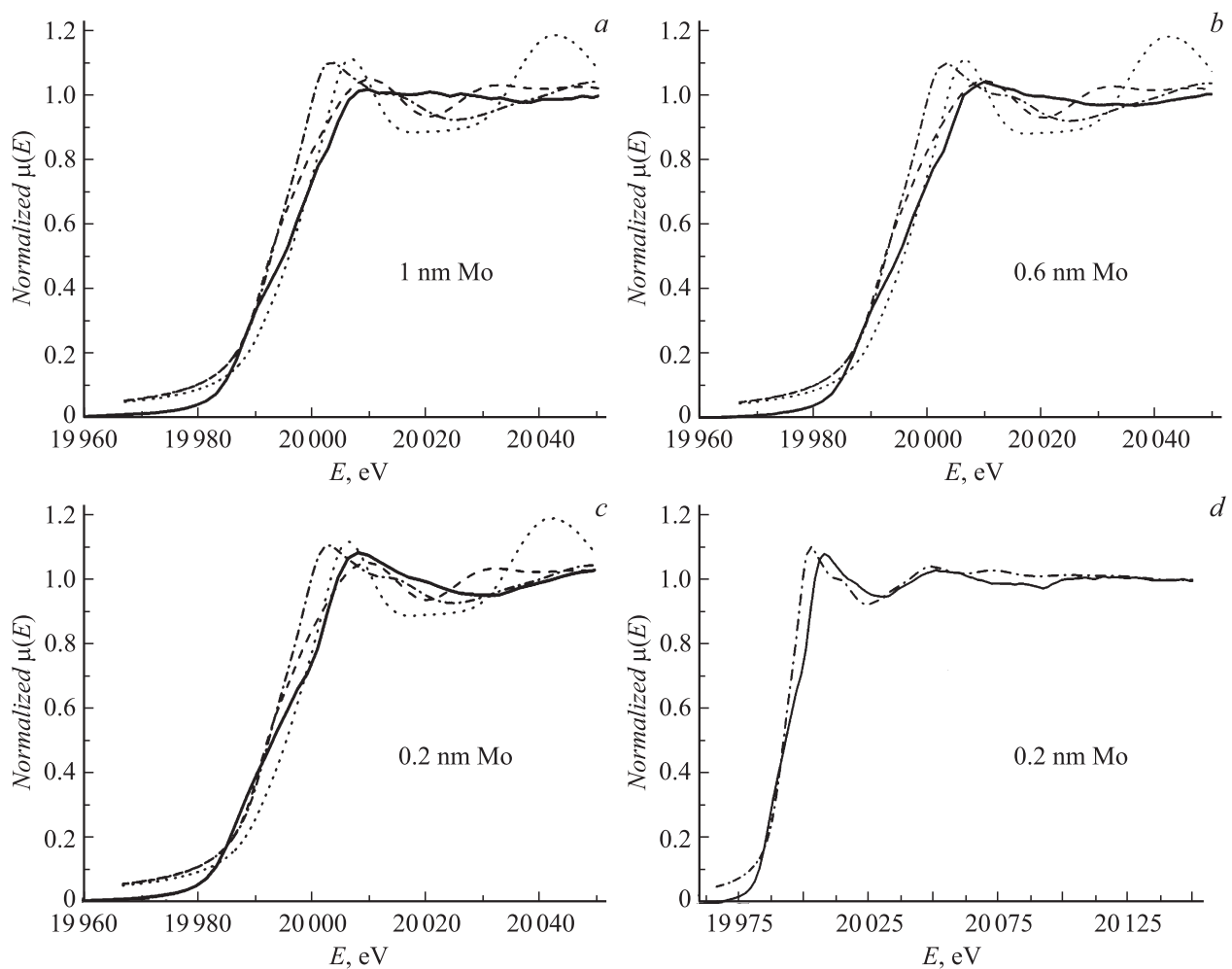


Рис. 4. Сравнение XANES-спектров от некоторых образцов Mo/Be с разными толщинами Mo в структуре (*a* — 1 nm Mo, *b* — 0.6 nm Mo, *c* и *d* — 0.2 nm Mo) с теоретическими XANES-спектрами бериллидов молибдена: MoBe₂ (---), MoBe₁₂ (····), MoBe₂₂ (-·-·-).

Также положение края поглощения у данных образцов не соответствует положению таковых у теоретически рассчитанных спектров бериллидов.

В свою очередь, XANES-спектр образца Mo/Be с толщиной Mo ~ 0.2 nm по форме (числу деталей и соотношению их интенсивностей) более всего похож на теоретически рассчитанный XANES-спектр MoBe₂₂ (рис. 4, *c, d*). В то же время, как и в случае других образцов, положение края поглощения XANES-спектра этого образца не соответствует ни одному из положений краев поглощения рассчитанных XANES-спектров рассмотренных бериллидов. Данная информация дает основание предполагать, что в многослойной системе Mo/Be с тонким слоем Mo ~ 0.2 nm в структуре образуется соединение Mo с Be, схожее по составу с MoBe₂₂. Предположительно при увеличении толщины дополнительно образуется другое соединение Mo с Be, которое в совокупности с образованным соединением, схожим с MoBe₂₂, дает средний XANES-спектр, не поддающийся анализу.

В результате подгонки экспериментальных EXAFS-спектров и функций радиального распределения атомов (рис. 5) были установлены радиусы координационных сфер и координационные числа (табл. 1). В табл. 2 представлены расчетные значения радиусов координационных сфер и координационных чисел Mo и бериллидов молибдена.

Радиусы первой координационной сферы в системе Mo/Be с толщинами Mo ~ 0.2 , ~ 0.6 и ~ 1 nm имеют значения, близкие к значениям в трех бериллидах: MoBe₂, MoBe₁₂ и MoBe₂₂. Однако, как указывалось ранее, только структура с толщиной Mo ~ 0.2 nm имеет схожесть в своем виде с бериллидом MoBe₂₂, что позволяет предположить его образование. Однозначно установить состав перемешанных зон у других толщин невозможно.

При больших толщинах слоя Mo (~ 2.3 nm) в структуре Mo/Be радиусы координационных сфер близки к таковым у пленки Mo. Координационное число в системе в исходном состоянии ниже, чем в чистой

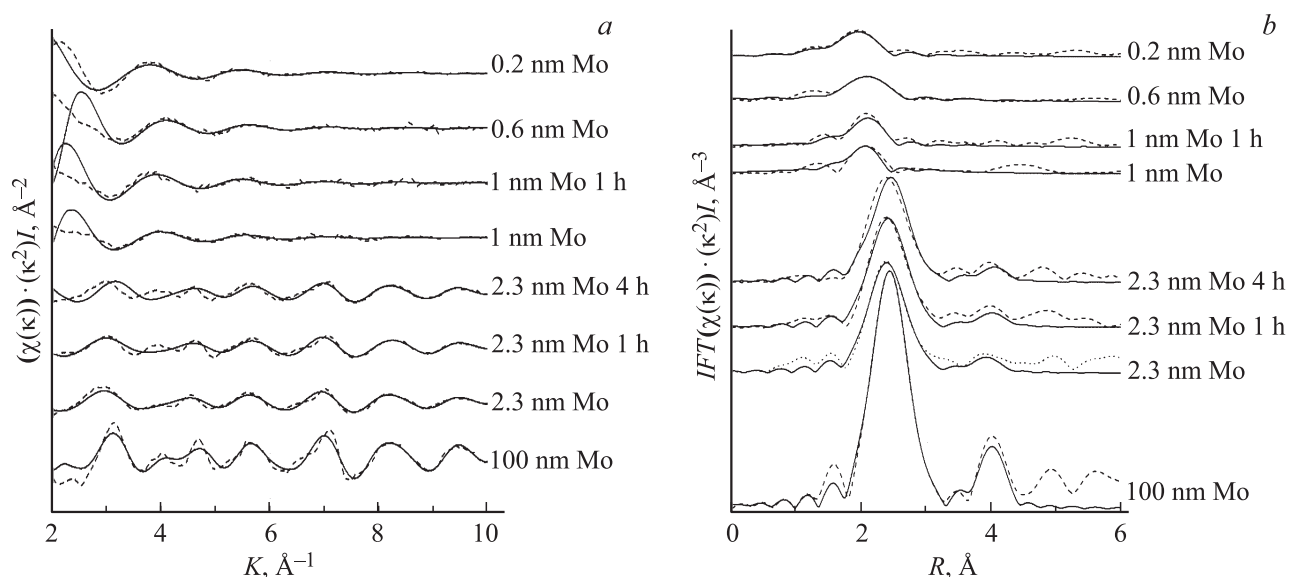


Рис. 5. Экспериментальные (---) и подгоночные (—) EXAFS-спектры (a) и функции радиального распределения (b) от многослойных периодических систем Mo/Be в исходном состоянии и после отжига и тонкой пленки Mo толщиной 100 nm.

Таблица 1. Межатомные расстояния и координационные числа, полученные из EXAFS-эксперимента

Толщина Mo в структуре и время отжига	Связь	$R, \text{Å}$	Координационное число	$\sigma^2, \text{Å}^2$
0.2 nm	Mo-Be	2.54	4.0	0.004
0.6 nm	Mo-Be	2.60	3.5	0.003
1 nm	Mo-Be	2.60	2.7	0.003
1 nm 1 h	Mo-Be	2.61	3.8	0.003
2.3 nm	Mo-Mo	2.69	3.4	0.005
	Mo-Mo	3.11	2.4	0.004
	Mo-Mo	4.36	2.4	0.006
2.3 nm 1 h	Mo-Mo	2.69	3.2	0.005
	Mo-Mo	3.10	1.6	0.005
	Mo-Mo	4.40	2.8	0.004
	Mo-Mo	2.72	3.4	0.005
2.3 nm 4 h	Mo-Mo	3.13	2.3	0.005
	Mo-Mo	4.42	3.3	0.008
Пленка 100 nm	Mo-Mo	2.71	5.9	0.004
	Mo-Mo	3.11	5.1	0.008
	Mo-Mo	4.40	12.0	0.004

пленке Mo, что говорит о наличии большего числа дефектов в тонком слое, чем в толстой пленке. После отжига радиусы координационных сфер приближаются к

Таблица 2. Межатомные расстояния и координационные числа для кристалла молибдена и бериллидов молибдена

Фаза	Связь	$R, \text{Å}$	Координационное число
Mo	Mo-Mo	2.73	8
	Mo-Mo	3.15	6
	Mo-Mo	4.45	12
MoBe ₂	Mo-Be	2.55	3
	Mo-Be	2.59	3
	Mo-Be	2.64	6
MoBe ₁₂	Mo-Be	2.67	3
	Mo-Be	2.54	4
	Mo-Be	2.61	8
	Mo-Be	2.77	8
	Mo-Mo	4.08	8
MoBe ₂₂	Mo-Mo	4.23	2
	Mo-Be	2.49	12
	Mo-Be	2.52	4
	Mo-Be	4.21	6
	Mo-Be	4.29	24

эталонным значениям, а также увеличиваются координационные числа, что говорит об уменьшении количества дефектов и увеличении дальнего порядка. Однако координационные числа у отожженных образцов меньше, чем в чистой пленке Mo. Наличие координационных

сфер, соответствующих связям Mo-Be в системе Mo/Be с толщиной Mo ~ 2.3 nm в структуре, установить не удалось, несмотря на то, что данные связи присутствуют в образцах с меньшей толщиной Mo в структуре.

На рис. 6–8 представлены картины рентгеновского фазового анализа от образцов в исходном состоянии и после термического отжига.

У многослойной системы Mo/Be с толщиной Mo в структуре ~ 0.2 nm наблюдаются рефлексы только от MoBe₂₂ (рис. 6). Термический отжиг в течение одного часа не приводит к каким-либо изменениям в спектре, а после термического отжига в течение 4 h пик MoBe₂₂ усиливается. Это свидетельствует об увеличении ширины переходной области за счет бериллида. Рефлекса от Mo в структуре не наблюдается, что в совокупности с данными EXAFS-эксперимента позволяет установить образование перемешанной зоны, схожей с MoBe₂₂.

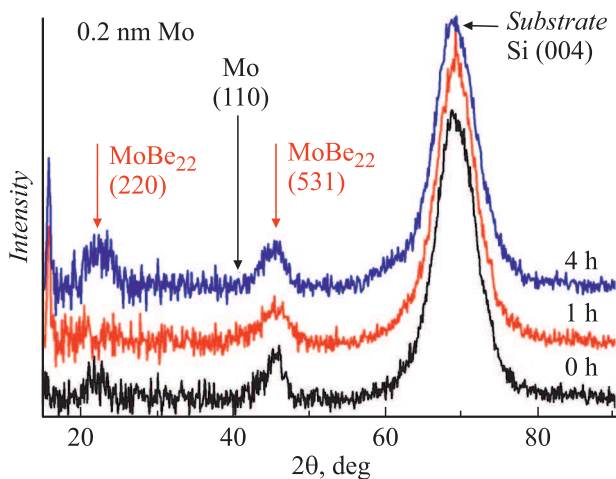


Рис. 6. Рентгеновский фазовый анализ ($\lambda = 0.154$ nm) многослойной периодической структуры Mo/Be с толщиной Mo в структуре ~ 0.2 nm.

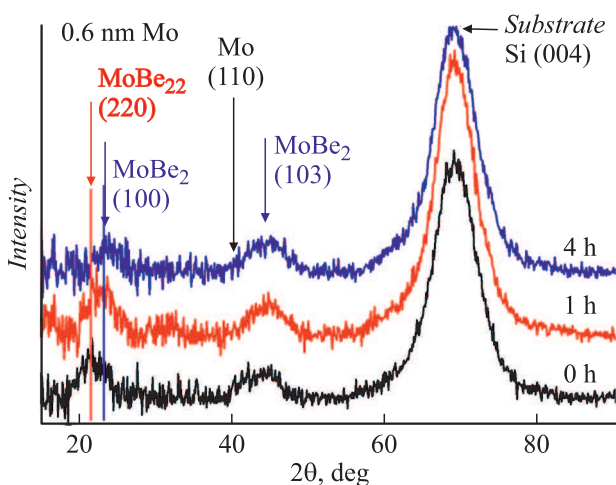


Рис. 7. Рентгеновский фазовый анализ ($\lambda = 0.154$ nm) многослойной периодической структуры Mo/Be с толщиной Mo в структуре ~ 0.6 nm.

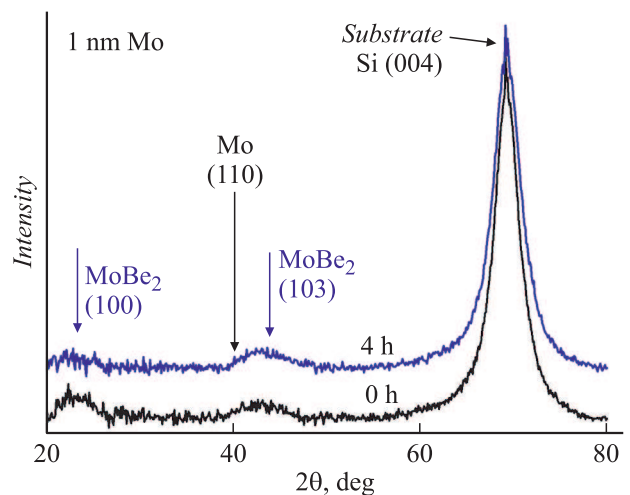


Рис. 8. Рентгеновский фазовый анализ ($\lambda = 0.154$ nm) многослойной периодической структуры Mo/Be с толщиной Mo в структуре ~ 1 nm.

У многослойной системы Mo/Be с толщиной Mo в структуре ~ 0.6 nm в исходном состоянии и после термического отжига в течение 1 h наблюдаются рефлексы как от MoBe₂₂, так и от MoBe₂ (рис. 7), а после отжига в течение 4 h рефлекс от MoBe₂₂ пропадает и появляется второй рефлекс MoBe₂. Это означает, что в результате диффузионного процесса в системе Mo/Be более выгодно образование на границе MoBe₂, а не MoBe₂₂. Рефлекса от чистого Mo не наблюдается.

У образца с толщиной ~ 1 nm Mo в структуре наблюдаются рефлексы только от MoBe₂ (рис. 8). Рефлексов от MoBe₂₂ нет ни в исходном состоянии, ни после термического отжига. Однако наличие рефлексов при меньших толщинах слоя Mo подразумевает их образование в системе с достаточной толщиной для их обнаружения. И если их отсутствие после термического отжига было бы объяснимо переходом перемешанной зоны в более стабильное состояние — MoBe₂, то полное отсутствие рефлексов MoBe₂₂ при толщине Mo в структуре ~ 1 nm непонятно. Рефлекса от чистого Mo не наблюдается.

У образцов с толщиной Mo ~ 2.3 nm, как известно из [13], наблюдаются только рефлексы от чистого Mo. Никаких рефлексов от бериллидов не наблюдается как в исходном состоянии, так и после термического отжига, несмотря на то, что их общая толщина на границах раздела должна составлять порядка 1 nm или более. Их отсутствие на картине с большой толщиной Mo в структуре пока не объяснено.

Выводы и заключение

По результатам поведенного комплексного исследования внутренней структуры Mo/Be многослойных зеркал и ее динамики при вакуумном отжиге были получены следующие результаты.

В структуре Mo/Be на границах раздела образуются перемешанные слои разного состава. Бериллид MoBe₂₂ образуется на границе Mo-на-Be из-за большого количества атомов Be, окружающих тяжелый Mo, который во время осаждения проникает вглубь Be пленки, и MoBe₂ на границе Be-на-Mo из-за малой энергии частиц Be, не проникающего в большом количестве в плотную пленку Mo.

В ходе термического отжига в течении 4 h соединение MoBe₂₂ на границе Mo-на-Be переходит в MoBe₂. Это может быть объяснено следующим образом. Be проникает глубже в Mo, чем Mo в Be. В этом случае доля Be в пограничной области снижается за счет ушедших атомов. Соответственно возрастает доля бериллида с меньшим содержанием бериллия. На границе Be-на-Mo заметных изменений не происходит, господствующим бериллидом здесь был до отжига и остается после него MoBe₂.

Так как никаких структурных изменений в слоях в течение 1 h отжига при температуре $T = 280^\circ\text{C}$ не наблюдается, полученный результат подтверждает гипотезу, предложенную в [12], о механизме роста коэффициента отражения образцов при одночасовом отжиге в вакууме в области 11 nm за счет частичного вытеснения кислорода из бериллиевых слоев. При дальнейшем отжиге происходят сильные диффузионные процессы с образованием другого соединения на границе раздела, а также сильный рост уровня шероховатости межслоевых границ, которые вносят более сильный негативный вклад в оптические характеристики, чем вытеснение кислорода.

Остается не проясненным несоответствие выводов настоящей работы выводам работы [18], где утверждается, что соединение с большим количеством Be образуется на границе Be-на-Mo, а не наоборот. Данное несоответствие требует дополнительных исследований.

Также остается непонятным отсутствие следов соединений при большой толщине Mo в многослойной системе. Исходя из данных EXAFS-спектроскопии, можно сделать вывод, что толщина перемешанных зон на обеих границах составляет не менее 1 nm, что много по сравнению со слоем Mo толщиной 2 nm.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания № 0035-2014-0204 и при поддержке грантов РФФИ № 19-32-90154, 19-02-00081, 18-02-00588, 18-02-00173, — интерпретация экспериментальных данных EXAFS, с использованием оборудования ЦКП „Физика и технологии микро- и наноструктур“ при ИФМ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Montcalm C., Bajt S., Mirkarimi P.B., Spiller E.A., Weber F.J., Folta J.A.* // Proceedings. 1998. Vol. 3331. P. 42.
- [2] *Skulina K.M., Alford C.S., Bionta R.M., Makowiecki D.M., Gullikson E.M., Soufli R., Kortright J.B., Underwood J.H.* // Appl. Opt. 1995. Vol. 34. P. 3727–3730.
- [3] *Mirkarimi P.B., Bajt S., Wall M.A.* // Appl. Opt. 2000. Vol. 39. P. 1617–1625.
- [4] *Singh M., Braat J.J.M.* // Appl. Opt. 2000. Vol. 39. P. 2189–2197.
- [5] *Mirkarimi P.B.* // Opt. Eng. 1999. Vol. 38. N 7. P. 1246–1259.
- [6] *Bajt S.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 2000. Vol. 18. N 2. P. 557–559.
- [7] *Wu B., Kumar A.* // Appl. Phys. Rev. 1. 2014. P. 011104.
- [8] *Chkhalo N.I., Salashchenko N.N.* // AIP Advances. 2013. Vol. 3. P. 082130-1.
- [9] *Вайнер Ю.А., Гарахин С.А., Зуев С.Ю., Нечай А.Н., Плешков Р.С., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Свечников М.В., Сертсу М.Г., Смертин Р.М., Соколов А., Чхало Н.И., Шафферс Ф.* // УФН. 2020. Т. 190. С. 92–106.
- [10] *Svechnikov M.V., Chkhalo N.I., Gusev S.A., Nechay A.N., Pariev D.E., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Tatarskiy D.A., Salashchenko N.N., Schäfers F., Sertsu M.G., Sokolov A., Vainer Y.A., Zorina M.V.* // Opt. Express. 2018. Vol. 26. N 26. P. 33718–33731.
- [11] *Chkhalo N., Gusev S., Nechay A., Pariev D., Polkovnikov V., Salashchenko N., Schäfers F., Sertsu M., Sokolov A., Svechnikov M., Tatarskiy D.* // Opt. Lett. 2017. Vol. 42. N 24. P. 5070–5073.
- [12] *Nechay A.N., Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Garakhin S.A., Pariev D.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Svechnikov M.V., Vainer Yu.A., Meltchakov E., Delmotte F.* // AIP Advances. 2018. Vol. 8. P. 075202.
- [13] *Смертин Р.М., Гарахин С.А., Зуев С.Ю., Нечай А.Н., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Свечников М.В., Сертсу М.Г., Соколов А., Чхало Н.И., Schäfers F., Юнин П.А.* // ЖТФ. 2019. Т. 89. Вып. 11. С. 1783–1788.
- [14] *Slaughter J.M., Kearney P.A., Schulze D.W., Falco C.M., Hills C.R., Saloman E.B., Watts R.N.* // Proceedings. SPIE. 1991. Vol. 1343. P. 73–82.
- [15] *Rosen R.S., Stearns D.G., Viliardos M.A., Kassner M.E., Vernon S.P., Cheng Y.* // Appl. Opt. 1993. Vol. 32. N 34. P. 6975–6980.
- [16] *Braun S., Mai H., Moss M., Scholz R., Leson A.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2002. Vol. 41. Pt 1. N 6B. P. 4074–4081.
- [17] *Sakhonenkov S.S., Filatova E.O., Gaisin A.U., Kasatkov S.A., Konashuk A.S., Pleshkov R.S., Chkhalo N.I.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2019. Vol. 21. P. 25002–5010.
- [18] *Kasatkov S.A., Filatova E.O., Sakhonenkov S.S., Gaisin A.U., Polkovnikov V.N., Smertin R.M.* // J. Phys. Chem. C. 2019. Vol. 123. N 42. P. 25747–25755.
- [19] *Самсонов Г.В.* // Бериллиды. 1996. С. 45–47.
- [20] *Лякушев Н.П.* // Диаграммы состояния двойных металлических систем. 1996. Т. 1. С. 587–589.
- [21] *Svechnikov M., Pariev D., Nechay A., Salashchenko N., Chkhalo N., Vainer Y., Gaman D.* // J. Appl. Cryst. 2017. Vol. 50. P. 1428–1440.
- [22] *Chernyshov A.A., Veligzhanin A.A., Zubavichus Y.V.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. Vol. 603. N 1–2. P. 95–98.

- [23] Электронный ресурс. Режим доступа. <http://kcsni.nrcki.ru/pages/main/sync/beamlines/stm/index.shtml>
- [24] *Ravel B., Newville M.* // J. Synchr. Rad. 2005. Vol. 12. P. 537–541.
- [25] *Zabinsky S.I., Rehr J.J., Ankudinov A., Albers R.C., Eller M.J.* // Phys. Rev. 1995. Vol. 52. N 4. P. 2995–3009.
- [26] *Joly Y.* // Phys. Rev. 2001. Vol. 63. N 12. P. 125120–125129.
- [27] *Guda S.A., Guda A.A., Soldatov M.A., Lomachenko K.A., Bugaev A.L., Lamberti C., Gawelda W., Bressler C., Smolentsev G., Soldatov A.V., Joly Y.* // J. Chem. Theory Comp. 2015. Vol. 11. N 9. P. 4512–4521.
- [28] *Hedin L., Lundqvist B.I.* // J. Phys. C. 1971. Vol. 4. N 14.
- [29] *Gates-Rector S., Blanton T.* // Powder Diffr. 2019. Vol. 34. N 4. P. 352–360.
- [30] *Bunău O., Joly Y.* // J. Phys. Cond. Mat. 2009. Vol. 21. N 34. P. 345501.