

PACS numbers: 07.85.Fv, 61.05.cf, 61.05.cm, 61.05.cp, 68.65.Ac, 81.15.Cd

Изменения структуры многослойных рентгеновских зеркал Zr/Mg с ростом толщины наноразмерных слоёв магния

Л. Е. Конотопский, И. Ф. Михайлов, И. А. Копылец,
В. В. Мамон, В. В. Кондратенко

*Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
ул. Кирпичёва, 21,
61002 Харьков, Украина*

Методами рентгеновской дифрактометрии исследованы особенности роста многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) Zr/Mg, изготовленных методом прямоточного магнетронного распыления. Показано, что МРЗ Zr/Mg благодаря высокой степени периодичности слоёв и малому несоответствию параметров их кристаллических решёток в 1,2% когерентно рассеивают рентгеновское излучение с $\lambda = 0,154$ нм. В данной работе впервые была использована обработка и анализ данных когерентного рассеяния для описания особенностей формирования зеркал. Полученные результаты в сочетании с данными малоугловой рентгеновской дифракции позволили установить диапазон толщин слоёв магния (до $\cong 4,8$ – $5,2$ нм), в котором плёнка является несплошной. Показано, что МРЗ Zr/Mg с толщинами слоёв Mg более 5,2 нм имеют малую межслоевую шероховатость ($\sigma \cong 0,4$ нм) и способны обеспечить высокую отражательную способность в диапазоне длин волн 25–35 нм.

Ключевые слова: многослойное рентгеновское зеркало, рентгеновский фазовый анализ, прямоточное магнетронное распыление, магний, цирконий.

Corresponding author: Leonid Evgeniyovych Konotopsky
E-mail: lkonotopsky@gmail.com

*National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute',
21 Kyrpychov Str., UA-61002 Kharkiv, Ukraine*

Please cite this article as: L. E. Konotopsky, I. F. Mikhailov, I. A. Kopylets, V. V. Mamon, and V. V. Kondratenko, Changes of Structure of Zr/Mg Multilayer X-Ray Mirrors with Growth of Thickness of Nanosize Layers of Magnesium, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 6: 0767 (2017) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.39.06.0767.

У роботі рентгеноструктурними методами досліджено особливості росту багатошарових рентгенівських дзеркал (БРД) Zr/Mg, виготовлених методом прямоструминного магнетронного розпорошення. На рентгенівській дифрактограмі від БРД Zr/Mg спостерігається когерентне розсіяння Рентгенового випромінення з $\lambda = 0,154$ нм, яке забезпечується епітаксіальним ростом шарів Mg та Zr та малою невідповідністю параметрів їхніх кристалічних ґратниць у 1,2%. У даній роботі вперше було використано оброблення й аналізу даних когерентного розсіяння у поєднанні з малокутовою рентгенівською дифракцією, що уможливило встановити інтервал товщин шарів магнію (до $\cong 4,8$ – $5,2$ нм), де плівка є несуцільною. Показано, що БРД Zr/Mg з товщинами шарів Mg, більшими за 5,2 нм, мають малу міжшарову шерсткість ($\sigma \cong 0,4$ нм) і здатні забезпечити високу відбивну здатність у діапазоні довжин хвиль 25–35 нм.

Ключові слова: багатошарове рентгенівське дзеркало, рентгенівська фазова аналіза, прямоструминне магнетронне розпорошення, магній, цирконій.

Structure of Zr/Mg multilayer x-ray mirrors (MXMs) deposited by direct-flow magnetron sputtering is studied by x-ray diffraction methods. X-ray diffraction curve ($\lambda = 0.154$ nm) has one diffraction peak ($2\theta \cong 34.6^\circ$) and, at least, two superlattice satellites within the range 31° – 38° . It means that Zr/Mg MXMs scatter x-rays coherently due to low mismatch (1.2%) between the lattice parameters of Mg and Zr layers and high level of multilayer periodicity. In this work, for the first time, processing and analysing coherent diffraction data are applied to describe features of MXMs grows. Obtained results in combination with low-angle x-ray diffraction data allow determining the thickness ($H_{Mg} < 5.2$ nm), for which magnesium layers are discontinuous. As demonstrated, the Zr/Mg MXMs with the Mg layers thicker than 5.2 nm have low interface roughness ($\sigma \cong 0.4$ nm) and can provide high level of reflectance.

Key words: multilayer x-ray mirror, x-ray phase analysis, DC magnetron sputtering, magnesium, zirconium.

(Получено 12 июня 2017 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) — эффективные оптические элементы для управления мягким рентгеновским излучением (0,5–50 нм), нашли широкое применение, как при проведении фундаментальных исследований, так и при решении практических задач [1]. Вместе с тем, отражательная способность зеркал в различных частях этого спектрального диапазона заметно отличается от теоретически рассчитанной. Это относится и к МРЗ, в которых одним из двух материалов (слабопоглощающим) является магний. Высокая химическая активность магния является причиной его взаимодействия со вторым материалом слоёв зеркала уже при изго-

товлении. Этот процесс приводит к уменьшению коэффициента отражения. В настоящее время выполнены исследования различных сочетаний материалов в качестве составляющих МРЗ на основе магния, включая как чистые химические элементы, так и соединения. В зеркалах Si/Mg и B₄C/Mg в результате межслоевого взаимодействия происходит падение коэффициентов отражения более чем на 50% по сравнению с теоретическими значениями [2]. В других случаях, например в МРЗ SiC/Mg, процессы межслоевого взаимодействия протекают при термическом воздействии. При температуре 350°C наблюдается образование Mg₂Si [3, 4], что также приводит к падению отражательной способности.

В этой связи важным является выбор материала в пару к магнию, который бы не вступал с ним во взаимодействие, и по своим оптическим характеристикам обеспечил высокий коэффициент отражения. К таким материалам относится цирконий. Магний и цирконий не взаимодействуют между собой [5]. Как показывает расчёт, для идеальных зеркал наиболее высокий коэффициент отражения МРЗ Zr/Mg имеют в двух диапазонах: 0,98–2 нм и 25,1–35 нм ($R_{\lambda=0,989} = 57\%$, $R_{\lambda=30,4} = 42\%$). Первый интервал важен для рентгеноспектрального анализа ($\lambda_{MgK\alpha} = 0,989$ нм, $\lambda_{NaK\alpha} = 1,191$ нм, $\lambda_{FK\alpha} = 1,832$ нм, $\lambda_{OK\alpha} = 2,362$ нм [6]), а второй — для астрофизических исследований Солнца [7, 8].

Авторы работы [9] исследовали термическую стабильность Zr/Mg зеркал и показали, что эти зеркала с периодом 15,37 нм сохраняют отражательную способность вплоть до температуры плавления магния. При этом вопросы, связанные с ростом слоёв и структурой многослойной композиции, которые существенно влияют на оптические свойства, экспериментально не рассматривались.

Целью данной работы явилось исследование особенностей формирования структуры МРЗ Zr/Mg, а также оценка возможности их применения для управления мягким рентгеновским излучением.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Образцы МРЗ Zr/Mg на стеклянных и монокристаллических кремниевых (111) подложках были изготовлены методом прямоочного магнетронного распыления в среде аргона. Вакуумная камера предварительно прогревалась и откачивалась до давления 10^{-4} Па. Давление аргона во время осаждения составляло 0,3 Па. Подложка перед осаждением очищалась пучком ионов аргона. Толщина слоёв контролировалась путём задания скорости транспортировки подложки над мишенями при стабилизации скоростей осаждения из мишеней циркония и магния. В процессе нанесения многослойного покрытия температура подложки не превышала 50°C.

Структура МРЗ Zr/Mg исследовалась с помощью рентгеновской

дифрактометрии с последующим компьютерным моделированием. Съёмка малоугловых рентгеновских дифрактограмм проводилась в θ - 2θ -геометрии на дифрактометре ДРОН-3М в излучении $\text{CuK}_{\alpha 1}$ (0,15406 нм). Монохроматизация первичного пучка обеспечивалась кососрезанным кремниевым (110) монохроматором. Моделирование экспериментальных дифракционных кривых проводилось в программе IMD [10].

Съёмка брэгговских отражений на больших углах выполнялась в геометрии $\theta/2\theta$ -сканирования в излучении CuK_{α} . Исследование отражательной способности зеркал Zr/Mg в излучении MgK_{α} было выполнено на рентгеновском кристалл-дифракционном спектрометре «СПРУТ» (Укрентген, Украина).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ малоугловых рентгеновских дифрактограмм, полученных от МРЗ Zr/Mg , свидетельствует о том, что как длиннопериодные (16,2 нм), так и короткопериодные (3,2 нм) зеркала обладают высоким уровнем периодичности, о чём свидетельствуют узкие и симметричные брэгговские максимумы (рис. 1). Для зеркал с периодом 16,2 нм хорошо видно, что интенсивность дифракционных максимумов описывается низкочастотной огибающей. Угловое положение минимума огибающей определяется толщиной самого тонкого слоя в многослойной композиции, в данном случае Zr . С её помощью можно оценить толщину этого слоя, которая составила ≈ 2.5 нм [11], что соответствует толщине слоя циркония, заданной при изготовлении зеркала.

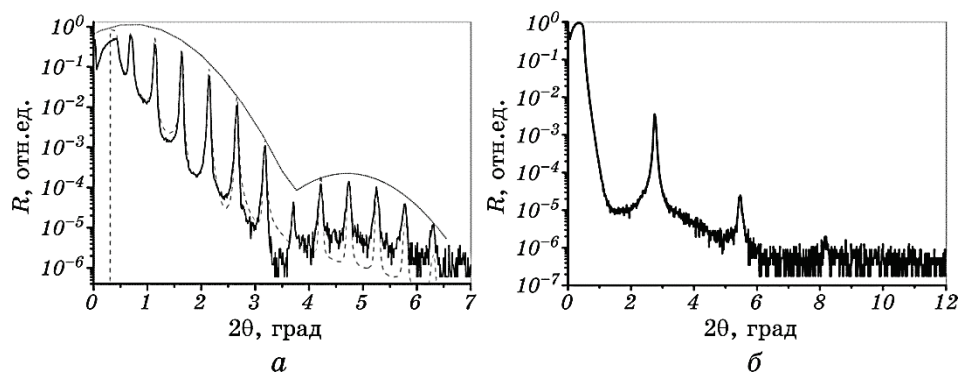


Рис. 1. Экспериментальная (---) и расчётная (----) малоугловые рентгеновские дифрактограммы от МРЗ Zr/Mg с периодами 16,2 нм (а) и 3,2 нм (б).

Fig. 1. Measured (---) and calculated (----) low-angle x-ray reflectivity curves ($\lambda = 0.154$ nm) for Zr/Mg MXMs with periods of 16.2 nm (a) and 3.2 nm (b).

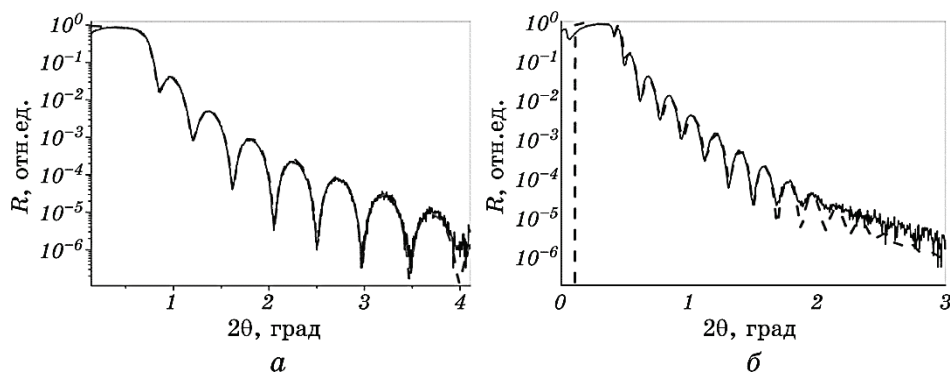


Рис. 2. Экспериментальная (—) и расчётная (---) малоугловые рентгеновские дифрактограммы от однослойных плёнок Zr (а) и Mg (б).

Fig. 2. Measured (—) and calculated (---) low-angle x-ray reflectivity curves ($\lambda = 0.154$ nm) for single-layer Zr (a) and Mg (b) films.

Моделирование экспериментальных спектров малоугловой рентгеновской дифракции от зеркал выполнялось в рамках двухслойной модели Zr/Mg, так как межслоевое взаимодействие в фазово-равновесной системе не ожидается. Плотности слоёв, которые закладывались в модель, были определены из моделирования спектров от однослойных плёнок циркония и магния толщиной 15,5 нм и 43 нм соответственно (рис. 2). Полученные значения составили $\rho_{\text{Mg}} = 1,74$ г/см³ и $\rho_{\text{Zr}} = 6,5$ г/см³. Это соответствует табличным величинам плотностей для массивных материалов [12, 13].

В результате использования двухслойной модели с табличными значениями плотностей удалось достичь хорошего совпадения между теоретическим и экспериментальным спектрами для рентгеновского зеркала с периодом 16,2 нм (рис. 1). В то же время, подгонку теоретического спектра под экспериментальный для МРЗ с периодом 3,2 нм выполнить в рамках указанной модели не удаётся. В этой связи на рис. 1, б расчётная кривая зеркального отражения отсутствует.

Кроме того, в МРЗ Zr/Mg с периодом 3,2 нм интенсивность всех брэгговских отражений занижена по сравнению с расчётной величиной более чем на порядок. Это характерно для всех зеркал Zr/Mg, в которых толщина слоя магния не превышает $\cong 4.8$ нм. Отмеченная особенность хорошо иллюстрируется зависимостью отражательной способности МРЗ в первом брэгговском максимуме от толщины слоёв Mg, полученной в излучении $\text{CuK}_{\alpha 1}$ (рис. 3, а). В интервале толщин $\cong 4,8$ –5,2 нм происходит резкий скачок коэффициента отражения. Такая же зависимость сохраняется и на рабочей длине волны в излучении MgK_{α} (рис. 3, б).

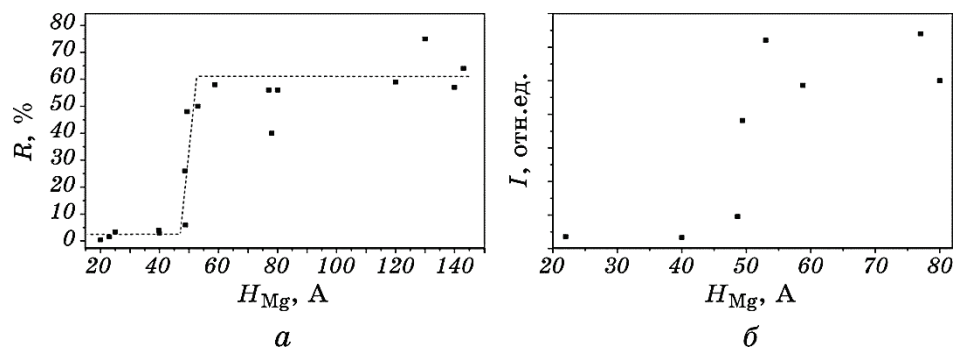


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения МРЗ Zr/Mg в первом брегговском максимуме от толщины слоёв магния, полученная в излучениях $\text{CuK}_{\alpha 1}$ (а) и MgK_{α} (б).

Fig. 3. Reflectance of Zr/Mg MXMs in the first Bragg maximum for $\text{CuK}_{\alpha 1}$ (а) and MgK_{α} (б) radiations versus thickness of Mg layers.

Рентгеновский фазовый анализ показывает, что в МРЗ Zr/Mg реализуется когерентное рассеяние [14]. Слои многослойной композиции рассеивают рентгеновское излучение, как единое целое. В результате, на дифрактограмме (рис. 4) вместо отдельных дифракционных максимумов Zr (002) и Mg (002) наблюдается рефлекс от «средней» решётки (S_0) с сателлитами (S_j^+ и S_j^-), равноудалёнными от него.

Критерием когерентности рассеяния является выражение [15]:

$$\frac{H}{d} \frac{\varepsilon}{2} \lesssim 2,2,$$

где H — период многослойной композиции, d — среднее значение межплоскостных расстояний в кристаллической решётке слоёв, ε — несоответствие межплоскостных расстояний сопрягаемых слоёв, которое для магния и циркония составляет 1,24%. В нашем случае, все рентгеновские зеркала Zr/Mg с периодами от 3,2 нм до 19,5 нм, которые исследовались в данной работе, удовлетворяют условию когерентности.

Необходимо отметить, что на картине рентгеновского фазового анализа, полученной в геометрии θ - 2θ -сканирования, присутствует только один указанный рефлекс когерентного рассеяния. Все остальные отражения отсутствуют. Это говорит о том, что слои имеют хорошо выраженную текстуру, ось которой [002] направлена нормально к поверхности подложки. Кроме того, такое ориентированное формирование слоёв свидетельствует о том, что они растут эпитаксиально. Важно отметить, что наличие текстуры и эпитаксиального роста слоёв обеспечивает высокую интенсивность рефлекса

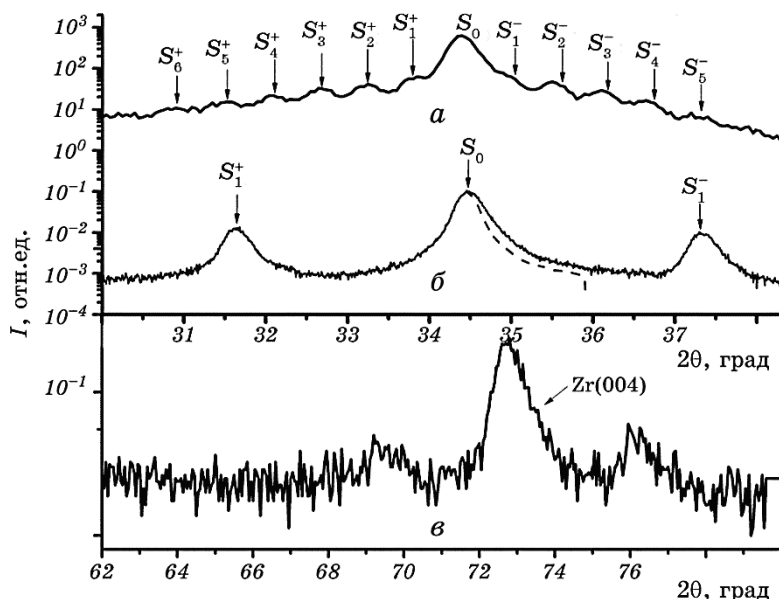


Рис. 4. Рентгеновские дифракционные картины когерентного рассеяния от образцов МРЗ Zr/Mg с периодом 16,2 нм (*а*) и 3,2 нм (*б*, *в*), снятые в геометрии $\theta-2\theta$ в излучении $\text{CuK}_{\alpha 1}$. Для образца с $H = 3,2$ нм приведены первый (*б*) и второй (*в*) порядок отражения.

Fig. 4. Coherent scattering patterns for Zr/Mg MXMs with period of 16.2 nm (*a*) and 3.2 nm (*b*, *c*) in $\text{CuK}_{\alpha 1}$ radiation in the symmetric ($\theta-2\theta$) geometry. For the Zr/Mg MXMs with period 3.2 nm, the first (*b*) and second (*c*) order of reflectance are shown.

S_0 и сателлитов.

Анализ картины когерентного рассеяния позволяет получить дополнительную информацию о структуре многослойной системы [16]. Для этого необходимо рассчитать и проанализировать соотношение интенсивностей сверхструктурных сателлитов S_j^+ и S_j^- к основному рефлексу S_0 . Мы ограничились только первыми сверхструктурными максимумами. Для расчёта были использованы следующие соотношения [16]:

$$\frac{1}{2}(S_1^+ + S_1^-)S_0 = B_{11}^2(1 + A_{21})^2 + A_{11}^2(1 + B_{21})^2 + (B_{11}B_{12} + A_{11}A_{12})^2 + (A_{11}B_{12} - B_{11}A_{12})^2 + \alpha_1^2 + \beta_1^2, \quad (1)$$

$$\frac{1}{4}(S_1^+ - S_1^-)S_0 = A_{11}(1 + B_{21})(A_{11}B_{12} - A_{12}B_{11} - \beta_1) - B_{11}(1 + A_{21})(B_{11}B_{12} + A_{11}A_{12} - \alpha_1), \quad (2)$$

где S_j^+ и S_j^- — интенсивности первых сателлитов, расположенных со стороны меньших и больших углов от основного максимума, α_k и β_k — амплитуды в разложении структурных факторов слоёв в ряд Фурье, A_{ik} и B_{ik} — соотношения функций Бесселя с аргументами a_k и b_k :

$$A_{ik} = \frac{I_i(a_k)}{I_0(a_k)}, B_{ik} = \frac{I_i(b_k)}{I_0(b_k)}, \quad (3)$$

$$a_k = \frac{Hl\delta_k}{kd^2}, b_k = \frac{Hl\chi_k}{kd^2}, \quad (4)$$

где δ_k и χ_k — k -е амплитуды изменения межплоскостного расстояния, l — порядок отражения. Для периодической системы цирконий-магний амплитуда модуляции межплоскостного расстояния составляет $\delta = (d_{Mg} - d_{Zr})/2 = 0,0016$ нм, следовательно, величины δ_k не могут быть больше этого значения. При таком значении δ максимально возможные значения a_k и A_{ik} , достигаемые при $H = 11,235$ нм, составляют $a_1 = 0,16$ и $A_{11} = 0,082$. Из (1) видно, что вклад A_{11}^2 в интенсивность $(S_1^+ + S_1^-)/(2S_0)$ значительно меньше экспериментально наблюдаемой величины, и им можно пренебречь.

Рассмотрим вклад атомного фактора рассеяния f . Различие между $f_{Mg} = 12,18$ и $f_{Zr} = 39,82$ (при $\sin\theta/\lambda = 0,0193$ нм⁻¹) очень велико и может обеспечивать амплитуду изменения структурного фактора $\alpha = (f_{Mg} - f_{Zr})/(f_{Mg} + f_{Zr}) = 0,53$. Конечно, такое значение может быть получено только при одинаковой толщине слоёв, а с увеличением соотношения толщин значение амплитуды уменьшается. Согласно нашим расчётам, изменение структурного фактора обеспечивает наблюдаемую интенсивность сателлитов при когерентном рассеянии.

В таблице 1 представлены экспериментальные и расчётные значения соотношения интенсивностей сателлитов когерентного рас-

ТАБЛИЦА 1. Экспериментальные и расчётные значения соотношения интенсивностей брэгговских отражений от «средней» решётки.

TABLE 1. Measured and calculated values of the ratio of Bragg-reflections' intensities for the 'average' lattice.

№	H , нм	H_{Mg} , нм	$(S_1^+ + S_1^-)/(2S_0)$		$(S_1^+ - S_1^-)/[2(S_1^+ + S_1^-)]$	
			Эксперимент	Расчёт	Эксперимент	Расчёт
1	3,25	2,25	0,099	0,12	0,066	0,077
2	6,65	3,15	0,068	0,26	-0,14	-0,2
3	8,498	3,36	0,065	0,17	-0,23	-0,21
4	9,214	5,814	0,13	0,14	-0,24	-0,29
5	11,235	7,877	0,107	0,106	-0,33	-0,28

сеяния. При толщине слоя магния более 5,2 нм рассчитанные значения соотношения интенсивностей сателлитов и основного пика близки к экспериментальным величинам, а для МРЗ с тонкими слоями рассчитанные значения соотношения интенсивностей превышают экспериментальные более чем в два раза. Это хорошо видно на примере образцов 3 и 4. Они имеют близкие значения периодов 8,498 нм и 9,214 нм соответственно, а толщина слоёв магния в них составляет 3,36 нм и 5,814 нм. При этом соотношения интенсивностей, полученные при расчёте для образца 3, значительно меньше экспериментальных величин, а для образца 4 наблюдается хорошее совпадение теории и эксперимента.

Большая величина теоретического значения соотношения интенсивностей рефлексов по сравнению с экспериментальным связана с завышенной интенсивностью основного брэгговского рефлекса от «средней» решётки. Для того чтобы в этом убедиться, необходимо исключить влияние S_0 . Это можно сделать, взяв отношение выражения (2) к (1). В этом случае наблюдается удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчётных значений для всех МРЗ (последний столбик в табл. 1). Таким образом, интенсивность основного максимума в МРЗ с толщинами слоёв магния менее $\cong 4,8-5,2$ нм более чем в два раза превышает ожидаемую величину. Такое несоответствие может быть связано с тем, что наряду с когерентным рассеянием, которое обеспечивается слоями циркония и магния, присутствует рефлекс, соответствующий одному из слоёв МРЗ, который рассеивает некогерентно. В данном случае, мы полагаем, что часть циркония не участвует в формировании сверхструктурных максимумов и дает независимый рефлекс, который сливается с основным сателлитом. Он приводит к асимметрии рефлекса S_0 со стороны больших углов, т.е. со стороны отражения $Zr(002)$, как показано на рис. 4 пунктирной линией. На втором порядке отражения вклад гетерофазного рассеяния от циркония проявляется более заметно (рис. 4, в). Это связано с тем, что с увеличением угла расстояние между брэгговскими рефлексами увеличивается пропорционально тангенсу угла. Доля циркония, которая рассеивает некогерентно, появляется, когда слои магния находятся на островковой стадии роста и ещё не стали сплошными. В таком случае между островками магния должен располагаться цирконий, который и будет рассеивать некогерентно.

Островковая стадия роста магния объясняет особенности кривой малоугловой дифракции для МРЗ с толщиной слоёв менее $\cong 4,8-5,2$ нм (рис. 1, б). Наличие в межостровковом пространстве циркония приводит к сбою интерференционной картины и падению интенсивности. При этом размер островков не влияет на интенсивность, поскольку при малых углах падения рентгеновского излучения к сбою интерференции будут приводить даже самые маленькие про-

слойки циркония, между островками магния. При этом важно отметить, что несплошность слоёв магния не приводит к развитию сильной шероховатости межслоевых границ.

Наличие островковой стадии роста слоёв магния находит своё экспериментальное подтверждение. Так, в МРЗ Zr/Mg с толщинами слоёв $H_{Zr} = 5,9$ нм и $H_{Mg} = 2,6$ нм наблюдалась усадка в 1,1 нм. Мы считаем, что она обусловлена тем, что скорость роста плёнки Mg на островковой стадии меньше, чем в случае сплошной плёнки, за счёт реиспарения части атомов Mg [17]. Таким образом, эффективная толщина слоёв магния на островковой стадии будет меньше, следовательно, и период МРЗ также уменьшится. В рентгеновских зеркалах с толщиной слоёв магния более 5,2 нм экспериментальное значение периода совпало с периодом, предварительно рассчитанным на основе скоростей роста плёнок.

Таким образом, систему Zr/Mg целесообразно использовать для создания высокоотражающих МРЗ только в длинноволновой части спектра (25–35 нм), где слои магния являются заведомо сплошными. Отличительной особенностью МРЗ Zr/Mg по сравнению с подавляющим большинством МРЗ на основе других сочетаний материалов является эпитаксиальный рост составляющих слоёв. Этому способствуют одинаковый тип решётки у обоих материалов — ГПУ, и малое несоответствие параметров кристаллической решётки.

4. ВЫВОДЫ

МРЗ Zr/Mg, изготовленные методом прямого магнетронного распыления, представляют собой чередующиеся эпитаксиальные слои циркония и магния. Слои являются текстурированными с ориентацией плоскостей (002) параллельно поверхности подложки.

Для МРЗ Zr/Mg наблюдается когерентное рассеяние рентгеновского излучения ($\lambda = 0,154$ нм) от «средней» решётки вблизи брэгговского отражения (002). Это открывает дополнительные возможности для анализа особенностей формирования многослойной композиции. Впервые обработка данных когерентного рассеяния в сочетании с результатами малоугловой рентгеновской дифракции позволила установить интервал толщин слоёв Mg (до $\cong 4,8$ –5,2 нм), в котором плёнка является несплошной.

Когерентное рассеяние обеспечивается высоким уровнем периодичности слоёв и малым несоответствием параметров кристаллической решётки (1,2%). Кристаллическое совершенство и взаимная эпитаксия слоёв способствуют увеличению интенсивности когерентного рассеяния. Когерентное рассеяние наблюдается для исследованных МРЗ Zr/Mg с периодами 3,2–19 нм, в том числе и на островковой стадии роста плёнки Mg.

Многослойную композицию Zr/Mg целесообразно использовать

для создания высокоотражающих зеркал с толщинами слоёв магния более 5,2 нм. Такие МРЗ обладают высоким геометрическим совершенством и низким уровнем межслоевой шероховатости ($\sigma \cong 0,4$ нм). При меньших толщинах слои Mg являются островковыми, что сопровождается падением отражательной способности.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. T. W. Barbee, *MRS Bulletin*, **15**, Iss. 2: 17 (1990).
2. J. Zhu, S. Zhou, H. Li, Q. Huang, Zh. Wang, K. L. Guen, M.-H. Hu, J.-M. André, and Ph. Jonnard, *Appl. Opt.*, **49**, Iss. 20: 3922 (2010).
3. H. Maurya, P. Jonnard, K. Le Guen, J.-M. André, Z. Wang, J. Zhu, J. Dong, Z. Zhang, F. Bridou, F. Delmotte, C. Hecquet, N. Mahne, A. Giglia, and S. Nannarone, *Eur. Phys. J. B*, **64**, No. 2: 193 (2008).
4. J. Zhu, D. Xu, Sh. Zhang, W. Wu, Zh. Zhang, F. Wang, B. Wang, C. Li, Y. Xu, Zh. Wang, L. Chen, H. Zhou, and T. Huo, *Front. Optoelec. Chin.*, **1**, Iss. 3–4: 305 (2008).
5. *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник* (Ред. Н. П. Лякишев) (Москва: Машиностроение: 2001), т. 3.
6. М. А. Блохин, И. Г. Швейцер, *Рентгеноспектральный справочник* (Москва: Наука: 1982).
7. S. V. Shestov, A. M. Urnov, S. V. Kuzin, I. A. Zhitnik, and S. A. Bogachev, *Astron. Lett.*, **35**, Iss. 1: 45 (2009).
8. I. A. Zhitnik, S. V. Kuzin, A. M. Urnov, I. L. Beigman, S. A. Bozhenkov, and I. Yu. Tolstikhina, *Astron. Lett.*, **31**, Iss. 1: 37 (2005).
9. H. Li, J. Zhu, S. Zhou, Zh. Wang, H. Chen, Ph. Jonnard, K. L. Guen, and J.-M. André, *Appl. Phys. Lett.*, **102**, Iss. 11: 111103 (2013).
10. D. L. Windt, *Computers in Physics*, **12**, No. 4: 360 (1998).
11. D. L. Voronov, E. N. Zubarev, V. V. Kondratenko, Yu. P. Pershin, V. A. Sevryukova, and Ye. A. Bugayev, *Thin Solid Films*, **513**, Iss. 1–2: 152 (2006).
12. *Энциклопедия неорганических материалов* (Ред. И. М. Федорченко) (Киев: Главная редакция УСЭ: 1977), т. 1.
13. *Энциклопедия неорганических материалов* (Ред. И. М. Федорченко) (Киев: Главная редакция УСЭ: 1977), т. 2.
14. А. Г. Хачатурян, *Теория фазовых превращений и структура твёрдых растворов* (Москва: Наука: 1974).
15. С. С. Борисова, И. Ф. Михайлов, Л. П. Шпаковская, *Кристаллография*, **31**, № 4: 651 (1986).
16. Л. С. Палатник, А. А. Козьма, И. Ф. Михайлов, В. Н. Маслов, *Кристаллография*, **23**, № 3: 570 (1978).
17. *Handbook of Thin Film Technology* (Eds. L. I. Maissel and R. Glang) (McGraw-Hill Hook Company: 1970).

REFERENCES

1. T. W. Barbee, *MRS Bulletin*, **15**, Iss. 2: 17 (1990).

2. J. Zhu, S. Zhou, H. Li, Q. Huang, Zh. Wang, K. L. Guen, M.-H. Hu, J.-M. André, and Ph. Jonnard, *Appl. Opt.*, **49**, Iss. 20: 3922 (2010).
3. H. Maurya, P. Jonnard, K. Le Guen, J.-M. André, Z. Wang, J. Zhu, J. Dong, Z. Zhang, F. Bridou, F. Delmotte, C. Hecquet, N. Mahne, A. Giglia, and S. Nannarone, *Eur. Phys. J. B*, **64**, No. 2: 193 (2008).
4. J. Zhu, D. Xu, Sh. Zhang, W. Wu, Zh. Zhang, F. Wang, B. Wang, C. Li, Y. Xu, Zh. Wang, L. Chen, H. Zhou, and T. Huo, *Front. Optoelec. Chin.*, **1**, Iss. 3–4: 305 (2008).
5. *Diagrammy Sostoyaniya Dvoynykh Metallicheskih Sistem: Spravochnik* (Ed. N. P. Lyakishev) (Moscow: Mashinostroenie: 2001), vol. 3 (in Russian).
6. M. A. Blohin and I. G. Shveitser, *Rentgenospektralny Spravochnik* (Moscow: Nauka: 1982) (in Russian).
7. S. V. Shestov, A. M. Urnov, S. V. Kuzin, I. A. Zhitnik, and S. A. Bogachev, *Astron. Lett.*, **35**, Iss. 1: 45 (2009).
8. I. A. Zhitnik, S. V. Kuzin, A. M. Urnov, I. L. Beigman, S. A. Bozhenkov, and I. Yu. Tolstikhina, *Astron. Lett.*, **31**, Iss. 1: 37 (2005).
9. H. Li, J. Zhu, S. Zhou, Zh. Wang, H. Chen, Ph. Jonnard, K. L. Guen, and J.-M. André, *Appl. Phys. Lett.*, **102**, Iss. 11: 111103 (2013).
10. D. L. Windt, *Computers in Physics*, **12**, No. 4: 360 (1998).
11. D. L. Voronov, E. N. Zubarev, V. V. Kondratenko, Yu. P. Pershin, V. A. Sevryukova, and Ye. A. Bugayev, *Thin Solid Films*, **513**, Iss. 1–2: 152 (2006).
12. *Entsiklopediya Neorganicheskikh Materialov* (Ed. I. M. Fedorchenko) (Kiev: Glavnaya Redaktsiya USE: 1977), vol. 1 (in Russian).
13. *Entsiklopediya Neorganicheskikh Materialov* (Ed. I. M. Fedorchenko) (Kiev: Glavnaya Redaktsiya USE: 1977), vol. 2 (in Russian).
14. A. G. Khachaturyan, *Teoriya Fazovykh Prevrashcheniy i Struktura Tverdykh Rastvorov* (Moscow: Nauka: 1974) (in Russian).
15. S. S. Borisova, I. F. Mikhailov, and L. P. Shpakovskaya, *Kristallografiya*, **31**, No. 4: 651 (1986) (in Russian).
16. L. S. Palatnik, A. A. Koz'ma, I. F. Mikhailov, and V. N. Maslov, *Kristallografiya*, **23**, No. 3: 570 (1978) (in Russian).
17. *Handbook of Thin Film Technology* (Eds. L. I. Maissel and R. Glang) (McGraw-Hill Hook Company: 1970).