

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ Co/C ПРИ СОЗДАНИИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ РАБОТАЮЩЕЙ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ $\lambda = 4,86$ НМ

Е.А. Бугаев

*Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”  
Украина*

Поступила в редакцию 27.02.2012

Рассмотрены проблемы синтеза, аттестации и термической обработки периодических многослойных рентгеновских зеркал Co/C. Описан метод согласования отражения рентгеновского излучения в пределах полной апертуры двухзеркальной оптической системы-объектива Шварцшильда. Показано, что, установка диафрагмы между источником и сферической подложкой и перемещение подложки с ускорением обеспечивают необходимое распределение периода многослойного покрытия вдоль поверхности зеркал.

**Ключевые слова:** рентгеновская микроскопия, многослойные покрытия, распыление.

Розглянуті проблеми синтезу, атестації і термічної обробки періодичних багатослойних рентгенівських дзеркал Co/C. Описаний метод узгодження відбиття рентгенівського випромінювання в межах повної апертури дводзеркальної оптичної системи-об’єктива Шварцшильда. Показано, що встановлення діафрагми між джерелом і сферичною підкладкою та переміщення підкладки з прискоренням забезпечують необхідний розподіл періоду багатослойного покриття вздовж поверхні дзеркал.

**Ключові слова:** рентгенівська микроскопія, багатослойні покриття, розпилення.

Synthesis, testing and thermal annealing of the Co/C multilayer x-ray mirrors have been considered. The method of matching the reflection of x-rays in the clear aperture of the two-mirror Schwarzschild system has been proposed. It has been shown that applying of a shadow mask between the magnetron sources and substrate with its accelerated moving provides necessary period distribution along the mirror surface.

**Keywords:** X-ray microscopy, multilayers, sputtering.

### ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновская микроскопия (РМ) в диапазоне мягкого излучения ( $\lambda = 2 - 5$  нм) становится важным инструментом в исследовании биологических объектов вследствие существенно более высокого разрешения (менее 100 нм) по сравнению с оптическим диапазоном длин волн [1]. Наличие скачков поглощения кислорода (2,3 нм) и углерода (4,4 нм) делят волновой диапазон на два, так называемых, “окна”-“водяное” (2,3 – 4,4 нм) и “углеродное” (4,4 – 5 нм). В первом диапазоне исследуются тонкие и “влажные” (с криофиксацией) образцы биологических тканей, в которых высокий контраст возникает между “прозрачной” водой и богатой углеродом клеточной структурой [2], а во втором относительно толстые и “сухие” образцы, в которых контраст обусловлен различной “прозрачностью” углеродных органических соединений [3].

В настоящее время реализованы проекты по РМ, использующие синхротронное излучение в качестве источника и зонные пластинки Френеля в качестве элементов формирующих изображение [1, 2]. Однако синхротрон очень дорогой источник, имеет очень большие размеры и доступ к излучению на нем ограничен. Для того чтобы РМ получила широкое распространение и стала общедоступной технологией, необходимо разработать лабораторную систему, включающую в себя источник, оптику и регистрирующую часть.

Задачу регистрации излучения можно считать решенной, на сегодняшний день ПЗС матрицы коммерчески доступны. Разработано несколько типов лабораторных источников, один из них – излучение лазерной плазмы, формируемой на поверхности легкой мишени, например, нитрида бора. Таким спо-

собом можно получить яркие характеристические линии многократно ионизированного азота в “водяном окне” ( $\text{Ly}-\alpha$ ,  $\lambda = 2,478$  нм) [4] и бора в “углеродном окне” ( $\text{Ly}-\alpha$ ,  $\lambda = 4,859$  нм) [5]. Достигнутая к настоящему моменту мощность лазерных источников пока недостаточна для использования лабораторного рентгеновского микроскопа на основе зонных пластинок. Альтернативой зонным пластинкам может служить зеркальная оптика на основе многослойных покрытий – рентгеновских зеркал нормального падения. Зеркальная оптика, обладая сопоставимым с зонной пластинкой разрешением, позволяет более эффективно использовать излучение источника, ее светосила превосходит зонную пластинку на два порядка [6]. Однако ее долгое время не рассматривали как альтернативу зонным пластинкам из-за малости достигнутых коэффициентов отражения рентгеновских зеркал в данном диапазоне длин волн и, соответственно, низкой дифракционной эффективности зеркальной оптики [7].

Последние достижения в синтезе многослойных периодических композиций с высокой (более 10%) отражательной способностью [8] позволяют приступить к изготовлению зеркальной оптики для РМ “углеродного окна”. Первые шаги в этом направлении, предпринятые несколько лет назад, были направлены на создание объектива Шварцшильда для широкополосного плазменного источника [9, 10]. Ниже представлены результаты работы по созданию первого узкополосного двухзеркального рентгеновского объектива Шварцшильда использующего в качестве источника лабораторную лазерную плазму, имеющую яркую характеристическую линию водородоподобного бора  $\text{Ly}-\alpha$ ,  $\lambda = 4,859$  нм.

### ОБЪЕКТИВ ШВАРЦШИЛЬДА

В последнее десятилетие предпринимаются попытки разработать различные рентгенооптические системы для фокусировки и получения изображений [11], включая зеркальную оптику нормального падения [12 – 14]. Одной из таких систем является двухзеркальный объектив на основе схемы Шварцшильда [15] – по сути “рентгеновская” линза.

Он представляет собой два концентрических сферических зеркала с многослойным покрытием (рис. 1, табл. 1). Такой объектив с покрытием для работы в “углеродном окне” позволяет:

- получать изображения с пространственным разрешением менее 100 нм, низкими абберациями, 20-ти кратным увеличением и полем зрения в сотни микрон;
- использовать относительно маломощные лабораторные источники рентгеновского излучения за счет большой светосилы;
- исследовать образцы, зафиксированные традиционными для оптической микроскопии способами, за счет большого фокусного расстояния объектива и прозрачности фиксирующего материала в “углеродном окне”;
- осуществлять 3-D томографию за счет малой, 20 – 30 нм, глубины резкости.

Таблица 1

Геометрические параметры объектива Шварцшильда для рентгеновской микроскопии “углеродного окна”

Увеличение объектива	21,26
Фокус, $f$	26,92 мм
Числовая апертура	0,19
Радиус малого зеркала, $y_1$	5,3 мм
Радиус большого зеркала, $y_2$	27 мм
Радиус кривизны малого зеркала	35 мм
Радиус кривизны большого зеркала	100 мм
Расстояние от объекта до изображения, $a$	627,7 мм
Расстояние до объекта, $b$	128,19 мм
Зазор между зеркалами, $d$	65 мм

Создание светосильного объектива Шварцшильда, работающего в коротковолновой части мягкого рентгеновского диапазона, является сложной задачей и требует решения целого ряда специальных вопросов при изготовлении многослойных покрытий зеркал.

Многослойное покрытие, состоящее из двух различных материалов, должно содержать несколько сотен гладких, сплошных слоев толщиной  $\sim 1$  нм. Наличие шероховатости границ раздела слоев или даже незначительного их диффузионного взаимодействия в доли нанометра будет приводить к уменьшению величины отражения зеркала в несколько раз по сравнению с идеальным случаем. Поэтому удачный подбор материалов и разра-

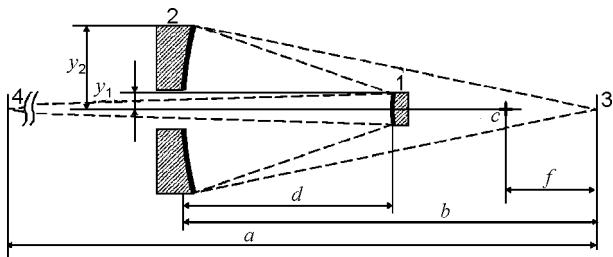


Рис. 1. Схема объектива Шварцшильда. 1 – выпуклое зеркало, 2 – вогнутое зеркало, 3 – объект, 4 – экран,  $c$  – центр кривизны зеркал (остальные обозначения в табл. 1). Пунктиром показан ход лучей в объективе.

ботка оптимальной технологии их нанесения позволяют достичь высокой отражательной способности рентгеновских зеркал в “углеродном окне”. Как было показано ранее [16], многослойная периодическая композиция  $Co/C$  изготовленная методом магнетронного распыления с числом периодов  $N = 200$  имеет коэффициент отражения при нормальном падении  $\sim 15\%$  и наиболее подходит для покрытия объектива Шварцшильда. Покрытие  $Co/C$ , как интерференционное зеркало имеет высокий коэффициент отражения только в ограниченной области длин волн  $\Delta\lambda$  (соответственно, ограниченной области углов  $\Delta\Theta$ ), равную  $1/N$ , где  $N$  число периодов многослойной структуры, участвующих в формировании отражения. В области “углеродного окна” в отражении участвуют почти две сотни периодов зеркала, что приводит к узкой полосе пропускания зеркал  $Co/C$  ( $\Delta\lambda \sim 0,025$  нм) [13]. Данное обстоятельство требует нанесения покрытия с чрезвычайно строгим значением периода в каждой точке каждого зеркала ( $\Delta d/d = \Delta\lambda/\lambda = 0,5\%$ , т. е.  $\pm 0,006$  нм), чтобы согласовать длину волны и угол падения излучения при последовательном отражении от зеркал объектива. Таким образом, многослойные отражающие покрытия объектива Шварцшильда для работы в диапазоне “углеродного окна” должны быть изготовлены из слоев высокого качества с изменяемым по определенному закону периодом, высокая точность изготовления которых обеспечивает оптимальное сопряжение отражающих полос зеркал при работе в диапазоне “углеродного окна”, т.е. на длине волны  $\lambda \sim 4,86$  нм.

В предложенной схеме объектива (табл. 1), диапазон углов падения излучения (в пределах кольцевой апертуры в приближении, что поле зрения достаточно мало) составляет

$1 - 3^\circ$  и  $3 - 9^\circ$ , для вогнутого и выпуклого зеркал, соответственно. Используя закон Брэгга  $\lambda = 2d\sin\Theta$  легко определить период многослойного покрытия, который должен иметь аксиальную симметрию и плавно меняться вдоль радиуса каждого из зеркал (рис. 2).

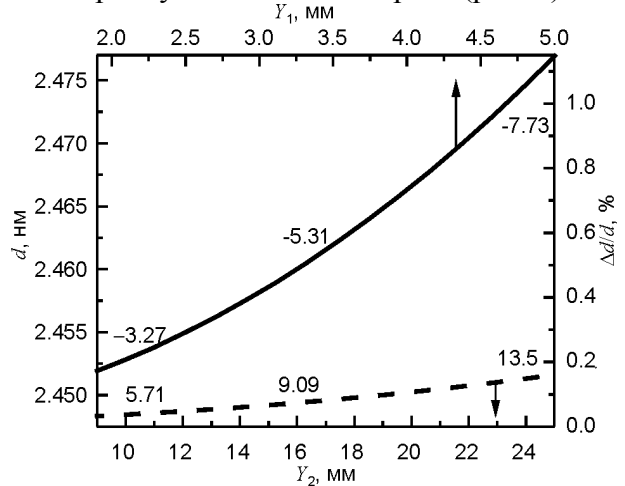


Рис. 2. Абсолютное ( $d$ ) и относительное ( $\Delta d/d$ ) изменение периода покрытия вдоль радиуса вогнутого (---) и выпуклого (-) зеркал в пределах апертуры объектива. Цифрами обозначен угол в градусах между осью зеркала и нормалью к его поверхности в данной точке.

Вообще говоря, распределение периода многослойного покрытия при осаждении его на криволинейную подложку будет существенно отличаться от зависимости, приведенной на рис. 2. Так в наших экспериментах период уменьшался на  $3,5\%$  от центра зеркала к краю для выпуклого зеркала и возрастал на  $3\%$  для вогнутого зеркала. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, расстояние источник-подложка не постоянно для всех точек зеркала, во-вторых, угол наклона элементарных площадок поверхности зеркал изменяется, причем изменение расстояния и наклона происходит в противоположные стороны (рис. 2). В ряду успешных работ по созданию объектива Шварцшильда для более мягкого рентгеновского излучения, перекрытие дифракционных максимумов обеспечивалось либо за счет очень широких полос пропускания зеркал  $\Delta\lambda/\lambda \sim 5 - 10\%$  [12, 17], либо путем применения сложных механизмов – неравномерно перемещающихся заслонок специальной формы [18].

Следует отметить, что создание зеркал с точностью распределения периода, приведенной выше, должно учитывать и более

тонкие эффекты. Так, во-первых, необходимо учитывать преломление рентгеновских лучей, которое ощутимо в этой области электромагнитного излучения (смещает полосу пропускания примерно на 1%). Для его учета необходимо знать реальную структуру покрытия – состав, плотность и толщину каждого слоя покрытия, что бы точно предсказать угловое положение брэгговского максимума. Во-вторых, рассчитать его реальную ширину (т. е. число эффективно работающих периодов многослойной структуры), чтобы определить допустимое отклонение периода зеркала от идеального распределения. Эти вопросы были рассмотрены ранее [19] и результаты исследования структуры композиций Co/C использовались в данной работе. Учитывая все эти факторы, в качестве критерия совпадения полос пропускания мы ограничились точностью периода зеркал в  $\pm 0,01$  нм.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Управление распределением периода зеркал по криволинейной поверхности требует разработки новой технологии осаждения многослойных структур. Значительные изменения периода и сильная кривизна зеркал требует также разработки соответствующих методик по измерению распределения периода и возможной дополнительной обработки зеркал для обеспечения перекрытия дифракционных максимумов покрытий в пределах всей апертуры оптической системы.

Многослойные покрытия Co/C изготавливались методом магнетронного распыления на постоянном токе в среде аргона при давлении 0,2 Па. В качестве мишеней использовались диски кобальта (99,5%) и углерода (99,99%) диаметром 100 мм, расположенные симметрично относительно оси вращения подложкодержателя на расстоянии 170 мм друг от друга. Подложка могла последовательно экспонироваться над мишенями в двух режимах: в фиксированном положении над центрами мишеней и в режиме движения с заданной скоростью. Подложкодержатель управлялся шаговым двигателем (1600 шагов/об.) и был оборудован двигателем постоянного тока, обеспечивавший вращение подложки вокруг собственной оси со скоростью 50 об/сек. Скорость осаждения компонентов покрытия выбиралась такой, чтобы подложка

совершала несколько оборотов вокруг собственной оси между каждым шагом подложкодержателя. В качестве подложек использовались: полированное стекло, полированный кремний, слюда мусковит. Подложки объектива были изготовлены из полированного плавленого кварца со среднеквадратичной шероховатостью 0,25 нм и точностью формы  $\lambda/10$  ( $\lambda = 633$  нм). Пространственное распределение скорости осаждения каждого из материалов определялось по поглощению света на планшетном сканере HP 4050 в режиме сканирования пленочных позитивов. Толщина однослойных и период многослойных покрытий измерялся методом малоугловой рентгеновской дифракции в излучении  $\text{CuK}_{\alpha 1}$  (0.15405 нм) с последующим моделированием экспериментальных спектров. Спектры моделировалась в программе X-ray Calc, рассчитывающей коэффициент отражения покрытия на основе формул Френеля.

Процесс изготовления зеркал содержал несколько стадий осаждения однослойных и многослойных покрытий, которые подробно рассмотрены ниже:

1. Определение распределения толщины пленок кобальта и углерода по поверхности плоской неподвижной подложки.
2. Расчет и изготовление затеняющих масок для получения однородного покрытия на движущейся плоской подложке.
3. Определение распределения толщины пленок на изогнутой вращающейся и движущейся подложке и расчет ее криволинейного движения для создания необходимого градиента покрытия.
4. Определение распределения периода многослойного покрытия по поверхности подложек движущихся по заданному закону.
5. Отжиг зеркал для точной подгонки их периода к расчетному значению.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК КОБАЛЬТА И УГЛЕРОДА

Пространственное распределение скорости осаждения пленок кобальта и углерода определялось по поглощению света. Для определения коэффициента поглощения света для каждого из материалов на пластины полированного стекла наносились прозрачные для

света пленки кобальта и углерода толщиной 3 – 100 нм. Толщина этих покрытий измерялась рентгеновским методом по осцилляциям у первичного пучка с точностью ~1% (рис. 3) на площади 1 мм<sup>2</sup>.

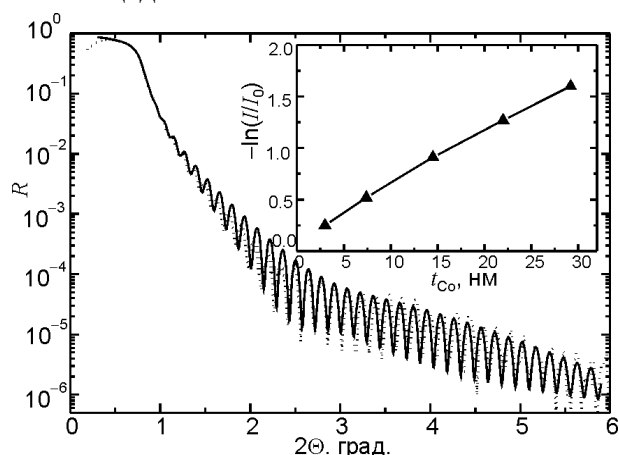


Рис. 3. Экспериментальная (---) и расчетная (—) кривые малоугловой рентгеновской ( $\lambda = 0,154$  нм) дифракции от пленки кобальта толщиной  $57,8 \pm 0,2$  нм. На вставке показана величина  $-\ln(I/I_0)$  как функция толщины, по которой определялся коэффициент поглощения света для кобальта. Аналогичные кривые строились для углерода.

По результатам сканирования находился логарифм отношения цифровых значений яркости полученных изображений для запыленного ( $I$ ) и чистого ( $I_0$ ) стекла усредненный по ансамблю пикселей ( $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>). По углу наклона зависимости  $-\ln(I/I_0)$  от толщины пленки определялся коэффициент поглощения отдельно для кобальта и углерода (рис. 3, вставка). В результате сканирования были получены матрицы скоростей осаждения каждого из материалов с пространственным разрешением 100 мкм по площади  $\varnothing 6$  см с точностью  $\pm 1\%$  (рис. 4).

### РАСЧЕТ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЗАТЕНЯЮЩИХ МАСОК

Для управления распределением периода по поверхности подложки на начальном этапе были разработаны затеняющие мишень маски, обеспечивающие однородное осаждение каждого из материалов на плоскую поверхность в режиме движения подложки с постоянной скоростью над источником.

При движении зафиксированной подложки над магнетронным источником каждая точка ее поверхности описывает над мише-

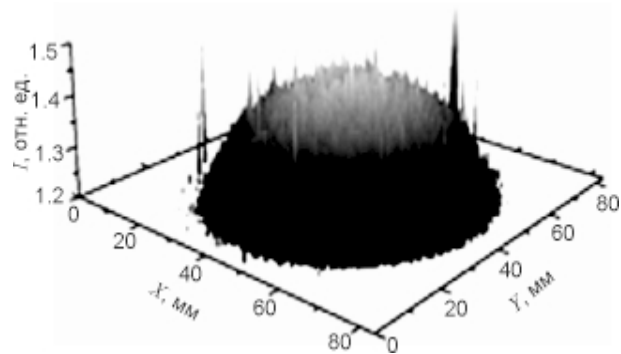


Рис. 4. Матрица относительной толщины пленки кобальта ( $t$ ), осажденной на плоскую неподвижную подложку до установки масок.

ню дугу, центр которой совпадает с центром вращения подложкодержателя. Для того чтобы в каждой точке подложки осаждалась пленка равной толщины достаточно между мишенью и подложкой разметить диафрагму (маску) такой формы, чтобы при движении каждой точки подложки по дуге осаждалась одно и то же количество материала (рис. 5). Численным интегрированием матрицы скорости осаждения были определены формы затеняющих масок для каждого материала. Маски для вогнутого и выпуклого зеркал отличались апертурой, из-за существенного различия в диаметре зеркал. На основе проведенных расчетов были изготовлены фотошаблоны и методом фотолитографии изготовлены маски из нержавеющей стали. При движении над масками с постоянной скоростью вращающейся плоской подложки была достигнута высокая ( $< 0,1\%$ ) радиальная симметрия и осевая симметрия ( $\pm 1\%$ ) в распределении толщины кобальта и углерода.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА ДВИЖЕНИЯ ПОДЛОЖЕК

Для получения необходимого распределения толщины покрытия вдоль радиуса зеркала подложка двигалась над маской с переменной скоростью. Шаговый двигатель, управляющий движением подложкодержателя, программировался таким образом, чтобы между дискретными шагами двигателя  $n$  и  $n + 1$ , пауза определялась соотношением  $t(n) = T \pm \Delta t_n$ , где  $T$  – фиксированное время между шагами, а  $\Delta t_n$  определялась выражением:

$$A \cdot \cos(2\pi(n - n_1)/(n_2 - n_1) - \pi),$$

где  $A$  – константа равная нулю при  $n < N_1$  и  $n > N_2$ ,  $N_1$  и  $N_2$  – начальный и конечный шаги,

задающие область движения подложки с ускорением над маской (рис. 5).

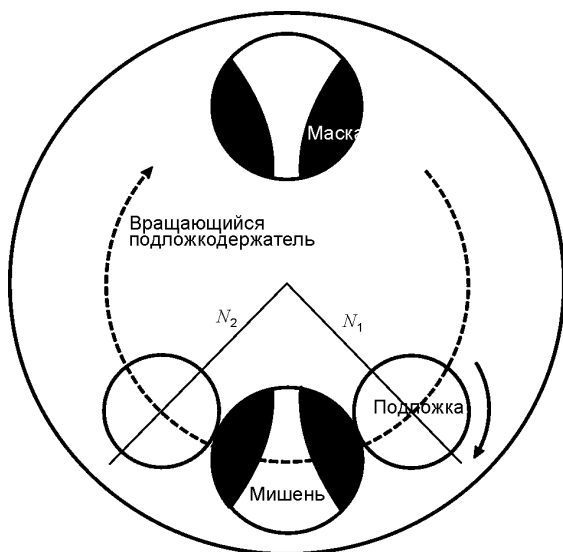


Рис. 5. Схема процесса осаждения многослойных покрытий Co/C.  $N_1$  и  $N_2$  границы зоны, где подложка движется с ускорением.

Параметры  $A$ ,  $N_1$  и  $N_2$  предварительно рассчитывались путем интегрирования матрицы скоростей, полученной на плоскую неподвижную подложку при маскированной мишени. В экспериментах пленки кобальта и углерода наносились на пластинки кремния (2×6 мм) уложенные по касательным к сфере соответствующего зеркалам радиуса. Толщина покрытия определялась рентгеновским способом. Таким образом, обеспечивалось постоянное соотношение толщины кобальта и углерода в многослойной композиции в каждой точке зеркала.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДА МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ НА КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОДЛОЖКАХ

Для достижения необходимой точности в изготовлении градуированных зеркал потребовалось разработать специальную методику по измерению распределения периода покрытий вдоль криволинейной поверхности.

На поверхность сферической подложки-шаблона по радиусу крепились тонкие полоски слюды толщиной 0,05 и шириной 2 мм. После осаждения многослойного покрытия слюдяные подложки закреплялись на специальном столике рентгеновского дифракто-

метра, который обеспечивал контроль положения образца по отношению к рентгеновскому лучу в трех направлениях. Для обеспечения одинаковой геометрии съемок в различных точках разных образцов слюдяные подложки изгибались по цилиндрической поверхности радиусом 35 мм. Этим также достигалось высокое разрешение измерений за счет того, что в пределах обучаемой области (~1,5 мм) угол изгиба покрытия без малого на два порядка превышал угловую ширину брэгговского максимума. Таким образом, локальность измерений в плоскости дифракции составляла примерно 20 мкм, в ортогональном направлении пучок имел размер около 1 мм. Юстировка образца обеспечивалась по отражению лазерного луча направленного точно по нормали к оси гониометра и рентгеновскому пучку. Данная геометрия съемки не позволяла оценить коэффициент отражения покрытия, но обеспечивало достаточную точность измерения его периода. Следует отметить, что при использовании гибких подложек, таких как слюда, например, необходимо учитывать влияние внутренних напряжений в покрытии, которые могут деформировать тонкую подложку. В наших экспериментах число периодов покрытия было уменьшено до 30 для минимизации этого эффекта.

### ОТЖИГ ЗЕРКАЛ

Сравнение периода многослойных покрытий, полученных в различных экспериментах при одинаковых условиях, показало наличие статистического разброса на уровне 1%. Такой разброс некоторых параметров осаждения не позволяет обеспечить надежное совпадение полос пропускания зеркал объектива. Для преодоления этого препятствия использовалась возможность увеличения периода Co/C зеркал путем их отжига без потери в отражательной способности [20].

Многослойное покрытие изготавливалось с периодом на 1 – 2% меньше номинального. Затем проводилась серия отжигов для определения зависимости прироста периода от температуры (рис. 6), которая в дальнейшем использовалась для коррекции периода покрытия после его осаждения на криволинейные подложки.

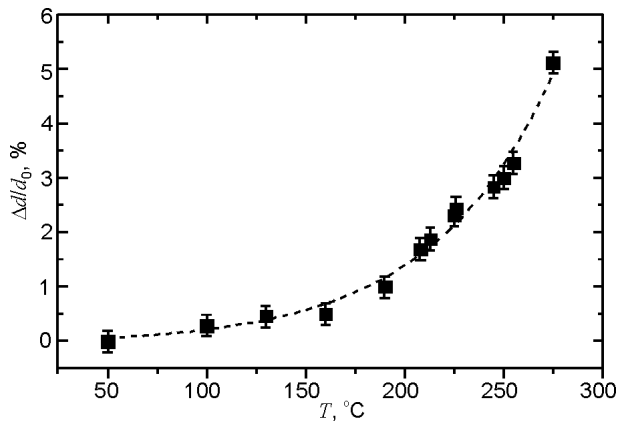


Рис. 6. Относительный рост периода многослойного покрытия Co/C ( $d_0 = 2,4$  нм) при нагреве.

Непосредственно измерить период покрытия методом малоугловой рентгеновской дифракции на вогнутом зеркале не представлялось возможным из-за практически полного затенения его поверхности при малых углах падения излучения. В этом случае температура отжига определялась по периоду образца-свидетеля, расположенного в центральном отверстии зеркала. Распределение периода после отжига определялось по гибкому образцу, изготовленному в отдельном эксперименте, период которого нормировался на период образца-свидетеля.

На рис. 7 приведены результаты измерения периода изготовленных зеркал. Черным цветом (коэффициент отражения более 50% от номинального) обозначена область углов скольжения и соответствующий им расчетный период вогнутого и выпуклого зеркал.

Как видно на рис. 7, экспериментально измеренные значения периода в целом хорошо совпадают с расчетными значениями, за исключением небольшой части апертуры (~1/5) на выпуклом зеркале, где неточность в периоде приведет к падению коэффициента отражения более, чем в два раза. В результате общая светосила объектива понизится примерно на 10% по сравнению с оптимальным значением. Рис. 7 наглядно демонстрирует, что удалось обеспечить высокий градиент периода на выпуклом зеркале ~0,3% на миллиметр и практически постоянный период на вогнутом зеркале ~0,05% на сантиметр, и достичь высокой степени совпадения полос отражения зеркал объектива.

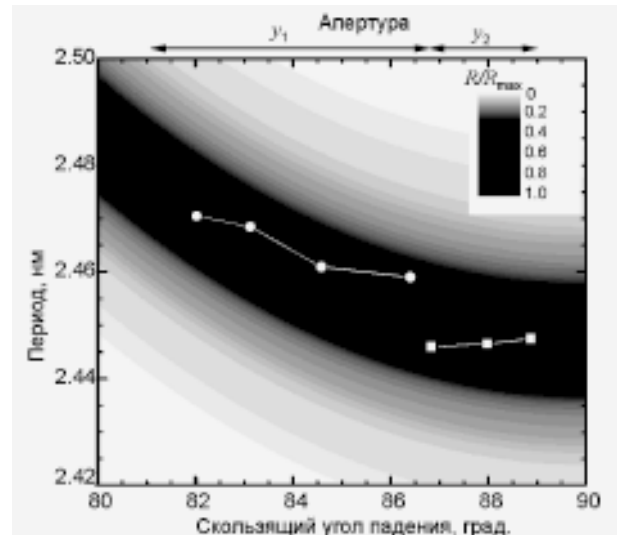


Рис. 7. Зависимость нормированного коэффициента отражения зеркал Co/C от периода и скользкого угла падения излучения на длине волны 4,86 нм. Экспериментально измеренный период для выпуклого (-□-) и вогнутого (-o-) зеркал в пределах апертуры объектива ( $y_1, y_2$ ) совпадает с расчетной полосой пропускания объектива.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика изготовления многослойных покрытий с контролируемым распределением периода по сферическим поверхностям с кривизной разного знака и величины. Показано, что сочетание затеняющей маски, вращения подложки вокруг собственной оси и движение подложки с ускорением над источником позволяют достичь удовлетворительной точности в величине и распределении периода вдоль поверхности. Применение отжига в качестве способа контролируемого увеличения периода покрытия, позволили обеспечить перекрытие полос пропускания зеркал и обеспечить приемлемую светосилу рентгеновского объектива, рассчитанного для работы в узкой спектральной области “углеродного окна”.

Автор выражает благодарность Ирине Цыганковой, Игорю Артюкову и Валерии Кондратенко за помощь в проведении экспериментов и подготовке статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

- McDermott G., Le Gros M.A., Knoechel Ch.G., Uchida M., Larabell C.A. Soft X-ray tomography and cryogenic light microscopy: the cool combi-



- nation in cellular imaging//Trends in Cell Biology. – 2009. – Vol. 19, No. 11. – P. 587-595.
2. Chao W., Harteneck B.D., Liddle J.A., Anderson E.H., Attwood D.T. Soft X-ray microscopy at a spatial resolution better than 15 nm//Nature. – 2005. – Vol. 435. – P. 1210-1213.
  3. Артюков И., Виноградов А., Касьянов Ю., Савельев С. О рентгеновской микроскопии в области “углеродного окна”//Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 8. – С. 691-692.
  4. Crank M., Harilal S.S., Hassan S.M., Hassanein A. X-ray emission in the “water-window” from laser-produced boron-nitride plasma//Abstracts IEEE International Conference. Plasma Science (ICOPS). – Chicago – 2011. – P. 5993263.
  5. Nagata Yu., Midorikawa K. Soft-x-ray generation from boron clusters irradiated by subpicosecond intense laser pulse//RIKEN Review. – 1998. – No. 17. – P. 21-22.
  6. Артюков И., Крымский К. Анализ оптических свойств объектива Шварцшильда. - М.: Препринт ФИАН, 1998. – 22 с.
  7. Рентгеновская оптика и микроскопия/Пер. с англ./Под ред. Г. Шмаля и Д. Рудольфа. – М: Мир, 1987. - 464 с.
  8. Artyukov I., Bugayev Ye., Devizenko O., Feschenko R., Kasyanov Yu., Kondratenko V., Romanova S., Saveliev S., Schfers F., Feigle T., Uspenski Yu., Vinogradov A. Carbon window soft x-ray imaging using multilayer optics//Proc. SPIE. – 2005. – Vol. 5919. – P. 59190E (1-10).
  9. Артюков И.А., Виноградов А.В., Бугаев Е.А., Девизенко А.Ю., Кондратенко В.В., Касьянов Ю.С. Рентгеновская микроскопия в области “углеродного окна” с использованием многослойной оптики и лазерно-плазменного источника//ЖЭТФ. – 2009. – Т. 136, № 5 (11). – С. 1009-1022.
  10. Бугаев Е.А. Создание градированного многослойного покрытия Co/C для изображающей системы в диапазоне “углеродного окна” ( $\lambda \sim 4,4 - 5,0$  нм)//Физическая инженерия поверхности. – 2009. – Т. 7, № 1-2. – С. 69-75.
  11. Sakdinawat A., Attwood D. Nanoscale X-ray imaging//Nature Photonics. – 2010. – Vol. 4. – P. 840-848.
  12. Vaschenko G., Brizuela F., Brewer C., Grisham M., Mancini H., Menoni C., Marconi M., Rocca J., Chao W., Liddle J., Anderson E., Attwood D., Vinogradov A., Artiukov I., Pershyn Y., Kondratenko V. Nanoimaging with a compact extreme-ultraviolet laser//Optics Letters. – 2005. – Vol. 30, No. 16. – P. 2095-2097.
  13. Artyukov I.A., Bugayev Ye.A., Devizenko O.Yu., Gullikson E., Kondratenko V.V., Vinogradov A.V. X-ray Schwarzschild objective for the carbon window ( $\lambda \sim 4.5$  nm)//Optics Letters. – 2009. – Vol. 34, No. 19. – P. 2930-2932.
  14. Takenaka H., Ichimaru S., Nagai K., Ohchi T., Ito H., Gullikson E. Multilayer mirrors for m-XPS using a Schwarzschild objective//Surface and Interface Analysis. – 2005. – Vol. 37, No. 2. – P. 181-184.
  15. Artiukov I., Krymski K. Schwarzschild objective for soft x-rays//Optical Engineering. – 2000. – Vol. 39, No. 8. - P. 2163-2170.
  16. Artyukov I., Feschenko R., Vinogradov A., Bugayev Ye., Devizenko O., Kondratenko V., Kasyanov Yu., Hatanod T., Yamamoto M., Saveliev S. Soft X-ray imaging of thick carbon-based materials using the normal incidence multilayer optics//Micron. – 2010. – Vol. 41. – P. 722-728.
  17. Artiukov, I., Vinogradov A., Asadchikov V., Kasyanov Yu., Serov R., Fedorenko A., Kondratenko V., Yulin S. Schwarzschild soft x-ray microscope for imaging of nonradiating objects//Optics Letters. – 1995. – Vol. 20, No. 24. – P. 2451-2453.
  18. Hatano T., Umetsu H., Yamamoto M. Deposition shutter control for figured multilayer fabrication //Precision Science and Technology. The Japan Society for Precision Engineering. – Tokyo. – 1999.– P. 292.
  19. Бугаев Е.А., Девизенко А.Ю., Зубарев Е.Н., Севрюкова В.А., Кондратенко В.В. Межслоевое взаимодействие и структурно-фазовые превращения в многослойной пленочной системе Co/C//Металлофизика и новейшие технологии.– 2008. – Т. 30, № 11. – С. 1533-1545.
  20. Бугаев Е.А., Девизенко А.Ю., Зубарев Е.Н., Севрюкова В.А., Кондратенко В.В. Эволюция структуры и фазового состава многослойной пленочной композиции Co/C при температурном воздействии// Металлофизика и новейшие технологии.– 2009.– Т. 31, № 9. – С. 1189-1204.

## LITERATURA

1. McDermott G., Le Gros M.A., Knoechel Ch.G., Uchida M., Larabell C.A. Soft X-ray tomography and cryogenic light microscopy: the cool combination in cellular imaging//Trends in Cell Biology. – 2009. – Vol. 19, No. 11. – P. 587-595.
2. Chao W., Harteneck B.D., Liddle J.A., Anderson E.H., Attwood D.T. Soft X-ray microscopy at a spatial resolution better than 15 nm//Nature. – 2005. – Vol. 435. – P. 1210-1213.



3. Artyukov I., Vinogradov A., Kasyanov Yu., Saveliev S. O rentgenovskoj mikroskopii v oblasti "uglerodnogo okna"//Kvantovaya `elektronika. – 2004. – T. 34, № 8. – S. 691-692.
4. Crank M., Harilal S.S., Hassan S.M., Hassanein A. X-ray emission in the "water-window" from laser-produced boron-nitride plasma//Abstracts IEEE International Conference. Plasma Science (ICOPS). – Chicago – 2011. – R. 5993263.
5. Nagata Yu., Midorikawa K. Soft x-ray generation from boron clusters irradiated by subpicosecond intense laser pulse//RIKEN Review. – 1998. – No. 17. – P. 21-22.
6. Artyukov I., Krymskij K. Analiz opticheskikh svojstv obektiva Shvarcschilda. – M.: Preprint FIAN, 1998. – 22 s.
7. Rentgenovskaya optika i mikroskopiya/Per. s angl./Pod red. G. Shmalya i D. Rudol'fa. – M: Mir, 1987. – 464 s.
8. Artyukov I., Bugayev Ye., Devizenko O., Feschenko R., Kasyanov Yu., Kondratenko V., Romanova S., Saveliev S., Schfers F., Feigle T., Uspenski Yu., Vinogradov A. Carbon window soft x-ray imaging using multilayer optics//Proc. SPIE. – 2005. – Vol. 5919. – P. 59190E (1-10).
9. Artyukov I.A., Vinogradov A.V., Bugaev E.A., Devizenko A.Yu., Kondratenko V.V., Kasyanov Yu.S. Rentgenovskaya mikroskopiya v oblasti "uglerodnogo okna" s ispolzovaniem mnogoslojnoj optiki i lazerno-plazmennogo istochnika//ZhETF. – 2009. – T. 136, № 5 (11). – S. 1009-1022.
10. Bugaev E.A. Sozdanie gradirovannogo mnogoslojnogo pokrytiya Co/C dlya izobrazhayushej sistemy v diapazone "uglerodnogo okna" ( $\lambda \sim 4,4 - 5,0$  nm)//Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. – 2009. – T. 7, № 1-2. – S. 69-75.
11. Sakdinawat A., Attwood D. Nanoscale X-ray imaging//Nature Photonics. – 2010. – Vol. 4. – P. 840-848.
12. Vaschenko G., Brizuela F., Brewer C., Grisham M., Mancini H., Menoni C., Marconi M., Rocca J., Chao W., Liddle J., Anderson E., Attwood D., Vinogradov A., Artiukov I., Pershyn Y., Kondratenko V. Nanoimaging with a compact extreme-ultraviolet laser//Optics Letters. – 2005. – Vol. 30, No. 16. – P. 2095-2097.
13. Artyukov I.A., Bugayev Ye.A., Devizenko O. Yu., Gullikson E., Kondratenko V.V., Vinogradov A.V. X-ray Schwarzschild objective for the carbon window ( $\lambda \sim 4.5$  nm)//Optics Letters. – 2009. – Vol. 34, No. 19. – P. 2930-2932.
14. Takenaka H., Ichimaru S., Nagai K., Ohchi T., Ito H., Gullikson E. Multilayer mirrors for  $\mu$ -XPS using a Schwarzschild objective//Surface and Interface Analysis. – 2005. – Vol. 37, No. 2. – P. 181-184.
15. Artiukov I., Krymski K. Schwarzschild objective for soft x-rays//Optical Engineering. – 2000. – Vol. 39, No. 8. – P. 2163-2170.
16. Artyukov I., Feschenko R., Vinogradov A., Bugayev Ye., Devizenko O., Kondratenko V., Kasyanov Yu., Hatanod T., Yamamoto M., Saveliev S. Soft X-ray imaging of thick carbon-based materials using the normal incidence multilayer optics//Micron. – 2010. – Vol. 41. – P. 722-728.
17. Artiukov, I., Vinogradov A., Asadchikov V., Kasyanov Yu., Serov R., Fedorenko A., Kondratenko V., Yulin S. Schwarzschild soft x-ray microscope for imaging of nonradiating objects//Optics Letters. – 1995. – Vol. 20, No. 24. – P. 2451-2453.
18. Hatano T., Umetsu H., Yamamoto M. Deposition shutter control for figured multilayer fabrication //Precision Science and Technology. The Japan Society for Precision Engineering. – Tokyo. – 1999. – P. 292.
19. Bugaev E.A., Devizenko A.Yu., Zubarev E.N., Sevryukova V.A., Kondratenko V.V. Mezhsloevoe vzaimodejstvie i strukturno-fazovye prevrascheniya v mnogoslojnoj plenochnoj sisteme Co/C//Metallofizika i novejschie tehnologii.– 2008. – T. 30, № 11. – S. 1533-1545.
20. Bugaev E.A., Devizenko A.Yu., Zubarev E.N., Sevryukova V.A., Kondratenko V.V. Evolyuciya struktury i fazovogo sostava mnogoslojnoj plenochnoj kompozicii Co/C pri temperatur-nom vozdejstvii//Metallofizika i novejschie tehnologii.– 2009.– T. 31, № 9. – S. 1189-1204.