

# Сравнение подходов в изготовлении широкополосных зеркал для ЭУФ диапазона: аperiodические и стекковые структуры

М.М.Барышева, С.А.Гарахин, С.Ю.Зуев, В.Н.Полковников, Н.Н.Салашенко, М.В.Свечников, Н.И.Чхало, С.Юлин

*Разработан дизайн и экспериментально изучены аperiodические и стекковые широкополосные Mo/Si-зеркала для задач проекта «Кортес», оптимизированные на равномерное отражение в диапазоне длин волн 17–21 нм. Показано, что стекковые структуры при незначительном проигрыше в величине коэффициента отражения оказываются намного более предпочтительными с точки зрения изготовления и аттестации, что, в свою очередь, позволяет корректировать процесс напыления и за небольшое число итераций достигать расчетных параметров многослойного зеркала.*

*Ключевые слова:* ЭУФ, широкополосные зеркала, аperiodические структуры, блок-структуры, стекковые структуры, магнетронное напыление, обратная задача.

## 1. Введение

С 1980-х годов периодические многослойные зеркала являются универсальным элементом оптических систем, предназначенных для работы во всем рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазонах длин волн (0.01–60 нм). Развитие технологии изготовления и методов аттестации таких структур позволило в настоящий момент вплотную подойти к теоретическому пределу значений коэффициентов отражения [1–5]. Вместе с тем, практически с самого начала [6, 7] ставился вопрос об изготовлении зеркал с изменяемым по глубине периодом, обладающих лучшими характеристиками – прежде всего, большим, чем у периодических зеркал, интегральным коэффициентом отражения, увеличенной спектральной или угловой полосой отражения. Для астрофизического телескопа Киркпатрика–Байеза [8] были предложены многослойные W/Si-зеркала, отражающие излучение с длинами волн до 0.18 Å при скользких углах падения 3 мрад. Период зеркала монотонно уменьшался в глубь структуры по закону  $d_i = a(b + i)^{-c}$ , где  $d_i$  – величина  $i$ -го периода от поверхности;  $c \approx 0.26$ ;  $a$  и  $b$  – подгоночные параметры. Этот подход получил название ABC-модели, или модели суперзеркала. В работах [9, 10] были предложены численные и аналитические способы расчета параметров таких зеркал, обеспечивающих заданный профиль кривой отражения. Позднее этот подход был применен при конструировании зеркал для каналов синхротронного излучения и для увеличения потока излучения от рентгеновской трубки на образце [11].

Разработке и применению аperiodических зеркал в области мягкого рентгеновского и ЭУФ излучений по-

священа монография [12]. Особая актуальность этой тематики обусловлена исследованиями экстремального состояния вещества, в рамках которых разрабатываются системы управления пространственными, временными и спектральными характеристиками фемто- и субфемтосекундных [13], а в последнее время уже атто- и субаттосекундных импульсов электромагнитного излучения, спектр которых лежит в рентгеновском или ЭУФ диапазоне [14]. Для таких ультракоротких импульсов спектральная ширина сопоставима с несущей частотой, поэтому необходимо применение широкополосных оптических элементов вместо классических узкополосных периодических рентгеновских зеркал.

В задачах рентгеновской микроскопии в окне прозрачности воды ( $\lambda = 2.3$ –4 нм) аperiodические зеркала позволяют увеличить регистрируемый сигнал в два-три раза [15]. Также они используются в «стигматических» спектрометрах с дифракционными решетками для исследований Солнца [16]. Комплекс аппаратуры для изучения Солнца «Кортес» содержит спектрогелиограф, позволяющий регистрировать спектры излучения солнечных вспышек, микровспышек и корональных выбросов массы. Спектральный диапазон прибора определяется входящим в его состав широкополосным фокусирующим рентгеновским зеркалом. В связи с этим необходимо разработать и изготовить такое зеркало, обладающее максимальным равномерным отражением в спектральном диапазоне 17–21 нм.

Несмотря на определенные успехи в изготовлении аperiodических зеркал, практическое решение этой задачи сопряжено с большими сложностями. Основной проблемой при изготовлении рентгеновского зеркала, состоящего из большого числа (зачастую более ста) слоев с индивидуальными толщинами и обладающего оптимальным заданным коэффициентом отражения, является, прежде всего, сложность и длительность процесса калибровки: на начальной стадии напыления толщина пленки растет нелинейно, коэффициенты прилипания частиц различаются, происходит также перемешивание материалов. Заметные искажения вносят [17] технологические ошибки в толщинах слоя 1%–2%, не оказывающие

М.М.Барышева, С.А.Гарахин, С.Ю.Зуев, В.Н.Полковников, Н.Н.Салашенко, М.В.Свечников, Н.И.Чхало. Институт физики микроструктур РАН, Россия, 603087 Нижегородская обл., Кстовский р-н, д. Афонино, ул. Академическая, 7; e-mail: mmbarysheva@ipmras.ru

S.Yulin. Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF, Albert-Einstein-Strasse 7, 07745 Jena, Germany

Поступила в редакцию 6 марта 2019 г.

существенного влияния на коэффициент отражения периодической многослойной структуры. Фактически, чтобы корректно напылить  $N_{\text{AMS}}$  слоев различной толщины, необходимо провести примерно столько же разных калибровок, и это при условии, что материалы достаточно хорошо изучены на стадии изготовления периодических зеркал, т. е. известны как плотности пленок (зачастую зависящие от толщины, которая определяет аморфное или кристаллическое состояние вещества [18]), так и межслойные шероховатости. Такое априорное знание необходимо, поскольку результат решения задачи оптимизации будет существенно определяться шероховатостями, как показано авторами в [17], т. е. оптимальные толщины аperiodического многослойного зеркала будут разными в зависимости от характеристик межслойных границ. После изготовления зеркала проводится его аттестация. В случае отличия отражательных характеристик изготовленной многослойной структуры от расчетных значений необходимо решить обратную задачу восстановления структуры зеркала с тем, чтобы произвести корректировку технологического процесса. Решение обратной задачи в классе аperiodических структур представляет огромную сложность, и зачастую никакой существенной информации о строении отдельных пленок по данным рефлектометрических измерений получить не удается.

Понимание этих проблем заставляет обратить внимание на подход, впервые, насколько известно авторам, предложенный в [19] для рентгеновского телескопа жесткого рентгеновского диапазона (излучение с  $h\nu = 20\text{--}40$  кэВ, угол скольжения излучения  $0.3^\circ$ ). Предложенная структура многослойного Pt/C-зеркала представляла собой восемь напыленных друг на друга периодических многослойных зеркал с периодами  $60\text{--}30$  Å, убывающими по мере приближения отражающих слоев к подложке. Всего структура состояла из 168 слоев, причем толщина слоя Pt фиксировалась на уровне  $15$  Å, кроме верхнего слоя, в котором доли Pt и C выбирались равными с целью подавления второго брэгговского пика. Из-за своей простоты этот метод был успешно применен при разработке рентгеновских зеркал скользкого падения для рентгеновских телескопов InFOCUS и ASTRO-H.

Позднее в [20] на основе подхода, разработанного в [10], в кинематическом приближении было получено аналитическое выражение для коэффициента отражения такой структуры и сформулированы основные принципы ее дизайна, а именно: выполнение условия  $N_i d_i = \text{const}$  для всех периодических зеркал, входящих в ее состав, причем число периодов  $N_i$  соседних зеркал отличается на единицу, период  $d_i$  уменьшается в глубь структуры, что соответствует ABC-модели [8]. Как и в случае суперзеркал, уширенная по сравнению с периодическим зеркалом полосо отражения образуется в результате проникновения коротковолнового излучения на большую глубину, где в соответствии с условием Брэгга оно отражается от периодического зеркала с меньшим периодом.

Аperiodические зеркала такого типа, представляющие собой стопку напыленных друг на друга периодических зеркал с набором характеристик  $\{N_i, d_i, \gamma_i\}$  (соответственно число периодов, величина периода и доля сильнопоглощающего слоя для каждого  $i$ -го зеркала), получили название блок-структур в работах [19, 20], или, в работах [21–24], посвященных разработке и изготовлению широкополосных зеркал для мягкого рентгеновского и ЭУФ диапазонов, – стековых структур (от английского «stack» –

стопка). В [21, 22] впервые было проведено сравнение аperiodического и стекового подходов к изготовлению широкополосных Mo/Si-зеркал нормального падения, обладающих постоянным коэффициентом отражения в диапазоне углов падения  $0\text{--}20^\circ$  для излучения с  $\lambda = 13.5$  нм. Расчетный коэффициент отражения для аperiodического зеркала, образованного сто одним слоем Mo и Si с толщинами в диапазоне  $2.7\text{--}4.5$  нм, составил 45% (отклонение в пределах единиц процентов). Оптимизированное зеркало, составленное из трех периодических структур с параметрами (по мере удаления от подложки)  $N_1 = 30$  ( $d_1 = 7.22$  нм),  $N_2 = 15$  ( $d_2 = 6.90$  нм) и  $N_3 = 5$  ( $d_3 = 6.10$  нм), обладало расчетным коэффициентом отражения в диапазоне углов падения  $0\text{--}20^\circ$ , изменяющимся в пределах 43%–53%. Изготовленные методом магнетронного напыления широкополосные зеркала в обоих случаях обеспечили коэффициент отражения более 30% (отличие от расчетного значения объясняется существованием шероховатостей) при большей гладкости измеренного коэффициента отражения для аperiodической структуры. При этом отмечается относительная простота изготовления и аттестации стековых структур, что делает их перспективными для оптики ЭУФ диапазона.

В настоящей работе обсуждается применение подобного подхода к разработке и изготовлению широкополосных зеркал для комплекса аппаратуры «Кортес», оптимизированных на равномерное отражение излучения в диапазоне длин волн  $17\text{--}21$  нм. При этом не накладываются никаких априорных ограничений на изменение периода или числа слоев в блоке и толщин слоев в глубь структуры. Эти параметры при численном решении задачи оптимизации рассматриваются как свободные в широком диапазоне значений.

## 2. Оптимизация параметров стековой структуры

Рассмотрим широкополосные зеркала для разрабатываемой в настоящее время аппаратуры для изучения Солнца «Кортес», предназначенной для установки на МКС. Требовалось изготовить широкополосное зеркало, обеспечивающее в спектральном диапазоне  $17\text{--}21$  нм равномерное отражение с коэффициентом  $R \geq 15\%$  при нормальном падении излучения и максимальным отклонением коэффициента отражения в пределах плато менее 10%. Традиционной парой материалов, применяемой для диапазона  $\lambda = 12.5\text{--}35$  нм, является Mo/Si, что определяется ее высоким оптическим контрастом и большой временной стабильностью наряду с гладкостью спектральных зависимостей оптических констант и малым поглощением кремния в этой области.

Вне зависимости от типа искомой структуры (аperiodическая или стековая) математическая задача оптимизации представляет собой минимизацию функционала

$$F = \int [R(\lambda) - R^{\text{targ}}]^{2m} d\lambda, \quad (1)$$

где  $R^{\text{targ}}$  – целевая кривая отражения, определяющая высоту плато коэффициента отражения. Интеграл вычисляется в области определения  $R^{\text{targ}}$  и рассматривается как функция толщин слоев. Процедура вычисления состоит из нескольких итераций. Начальная высота плато выбирается на уровне, соответствующем коэффициенту отра-

жения периодического зеркала, и постепенно понижается до достижения удовлетворительной гладкости плато.

В случае аперриодических многослойных зеркал (АМЗ) параметрами в задаче оптимизации являются толщины слоев Mo и Si в парах  $h_i(\text{Mo})$ ,  $h_i(\text{Si})$ ,  $i = 1, \dots, N_{\text{AMS}}/2$ . Общее число слоев  $N_{\text{AMS}}$  изначально берется равным таковому для периодической структуры и уменьшается в процессе оптимизации – отбрасываются глубинные слои, не оказывающие заметного влияния на рассчитанный коэффициент отражения. Таким образом, для аперриодической структуры имеются несколько десятков параметров подгонки. Шероховатость и плотности для используемой пары материалов Mo/Si известны [25], их зависимость от особенностей технологического процесса хорошо изучена на этапе изготовления периодических многослойных структур. Для стековой структуры дополнительными свободными параметрами являются  $N_i$ . Число стеков было выбрано равным трем, а сверху напылилась защитная пленка Si. Таким образом, имеем всего 10 параметров, минимизирующих функционал (1). Как будет показано ниже, в нашем случае этого достаточно для решения поставленной задачи, хотя очевидно, что с увеличением числа стеков теоретически можно получать все более совершенные кривые отражения, соответствующие аперриодическому зеркалу (в пределе для числа стеков, равного  $N_{\text{AMS}}/2$ , и  $N_i = 1$  получим аперриодическую структуру с числом слоев  $N_{\text{AMS}}$ ).

Оптимизация проводилась при помощи алгоритма дифференциальной эволюции, реализованного в рамках разработанной М.В.Свечниковым программы Multifitting [26]. В отличие от ее широко распространенного аналога IMD [27] (эта работа цитируется 876 раз, три миллиона скачиваний программы), Multifitting позволяет рассматривать число периодов в стеках  $N_i$  как параметр подгонки, что делает возможным решение задачи оптимизации в классе стековых структур. Другим важным преимуществом программы Multifitting является возможность одновременной подгонки нескольких кривых отражения, например предназначенных для жесткого и мягкого рентгеновских диапазонов. Кроме того, переходные слои представляются в виде линейной комбинации простейших функций, включающих функцию ошибок, которая наилучшим образом описывает шероховатость, и step-функцию, описывающую стехиометрические слои в переходной области, например, силицид молибдена в случае многослойного Mo/Si-зеркала.

При вычислениях задавались ширины переходных областей (Mo-на-Si (1.2 нм) и Si-на-Mo (0.6 нм) [25]) и табличные плотности пленок. В качестве подложек использовались кремниевые пластины для микроэлектронной промышленности с эффективными шероховатостями  $\sigma_{\text{eff}} = 0.3$  нм [28] в диапазоне пространственных частот  $0.024\text{--}65$  мкм<sup>-1</sup>.

В многопараметрических задачах всегда возникает вопрос об оптимальности найденного решения. Для повышения охвата параметрического пространства запускались серии автоматических подгонок со случайными начальными значениями искомых параметров, что увеличивает вероятность успеха, однако не гарантирует достижения глобального минимума. В случае аперриодических структур заданному критерию обычно удовлетворяют несколько реализаций. На следующем этапе происходит отсев решений из соображений их устойчивости к малым возмущениям. На рис.1,а приведен профиль аперриодиче-

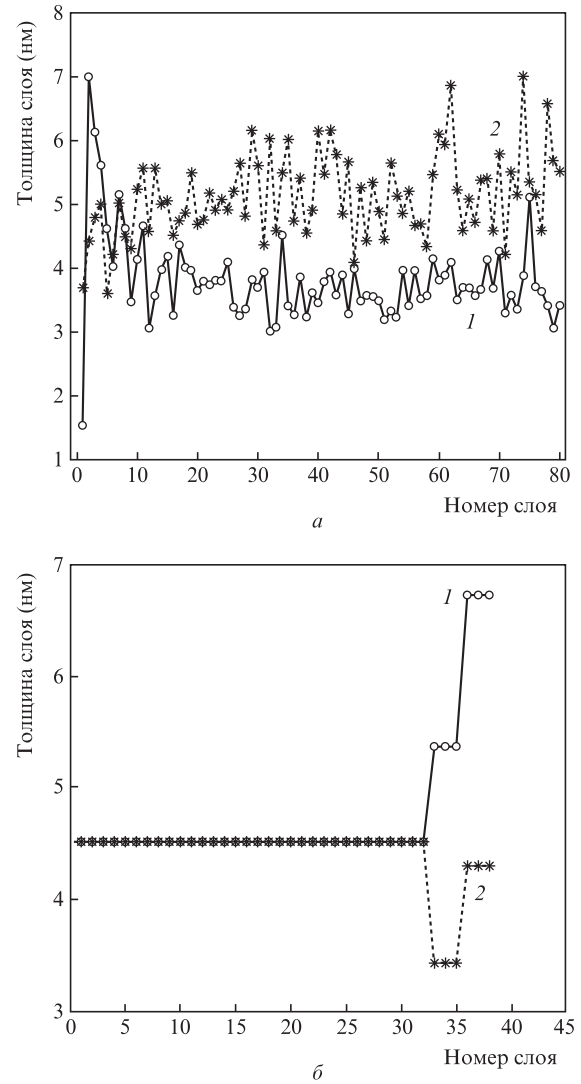


Рис.1. Зависимости толщин слоев кремния (1) и молибдена (2) от номера слоя, отсчитываемого от подложки, для аперриодического многослойного (а) и стекового (б) зеркал.

ского Mo/Si-зеркала. Номер слоя отсчитывается от подложки, на поверхности находится слой Mo, суммарное число слоев – 160. Для стековых Mo/Si-структур (диапазон длин волн 17–21 нм) многократный запуск процедуры подгонки позволяет довольно быстро получить оптимальные значения  $N_i$  для верхних стеков (в нижнем стеке число слоев выбирается достаточно большим, чтобы его толщина превышала длину экстинкции излучения). Полученное распределение толщин слоев стековой структуры по глубине приведено на рис.1,б. Отметим, что, в отличие от результатов работы [20], периоды зеркал, составляющих стековую структуру, возрастают для слоев, приближающихся к подложке, и условие  $N_i d_i = \text{const}$  [20] очевидно не выполняется. Поскольку в мягком и ЭУФ диапазонах большую роль играет поглощение излучения в материале, то, как и в [21, 22], на поверхности стековой структуры должно находиться относительно тонкое зеркало, пропускающее излучение в нижние слои.

Расчетные коэффициенты отражения  $R(\lambda)$  для описанных зеркал приведены на рис.2. Видно, что аперриодическое зеркало безусловно, превосходит стековое с точки зрения гладкости плато коэффициента отражения, средний коэффициент отражения в области  $\lambda = 17\text{--}21$  нм для

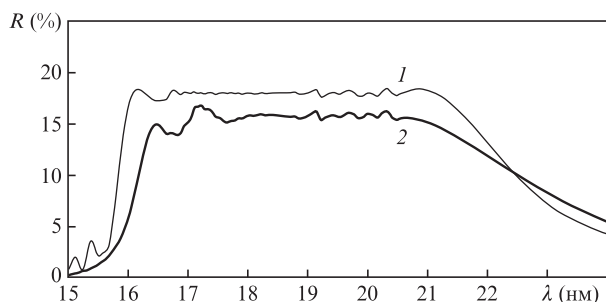


Рис. 2. Рассчитанные кривые отражения оптимизированных многослойных Mo/Si-зеркал апериодического (1) и стекового (2) типов. Ширины переходных областей Mo-на-Si и Si-на-Mo равны 1.2 и 0.6 нм соответственно.

него тоже несколько выше: 18% против 15.8%. Однако, переходя к изготовлению многослойных апериодических структур, мы обнаруживаем, что это незначительное превосходство полностью нивелируется сложностью их калибровки по толщинам и последующего синтеза. В то же время структуры стекового типа позволяют обойтись всего лишь несколькими предварительными напылениями.

### 3. Эксперимент

Образцы изготавливались методом магнетронного распыления в атмосфере аргона при давлении  $10^{-3}$  Тор. Подробности условий нанесения многослойных структур можно найти в [29], здесь же отметим, что толщина осажденной пленки материала определяется двумя основными параметрами: временем прохождения подложки над мишенью и величиной тока магнетрона (чем выше ток, тем сильнее распыляется материал). Помимо этого есть также более слабая зависимость толщины от состояния стенок внутри напылительной установки, давления газа в ней и степени выработки мишени. При значительном различии в толщинах напыляемых слоев приходится одновременно корректировать как скорость прохода подложки над мишенью, так и ток магнетрона. В случае обычного апериодического зеркала так делать нельзя: если ток магнетрона будет меняться от слоя к слою, это приведет к заметной неустойчивости процесса. Таким образом, остается лишь одна возможность изменения толщины слоя – изменение скорости прохода подложки над мишенью. Однако эта скорость может очень сильно различаться для слоев разной толщины: для напыления толстых слоев необходимо делать ее очень малой. При этом возрастет и общее время напыления структуры, а значит, будут сильнее сказываться систематические отклонения толщин напыляемых слоев от расчетных. Для преодоления этой проблемы в работе [30] функционал (1) модифицирован таким образом, чтобы дополнительно минимизировать различие толщин слоев в соседних «периодах» апериодической структуры.

В то же время стековая структура, во-первых, сама по себе содержит меньше слоев. Во-вторых, после напыления каждого стека можно изменить как ток магнетрона, так и скорость прохождения подложки, после чего напылять следующую периодическую структуру. Суммарное время ее напыления будет меньше, а значит, уменьшится влияние негативных эффектов.

Процессу изготовления любого многослойного зеркала предшествует процедура калибровки, цель которой – определение скорости роста пленки и времени прохожде-

ния подложки над мишенью для достижения конкретной толщины пленки. Изготовление качественной апериодической структуры в идеале требует отдельной калибровки для каждой отдельной толщины. Если их число велико, технологически задача будет решаться на протяжении нескольких недель, за которые качество калибровки существенно снизится из-за дрейфа режима напыления. В такой ситуации обычно поступают следующим образом: осуществляют калибровку для нескольких толщин, а для остальных параметры напыления задают из соображений пропорциональности. Таким образом, в случае апериодической структуры априори вносится ошибка в толщины слоев в дополнение к неизбежному случайному их разбросу из-за микроскачков тока (микротрейбои), незначительного изменения давления рабочего газа и т. д.

В свою очередь стековая структура требует лишь трех-шести калибровочных напылений для входящих в ее состав периодических зеркал, причем калибровка будет «честная», а не прогнозируемая, что повысит точность синтеза финального широкополосного зеркала. При необходимости повторного изготовления многослойного зеркала с теми же параметрами процедура калибровки должна быть повторена, таким образом адекватная быстрая калибровка означает также хорошую воспроизводимость результата.

Изготовленные широкополосные зеркала аттестовались по отражению на разработанном авторами рефлектометре [31], в котором для монохроматизации излучения используется высокоразрешающий спектрометр Черни–Тюрнера с плоской дифракционной решеткой и двумя сферическими коллимирующими зеркалами. Источником рентгеновского излучения служила высокоионизованная плазма, генерируемая при воздействии мощного лазерного излучения с интенсивностью  $10^{11}$ – $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> на твердотельную мишень. Сканирование по спектру осуществлялось поворотом дифракционной решетки, а калибровка лабораторного рефлектометра – путем сравнения результатов с данными измерения коэффициентов отражения периодических зеркал с помощью рефлектометра оптического канала ускорителя BESSY-II [32, 33].

Кроме того, для исследования структуры многослойных зеркал применялся метод малоугловой дифракции рентгеновских лучей. Измерения проводились в диапазоне  $0$ – $5^\circ$  углов скольжения  $\theta$  излучения с  $\lambda = 0.154$  нм с использованием четырехкристального высокоразрешающего дифрактометра PANalytical X'Pert Pro.

При решении обратной задачи восстановления структуры многослойного зеркала с целью дальнейшей корректировки параметров напыления проявляется важное преимущество стековых структур перед «классическими» апериодическими зеркалами. С математической точки зрения эта задача не отличается от описанной выше задачи оптимизации параметров многослойных структур и сводится к минимизации того же функционала (1), в который в качестве  $R^{\text{larg}}$  подставлены экспериментально полученные кривые отражения  $R_{\text{exp}}(\lambda, \theta)$ . Однако она имеет большее число параметров оптимизации: и протяженности переходных областей, и плотности пленок – в дополнение к толщинам слоев – могут отличаться от заданных и приводить к отличию кривой отражения от расчетной. В случае стековых структур при решении обратной задачи мы имеем в своем распоряжении хорошо развитую методологию определения параметров периодических зеркал.

### 4. Результаты и их обсуждение

На рис.3,*а* приведены полученные экспериментально и восстановленные с использованием программы Multifitting [26] кривые отражения изготовленной Mo/Si-структуры. Было выявлено отклонение толщин пленок молибдена  $h_{Mo}$  и кремния  $h_{Si}$  от рассчитанных (см. табл.1) и внесены коррективы во времена напыления, позволившие за три итерации (потребовалось около недели работ) добиться плато коэффициента отражения в области 17–21 нм. Соответствующие им кривые отражения мож-

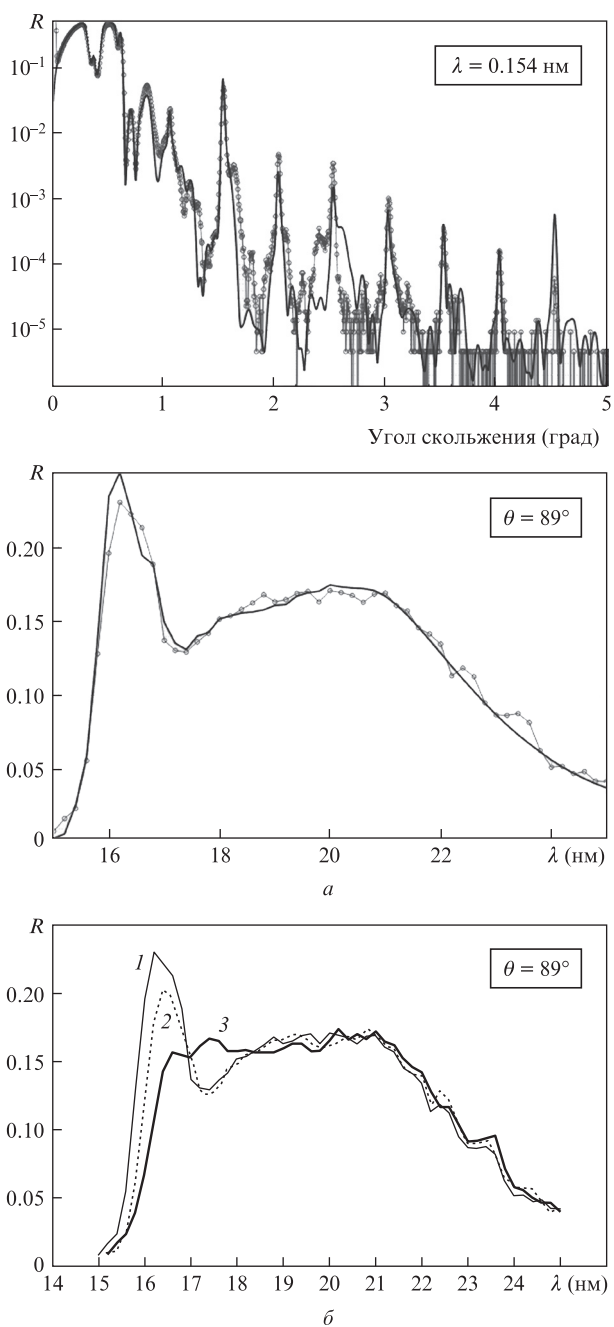


Рис.3. Кривые отражения стековых Mo/Si-структур, полученные экспериментально и восстановленные с использованием программы Multifitting: *a* – зависимости  $R(\theta)$  и  $R(\lambda)$  для  $\lambda = 0.154$  нм и  $\theta = 89^\circ$  соответственно (точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – результат восстановления); *б* – спектры отражения синтезированных структур (цифры у кривых соответствуют номеру итерации).

Табл.1. Восстановленные параметры (нм) стековой Mo/Si-структуры.

Номер стека $i$ от подложки	Число периодов $N_i$	Расчет		Первичная структура		Первая корректировка		Финальная корректировка	
		$h_{Mo}$	$h_{Si}$	$h_{Mo}$	$h_{Si}$	$h_{Mo}$	$h_{Si}$	$h_{Mo}$	$h_{Si}$
Пленка Si	1		1.40	1.40		1.40		1.40	
3	3	4.30	6.72	4.34	6.66	4.33	6.66	4.34	6.72
2	3	3.43	5.37	3.35	5.21	3.35	5.21	3.44	5.39
1	32	4.50	4.50	4.30	4.30	4.40	4.40	4.52	4.52

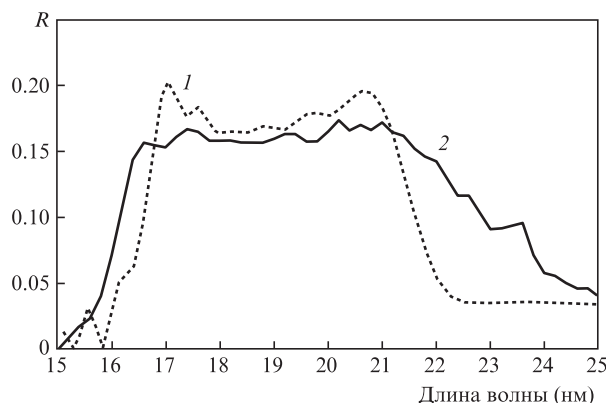


Рис.4. Измеренные спектры отражения аperiodического (1) и стекового (2) Me/Se-зеркал.

но видеть на рис.3,*б*. Обращает на себя внимание чувствительность кривой отражения к изменениям толщин пленок на единицы ангстрем.

В случае аperiodических структур, образованных десятками и сотнями пленок различной толщины, решить обратную задачу практически невозможно [10, 30]. Полученное решение (набор параметров пленок в составе многослойного зеркала) заведомо не единственное, соответственно нельзя реализовать действительно итерационную процедуру синтеза многослойных зеркал, за конечное число корректировок приводящую к изменению кривой отражения в лучшую сторону.

На рис.4 приведены измеренные спектры отражения аperiodического и стекового Mo/Si-зеркал, дизайн которых показан на рис.1. Видно, что реальное стековое зеркало имеет даже более гладкий профиль коэффициента отражения, что связано с корректировкой толщин пленок в процессе изготовления образца. Средний коэффициент отражения стековой структуры несколько меньше, тем не менее с учетом простоты изготовления этот тип широкополосных зеркал представляется крайне эффективным для практического использования.

### 5. Заключение

В рамках работы изучались аperiodические широкополосные Mo/Si-структуры для задач проекта «Кортес», оптимизированные на равномерное отражение в диапазоне длин волн 17–21 нм. Показано, что для стековых структур, состоящих из трех напыленных друг на друга периодических зеркал с разными параметрами, удается достичь равномерного отражения на уровне 16% при хорошей воспроизводимости результатов. Незначительно проигрывая аperiodической структуре в теоретической величине коэффициента отражения, стековое зеркало

ло оказывается намного более предпочтительным с точки зрения скорости его изготовления и аттестации, что в конечном итоге позволяет проводить грамотную корректировку процесса напыления и за небольшое число итераций достигать расчетных параметров структуры.

Работа поддержана программой Президиума РАН I.1 «Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом». Доработка программы Multifitting для решения задачи оптимизации в классе стековых структур выполнялась в рамках гранта РФФИ для молодых ученых № 18-32-00173.

1. Chkhalo N.I., Pariev, D.E., Polkovnikov V.N., et al. *Thin Solid Films*, **631**, 106 (2017).
2. Chkhalo N.I., Gusev S.A., Nechay A.N., et al. *Opt. Lett.*, **42** (24), 5070 (2017).
3. Svechnikov M.V., Chkhalo N.I., Gusev S.A., et al. *Opt. Express*, **26** (26), 33718 (2018).
4. Yakshin A.E., van de Kruijs R.W.E., Nedelcu I., et al. *Proc. SPIE*, **6517**, 65170I (2007).
5. Bajt S. *J. Vac. Sci. Technol. A: Vac., Surf. Films*, **18** (2), 557 (2000).
6. Lee P. *Opt. Commun.*, **37** (3), 159 (1981).
7. Meekins J.F., Cruddace R.G., Gursky H. *Appl. Opt.*, **26** (6), 990 (1987).
8. Joensen K.D., Voutov P., Szentgyorgyi A., et al. *Appl. Opt.*, **34** (34), 7935 (1995).
9. Ziegler E., Bukreeva I.N., Kozhevnikov I.V., et al. *Proc. SPIE*, **3737**, 386 (1999).
10. Kozhevnikov I.V., Bukreeva I.N., Ziegler E. *Phys. Res. A*, **460** (2–3), 424 (2001).
11. Morawe C., Ziegler E., Peffen J.-C., Kozhevnikov I. *Phys. Res. A*, **493** (3), 189 (2002).
12. Рагозин Е.Н. (ред.) *Аперриодические элементы в оптике мягкого рентгеновского диапазона* (М.: Физматлит, 2018).
13. Бейгман И.Л., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **74** (3), 167 (2001).
14. Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *УФН*, **185**, 1203 (2015).
15. Буренков Д.С., Успенский Ю.А., Артюков И.А., Виноградов А.В. *Квантовая электроника*, **35** (2), 195 (2005) [*Quantum Electron.*, **35** (2), 195 (2005)].
16. Shestov S.V., Ulyanov A.S., Vishnyakov E.A., et al. *Proc. SPIE*, **9144**, 91443G (2014).
17. Гайкович П.К., Полковников В.Н., Салашенко Н.Н. и др. *Квантовая электроника*, **46** (5), 406 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (5), 406 (2016)].
18. Гарахин С.А., Мельчаков Е.Н., Полковников В.Н. и др. *Квантовая электроника*, **47** (4), 378 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (4), 378 (2017)].
19. Yamashita K., Kunieda H., Tawara Y., et al. *Proc. SPIE*, **3766**, 327 (1999).
20. Yao Y., Kunieda H., Wang Z. *Opt. Express*, **21** (7), 8638 (2013).
21. Kuhlmann T., Yulin S., Feigl T., et al. *Proc. SPIE*, **4688**, 509 (2002).
22. Kuhlmann T., Yulin S., Feigl T., Kaiser N. *Proc. SPIE*, **4782**, 196 (2002).
23. Yulin S. *Multilayer Coatings for EUV/Soft X-ray Mirrors in Optical Interference Coatings* (Berlin: Springer, 2003, p. 281).
24. Yulin S. *Multilayer Interference Coatings for EUVL in Extreme Ultraviolet Lithography* (New York: McGraw-Hill, 2009, p. 225).
25. Braun S., Mai H., Moss M., et al. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, 4074 (2002).
26. Svechnikov M., Pariev D., Nechay A., et al. *J. Appl. Cryst.*, **50**, 1428 (2017).
27. Windt D. *Comput. Phys.*, **12** (4), 360 (1998).
28. Барышева М.М., Вайнер Ю.А., Грибков Б.А. и др. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **75** (1), 71 (2011).
29. Andreev S.S., Akhsakhalyan A.D., Bibishkin M.A., et al. *Centr. Europ. J. Phys.*, **1**, 191 (2003).
30. Kozhevnikov I.V., Yakshin A.E., Bijkerk F. *Opt. Express*, **23** (7), 9276 (2015).
31. Гарахин С.А., Забродин И.Г., Зуев С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **47** (4), 385 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (4), 385 (2017)].
32. Sokolov A., Bischoff P., Eggenstein F., et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **87** (5), 052005 (2016).
33. Schäfers F., Bischoff P., Eggenstein F., et al. *J. Synchrotron Radiat.*, **23**, 67 (2016).