

13 Высокоградиентная асферизация подложек тонкопленочными покрытиями Al/Si

© К.В. Дуров, С.М. Минеев, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального исследовательского центра
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: zevs2801@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 мая 2024 г.
В окончательной редакции 15 мая 2024 г.
Принято к публикации 15 мая 2024 г.

Рассмотрены вопросы пленочной асферизации. В качестве асферизирующего покрытия предложена нанесенная на сферическую поверхность многослойная структура Al/Si. Подбором соотношения материалов в периоде произведен поиск состояния, при котором напряжения в многослойной структуре минимизировались. При этом период структуры 9–10 nm соответствует зеркалам нормального падения для диапазона длин волн 17–19 nm, представляющим интерес для солнечной астрономии. С помощью прецизионных фигурных диафрагм между магнетроном и подложкой был сформирован асферический профиль покрытия с максимальным перепадом высот $\sim 1.3 \mu\text{m}$.

Ключевые слова: тонкие пленки, магнетронное напыление, внутренние напряжения, асферизация.

DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58556.172-24

Введение

Для оптических систем изображающей оптики принципиальное значение приобретают вопросы aberrаций и их минимизации. Из-за наличия сферических aberrаций зеркала оптических схем должны иметь не сферическую, но асферическую форму поверхности. Наличие aberrаций сказывается на разрешающей способности оптического прибора, в состав которого входят рассматриваемые элементы. Этот эффект можно проиллюстрировать на примере зеркал для солнечных телескопов орбитального базирования ТЕРЕК (1988 г.) [1], ТЕРЕК-К (1994 г.) [2,3], СПИРИТ (2001 г.) [4] и ТЕСИС (2009 г.) [5,6].

В телескопе ТЕРЕК применялись зеркала сферической формы. Угловое разрешение составило 10 arc.sec. (соответствует линейному разрешению по диску Солнца порядка 10 тысяч километров). В телескопе ТЕРЕК-К применены уже асферические зеркала тороидальной формы. Разрешение составило 5 arc.sec. Асферизация зеркал до формы параболоида вращения позволила для телескопа СПИРИТ достичь углового разрешения 3 arc.sec. и для телескопа ТЕСИС — 1.7 arc.sec. (соответствует линейному разрешению по диску Солнца порядка 1 тысяч километров). Таким образом, асферичность формы зеркал изображающих оптических систем существенно повышает разрешающую способность и, можно сказать, является необходимостью.

При механической обработке подложек с приемлемой точностью изготавливаются лишь сферические заготовки. Придание им асферической формы может идти двумя путями. Первая методика связана с травлением поверхности сферической заготовки пучками ускоренных

ионов [7]. В этом случае с поверхности оптического элемента удаляются участки, выступающие над требуемым профилем. Второй подход — вакуумное напыление тонкопленочного покрытия. Он применялся, например, для создания асферических зеркал солнечного телескопа SOHO [8].

Каждая из методик имеет преимущества и недостатки. Так, ионно-пучковое травление формирует заготовку без нанесения на ее поверхность дополнительных материалов. Такая подложка может впоследствии подвергаться химической обработке (например, для очистки поверхности от загрязнений) без риска уничтожения или повреждения асферизирующего покрытия. В то же время есть ряд материалов (например, бериллий), поверхность которых не удастся обработать ионными пучками без развития шероховатости [9]. Тогда естественным выходом становится применение методики пленочной асферизации.

Здесь возникает вопрос выбора материалов асферизирующего покрытия. Они должны, во-первых, обладать хорошей адгезией к материалу подложки — для предотвращения отслаивания покрытия от подложки. Во-вторых, асферизирующие пленки должны сохранять низкую поверхностную шероховатость. Последнее требование связано с необходимостью впоследствии нанесения на подложку многослойного отражающего покрытия. Для обеспечения высоких коэффициентов отражения рентгеновского излучения шероховатость подложки и отражающего покрытия должна находиться на низком уровне — не более нескольких ангстрем.

В работе [8] предлагалось асферизирующее покрытие на основе бора. Его толщина составляла 350 nm. Там же было отмечено, что при превышении пленкой бора тол-

щины 300 nm она начинает отслаиваться от подложки. Авторы применили дополнительный слой вольфрама для лучшей адгезии пленки бора к подложке.

Для зеркал телескопа СПИРИТ было предложено многослойное асферизирующее покрытие на основе Mo/Si [10]. Поскольку и отражающее покрытие представляло собой многослойную структуру (МСС) Mo/Si, но с другим периодом, этим самым достигалось упрощение технологического процесса. Толщина асферизирующей пленки составила порядка 300 nm.

Однако применявшаяся в этом случае МСС Mo/Si имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, неучтенные внутренние напряжения покрытия — довольно значительные, в несколько сотен МПа — как показано в [11], неизбежно приведут к искажению конечной формы поверхности зеркала. По оценкам деформация подложки в этом случае может достигать 20–30 nm. Эти значения существенно превышают критерий Марешаля для оптики дифракционного качества: отклонения формы от заданной поверхности не более $\lambda/14$. В случае оптики рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового диапазонов длин волн $\lambda = 2–30$ nm. Бесстрессовое (с нулевым значением внутренних напряжений) состояние Mo/Si-пленки возможно лишь при значительной толщине молибдена, что сопровождается развитием шероховатости [12]. Во-вторых, для Mo/Si не существует селективного химического травителя, не разрушающего одновременно поверхность кварцевой или кремниевой подложки. Таким образом, не представляется возможным реставрировать подложку в случае неудачно проведенного процесса синтеза (удалить с нее осажденные материалы без последствий для оптической поверхности).

При изготовлении асферических зеркал телескопа ТЕСИС авторы заменили МСС Mo/Si альтернативной структурой на основе Cr/Sc. Они подобрали соотношение Cr и Sc, обеспечивающее компенсацию внутренних отражений. Шероховатость подложки с осажденной пленкой при этом не развивалась. Кроме того, Cr/Sc растворяется в слабом растворе соляной кислоты без каких-либо последствий для поверхности кварца или кремния, т.е. асферизирующее покрытие на основе Cr/Sc одновременно исполняет роль жертвенного слоя при необходимости реставрации подложки. Полный размах (перепад между максимумом и минимумом) высот асферизирующей пленки составил 130 nm.

Во всех описанных выше примерах пленочной асферизации толщина пленки находилась на уровне 0.1–0.3 μm . В настоящей работе мы изучали материалы для более высокоградиентной асферизации (с перепадом высот более 1 μm). К ним предъявлялись требования:

- сохранение низкой поверхностной шероховатости;
- бесстрессовое состояние;
- высокая скорость роста пленки.

В качестве основы для асферизирующего покрытия предложена МСС Al/Si. Во-первых, коэффициент распыления алюминия, а значит и скорость роста пленки, высок.

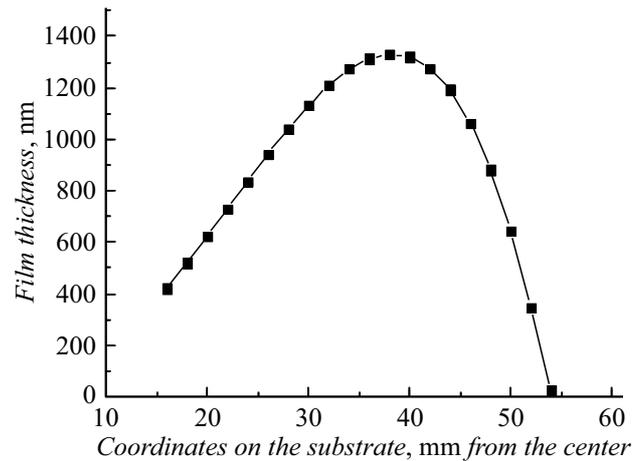


Рис. 1. Предложенное для эксперимента распределение толщины асферизирующего покрытия в зависимости от радиальной координаты подложки.

Во-вторых, из ранее проведенных исследований [13] известно, что МСС Al/Si обладает низкой, на уровне 0.6 nm, межслоевой шероховатостью, т.е. можно ожидать соответствующей поверхностной шероховатости.

Еще одним важным преимуществом МСС Al/Si перед другими составами асферизирующих покрытий является возможность его использования в качестве отражающего покрытия для диапазона длин волн 17–19 nm, т.е. при изготовлении асферических зеркал, оптимизированных на этот диапазон, можно будет ограничиться использованием двух магнетронных источников — с алюминиевой и кремниевой мишенями.

Внутренние напряжения в пленках Al/Si ранее не изучались.

На рис. 1 приведена расчетная зависимость толщины пленочного покрытия от радиальной координаты подложки диаметром 110 mm.

Максимальная толщина пленки $D = 1332$ nm находится в 38 mm от центра подложки. На краю центрального отверстия толщина снижается до 422 nm. К краю подложки толщина спадает до 24 nm. Это значительный градиент. Такие величины на практике до сих пор не достигались.

1. Методика эксперимента

Пленочная асферизация достигается осаждением на поверхность подложки тонкой пленки с толщиной, переменной по площади подложки. Методы осаждения, вообще говоря, могут быть разными. Наиболее простым в смысле точности контроля распределения толщины является метод магнетронного напыления. В то же время он плохо подходит для распыления диэлектрических материалов — распыление на постоянном токе таких мишеней невозможно в принципе, а распыление

в высокочастотном разряде имеет низкие скорости роста пленок. Соответственно эти скорости затрудняют получение покрытий с большими (в единицы-десятки микрометров) толщинами и соответственно перепадами толщин. Как альтернатива высокочастотному разряду, может быть рассмотрено распыление диэлектрических мишеней нейтрализованным ионным пучком.

Объединение выше обозначенных методов достигнуто в установке магнетронного и ионно-пучкового напыления многослойных структур, разработанной и созданной в ИФМ РАН [14].

Рабочая камера представляет собой цилиндрический объем высотой 500 mm, диаметром 800 mm. Магнетронные источники равномерно распределены по периметру дна рабочей камеры. Они представляют собой источники планарного типа. Магнитное поле арочной конфигурации способствует формированию на поверхностях мишеней кольцевой зоны эрозии (внутренний диаметр кольца 95 mm, внешний — 115 mm). Такая конфигурация позволяет без труда получать равномерное или заданное распределение наносимого покрытия на подложках диаметром до 120 mm, а с применением ряда технологических приемов — и до 200 mm.

Источниками питания магнетронов служат стабилизированные блоки на постоянном токе, разработанные в ИФМ РАН. Они позволяют варьировать ток разряда в пределах 100–2000 mA при напряжениях от 100 до 500 V. Для высокочастотного распыления мишеней используются блоки фирмы „Balzers“ с частотой 13.56 MHz. В процессе синтеза типичные значения электрической мощности находятся в пределах 150–250 W.

Для лучшего понимания технологического процесса на рис. 2 приведена схема установки (без ионных источников, поскольку в работе применялось только магнетронное напыление).

Подложка рабочей поверхностью вниз крепится на вращающемся диске, расположенном над магнетронами. При вращении диска подложка проходит над рабочими магнетронами. Это позволяет наносить слои последова-

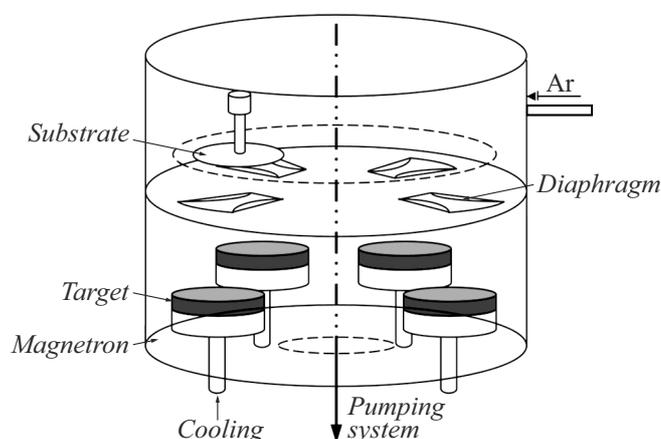


Рис. 2. Схема установки магнетронного напыления.

тельно один за другим. За один полный оборот диска напыляется полный период структуры. Изменяя скорость прохождения подложки (угловую скорость вращения диска) над магнетронами, можно регулировать как соотношение толщин слоев в периоде, так и величину самого периода.

Характерные скорости роста пленок для магнетронного распыления на постоянном токе составляют 0.1–1 nm/s в зависимости от материала мишени и от приложенной к ней электрической мощности. Для высокочастотного разряда эти скорости ниже в 5–10 раз. В наших экспериментах скорости роста пленок Si и Al составляли ~ 0.14 и 0.55 nm/s соответственно.

Цикл работ по созданию многослойного покрытия включает процедуру обеспечения необходимого распределения по площади подложки толщины слоев напыляемых материалов. Для обеспечения либо равномерности, либо заданного распределения покрытия по площади подложки над каждым магнетроном расположены фигурные прецизионные диафрагмы. Изменяя их форму, можно контролировать распределение плотности потока вещества, поступающего на подложку. Точность управления распределением периода по площади зеркала составляет величину порядка 0.5% от величины периода.

С помощью таких фигурных диафрагм достигалась пленочная асферизация зеркал солнечных обсерваторий СПИРИТ и ТЕСИС. При этом важно отметить, что технология позволяет обеспечивать перепады с большим размахом высот. Толщина покрытия по площади подложки может различаться на порядок на расстояниях в десятки миллиметров. Обеспечить столь резкий перепад высот в пределах единиц миллиметров другими методами затруднительно.

Процедура создания заданного распределения толщины материалов носит итерационный характер. На первом этапе происходит напыление МСС на кремниевые сверхгладкие пластины, закрепленные на металлической поверхности с радиусом кривизны, равным таковому у „рабочей“ подложки. После напыления проводятся измерения методом малоугловой рентгеновской дифракции на дифрактометре Philips X’Pert PRO (Philips Analytical, Нидерланды). Измерения и последующая обработка результатов малоугловой рентгеновской дифракции с помощью программы „Multifitting“ [15] позволяет определить большинство параметров МСС (период, индивидуальные толщины материалов в периоде, шероховатость и др.). Полученное реальное распределение толщин по площади подложки сравнивается с расчетным. При необходимости проводится коррекция формы прецизионных диафрагм и повторное напыление с последующими измерениями. Финальный этап связан с напылением „рабочей“ структуры на „рабочую“ подложку.

Важно, чтобы асферизирующее покрытие имело минимальное значение величины внутренних напряжений s (от англ. stress). Для однозначности необходимо придерживаться общепринятой терминологии. Напряжения в пленке (сплошной или многослойной) могут быть

растягивающим, когда пленка как бы старается сжаться на подложке — сила противодействует сжатию, „растягивает“ пленку и направлена от центра подложки к периферии. В этом случае принято s приписывать знак „плюс“. Напряжения могут иметь и сжимающий характер — силы направлены от периферии к центру. Тогда принято говорить об отрицательных напряжениях и приписывать s „минус“. При знаке „плюс“ система пленка + подложка принимает вогнутый характер, при знаке „минус“ — выпуклый, пленкой вовне.

Самые наглядные методы измерения напряжений основаны на следующем свойстве. Если пленка в напряженном состоянии осаждена на поверхность подложки, то подложка будет изгибаться. Этот изгиб может быть измерен, а соответствующее напряжение вычислено по результатам измерения кривизны системы с привлечением формулы Стони [16]:

$$s = \frac{E}{6(1-\nu)} \frac{d_{\text{substr}}^2}{d_{\text{film}}} \left(\frac{1}{R_{\text{after}}} - \frac{1}{R_{\text{before}}} \right), \quad (1)$$

где E и ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала подложки, d_{substr} и d_{film} — толщины подложки и пленки, R_{before} и R_{after} — радиусы кривизны подложки до и после осаждения на нее пленки.

В остальном методы разнятся лишь в подходах к определению радиуса кривизны подложки. Обзор методов дан, например, в [17]. В наших экспериментах радиусы кривизны подложек и соответственно внутренние напряжения определялись с помощью интерферометра VerifireTM4 по методике, описанной в [18]. Радиус кривизны подложки определялся путем сравнения профиля подложки до и после нанесения отражающего покрытия с профилем эталонной поверхности, встроенной в интерферометр. Измерение на интерферометре позволяет установить отклонение профиля измеряемой подложки от профиля эталона. В качестве эталона выступает пропускающая эталонная плоскость, размер — около 100 мм, коэффициент отражения — 4%, точность формы лучше $\lambda/20$, $\lambda = 555$ нм. Заявленная абсолютная погрешность определения профиля с помощью данного прибора составляет 10 нм.

Аттестация поверхностной шероховатости производилась на специализированном стенде на основе атомно-силового микроскопа Ntegra (NT-MDT) [19].

Форма поверхности подложки после процедуры пленочной асферизации исследовалась с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения [20], построенного на базе уникального источника эталонной сферической волны — зауженного до субволновых размеров оптического волокна.

2. Результаты и их обсуждение

Прежде чем переходить к процедуре формирования профиля асферизации, необходимо определить оптимальные с точки зрения внутренних напряжений пара-

Характеристики многослойных структур Al/Si

d , nm	$\beta(\text{Si})$, rel.u.	s , MPa	σ_{eff} , nm	σ_{Al} , nm	σ_{Si} , nm
10.54	0.68	-417	0.84	0.62	0.74
10.06	0.50	-322	0.83	0.70	0.76
9.33	0.42	-174	0.82	0.90	0.91
8.74	0.30	-84	0.81	0.95	0.93
8.70	0.20	-39	0.80	0.97	0.96
8.96	0.15	-67	-	-	-

метры структуры. Точнее — соотношение материалов в периоде. Для этого был синтезирован ряд структур Al/Si с числом периодов 40. МСС различались соотношением материалов в периоде. В среднем периоды структур выбраны около 9–10 нм. Эти значения соответствуют многослойным зеркалам нормального падения для спектрального диапазона 17–19 нм.

Данный диапазон представляет интерес для задач солнечной астрономии. В него попадают линии излучения ионов FeIX-FeXII, образующиеся при температуре плазмы 1.3–1.6 МК. Многослойные зеркала на основе Al/Si в рассматриваемом спектральном диапазоне обладают высокой спектральной селективностью $\Delta\lambda = 0.4$ нм [13]. Это свойство делает их перспективными для решения спектроскопических задач физики Солнца. Поскольку солнечные телескопы относятся к изображающим системам, приобретает большое значение учет внутренних напряжений, приводящих к упругим деформациям подложек, поэтому результаты нашего исследования имеют значение не только для задач асферизации, но и для создания солнечных телескопов, ориентированных на спектральный диапазон 17–19 нм.

В таблице приведены результаты серии экспериментов с МСС, имеющими различное соотношение материалов в периоде. Здесь d — период структуры, $\beta = d(\text{Si})/d$ — доля слоя кремния в периоде, s — внутренние напряжения в пленке, σ_{eff} — поверхностная шероховатость, σ_{Al} — межслоевая шероховатость на границе Si-на-Al, σ_{Si} — межслоевая шероховатость на границе Al-на-Si.

Для большего удобства восприятия на рис. 3 графически изображена зависимость внутренних напряжений от величины β .

Внутренние напряжения МСС Al/Si носят сжимающий характер. В диапазоне значений β от 0.20 до 0.68 наблюдается зависимость, близкая к линейной. Можно было бы ожидать, что при $\beta = 0.15$ значение s будет близким к нулю, однако на практике наблюдается перегиб и возрастание сжимающих напряжений. Наименьшее значение $s = -39$ МПа наблюдается при $\beta = 0.20$.

Интересно отметить, что в соответствии с данными [13] максимум отражательной способности МСС Al/Si приходится на значение $\beta = 0.50$. В соответствии с рис. 3 и таблицей в этом случае $s = -322$ МПа — довольно значительная величина, способная привести к

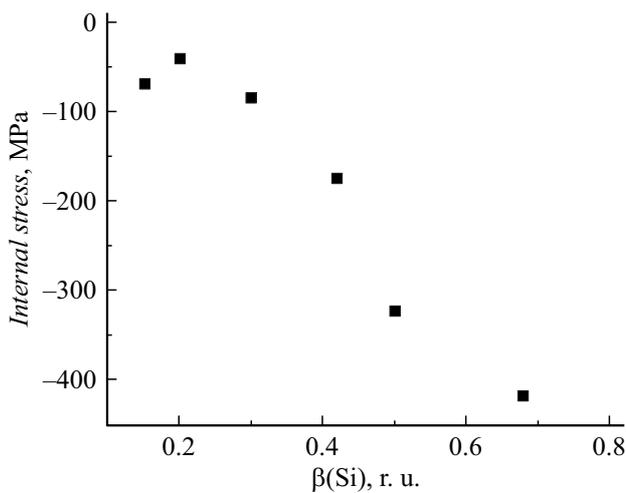


Рис. 3. Зависимость внутренних напряжений в многослойных пленках Al/Si от величины $\beta = d(\text{Si})/d$.

существенным упругим деформациям. Это обстоятельство следует учитывать при изготовлении зеркал для солнечных телескопов. Для компенсации деформаций, вызываемых МСС Al/Si, можно применить методику осаждения „антистрессового“ многослойного покрытия. Оно должно иметь растягивающий характер внутренних напряжений. В качестве такой МСС может подойти пленка Cr/Y с большей долей хрома в периоде [13].

Предположим, что нужно компенсировать деформации, вызываемые зеркалом Al/Si с величиной $s = -322 \text{ MPa}$, периодом 9 nm и числом периодов 60 (общая толщина покрытия 540 nm). В соответствии с данными [13] можно применить структуру Cr/Y с толщиной хрома в периоде 3.3 nm , скандия — 2 nm . В этом случае $s = +600 \text{ MPa}$. Для компенсации потребуется 55 периодов такой МСС Cr/Y.

Обращает на себя внимание субнанометровая величина поверхностной шероховатости — на уровне 0.8 nm для всех изученных образцов. Отличие от этого значения межслоевой шероховатости (от 0.6 до 0.9 nm) может быть объяснено ее соответствующим характером — межслоевая шероховатость складывается из геометрической шероховатости и перемешивания материалов на границах раздела. Из приведенных зависимостей можно сделать вывод о том, что с уменьшением β возрастает именно перемешивание, а геометрическая шероховатость остается приблизительно на одном уровне.

Важно отметить, что в случае заметного увеличения числа периодов (для достижения заданной величины асферизирующего покрытия) происходит некоторый рост поверхностной шероховатости. В частности, для структуры с $\beta = 0.30$ и числом периодов 300 в эксперименте наблюдалось значение $\sigma_{\text{эф}} = 1.5 \text{ nm}$, при этом межслоевая шероховатость остается на уровне 0.9 nm . Однако если наносить зеркало Al/Si с периодом 9 nm на поверх-

ность с шероховатостью не 0.8 , а 1.5 nm , коэффициент отражения на длине волны 17.7 nm снизится с 40 до 24% .

Из приведенных зависимостей следует, что минимальным значением внутренних напряжений обладает структура с величиной $\beta = 0.20$. Этот состав был выбран для работ по созданию асферизирующего покрытия.

Поскольку синтез полноценной пленки с максимальной толщиной порядка $1.3 \mu\text{m}$ занимает до двух полных рабочих дней, выведение профиля асферизирующего покрытия проводилось со структурами значительно меньшей толщины (с числом периодов 30 и общей толщиной порядка 300 nm). Для сравнения получаемых значений распределения толщин пленки с заданным профилем они (толщины покрытия и заданный профиль) нормировались на единицу и сравнивались на одном графике. Пример такого сравнения приведен на рис. 4.

По этим данным проводился анализ отклонения полученного профиля распределения от заданного. В точке, где полученный профиль идет ниже заданного, прецизионные диафрагмы расширяются, и наоборот. В результате была получена конфигурация прецизионных диафрагм, обеспечивающая профиль тонкопленочного покрытия, приближенный к заданному.

На финальном этапе на вогнутую сферическую подложку диаметром 108 mm и радиусом кривизны поверхности $R = 266.6 \text{ mm}$ осаждалась многослойная структура Al/Si с числом периодов $N = 160$, обеспечивающем в максимуме толщину покрытия 1332 nm .

На рис. 5 приведены исходный (до асферизации) профиль отклонения поверхности от сферы (а) и результирующий (после асферизации) профиль (b).

Точное значение размаха высот, судя по карте на рис. 5, b, составляет $1.566 \mu\text{m}$. Следует учесть, что отклонение исходного профиля от сферы без учета малых по площади краевых областей составляло около $0.24 \mu\text{m}$.

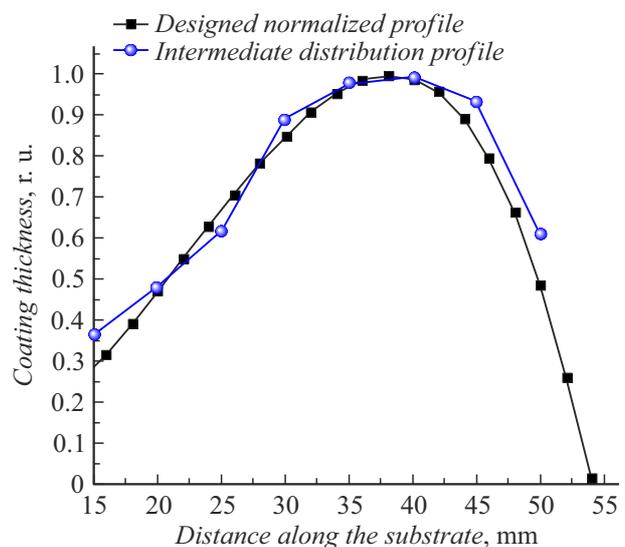


Рис. 4. Пример сравнения толщины асферизирующего покрытия и заданного профиля.

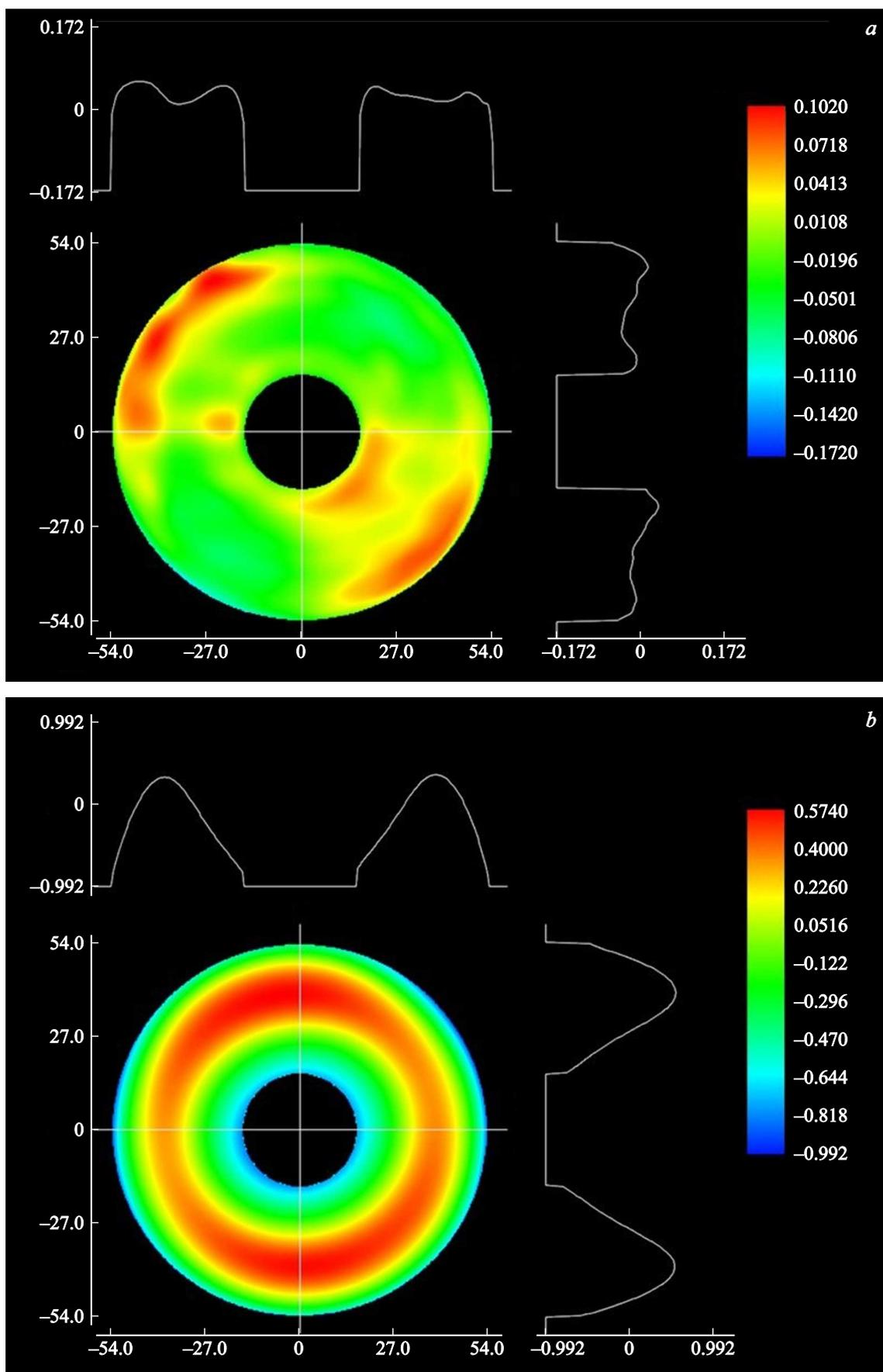


Рис. 5. Карта высот поверхности подложки до (a) и после (b) асферизации.

Таким образом удалось получить профиль поверхности, близкий к заданному.

Заключение

В результате исследований изучены многослойные пленки Al/Si с периодом около 9–10 nm и различным соотношением толщин материалов в периоде. Определены значения внутренних напряжений. Показано, что наименьшее значение –39 МПа достигается при доле слоя кремния в периоде 0.20. Для структуры с параметрами, оптимизированными на максимум отражения в спектральном диапазоне 17–19 nm, внутренние напряжения составят около –300 МПа.

Определены значения поверхностной и межслоевой шероховатости. Их важно иметь в виду для последующего осаждения на поверхность асферизирующей пленки отражающего покрытия. У структуры Al/Si с числом периодов 40 поверхностная шероховатость составляет около 0.8 nm, у структуры с 300 периодами она вырастет до 1.5 nm.

Разработана методика пленочной асферизации с применением МСС Al/Si с минимальным значением величины внутренних напряжений и с размахом высот до 1.3 μm .

Финансирование работы

Синтез и работы по пленочной асферизации выполнены при поддержке гранта РФФИ 21-72-30029, изучение внутренних напряжений выполнено в рамках Государственного задания FFUF-2024-0022.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.И. Собельман, И.А. Житник, Б. Вальничек, М. Рыбански, М. Бернас, С.В. Гапонов, Р. Гудец, А.П. Игнатъев, Р.В. Исаджанян, В.М. Кищенко, М. Клима, Я. Копецки, В.В. Корнеев, О.Б. Краснопольский, М.Н. Крмоян, В.В. Крутов, В.М. Ломкова, А.В. Митрофанов, С.Н. Опарин, Р. Пересты, А.А. Перцов, Н.Н. Салашченко, В.А. Слемзин, А.Б. Телегин, В.О. Тимофеев, И.П. Тиндо, А.М. Урнов, Ю.Н. Фотин, Ю.М. Ходжаянц. Письма в АЖ, **16** (4), 323 (1990).
- [2] И.И. Собельман, И.А. Житник, А.П. Игнатъев, В.В. Корнеев, В.Ю. Клепиков, В.В. Крутов, С.В. Кузин, А.В. Митрофанов, С.Н. Опарин, А.А. Перцов, Н.Н. Салашченко, В.А. Слемзин, А.И. Степанов, И.П. Тиндо, Э.А. Аветисян, В.М. Ломкова, В.Ф. Суханов, Ю.Н. Фотин. Письма в АЖ, **22** (8), 604 (1996).
- [3] I.A. Zhitnik, A.P. Ignatiev, V.V. Korneev, V.V. Krutov, S.V. Kuzin, A.V. Mitrofanov, S. Oparin, A.A. Pertzov, V.A. Slemzin, I.P. Tindo, M. Pakhomov, N.N. Salashchenko, O. Timofeev. Proc. SPIE, **3406**, 1 (1998).
- [4] В.Н. Ораевский, И.И. Собельман. Письма в АЖ, **28** (6), 34 (2002).
- [5] С.В. Кузин, И.А. Житник, О.И. Бугаенко, А.П. Игнатъев, А.В. Митрофанов, С.Н. Опарин, А.А. Перцов. Известия РАН. Сер. физ., **69** (2), 191 (2005).
- [6] O.I. Bugaenko, S.V. Kuzin, S.A. Bogachev, I.A. Zhitnik, A.A. Perzov, A.P. Ignatiev, A.M. Mitrofanov, V.A. Slemzin, S.V. Shestov, N.K. Sukhodrev. Adv. Space Res., **43** (6), 1001 (2009).
- [7] I.V. Malyshev, D.G. Reunov, N.I. Chkhalo, M.N. Toropov, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Tsybin, A.Ya. Lopatin, A.K. Chernyshev, M.S. Mikhailenko, R.M. Smertin, R.S. Pleshkov, O.M. Shirokova. Optics Express, **30** (26), 47567 (2022).
- [8] J.-P. Delaboudiniere, R.A. Stern, A. Maucherat, F. Portier-Fozzani, W.M. Neupert, J.B. Gurman, R.C. Catura, J.R. Lemen, L. Shing, G.E. Artzner, J. Brunaud, A.H. Gabriel, D.J. Michels, J.D. Moses, B. Au, K.P. Dere, R.A. Howard, R. Kreplin, J.M. Defise, C. Jamar, P. Rochus, J.P. Chauvineau, J.P. Marioge, F. Clette, P. Cugnon, E.L. van Dessel. Adv. Space Res., **20** (12), 2231 (1997).
- [9] N.I. Chkhalo, M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, M.V. Zorina, S.Yu. Zuev, D.S. Kazakov, A.V. Milkov, I.L. Strulya, V.A. Filichkina, A.S. Kozlov. Appl. Opt., **58**, 3652 (2019).
- [10] С.С. Андреев, С.Ю. Зуев, В.И. Позднякова, Н.Н. Салашченко, В.А. Слемзин, И.Л. Струля, И.А. Шерешевский, И.А. Житник. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **1**, 6 (2003).
- [11] С.С. Андреев, Е.Б. Ключенков, А.Л. Мизинов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, Л.А. Суслов, В.В. Чернов. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **2**, 45 (2005).
- [12] С.С. Андреев, С.В. Гапонов, С.А. Гусев, С.Ю. Зуев, Е.Б. Ключенков, К.А. Прохоров, Н.И. Полушкин, Е.Н. Садова, Н.Н. Салашченко, Л.А. Суслов, М.Н. Haidl. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **1**, 66 (2001).
- [13] S.A. Bogachev, N.I. Chkhalo, S.V. Kuzin, D.E. Pariev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, S.V. Shestov, S.Y. Zuev. Appl. Opt., **55** (9), 2126 (2016).
- [14] И.Г. Забродин, Б.А. Закалов, И.А. Каськов, Е.Б. Ключенков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, С.Д. Стариков, Л.А. Суслов. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **7**, 37 (2013).
- [15] M. Svechnikov. J. Appl. Crystallogr., **53** (1), 253 (2020).
- [16] A. Brenner, S. Senderoff. J. Res. Nat'l. Bur. Stand., **42**, 105 (1949).
- [17] Л. Майссел, Р. Глэнг. *Технология тонких пленок. Справочник* (Советское радио, М., 1977)
- [18] R.M. Smertin. Thin Solid Films, **782** (1), 140044 (2023).
- [19] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko, M.V. Zorina. Review Scientific Instruments, **86**, 016102 (2015).
- [20] A.A. Akhsakhalyan, N.I. Chkhalo, N. Kumar, I.V. Malyshev, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, V.A. Ulasevich, S.V. Kuzin. Precision Eng., **71**, 330 (2021).